



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2055693.1995



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

## Monitoring the Physicochemical Parameter and Investigating the Causes of Destruction for Thermal Power Plant Steam Cycle

Mohsen Esmailpour<sup>1\*</sup>, Majid Ghahraman Afshar<sup>1</sup>, Abbas Yousefpour<sup>1</sup>, Milad Kazemnejadi<sup>2</sup>, Hossein Ghaseminejad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Chemistry Department, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

Received: 1 Jan 2025 Accepted: 20 May 2025

### Abstract

In this study, the effective parameters in the water-steam cycle of a thermal power plant including feed water, blowdown, saturated steam, and condenser are investigated. According to the XRD and XRF analysis of the deposits from the blowdown and the internal deposits of the boiler, the type of corrosion that occurred in this power plant are investigated. Based on the performed experiments, the pH, TDS, and electrical conductivity of the saturated steam after are about 9, 3.66 ppm, and 5  $\mu$ S/cm, respectively. The results of these studies indicate that the oxygen content is high which leads to pitting corrosion and separation of the magnetite protective layer. As a result, overheating of the pipes happens due to the accumulation of deposits in the pipes. Moreover, the XRD and XRF analyses of the internal deposits of the boiler and the deposits in the blowdown indicate the presence of hematite phase which confirms the presence of excess oxygen and the conversion of the magnetite coating layer to hematite and its separation from the surface. In order to prevent overheating of waterwall pipes, it is recommended to use appropriate alternative fuels, improve the chemical regime of the circulating water, improve fuel quality, and conduct periodic and regular acid washing.

**Keyword:** Thermal Power Plant, Physicochemical Parameters, Boiler, Blowdown, Corrosion.

\* mesmaeilpour@nri.ac.ir

### Please Cite This Article Using:

Esmailpour, M., Ghahraman Afshar, M., Yousefpour, A., Kazemnejadi, A., Ghaseminejad, H., "Monitoring the Physicochemical Parameter and Investigating the Causes of Destruction for Thermal Power Plant Steam Cycle", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 89, pp. 57-76, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2055693.1995



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

## پایش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و بررسی علل تخریب سیکل بخار نیروگاه حرارتی

محسن اسماعیل پور<sup>1\*</sup>، مجید قهرمان افشار<sup>1</sup>، عباس یوسف پور<sup>1</sup>، میلاد کاظم نژادی<sup>2</sup>، حسین قاسمی نژاد<sup>1</sup>

<sup>1</sup> گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

<sup>2</sup> گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

دریافت: 1403/10/12 پذیرش: 1404/02/30

### چکیده

در این پژوهش پارامترهای مؤثر در سیکل آب و بخار نیروگاه حرارتی از جمله آب تغذیه، بلودان، بخار اشباع و کندانسور بررسی و ارزیابی می گردد. سپس با توجه به آنالیز XRD و XRF رسوبات حاصل از بلودان و رسوبات داخلی بویلر نوع خوردگی های حادث شده در این نیروگاه بررسی گردید. بر اساس آزمونهای انجام شده pH، TDS و هدایت الکتریکی کل نمونه بخار اشباع به ترتیب در حدود 9، 3,66 ppm و 5  $\mu\text{S/cm}$  می باشد. نتایج این بررسی ها نشان دهنده بالا بودن میزان اکسیژن است که منجر به ایجاد خوردگی حفره ای، جدایش لایه محافظ مگنتیت و در نتیجه اورهیت شدن لوله ها به دلیل تجمع رسوبات در لوله ها می شود. همچنین آنالیزهای XRD و XRF رسوبات داخلی بویلر و رسوبات موجود در بلودان نشان از وجود فاز هماتیت دارد که مؤید حضور اکسیژن مازاد و تبدیل لایه پوششی مگنتیت به هماتیت و جدایش آن از سطح خواهد شد. به منظور جلوگیری از اورهیت شدن لوله های واتروال استفاده از سوخت های جایگزین مناسب، بهبود رژیم شیمیایی آب گردش، بهبود کیفیت سوخت و اسیدشویی دوره ای و منظم پیشنهاد می شود.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه حرارتی، پارامترهای فیزیکوشیمیایی، بویلر، بلودان، خوردگی.

\* mesmaeilpour@nri.ac.ir

## 1- مقدمه

سیستم‌های تولید بخار معمولی شامل قسمت‌های پیش-بویلر (هیترهای هوازدا، لوله‌کشی، پمپ‌ها، هیترهای مرحله‌ای و اکونومایزر)، بخش تولیدکننده بخار (بویلر، سوپرهیترها و ری‌هیترها)، بخش بعد از تولیدکننده بخار (تجهیزات فرآیندی، لوله‌های بخار و تله‌های کندانس) و بخش کندانس (لوله‌ها، فلاش تانک‌ها، پمپ‌ها و تانک‌های ذخیره‌ی کندانس) می‌باشد [1-3].

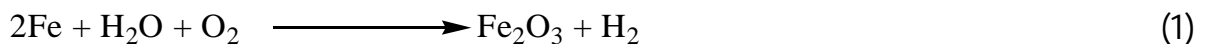
خوردگی در سیستم‌های تولید بخار منجر به معضلات و مشکلات اساسی در صنایع از جمله پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، واحدهای گاز و پتروشیمی‌ها شده است. خوردگی در بویلرها تحت تأثیر عواملی از جمله غلظت دی‌اکسیدکربن، آمونیاک، اکسیژن و نحوه کنترل این گونه‌ها و همچنین آنیون‌های کلرید و هیدروکسید و غلظت بالای مواد شیمیایی در آب بویلر قرار دارند. کنترل گازهای محلول در آب (اکسیژن و دی‌اکسیدکربن) در سیستم‌های پیشرفته‌تر تولید بخار منجر به کاهش خوردگی دیواره‌ی داخلی لوله‌های بویلرها می‌شود. تردی قلیایی<sup>1</sup>، خوردگی حفره‌ای<sup>2</sup> و تردی هیدروژنی<sup>3</sup> از جمله مکانیزم‌های متداول خوردگی در سیستم‌های تولید بخار می‌باشند [4-6].

نتایج حاصل از پژوهش‌ها و تحقیقات نشان‌دهنده آن است که کنترل خوردگی در بویلر به طور جدی و اساسی تحت تأثیر کیفیت آب تغذیه بویلر قرار دارد. در صورتیکه کنترل پارمتر pH و شرایط رسوب‌گذاری به خوبی کنترل شود آنگاه عامل اصلی خوردگی پیش از بویلر و داخل بویلر، اکسیژن خواهد بود. ایجاد محصولات خوردگی و خوردگی‌های ناشی از اکسیژن منجر به تحمیل هزینه‌های سنگین در نگهداری بویلر خواهد شد. از اینرو پایش و کنترل غلظت اکسیژن در بویلر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین در راستای جلوگیری از خوردگی اکسیژنی در بویلر، باید غلظت اکسیژن به چند ppb کاهش یابد و در همین مقادیر پایین کنترل شود [7, 8].

لوله‌های دیواره آبی، سوپرهیتر، ری‌هیتر و اکونومایزر بویلر از جمله مناطقی هستند که در سیستم‌های حرارتی در معرض خوردگی اکسیژنی قرار دارند. هنگامی که مقدار اکسیژن محلول در آب بیش از اندازه باشد خوردگی‌های اکسیژنی دیگر قسمت‌های بویلر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین افزایش مقدار اکسیژن از حد مجاز نیز در یک بازه زمانی حتی کوتاه مدت نیز منجر به خسارات فراوانی ناشی از خوردگی اکسیژنی خواهد شد [9-11].

خوردگی و شکست در لوله‌های دیواره آبی و لوله‌های اکونومایزر به دو دسته سمت آب و سمت شعله تقسیم‌بندی می‌شود. با این وجود اکثر مشکلات ناشی از خوردگی در سمت آب اتفاق می‌افتد. از عمده‌ترین عوامل شکست لوله لوله‌های بویلر می‌توان به خوردگی خستگی، خوردگی در آب با دمای پایین، سایش توسط جریان گاز و خوردگی حفره‌ای ناشی از وجود اکسیژن اشاره کرد [12].

هنگامی که فولاد در معرض آب حاوی اکسیژن محلول قرار می‌گیرد واکنش 1 انجام می‌شود:



همچنین در رژیم کنترل شیمیایی مخلوط آب<sup>4</sup> (MWT) حضور اکسیژن مازاد منجر به تبدیل لایه پوششی و محافظ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  به هماتیت ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) و جدا شدن اکسید فلزی به داخل آب سیکل مطابق با واکنش (2) خواهد شد.

<sup>1</sup> Alkaline crispness

<sup>2</sup> Pitting corrosion

<sup>3</sup> Hydrogen embrittlement

<sup>4</sup> Mixed Water Treatment



این نوع خوردگی را می توان با کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب ورودی یک سیستم بویلر کنترل کرد. در بعضی مواقع نشت هوا، نامناسب بودن مواد شیمیایی به کار رفته جهت حذف اکسیژن و عملکرد نادرست سیستم هوازدا منجر به بروز خوردگی اکسیژنی می شود [13].

تنها راه ورود اکسیژن با توجه به فشار عملیاتی بالای بویلر از طریق آب تغذیه خواهد بود و هوازداهای مکانیکی عملیات اکسیژن زدایی اولیه ی آب تغذیه را انجام می دهند. به منظور اکسیژن زدایی در این مرحله، آب تغذیه در تماس با بخار قرار گرفته که منجر به خروج گازهای محلول در آن به همراه بخار می شود. امروزه هوازداهای پیشرفته توانایی کاهش اکسیژن محلول در آب به کمتر از 10 ppb را دارا می باشند [14, 15]. پس از بکارگیری روش های مکانیکی، مواد شیمیایی اکسیژن زدا به منظور کاهش بیشتر غلظت اکسیژن محلول به آب تزریق می شود. بخش عمده اکسیژن- زدایی آب با روش های مکانیکی انجام می گردد و فرآیند حذف مکانیکی اکسیژن باید قبل از تزریق مواد شیمیایی اکسیژن زدا انجام گیرد.

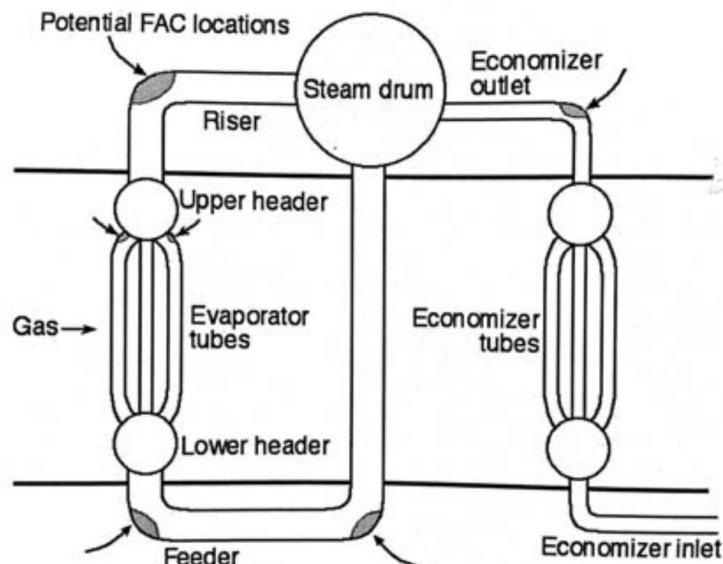
از دیگر عوامل اصلی و تأثیرگذار در خرابی لوله های بویلرهای بازیافت پدیده خوردگی تشدید شده به واسطه جریان (FAC) می باشد که پس از خستگی حرارتی سهم عمده ای از خوردگی ها را به خود اختصاص داده است. سطوح از جنس فولاد کربنی به واسطه یک لایه اکسید مغناطیسی محافظ بر روی فلز در مقابل حملات خوردنده ها محافظت می گردند [16-18].

حذف لایه محافظ به خاطر جریان آب ورودی از روی سطح فولاد کربنی منجر به ایجاد پدیده FAC می شود. با حذف لایه محافظ، سطح لوله نسبت به خوردگی مستعدتر شده و با گذشت زمان باعث کاهش ضخامت لوله و در نهایت سوراخ شدگی می شود. زمانی که نرخ رشد لایه محافظ از انحلال لایه محافظ کمتر شود پدیده FAC شروع شده و با کنده شدن پوسته های لایه اکسید توسط جریان سیال، تشدید پدیده FAC اتفاق خواهد شد [19]. شکل 1 پدیده FAC و نازک شدن لوله ها را نشان می دهد.



شکل 1- پدیده FAC و نازک شدن لوله [17]

در بویلرهای بازیافت پدیده FAC به شدت در محل خم نزدیک به هدرهای پایین و بالای لوله های اکونومایزر مشاهده می شود که منجر به نازک شدن و تخریب لوله ها خواهد شد (شکل 2) [20].



شکل 2- آسیب FAC در محل خم هدرهای پایین و بالا در بویلر بازیافت

همچنین یکی از عوامل پارگی لوله‌های واتروال (دیواره آبی) اورهیت شدن (گرمای بیش از حد) می‌باشد. با افزایش سرعت حرکت سیال، قدرت جذب حرارت جابجایی بالاتر می‌رود. لذا به منظور تبدیل آب به بخار فوق گرم باید درجه حرارت تولیدی احتراق سوخت را بیش از پیش بالا برد. این امر منجر به نزدیک شدن دمای بهره‌برداری به دمای قابل تحمل آلیاژ لوله‌های دیواره آبی می‌شود که تهدیدی اساسی برای بروز پدیده اورهیت شدن لوله‌ها و خسارت‌های مرزدانه‌ای به همراه خواهد داشت [21].

بویلرهای حرارتی در برابر تغییرات سوخت (درجه تقطیر و وزن مخصوص) آسیب‌پذیر می‌باشند. بنابراین یک سوخت با نداشتن استانداردهای لازم سهم بسزایی در رخدادهای اورهیت شدن لوله‌های بویلرهای حرارتی ایجاد می‌کند. رشد رسوب در داخل لوله‌ها منجر به زبری سطوح داخلی و کاهش حجم عبوری سیال می‌شود. در اثر کم شدن دبی عبوری سیال، تلاطم و آشفتگی جریان سیال به همراه جوشش نامناسب در آن نیز اتفاق می‌افتد [22, 23]. بنابراین در این پژوهش، ابتدا پارامترهای فیزیکوشیمیایی سیکل بخار نیروگاه حرارتی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و سپس با توجه به آنالیزهای XRD و XRF از رسوب‌های بویلر و بلودان به بررسی خوردگی‌های حادث شده خواهیم پرداخت.

## 2- بخش تجربی

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب سیکل آب و بخار نیروگاه مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه می‌باشد. لذا، آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شده است. تمامی مواد و حلال‌های شیمیایی مورد نیاز از شرکت Sigma Aldrich خریداری و بدون خالص‌سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفت. اندازه‌گیری پارامترهای pH، هدایت الکتریکی (EC) و سختی آب (TDS) با دستگاه HANNA HI2300 انجام گرفت. به منظور سنجش یون‌های منیزیم و کلسیم از استاندارد 3500 Ca- و 3500 Mg-B و روش جذب اتمی استفاده شده است. همچنین جهت سنجش یون‌های پتاسیم و سدیم از روش طیف سنج نشر B و روش جذب اتمی استفاده شده است.

شعله طبق استاندارد 3500-K و 3500-Na استفاده شده است. تعیین غلظت یون‌های سولفات و کلرید با تیتراسیون باریم (استاندارد انجام آزمون 4110SMWW) و تیتراسیون موهر (استاندارد انجام آزمون 4500Cl) انجام گرفته است. همچنین تعیین غلظت آنیون‌های فسفات، فلوراید، نیتریت و نیترات با روش UV-Vis و با روش استاندارد 4110 SMWW انجام گرفت. به منظور تعیین غلظت کاتیون از دستگاه آنالیز ICP-OES مدل Perkin-Elmer DV5300 استفاده شد. آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه‌های رسوب با دستگاه Bruker AXS D8 با تابش  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418$ ) انجام گرفت. آزمون شیمیایی نمونه رسوب‌ها با استفاده از دستگاه XRD مدل PERFORM, X انجام گرفت. شرایط انجام آزمون XRF رسوب بویلر و رسوب بلودان بویلر به نحوه‌ی نمونه‌برداری و یکنواختی نمونه بستگی دارد. این آنالیز به صورت نیمه کمی<sup>5</sup> انجام شده است. در این آزمون ابتدا نمونه در دمای  $110^\circ\text{C}$  رطوبت گیری شد و سپس آزمون اندازه گیری کاهش وزن احتراق<sup>6</sup> (LOI) نمونه به مدت 1/5 ساعت در دمای  $950^\circ\text{C}$  قرار گرفت.

### 3- بحث و نتیجه‌گیری

#### 3-1- بررسی پارامترهای مؤثر سیکل آب واحد نیروگاه بخار

نمونه‌برداری از سمپلینگ‌های واحد نیروگاه بخار شامل بخار اشباع، آب تغذیه، کندانسور و بلودان بویلر انجام گرفت و نتایج حاصل از آزمون‌های پارامترهای مؤثر آب از قبیل pH، TDS، TH، EC، Ca، Na، Cl،  $\text{PO}_4$ ،  $\text{SO}_4$ ،  $\text{NO}_3$ ،  $\text{NO}_2$ ،  $\text{SiO}_2$ ، DO، Cu، Fe، Cr، Zn، Ni و Al به ترتیب در جداول 1 تا 4 خلاصه شده است.

#### جدول 1- نتایج آزمون پارامترهای مؤثر بخار اشباع واحد نیروگاه بخار [17]

نمونه بخار اشباع واحد نیروگاه بخار				
ردیف	فاکتور	واحد	روش انجام آزمون	میزان
1	pH	-	St.M.4500-HB	9/09
2	املاح محلول (TDS)	mg/l	St.M.2540-C	3/66
3	سختی کل (TH)	mg/l	St.M.2340-C	<5
4	هدایت الکتریکی (EC)	$\mu\text{s}/\text{cm}$	St.M.2510	5/51
5	کلسیم (Ca)	mg/l	St.M.3500-Ca-B	<5
6	سدیم (Na)	mg/l	St.M.3500-Na	<1
7	کلراید (Cl)	mg/l	St.M.4500.Cl.B	<5
8	فسفات ( $\text{PO}_4$ )	mg/l	St.M.4500.P-E	<0/1
9	سولفات ( $\text{SO}_4$ )	mg/l	St.M.4500.SO4-E	<5
10	نیترات ( $\text{NO}_3$ )	mg/l	Chromotropic Acid Method	<1
11	نیتریت ( $\text{NO}_2$ )	mg/l	EPA-354.1	<0/1
12	سیلیس ( $\text{SiO}_2$ )	mg/l	Hch M.8185	<0/1
13	اکسیژن محلول (DO)	mg/l	St.M.4500.O-G	4/22

<sup>5</sup> Semi quantitative

<sup>6</sup> Loss of Ognition

<100	St.M.3111-B	µg/l	مس (Cu)	14
680 (حد استاندارد کمتر از 100 میکروگرم بر لیتر)	St.M.3111-B	µg/l	آهن (Fe)	15
<100	St.M.3111-B	µg/l	کروم (Cr)	16
<100	St.M.3111-B	µg/l	روی (Zn)	17
<100	St.M.3111-B	µg/l	نیکل (Ni)	18
<400	St.M.3111-D	µg/l	آلومینیوم (Al)	19

**جدول 2- نتایج آزمون پارامترهای مؤثر نمونه آب تغذیه واحد نیروگاه بخار**

نمونه آب تغذیه بویلر واحد نیروگاه بخار نیروگاه بخار				
ردیف	فاکتور	واحد	روش انجام آزمون	میزان
1	pH	-	St.M.4500-HB	8,8
2	املاح محلول (TDS)	mg/l	St.M.2540-C	3,59
3	سختی کل (TH)	mg/l	St.M.2340-C	<5
4	هدایت الکتریکی (EC)	µs/cm	St.M.2510	5,4
5	کلسیم (Ca)	mg/l	St.M.3500-Ca-B	<5
6	سدیم (Na)	mg/l	St.M.3500-Na	<1
7	کلراید (Cl)	mg/l	St.M.4500.Cl.B	<5
8	فسفات (PO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.P-E	<0,1
9	سولفات (SO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.SO4-E	<5
10	نیترات (NO <sub>3</sub> )	mg/l	Chromotropic Acid Method	<1
11	نیتریت (NO <sub>2</sub> )	mg/l	EPA-354.1	<0/1
12	سیلیس (SiO <sub>2</sub> )	mg/l	Hch M.8185	<0/1
13	اکسیژن محلول (DO)	mg/l	St.M.4500.O-G	3/88
14	مس (Cu)	µg/l	St.M.3111-B	<100
15	آهن (Fe)	µg/l	St.M.3111-B	<100
16	کروم (Cr)	µg/l	St.M.3111-B	<100
17	روی (Zn)	µg/l	St.M.3111-B	<100
18	نیکل (Ni)	µg/l	St.M.3111-B	<100
19	آلومینیوم (Al)	µg/l	St.M.3111-D	<400

**جدول 3- نتایج آزمون پارامترهای مؤثر نمونه آب کندانسور واحد نیروگاه بخار**

نمونه آب کندانسور واحد نیروگاه بخار نیروگاه بخار				
ردیف	فاکتور	واحد	روش انجام آزمون	میزان
1	pH	-	St.M.4500-HB	9/07
2	املاح محلول (TDS)	mg/l	St.M.2540-C	2/55
3	سختی کل (TH)	mg/l	St.M.2340-C	<5
4	هدایت الکتریکی (EC)	μs/cm	St.M.2510	3/84
5	کلسیم (Ca)	mg/l	St.M.3500-Ca-B	<5
6	سدیم (Na)	mg/l	St.M.3500-Na	<1
7	کلراید (Cl)	mg/l	St.M.4500.Cl.B	<5
8	فسفات (PO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.P-E	<0/1
9	سولفات (SO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.SO4-E	<5
10	نیترات (NO <sub>3</sub> )	mg/l	Chromotropic Acid Method	<1
11	نیتریت (NO <sub>2</sub> )	mg/l	EPA-354.1	<0/1
12	سیلیس (SiO <sub>2</sub> )	mg/l	Hch M.8185	<0/1
13	اکسیژن محلول (DO)	mg/l	St.M.4500.O-G	4/17
14	مس (Cu)	μg/l	St.M.3111-B	<100
15	آهن (Fe)	μg/l	St.M.3111-B	<100
16	کروم (Cr)	μg/l	St.M.3111-B	<100
17	روی (Zn)	μg/l	St.M.3111-B	<100
18	نیکل (Ni)	μg/l	St.M.3111-B	<100
19	آلومینیوم (Al)	μg/l	St.M.3111-D	<400

## جدول 4- نتایج آزمون پارامترهای مؤثر آب بلودان بویلر واحد نیروگاه بخار

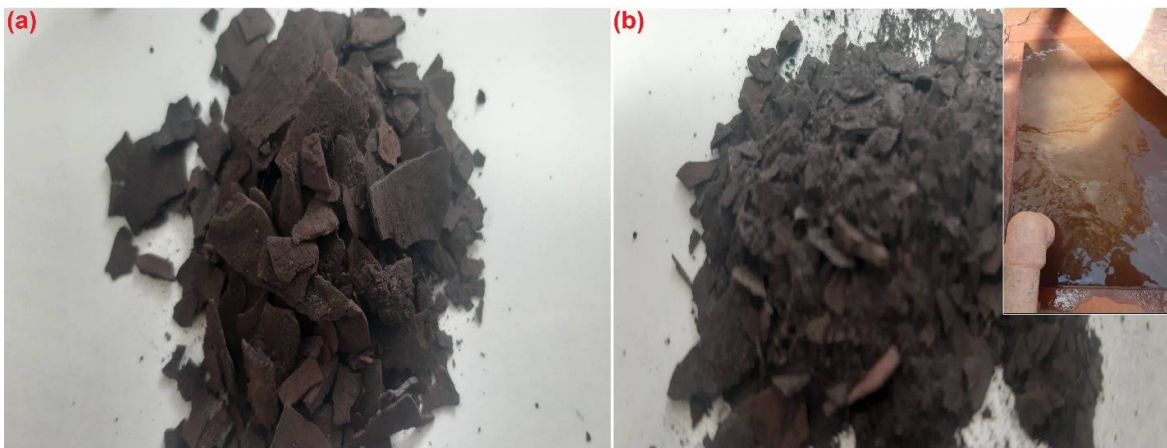
نمونه آب بلودان بویلر واحد نیروگاه بخار نیروگاه بخار				
ردیف	فاکتور	واحد	روش انجام آزمون	میزان
1	pH	-	St.M.4500-HB	8/02
2	املاح محلول (TDS)	mg/l	St.M.2540-C	10/2
3	سختی کل (TH)	mg/l	St.M.2340-C	<5
4	هدایت الکتریکی (EC)	µs/cm	St.M.2510	15/34
5	کلسیم (Ca)	mg/l	St.M.3500-Ca-B	<5
6	سدیم (Na)	mg/l	St.M.3500-Na	<1
7	کلراید (Cl)	mg/l	St.M.4500.Cl.B	<5
8	فسفات (PO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.P-E	3/05
9	سولفات (SO <sub>4</sub> )	mg/l	St.M.4500.SO4-E	<5
10	نیترات (NO <sub>3</sub> )	mg/l	Chromotropic Acid Method	<1
11	نیتريت (NO <sub>2</sub> )	mg/l	EPA-354.1	<0/1
12	سیلیس (SiO <sub>2</sub> )	mg/l	Hch M.8185	<0/1
13	اکسیژن محلول (DO)	mg/l	St.M.4500.O-G	3/78
14	مس (Cu)	µg/l	St.M.3111-B	<100
15	آهن (Fe)	µg/l	St.M.3111-B	<100
16	کروم (Cr)	µg/l	St.M.3111-B	<100
17	روی (Zn)	µg/l	St.M.3111-B	<100
18	نیکل (Ni)	µg/l	St.M.3111-B	<100
19	آلومینیوم (Al)	µg/l	St.M.3111-D	<400

بررسی نتایج حاکی از آن است که میزان اکسیژن محلول در تمامی نمونه‌ها از حد مجاز بالاتر می‌باشد. شایان ذکر است که براساس دستورالعمل Eprri مقدار اکسیژن محلول باید در رژیم کنترل شیمیایی MWT کمتر از 5 PPb و براساس دستورالعمل سازنده کمتر از 7 PPb باشد. همچنین میزان آهن در نمونه بخار اشباع از حد مجاز بالاتر می‌باشد. با توجه به اینکه در رژیم کنترل شیمیایی MWT لایه محافظ و پوششی از نوع مگنتیت (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) می‌باشد در صورتیکه میزان اکسیژن محلول از حد مجاز بالاتر باشد منجر به تبدیل لایه محافظ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> به هماتیت (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و جدایش آن به داخل آب سیکل مطابق با واکنش زیر خواهد شد [24-26].

نسبت نسبی فاز هماتیت و مگنتیت براساس پیک‌های شاخص و شدت پیک‌ها در زوایای پراش 33/1 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) و 35/3 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) قابل محاسبه می‌باشد که به ترتیب برابر با 125 و 245 می‌باشد (نسبت نسبی 125/245=0/51). با توجه به بررسی پارامترهای آب و وجود اکسیژن مازاد و نتایج حاصل از نتایج XRD، حضور اکسیژن مازاد در بویلر

منجر به انجام واکنش زیر و تبدیل لایه محافظ پوششی  $Fe_3O_4$  به فاز هماتیت  $Fe_2O_3$  می شود که نشانگر شدت اکسیداسیون در سیستم می باشد.

از اینرو در راستای صحت سنجی این موضوع رسوب داخلی بویلر و همچنین رسوبات مشاهده شده در بلودان بویلر، آنالیزهای XRD و XRF از این رسوبات انجام گرفت. شکل 3 رسوب های نمونه برداری شده را نشان می دهد.



شکل 3- نمونه رسوب داخلی و رسوب بلودان بویلر واحد نیروگاه بخار

### 3-2- نتایج و تحلیل آنالیزهای XRD و XRF

پراش اشعه ایکس از رسوبات بویلر و بلودان بویلر واحد نیروگاه بخار در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است حضور پیک ها با زاویه های پراش  $18/27^\circ$ ,  $30/1^\circ$ ,  $35/60^\circ$ ,  $43/05^\circ$ ,  $53/40^\circ$ ,  $56/94^\circ$ ,  $62/40^\circ$  و  $73/95^\circ$  که به ترتیب به اندیس های میلر (111)، (220)، (311)، (400)، (422)، (511)، (440) و (553) اختصاص دارند مؤید وجود ذرات  $Fe_3O_4$  در رسوب می باشد (Crystalline face-centered cubic  $Fe_3O_4$  NPs (JCPDS file (No. 19-0629) [27].

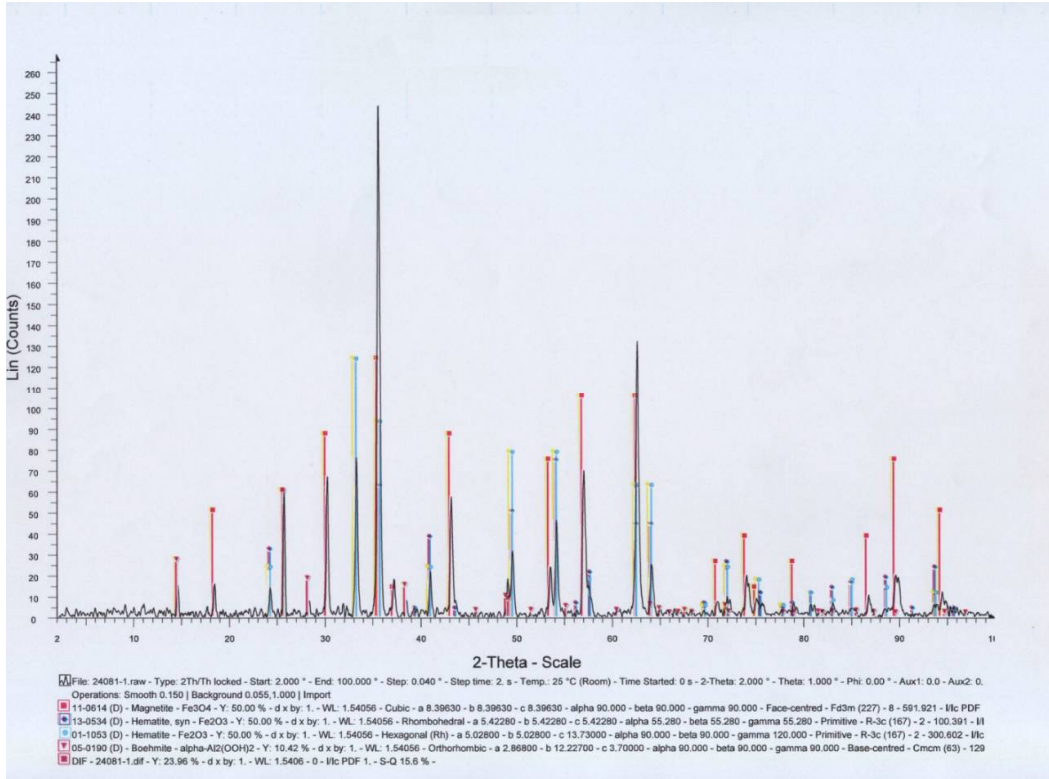
همچنین حضور پیک ها با زاویه های پراش  $24/15^\circ$ ,  $33/16^\circ$ ,  $35/61^\circ$ ,  $40/86^\circ$ ,  $49/93^\circ$ ,  $54/04^\circ$ ,  $58/10^\circ$ ,  $62/40^\circ$  و  $64/45^\circ$  که به ترتیب به اندیس های میلر (012)، (104)، (110)، (113)، (024)، (116)، (018)، (214) و (300) اختصاص دارند با الگوی استاندارد XRD برای ذرات هماتیت  $\alpha-Fe_2O_3$  (JCPDS 33-0644) مطابقت دارند [28].

از اینرو با توجه به اینکه در رژیم کنترل شیمیایی MWT لایه محافظ مگنتیت می باشد وجود  $Fe_3O_4$  در رسوب قابلیت توجه دارد. اما بررسی دقیق تر پراش اشعه ایکس از رسوبات نشان می دهد که علاوه بر ذرات  $Fe_3O_4$  (مگنتیت) پیک های مختص مربوط به ذرات  $Fe_2O_3$  (هماتیت) نیز قابل مشاهده می باشد [29].

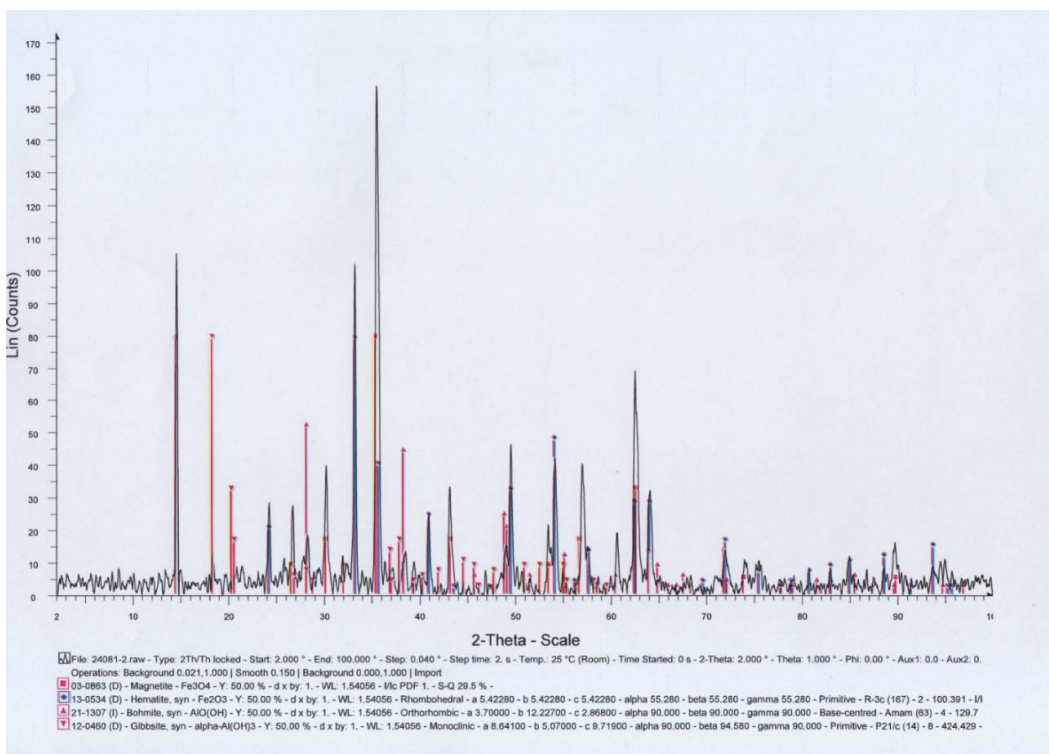
با افزایش ضخامت لایه محافظ و حضور اکسیژن مازاد (خارج از حد استاندارد با توجه به نتایج پایش آنلاین که میزان اکسیژن از حد مجاز بالاتر بود که نتایج آن در جداول 1-4 ارائه شده است) واکنش زیر انجام می گیرد که منجر به تشکیل هماتیت اضافی و رهایش آن به داخل درام بویلر می شود.



به همین دلیل رسوبات فراوانی در بویلر و بلودان درامها مشاهده شد [30, 31].



شکل 4- پراش اشعه ایکس رسوب بویلر واحد نیروگاه بخار



شکل 5- پراش اشعه ایکس رسوب بلودان بویلر واحد نیروگاه بخار

آزمون XRF با استفاده از استاندارد مرجع ASTM E 1621-21 از طریق آماده‌سازی نمونه با آسیاب کردن انجام گرفت و نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی بوسیله دستگاه XRF براساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده گزارش شد. نتایج مربوط به XRF درصد بالایی از اکسیدهای آهن را در رسوب‌های بویلر و بلودان واحد 1 را نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از آن مرتبط با  $Fe_2O_3$  می‌باشد که این رسوبات از طریق واکنش بین اکسیژن مازاد (بیش از 5ppb) و لایه محافظ  $Fe_3O_4$  تشکیل شده‌اند. وجود فاز هماتیت در رسوبات مؤید حضور اکسیژن مازاد می‌باشد که منجر به ایجاد خوردگی‌های حفره‌ای در درام بخار، لوله‌های آب تغذیه و اکونومایزر می‌شود. جداول 5 و 6 نتایج آزمون شیمیایی XRF این رسوبات را نشان می‌دهد.

جدول 5- آزمون شیمیایی به روش XRF برای رسوب بویلر واحد

اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی
$Na_2O$	0/58	MgO	1/78	$Al_2O_3$	1/83	$SiO_2$	1/07
$P_2O_5$	0/33	$SO_3$	0/18	CaO	1/23	$Cr_2O_3$	0/14
MnO	0/27	$Fe_2O_3, Fe_3O_4$	90/99	L.O.I	1/6	-	-

جدول 6- آزمون شیمیایی به روش XRF برای رسوب بلودان بویلر واحد

اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی
$Na_2O$	0/3	MgO	1/69	$Al_2O_3$	2/88	$SiO_2$	6/35
$P_2O_5$	4/71	$SO_3$	0/2	$K_2O$	0/16	CaO	3/4
$TiO_2$	0/16	$Cr_2O_3$	0/65	MnO	0/17	$Fe_2O_3, Fe_3O_4$	69/09
CuO	0/14	ZnO	0/24	L.O.I	9/86	-	-

وجود اکسیژن مازاد می‌تواند عواقب جدی در پی داشته باشد که منجر به تسریع خوردگی حفره‌ای، جدایش لایه محافظ  $Fe_3O_4$  (از طریق واکنش با اکسیژن و تبدیل به فاز هماتیت) شده و وجود رسوبات در لوله‌ها احتمال اورهیت شدن لوله‌ها را افزایش می‌دهد (شکل 6). با توجه به بالا بودن میزان اکسیژن آب تغذیه، تبدیل فاز مگنتیت پوششی به هماتیت اتفاق می‌افتد که به دلیل تجمع این رسوب‌ها در داخل بویلر و مسیرهای ورودی و خروجی لوله‌ها پدیده DNB اتفاق می‌افتد که این پدیده منجر به ایجاد عایق حرارتی و افزایش دما در جداره لوله و نهایتاً اورهیت شدن لوله‌ها اتفاق می‌افتد.



شکل 6- اورهیت شدن لوله‌های واتروال واحد نیروگاه بخار

از جمله دلایل اصلی ایجاد این نوع تخریب می‌توان به افزایش دمای گاز احتراق (نامناسب بودن نحوه قرار گرفتن مشعل‌ها و متغیرهای احتراق) و کاهش جریان آب داخل لوله اشاره کرد. همچنین بدلیل طراحی نامناسب اولیه، ممکن است شار حرارتی در بعضی از نواحی کوره بیشتر از حد پیش‌بینی شده باشد. کاهش جریان آب داخل لوله می‌تواند از پایین آمدن سطح آب داخل درام، کاهش گردش آب بویلر، نشتی، گسیختگی لوله‌های قبلی، و کاهش مقطع عبور جریان آب (به دلیل گرفتگی ناشی از تجمع رسوب‌ها و ذرات جامد جدا شده از لوله‌ها) ناشی شود. همچنین دیگ بخار در مقابل تغییر در سوخت‌ها از لحاظ وزن مخصوص و درجه تقطیر آسیب‌پذیر می‌باشد و یک سوخت با نداشتن استانداردهای استفاده در دیگ بخار سهم بزرگی در خسارت‌های اورهیت شدن لوله‌های آن دارد. سوخت‌هایی که کیفیت پایینی دارند ممکن است حرارت تولید شده از سوختن آنها دارای حرارت تولیدی بالاتر یا نوساناتی داشته باشد که نه تنها باعث آسیب رساندن به لوله‌های دیواره آبی این دیگ بخار می‌باشد بلکه باعث تغییر در رژیم آب گردشی و مصرف سوخت بیشتر می‌شود و حتی تأثیراتی نیز بر تغییر در شکل‌گیری شعله تشعشعی که از مجموع شعله‌ها بوجود می‌آید نیز داشته که در بروز جریان‌های گردابی، جوشش نامناسب، ارتعاشات و ... عاملی تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین از جمله دلایل اورهیت شدن لوله‌های دیواره آبی دیگ بخار نیروگاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: -رسوب گرفتگی: دلایل زیادی برای بروز رسوب‌گذاری داخل لوله‌ها وجود دارد که نمونه‌هایی از این دلایل عبارتند از: تغییر در pH آب گردشی، وجود ناخالصی در اثر جوشش نامناسب آب بخصوص در هنگام راه‌اندازی دیگ بخار، جمع شدن نخاله‌ها در اثر جوشکاری لوله‌ها به یکدیگر، تخریب لایه محافظ  $Fe_3O_4$  (عدم کنترل میزان اکسیژن با توجه به آنالیزهای نمونه آب و آزمون‌های XRF و XRD رسوب‌ها در نیروگاه بخار) و ...

رشد رسوب در جداره داخلی لوله باعث کاهش حجم عبوری سیال و همچنین زبری (خشن شدن و ناهموار شدن سطح رسوب) بیشتر سطح داخلی لوله شده و این امر باعث تلاطم جریان سیال در اثر کم شدن دبی عبوری سیال مایع شده و این آشفتگی کمک به کاهش سرعت سیال مایع نموده است و جوشش نامناسب آن را به همراه دارد و در نتیجه حباب‌های هوا در مایع بوجود می‌آورد که با پیوستن این حباب‌ها پدیده‌ای به نام جدا شدن حباب‌های بخار (DNB: Departure From Nucleate Boiling) بوجود می‌آید که DNB به گونه‌های مختلفی مانند یک عایق حرارتی

عمل می‌کند و باعث افزایش دما در جداره لوله شده و در نهایت اورهیت شدن لوله را به همراه دارد. اگر این حباب‌های بوجود آمده به میزانی نباشند که DNB رخ دهد، با پیمودن مسافت بیشتری در طول لوله در مناطقی که تلاطم جریان کم شده و سرعت فاز مایع افزایش پیدا کرده است، حباب‌ها به واسطه نیرویی که از جریان سیال به حباب‌ها وارد می‌شود باعث ترکیدن آنها در زمانی که به لایه محافظ  $Fe_3O_4$  چسبیده‌اند، می‌شود و باعث تخریب این لایه می‌شوند. سپس با حمل تکه‌های  $Fe_3O_4$  توسط فاز مایع و تجمع آنها در منطقه‌ای دیگر از لوله باعث گرفتگی کامل لوله شده که باعث جلوگیری از گردش سیال درون لوله و جلوگیری از عمل خنک‌کاری لوله توسط سیال می‌شود. این موارد منجر به ایجاد تنش در قسمت بعد از گرفتگی و اورهیت شدن لوله خواهد شد [32].

بعد از اینکه لایه محافظ  $Fe_3O_4$  در اثر ترکیدن حباب‌های هوا بر جداره داخلی لوله‌ها از بین رفته، حفره‌های کوچکی بوجود می‌آید که مکان مناسبی را برای ایجاد کوره‌های کوچکی برای جوش سریع فاز مایع و تغلیظ ترکیبات آن ایجاد می‌کند که با اسیدی شدن بیشتر مایع، خوردگی جداره لوله را بصورت کروی به همراه می‌آورد. هنگامی که نقاط کاتدی و آندی در کنار یکدیگر قرار گیرند خود باعث تشدید خوردگی از نوع اسیدی می‌شود و این امر با نفوذ یون کلرید از رسوب باعث اسیدی‌تر شدن فاز مایع در محل حفره‌ها می‌شود و امکان هر چه بیشتر شدن آندی و کاتدی شدن سطح لوله را بوجود می‌آورد. همچنین در موارد دیگر ترکیب هیدروژن اسیدی با کربن لوله باعث تولید گاز متان شده که گاز متان تولید شده باعث ضعف در پیوندهای مرزخانه‌های فلز شده و شکست هیدروژنی بصورت پنجره‌ای را ایجاد می‌کند [33].

همچنین ایجاد جریان گردابی در جریان آب سیکل و به دنبال آن ایجاد پدیده DNB منجر به ایجاد خستگی ناشی از ارتعاش بصورت غیرمستقیم می‌شود. همچنین برخورد شدید فلوی گاز به جداره لوله از جمله دلایل اصلی بروز تخریب خستگی ناشی از ارتعاش می‌باشد که منجر به ایجاد پارگی لبه کلفت در نزدیکی مسیر خط جوش و اتصالات لوله‌ها به یکدیگر می‌شود [34, 35].

بنابراین از عوامل اصلی پارگی لوله‌های واتروال در نیروگاه حرارتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1. تجمع رسوبات داخلی
  2. تغییرات pH آب بویلر بویژه تغییرات موضعی آن در زیر رسوبات
  3. بالا بودن درجه حرارت (اورهیت شدن) لوله مخصوصاً در ناحیه صدمه دیده
  4. صدمات و نوسانات حاصل از خستگی بویژه در راه‌اندازی‌ها
- راهکارهای اجرایی به منظور جلوگیری از اورهیت شدن دیواره آبی بویلرها عبارتند از:

1. استفاده از سوخت‌های مناسب به عنوان سوخت جایگزین
2. بهبود کیفیت سوخت مصرفی از نظر درجه تقطیر و وزن مخصوص
3. بهبود هرچه بیشتر رژیم شیمیایی آب گردش
4. اسیدشویی دوره‌ای و منظم به منظور جلوگیری از تجمع رسوب در لوله‌ها
5. بررسی و پایش منظم نحوه قرار گرفتن مناسب مشعل‌ها و متغیرهای احتراق [36].

همچنین نشت کندانسور، آلودگی شیمیایی و اکسیژن مازاد را به کاندنسیت و به طور بالقوه به تعادل چرخه وارد می‌کند. این نشت کندانسور منبع اصلی آلودگی سیکل است که منجر به آسیب خوردگی و خرابی در درام‌ها و

توربین‌های بخار می‌شود. از اینرو کاندنسیت باید به طور مداوم با اندازه‌گیری رسانایی سدیم و کاتیون کنترل شود تا وجود آب خنک‌کننده کندانسور در نشت تعیین شود [37].

همچنین از نظر کنترل شیمیائی بویلر، بالا رفتن میزان اکسیژن و پائین آمدن pH آب بویلر تأثیر زیادتری در ایجاد خوردگی خستگی خواهد داشت. در مواردی که انبساط و انقباض فلز لوله به جهت اتصالات و یا نزدیکی به محل جوش محدود گردد ترک‌های خستگی می‌تواند در نتیجه نوسانات خستگی (مثلاً در اثر راه‌اندازی‌های واحد) در نواحی از لوله اشاعه پیدا نماید و این ترک‌ها در نواحی که قبلاً خورده شده گسترش پیدا نموده و منتهی به پاره‌گی لوله در تحت خوردگی خستگی می‌گردد. علاوه بر این وارد آمدن انواع ترک‌های طولی و عرضی در نتیجه وجود اختلاف درجه حرارت در فلز لوله منجر به ایجاد خستگی حرارتی می‌شود که عوامل بهره‌برداری، وضعیت تنش‌های وارده و کنترل شیمیائی واحد نیز در ایجاد این نوع خستگی اثرگذار می‌باشند [38].

همچنین یکی دیگر از عوامل اصلی در ایجاد پاره‌گی لوله‌های واتروال وجود حفره و شکاف‌های طولی داخل آن می‌باشد این صدمات در جداره داخلی لوله در ناحیه صدمه دیده و مقابل آن مشاهده شده است که در ناحیه سمت حرارت این حفره‌ها و شکاف‌ها عمیق‌تر می‌باشند (شکل 6). این حفره‌ها و شکاف‌ها در جداره داخلی در تحت خوردگی داخلی یعنی خوردگی از ناحیه آب حادث شده است که در ناحیه‌ای که میزان حرارت فلز بالا بوده شدت خوردگی بیشتر صورت گرفته است. علل خوردگی داخلی را می‌توان نتیجه تجمع رسوبات، تغییرات pH آب و بالا بودن درجه حرارت در این ناحیه دانست که این عوامل تدریجاً طی دوران بهره‌برداری از واحد باعث خوردگی گردیده است [39].

همچنین عدم اسیدشویی منظم منجر به رشد لایه اکسید مغناطیسی و تجمع رسوبات (مخصوصاً در ناحیه پر حرارت لوله) باعث افزایش درجه حرارت فلز لوله می‌گردد و از طرف دیگر با نفوذ آب بویلر به زیر این رسوبات و تغلیظ آن باعث تشکیل سل‌های الکتروشیمی و از بین رفتن لایه اکسید مغناطیسی و به دنبال آن خوردگی خواهد گردید. خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال (FAC) از دیگر خوردگی‌هایی می‌باشد که با توجه به طراحی و قدمت نیروگاه‌ها اتفاق می‌افتد که به عنوان یکی دیگر از انواع خوردگی در نیروگاه بخار مطرح می‌باشد [40]. خوردگی FAC در پشت مناطق جوشکاری شده و محل خم لوله‌ها به وفور دیده می‌شوند که پدیده‌هایی از قبیل فلاشینگ، کاویتاسیون، سایش ذرات معلق و برخورد قطعات کوچک مایع منجر به تشدید این پدیده می‌شوند. همچنین از جمله عوامل اصلی بروز FAC در لوله‌های اکونومایزر و در ناحیه خم لوله‌ها می‌توان به شرایط ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی سیال، خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در هارپ، طراحی اولیه هارپ و رژیم شیمیایی آب اشاره کرد. خوردگی FAC بیشتر در لوله‌های ورودی اکونومایزر، لوله‌های کنار boiler feed، خطوط درین و لوله‌های ورودی به هدر اکونومایزر در این نیروگاه دیده شد (شکل 7).



شکل 7- خوردگی FAC در لوله های اکونومایزر واحد نیروگاه بخار

از اینرو روش های زیر جهت کنترل FAC در لوله های ساده کربنی اکونومایزر پیشنهاد می گردد:

- ✓ -افزایش pH آب در ناحیه اکونومایزر به مقادیر بالاتر می تواند نرخ FAC را تا حد شایان توجهی کاهش دهد.
- ✓ -کنترل غلظت اکسیژن محلول در آب: میزان اکسیژن بالاتر از حد استاندارد منجر به خوردگی حفره ای ناشی از اکسیژن می شود. خوردگی حفره ای عمدتاً در زمان خاموشی و بعضاً در طی راه اندازی بویلر به وجود می آید. در زمان خاموشی یا توقف واحد، اکسیژن هوا از راه توربین، کندانسور، پمپ های کندانست و هیترهای آب تغذیه وارد لوله های بخار بویژه لوله های سوپر هیت و ری هیت و اکونومایزر می شود. نفوذ اکسیژن به همراه آب و یا رطوبت باعث واکنش های زیر بر روی سطح فولاد می شود:



قابلیت انحلال محصول واکنش  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  خیلی کم بوده و به صورت کلئیدی روی سطح پراکنده می شود و این امر سبب بروز خوردگی سایشی با ذرات جامد در نقاط گوناگون سیکل خواهد شد.

-تغییر مواد نقاط در معرض خطر FAC به آلیاژهای دارای کروم، مولیبدن و یا مس نقش بسزایی در مقاوم سازی این نقاط ایفا می کند جدول 7 در این میان استفاده از لوله های کروم دار (بیش از 1 درصد کروم) در بسیاری از مراجع توصیه می شود.

**جدول 7- مواد جایگزین شده با فولاد ساده کربنی لوله های اکونومایزر فشار قوی بویلر**

نام ماده و محل استفاده	ترکیب شیمیایی %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
A213(T11)-در خروج سیال از هدر (سرعت کمتر)	≤0/15	تا 0/5 1	تا 0/03 0/6	0/03	0/03	1 تا 1/5	0/44 تا 0/65
A213(T22)-در ورود سیال به هدر (سرعت بیشتر)	≤0/15	≤0/15	تا 0/03 0/6	0/03	0/03	2 تا 2/5	0/9 تا 1/1

جایگزینی فولادهای ساده کربنی با فولادهای پر آلیاژ در نیروگاه‌ها حرارتی نشان می‌دهد که مشکلات گذشته از قبیل گسیختگی، سوراخ شدگی و پارگی در لوله‌ها دیگر مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج تحقیقات حاکی از آن است که در لوله‌های ورودی که در معرض حرارت بالا قرار دارند و همچنین نواحی بالای ساختمان بویلر (بیشترین میزان فلوی حرارتی) استفاده از آلیاژ A213(T22) عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد. این متریال به دلیل کروم و مولیبدن بالا مقاومت سایشی بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

#### 4- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت پایش و جلوگیری از خوردگی در صنعت برق بویژه نیروگاه‌های کشور، اجراء برنامه‌های پایش و نظارت به منظور افزایش کارایی و عمر تجهیزات توجه بسزایی را به خود جلب کرده است. از اینرو در کار حاضر با توجه به خوردگی‌های حادث شده در بویلرهای نیروگاه بخار، بررسی و ارزیابی پارامترهای مؤثر آب و بخار این نیروگاه از قبیل آب کندانسور، بخار اشباع، بلودان و آب تغذیه بویلر واحد نیروگاه انجام گرفت. نتایج این بررسی‌ها نشان‌دهنده بالا بودن میزان اکسیژن می‌باشد که منجر به ایجاد خوردگی حفره‌ای، جدایش لایه محافظ مگنتیت و در نتیجه اورهیت شدن لوله‌ها به دلیل تجمع رسوبات در لوله‌ها می‌شود. همچنین آنالیزهای XRD و XRF رسوبات داخلی بویلر و رسوبات موجود در بلودان انجام گرفت که وجود فاز هماتیت مؤید حضور اکسیژن مازاد و تبدیل لایه پوششی مگنتیت به هماتیت و جدایش آن از سطح خواهد شد. به منظور جلوگیری از اورهیت شدن لوله‌های واتروال استفاده از سوخت‌های جایگزین مناسب، بهبود رژیم شیمیایی آب گردش، بهبود کیفیت سوخت و اسیدشویی دوره‌ای و منظم پیشنهاد می‌شود. همچنین در لوله‌های ورودی به هدر اکونومایزر، لوله‌های آب تغذیه بویلر و لوله‌های ورودی اکونومایزر خوردگی ناشی از FAC مشاهده شد که با کنترل غلظت اکسیژن محلول در آب، افزایش pH آب در ناحیه اکونومایزر و استفاده از فولادهای پرآلیاژ (دارای کروم، مولیبدن و یا مس) همچون A213(T11) و A213(T22) می‌توان از این نوع خوردگی جلوگیری کند.

#### 5- تشکر و قدردانی

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

#### 6- تعارض منافع

نویسندگان این مقاله گواهی می‌دهند که هیچ وابستگی یا دخالتی در هیچ سازمان یا نهادی با هرگونه منافع مالی (مانند حق الزحمه، کمک هزینه تحصیلی، مشارکت در دفاتر سخنرانان، عضویت، استخدام، مشاوره، مالکیت سهام، یا سایر منافع دارایی، و شهادت کارشناسان یا روابط غیرقابل مجوز، قراردادهای حرفه‌ای یا خصوصی) ندارند.

## 7- منابع

- [1] A. E. Jaffer, D. Fulmer, and J. D. Ensslen, "Recent Developments in Organic Oxygen Scavenger Technology," *NACE CORROSION*, pp. NACE-06687, 2006.
- [2] M. Esmailpour, M. Ghahraman Afshar, and H. Ghaseminejad, "Investigation of water consumption in Shahid Montazer Ghaem steam Power Plant and technical-economic evaluation of the boilers' blowdown recycling solutions," *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, vol. 42, no. 4, pp. 177-189, 2024.
- [3] M. G. Afshar, M. Azimi, N. Habibi, H. Masihi, and M. Esameilpour, "Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem power plant," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 11, pp. 100339, 2023.
- [4] A. Heyes, "Oxygen pitting failure of a bagasse boiler tube," *Engineering Failure Analysis*, vol. 8, no. 2, pp. 123-131, 2001.
- [5] I. Chatteraj, S. K. Das, B. Ravikumar, and D. Bhattacharya, "Corrosive degradation and failure of vertical furnace wall tubes of a boiler," *Engineering Failure Analysis*, vol. 4, no. 4, pp. 279-286, 1997.
- [6] M. Mirzaee, T. Mohebbi, and D. Reza khani, "A Comprehensive Review of the Corrosion and Erosion Resistant Coating on the Fireside in Power Plant Boilers," *Farayandno*, vol. 18, no. 82, pp. 73-93, 2023.
- [7] K. Ranjbar, "Failure analysis of boiler cold and hot reheater tubes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 4, pp. 620-625, 2007.
- [8] H. Hoseiny, M. Rouhi Sad abad, and A. Pasha, "Corrosion Failure Analysis of A178 Gr A Carbon Steel Boiler Tube Used in an Oil Refinery," *Farayandno*, vol. 14, no. 68, pp. 5-19, 2020.
- [9] N. C. Company, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. McGraw Hill Professional, 2011.
- [10] M. G. Afshar, M. Esmailpour, and H. Ghaseminejad, "Microbial corrosion affected by environmental factors in cooling tower of Bandar Abbas power plant," *Journal of Environmental Studies*, vol. 49, no. 4, 2024.
- [11] J. Dahdeleh, I. Danaee, G. Rashed, and K. Qobadi, "The investigation on inhibition effect of salen ligand for carbon steel corrosion in boiler," *Farayandno*, vol. 10, no. 51, pp. 25-39, 2015.
- [12] R. S. Moakhar, M. Mehdipour, M. Ghorbani, M. Mohebbali, and B. Koohbor, "Investigations of the failure in boilers economizer tubes used in power plants," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 22, pp. 2691-2697, 2013.
- [13] A. Patil, P. Baviskar, M. Sable, and S. Barve, "To optimise economiser design for better performance," *International Journal of Applied research in Mechanical Engineering*, no. 2011.
- [14] P. Kuznietsov and O. Biedunkova, "Dissolved oxygen concentration water dynamics with discharge of the nuclear power plant under the influence of temperature effect," *Problems of Atomic Science and Technology*, vol. 4, no. 152, pp. 94-99, 2024.
- [15] M. Lefhoko, "Power station operations Millmerran power station feed water dissolved oxygen control," 2007.
- [16] J.-J. Kwon and W. Kim, "Implementation of the rules for the continued operation in Korea," *Nuclear Power Plant Life Management*, vol. 155, pp. 28, 2007.
- [17] M. Ghahraman Afshar, M. Esmailpour, and N. Namaki Shooshtari, "Microbial corrosion in cooling tower of ramini power plant: determination and corrective solution," *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, vol. 34, no. 4, pp. 97-108, 2023.

- [18] M. Ghahraman Afshar, M. Azimi, N. Habibi, and M. Esmaeilpour, "Providing Operational Solution to Reduce Water Consumption of Cooling Water Cycle in Montazer Ghaem Power Plant by Chemical Modification of Clarifier Water," *Iranian Chemical Engineering Journal*, 2023.
- [19] R. B. Dooley and R. Tilley, "Guidelines for controlling flow-accelerated corrosion in fossil and combined cycle plants," *Palo Alto: EPRI*, 2005.
- [20] M. Esmaeilpour, M. Ghahraman Afshar, M. Faghihi, and M. Rafiei, "Investigation of Water Consumption in Loshan Power Plant and Technical-Economic Evaluation of the Suggested Solutions to Modify the Consumption Pattern," *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, vol. 34, no. 3, pp. 1-20, 2023.
- [21] J. Purbolaksono, Y. Hong, S. Nor, H. Othman, and B. Ahmad, "Evaluation on reheater tube failure," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, no. 1, pp. 533-537, 2009.
- [22] R. D. Port and H. M. Herro, "The Nalco guide to boiler failure analysis," (*No Title*), 1991.
- [23] م. دیناروند، "بررسی علل اورهیت شدن دیواره آبی بویلر های یکبار گذری که تحت خلاء کار می کنند نمونه موردی بویلر اصلی واحد 6 نیروگاه رامین اهواز،" presented at the "اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، 1391.
- [24] R. Dooley and V. Chexal, "Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 77, no. 2-3, pp. 85-90, 2000.
- [25] H. P. Bloch and F. K. Geitner, *Machinery failure analysis and troubleshooting: practical machinery management for process plants*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [26] S. D. Cramer *et al.*, *ASM handbook*. ASM international Materials Park, Ohio, 2003.
- [27] M. Esmaeilpour, S. Zahmatkesh, N. Fahimi, and M. Nosratabadi, "Palladium nanoparticles immobilized on EDTA-modified Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub> nanospheres as an efficient and magnetically separable catalyst for Suzuki and Sonogashira cross-coupling reactions," *Applied Organometallic Chemistry*, vol. 32, no. 4, pp. e4302, 2018.
- [28] A. Sardarian, M. Kazemnejadi, and M. Esmaeilpour, "Functionalization of superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub> nanoparticles with a Cu (II) binuclear Schiff base complex as an efficient and reusable nanomagnetic catalyst for N-arylation of  $\alpha$ -amino acids and nitrogen-containing heterocycles with aryl halides," *Applied Organometallic Chemistry*, vol. 35, no. 1, pp. e6051, 2021.
- [29] K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, and F. Inada, "Model of physico-chemical effect on flow accelerated corrosion in power plant," *Corrosion Science*, vol. 53, no. 11, pp. 3526-3533, 2011.
- [30] K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, F. Inada, T. Ohira, and K. Hisamune, "Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, no. 11, pp. 4482-4486, 2011.
- [31] M. G. Fontana, "Perspectives on corrosion of materials," *Metallurgical Transactions*, vol. 1, no. 12, pp. 3251-3266, 1970.
- [32] I. Sudhakar, Y. V. Vardhan, P. Sruthi, P. Harshit, S. S. Kumar, and V. V. Prakash, "Study on corrosion behavior of heat treated high carbon low alloy steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 3919-3925, 2018.
- [33] H. Ardy, Y. P. Putra, A. D. Anggoro, and A. Wibowo, "Failure analysis of primary waste heat boiler tube in ammonia plant," *Heliyon*, vol. 7, no. 2, 2021.
- [34] M. Roth, M. Yanishevsky, and P. Beaudet, "Failure analysis of aircraft landing gear components," 2019.

- [35] M. Ghahraman Afshar, M. Esmailpour, H. Ghaseminejad, and N. Esmaili, "Detection and Analysis of Microbial Influenced Corrosion in Cooling Tower of Shahid Mofateh Power Plant," *journal of New Materials*, vol. 13, no. 50, pp. 46-59, 2023.
- [36] A. Saha, *Boiler Tube Failure Mechanisms*. Springer, 2023.
- [37] N. Y. Lee, S. G. Lee, K. H. Ryu, and I. S. Hwang, "On-line monitoring system development for single-phase flow accelerated corrosion," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 237, no. 7, pp. 761-767, 2007.
- [38] Y. Liu, M. Liu, X. Lu, and Z. Wang, "Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 277, pp. 124962, 2022.
- [39] G. ND and F. MG, "A Critical analysis of pitting corrosion," *Corrosion Engineering Digest*, vol. 8, no. 7, pp. 298-307, 1959.
- [40] P. Khunphakdee and B. Chalermssinsuwan, "Review of flow accelerated corrosion mechanism, numerical analysis, and control measures," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 197, pp. 519-535, 2023.