

## بررسی علل تخریب لوله انتقال گاز دی اکسید گوگرد در مخزن تولید آب دیفوزیون کارخانه قند شیرین مشهد

عباس افراسیابی گرکانی<sup>1\*</sup>، مهرداد ضیا حسین پور<sup>2</sup>، زیبا میرزاخانزاده<sup>3</sup>، محمد ایوبی فر<sup>4</sup>، سید موسی سیادتی<sup>5</sup>، عبدالمجید مسکوکی<sup>6</sup>

1- استادیار گروه ماشین آلات مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی  
\*نویسنده مسئول (afrasyab@ut.ac.ir)

- 2- کارشناس ارشد گروه مهندسی خوردگی و حفاظت از مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
3- کارشناس ارشد گروه مهندسی خوردگی و حفاظت از مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
4- کارشناس ارشد مهندسی مواد، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی  
5- کارشناس ارشد مهندسی مواد، پارک علم و فناوری خراسان  
6- دانشیار گروه فرآوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی

### چکیده

تاریخ دریافت: 92/08/08

تاریخ پذیرش: 93/05/18

#### واژه‌های کلیدی

آب دیفوزیون

خوردگی

دی‌اکسید گوگرد

علل شکست

کارخانه قند

با توجه به اهمیت فرایند دیفوزیون در پروسه تولید قند و شکر، کارکرد درست این بخش بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این بخش آب لازم با pH معین جهت استفاده در فرایند دیفوزیون از طریق واکنش آب با گاز دی‌اکسید گوگرد در مخزن مشخص، تولید می‌گردد. در این تحقیق علل تخریب لوله اصلی پخش گاز دی‌اکسید گوگرد در داخل مخزن تولید آب دیفوزیون بررسی گردید. جهت انجام بررسی‌ها، آزمون کوانتومتری بر روی ورق و ناحیه جوش، آزمون پراش اشعه ایکس بر روی محصولات خوردگی، آزمون پلاریزاسیون دینامیک بر روی نمونه جدا شده از لوله در 3 دمای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد و آزمون دابل لوپ جهت بررسی حساسیت در نواحی اطراف جوش انجام شد. با توجه به نتایج، نواحی جوش غیرحساس بوده و دانسیته جریان خوردگی در حدود 0/0001 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و نرخ خوردگی لوله کمتر از 2 میکرون در سال محاسبه شد. بنابراین علت اصلی تخریب ناشی از خوردگی یکنواخت نبوده، بلکه به دلیل تجمع گاز در کف لوله و تشکیل موضعی محلول‌های خورنده گوگردار می‌باشد. لذا با اصلاح طراحی شامل تغییر در مکان لوله‌های انشعابی، ایجاد شیب در لوله اصلی و یا تغییر جنس لوله می‌توان از تشکیل موضعی محلول‌های خورنده جلوگیری کرده و نرخ خوردگی را کاهش داد.

### مقدمه

فشار اسمزی که مربوط به اختلاف غلظت در داخل و خارج از سلول‌های خلال است صورت می‌گیرد. در صورتی که برای استخراج قند از آب گرم استفاده شود و خلال‌ها به دمای حدود 72 تا 75 درجه سانتی‌گراد رسیده باشند، عمل دیفوزیون قند به خوبی انجام

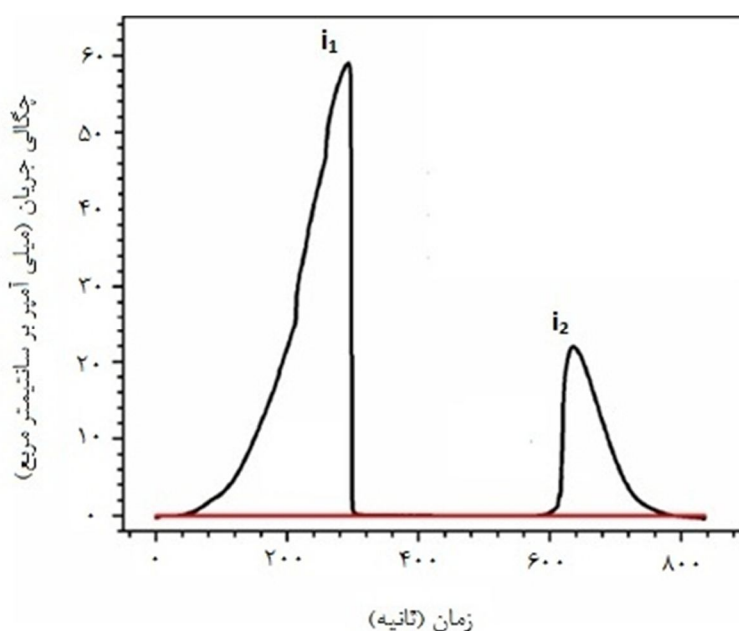
به مرحله استخراج قند از خلال چغندر قند، فرایند شربت‌گیری، عصاره‌گیری و یا دیفوزیون گفته می‌شود. عمل استخراج قند از خلال چغندر قند در دستگاه دیفوزیون یا دیفیوزر و با استفاده از خاصیت انتشار و

وجود عنصر مولیبدن در ترکیب شیمیایی ناشی می‌شود. همچنین تحقیقات این محققان مقاومت قابل توجه فولادهای زنگ نزن AISI 304 و AISI 444 در مقایسه با فولاد ساده AISI 1010 را در برابر خوردگی حفره‌ای و شیاری در شربت قند را نشان می‌دهد. این پدیده با توجه به میزان کروم بالا و خواص روپینگی فولادهای AISI 304 و AISI 444 کاملاً قابل توجهیه می‌باشد.

جوشکاری در ساخت قطعات و وجود کلر در شربت قند، می‌تواند موجب حساس شدن قطعات و خوردگی مرزانه‌ای در آنها گردد. به طور کلی رسوب (ته نشین شدن) کاربرد در مرز دانه‌ها، هنگامی که فولادهای زنگ نزن در یک بازه زمانی در محدوده دمای بین 425 تا 870 درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند (به خصوص در جوشکاری)، را حساس شدن می‌گویند (Wasnik et al., 2002; Sourmail et al., 2003; Kokawa et al., 2000). مدت زمانی که فولاد در این دما قرار می‌گیرد، مقدار کاربرد رسوب شده را تعیین می‌کند. وقتی کاربرد کروم در مرز دانه‌ای رسوب می‌کند، نواحی کناری به سرعت از کروم تهی می‌شود. در صورتی که این ته‌نشینی و تهی‌سازی نسبتاً پیوسته باشد، فولاد را نسبت به خوردگی بین دانه‌ای مستعد می‌سازد. همچنین حساس شدن، مقاومت فولاد را در برابر انواع دیگر خوردگی مانند خوردگی حفره‌ای، خوردگی شیاری و ترک خوردگی تنشی کاهش می‌دهد. جهت تعیین حساسیت، از آزمون دابل لوپ استفاده می‌شود. در این روش آزمون پلاریزاسیون دینامیک تا محدوده روپینگی ادامه یافته و سپس نرخ روبش بر عکس برمی‌گردد. در این روش می‌توان علاوه بر نمودارهای پتانسیل بر حسب جریان، از نمودارهای جریان بر حسب زمان نیز استفاده نمود. در این حالت در صورت وجود حساسیت، نمودار جریان بر حسب زمان مطابق شکل 1 خواهد بود (Kain et al., 2002).

می‌گیرد. همچنین بهترین pH برای دیفوزیون بین 5/5 تا 5/8 می‌باشد، زیرا اگر pH پایین تر از آن باشد خطر خوردگی اجزای دیفوزیون وجود دارد و در صورتی که بالاتر باشد، به نسبت افزایش pH پکتین بیشتری حل می‌شود و تفاله حالت لزج پیدا می‌کند. در نتیجه انتقال خلال مشکل شده و ماده خشک تفاله کاهش می‌یابد. در برخی کارخانه‌ها برای کاهش رنگ شربت به آن گاز یا ترکیبات دیگر گوگردار زده می‌شود و شربت رنگ روشن تری پیدا می‌کند. ممکن است از روش‌های دیگر رنگبری مانند کاربرد زغال فعال نیز استفاده شود (Honig, 1963).

فرایند خوردگی در کارخانجات قند و شکر به عنوان یک بحث جدی و مهم مطرح می‌باشد. در ابتدا بیشتر قطعات به کار گرفته شده در کارخانه‌های قند از فولاد ساده کربنی انتخاب می‌گردید، ولی با گذشت زمان و مشاهده خوردگی از جمله خوردگی‌های موضعی و بیولوژیکی و همچنین وقوع سایش قابل توجه در قطعات به دلیل pH اسیدی و ترکیبات موجود در شربت، به تدریج فولادهای زنگ نزن جایگزین فولادهای ساده کربنی در ساخت تجهیزات گردیدند. در این زمینه تحقیقات Farias و Lins (2011) نشان داد که فولادهای زنگ نزن آلیاژی از جمله ASTM T11 و ASTM T22 بهترین مقاومت به خوردگی را جهت ساخت دیگ‌های بخار در کارخانه‌های قند دارا می‌باشند. افزودن عنصر آلیاژی منیزیم به ترکیب شیمیایی این فولادها عامل اصلی افزایش مقاومت به خوردگی می‌باشد. علاوه بر این Wesley و همکاران (2013) خوردگی بیولوژیکی بر روی سه فولاد AISI 444، AISI 439 و AISI 304 را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها فولاد AISI 444 بالاترین مقاومت در برابر خوردگی بیولوژیکی را دارا بوده در حالی که فولاد AISI 439 از کمترین مقاومت برخوردار است. مقاومت قابل توجه فولاد AISI 444 در برابر خوردگی در این محیط‌ها از



شکل 1- نمودار دانسیته جریان بر حسب زمان برای فولاد حساس شده

با جریان 1 آمپر بر سانتی متر مربع الکترواچ شد و بلافاصله پس از شستشو با آب مقطر خشک گردید. تصاویر میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل BX41M-LED در بزرگنمایی‌های متفاوت تهیه شدند.

جهت تعیین نوع فولاد به کار گرفته شده در لوله انتقال گاز دی اکسید گوگرد، از آزمون کوانتومتری استفاده شد. با کمک این آزمون درصد عناصر مختلف در آلیاژ مشخص گردید. به منظور تعیین ترکیب محصولات خوردگی تشکیل شده در سطح داخلی لوله از روش پراش اشعه ایکس استفاده شد. الگو پراش با دستگاه ساخت کمپانی Unisantis مدل XMD300 به دست آمد.

#### انجام آزمون‌های پلاریزاسیون دینامیک و تعیین حساسیت

اندازه‌گیری رفتار پلاریزاسیون روشی مناسب برای تعیین رفتار خوردگی یک فلز در شرایط اکسیداسیون می‌باشد (Lagrenée et al., 2001; Mol et al., 2000)، در تکنیک پلاریزاسیون، با تغییر در پتانسیل، جریان خالص قابل اندازه‌گیری ایجاد خواهد شد. پتانسیل توسط دستگاه پتانسیواستات با نرخ مشخص که توسط کاربر تعیین می‌شود، تغییر می‌کند. پارامترهای حاصل از منحنی به دست آمده عبارتند از:

با توجه به شکل، وجود دو مقدار بیشینه در جریان مشاهده شد که نشان دهنده وجود حساسیت در نمونه بود و در صورت عدم حساسیت تنها یک جریان مشاهده شد. میزان حساسیت در این روش از تقسیم جریان بیشینه دوم ( $i_2$ ) بر جریان بیشینه ابتدایی ( $i_1$ ) محاسبه شده است.

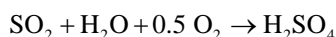
در پژوهش حاضر که برای اولین بار در کارخانجات قند صورت می‌گیرد، علل تخریب پیش از موعد لوله انتقال گاز  $SO_2$  به مخزن آب دیفوزیون در کارخانه قند شیرین مشهد با استفاده از آزمون‌های پلاریزاسیون پیوسته، دابل لوب، کوانتومتری و پراش اشعه ایکس بررسی شد.

#### روش‌ها

##### بررسی ریز ساختار

قبل از شروع بررسی‌ها از نمونه تخریب شده و مکان استفاده آن به کمک دوربین دیجیتال تصاویر مورد نیاز تهیه گردید. همچنین به منظور بررسی رفتار خوردگی، نمونه‌های مورد نیاز از لوله تخریب شده جدا و مانع گردیدند. به این منظور نمونه‌ای به ابعاد 1 سانتی متر مربع از لوله تهیه و پس از مانع کردن با سنباده‌زنی و پولیش سطح آن بصورت آینه‌ای درآمد. سپس جهت مشاهده ریزساختار، نمونه در محلول استاندارد (10 درصد اگزالیک اسید) به مدت 90 ثانیه

سولفوریک با pH بین 5/5 تا 6 تولید می‌گردد.  
رابطه (1)



در این حالت اسید سولفوریک تشکیل شده در واکنش 1 موجب خوردگی قطعات می‌شود. اگرچه میزان اسیدیته محلول با توجه به حجم بالای آب بسیار کم بوده و میزان خوردگی توسط اسید تولید شده اندک خواهد بود. شکل 3 لوله‌های تخریب شده مخزن را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر در قسمت کف لوله اصلی حمل گاز در داخل مخزن خوردگی شدید مشاهده می‌شود و لوله‌های فرعی تقریباً سالم می‌باشند. همچنین قسمت انتهایی لوله مرکزی نیز تا ارتفاع معینی از کف دچار خوردگی حفره‌ای شده است. شکل 4 تصاویر متالوگرافی نمونه فولادی را در بزرگنمایی 500 برابر نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر ساختار تک فازی آستنیتی می‌باشد. در این فولادها مقدار بالای نیکل موجود در ترکیب شیمیایی آلیاژ عامل اصلی پایدار سازی آستنیت در ساختار این فولادها می‌باشد. عموماً فولادهای آستنیتی از مقاومت به خوردگی بالاتری در مقایسه با فولادهای فریتی برخوردار می‌باشند.

#### آزمون‌های کوانتومتری و پراش اشعه ایکس

آزمون کوانتومتری بر روی لوله اصلی و ناحیه جوش صورت گرفت که نتایج آن در جدول 1 ارائه شده است.

با توجه به نتایج، ترکیب ورق و جوش تقریباً یکسان و مطابق ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L می‌باشد.

نتایج آزمون پراش اشعه ایکس از محصولات خوردگی بر سطح لوله نیز در ادامه آمده است.

پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) و شدت جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) و شیب تافل آندی و کاتدی که با مماس کردن خطوط بر نواحی کاتدی و آندی قابل محاسبه می‌باشد. واحد شیب تافل عموماً بر حسب میلی‌ولت بر یک دهه (mV/decade) است. دمای سیستم تهیه آب دیفوزیون در محدوده 50 تا 70 درجه سانتی‌گراد تغییر کرده و بدین منظور جهت تعیین نرخ خوردگی حداقل، میانه و حداکثر تست پلاریزاسیون در 3 دمای 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. این آزمون توسط پتانسیو استات GillAc ساخت کمپانی ACM انگلستان در محدوده 50- تا 1500 میلی‌ولت با نرخ روبش 60 میلی‌ولت بر دقیقه انجام شد. الکتروود مرجع و خنثی به ترتیب کالومل ( $\text{SCE}^1$ ) و پلاتین استفاده گردید. به منظور افزایش دقت در آزمون‌ها، محلول مورد نیاز جهت انجام آزمون‌های خوردگی مستقیماً از خط دیفوزیون کارخانه قند شیرین تهیه گردید. pH محلول نیز توسط pHسنج ساخت کمپانی Inolab تعیین شد. همچنین آزمون دابل لوپ در محلول 0/5 مولار اسید سولفوریک به همراه 0/01 مولار پتاسیم تیوسیانیات (KSCN) انجام گردید. نرخ روبش نیز 100 میلی‌ولت بر دقیقه می‌باشد (Clarke *et al.*, 1978).

#### نتایج و بحث

##### بررسی نقاط تخریب شده

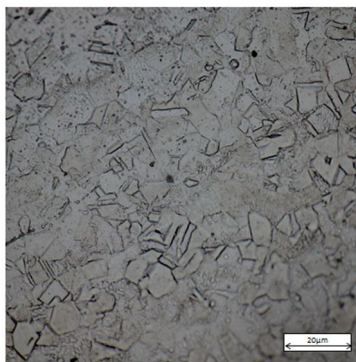
شکل 2 تصاویر تهیه شده از مخزن تهیه آب دیفوزیون را نشان می‌دهد. در این مخازن، گاز دی‌اکسید گوگرد ناشی از سوختن گوگرد در کوره‌ها پس از خنک شدن در خنک کننده‌ها، وارد مخزن تولید آب دیفوزیون می‌گردد. پس از ورود به مخزن در معرض پاشش آب قرار گرفته و طی واکنش زیر اسید



شکل 2- تصاویر تهیه شده از داخل و خارج مخزن تهیه آب دیفوزیون



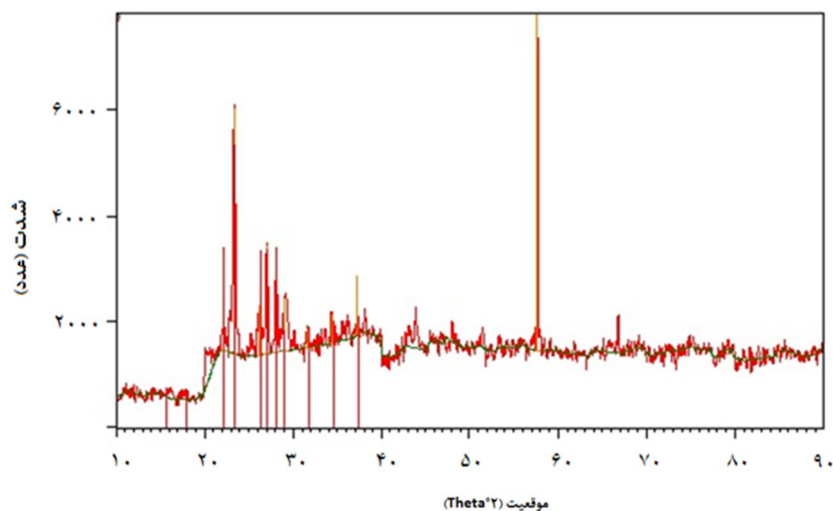
شکل 3- لوله تخریب شده



شکل 4- تصویر متالوگرافی از سطح نمونه در بزرگنمایی 500 برابر

جدول 1- نتایج آزمون کوانتومتری از ناحیه جوش و فلز پایه

	Fe	N	W	V	Ti	Co	Cu	Al	Nb	Ni	Mo	Cr	S	P	Mn	si	c	
فلز پایه	باقیمانده	۰/۰۸۷	۰/۰۳۶	۰/۰۷۶	۰/۰۱۱	۰/۴۰۹	۰/۰۷	۰/۰۲۳	۰/۰۵۸	۱۲/۴۲۲	۲/۳۸۶	۱۷/۹۴	۰/۰۱۹	۰/۰۲۸	۰/۸۳۶	۰/۸۲۸	۰/۰۳۸	
ناحیه جوش	باقیمانده	۰/۰۱۸	۰/۰۶۱	۰/۰۶	۰/۰۰۷	۰/۳۳۱	۰/۲۹۵	۰/۰۱۷	۰/۰۵۲	۱۲/۴۸۲	۲/۴۹۲	۱۷/۰۴۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۱/۵۷۰	۰/۸۴۲	۰/۰۴۵	



شکل 5- آزمون پراش اشعه ایکس

جدول 2- ترکیب موجود بر سطح لوله بر اساس نتایج آزمون پراش اشعه ایکس

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-047-1687	63	Sodium Vanadium Oxide Sulfide Hydrate	0.000	0.508	NaVOS <sub>2</sub> +2 H <sub>2</sub> O

وقوع خوردگی در لوله باشد. این ترکیبات با حرکت گاز به لوله منتقل شده است.

آزمون‌های پلاریزاسیون دینامیک و تعیین حساسیت نتایج آزمون پلاریزاسیون دینامیک در 3 دما در شکل 6 ارائه شده است.

جدول 2 محصولات خوردگی ایجاد شده را بر اساس اطلاعات به دست آمده از شکل 5 نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار تنها فاز شناسایی شده در محصولات خوردگی ترکیب سدیم وانادیم اکسید 2 آبه حاوی گوگرد می‌باشد. منشا این ترکیب وقوع خوردگی داغ در کوره‌های سوخت بوده و نمی‌تواند ناشی از

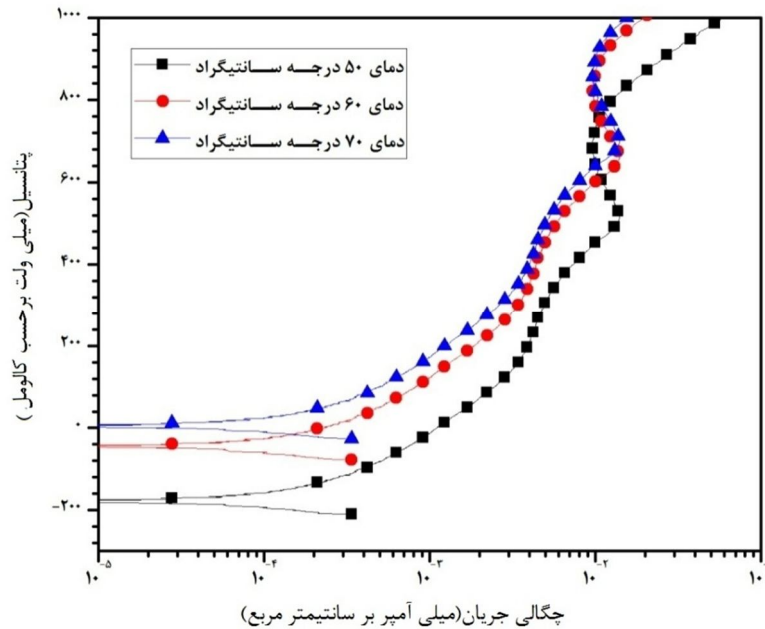
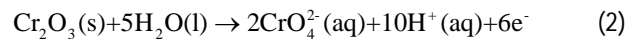
همچنین می‌توان با توجه به رابطه فارادی میزان کاهش ضخامت ناشی از خوردگی را با فرض آهن خالص بودن نمونه به طور تقریبی محاسبه کرد.

$$T = \frac{Zit}{nF\rho} \quad \text{رابطه (3)}$$

در رابطه 3، T ضخامت خورده شده بر حسب سانتی‌متر، Z عدد جرمی آهن (55/8 گرم بر مول)، i جریان خوردگی بر حسب آمپر بر سانتی‌متر مربع، t زمان (31536000 ثانیه به ازای یک سال)، n بار الکتریکی آهن (برابر با 2)، F ثابت فارادی (96500 کولمب بر مول) و ρ چگالی آهن (7/8 گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

با توجه نمودارها، رفتار فولاد در داخل محلول دیفوزیون در حالت روئین با نرخ خوردگی اندک قرار دارد. در این نمودار نیز افزایش جریان در پتانسیل‌های بالا ناشی از وقوع واکنش‌های فراروینگی می‌باشد. بر اساس این واکنش‌ها لایه روئین موجود بر سطح مطابق رابطه 2 شروع به انحلال نموده و جریان متناسب با انحلال لایه افزایش می‌یابد. اطلاعات به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون دینامیک در جدول 3 آمده است.

رابطه (2)



شکل 6- نتایج آزمون پلاریزاسیون دینامیک در 3 دما

جدول 3- اطلاعات به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون دینامیک

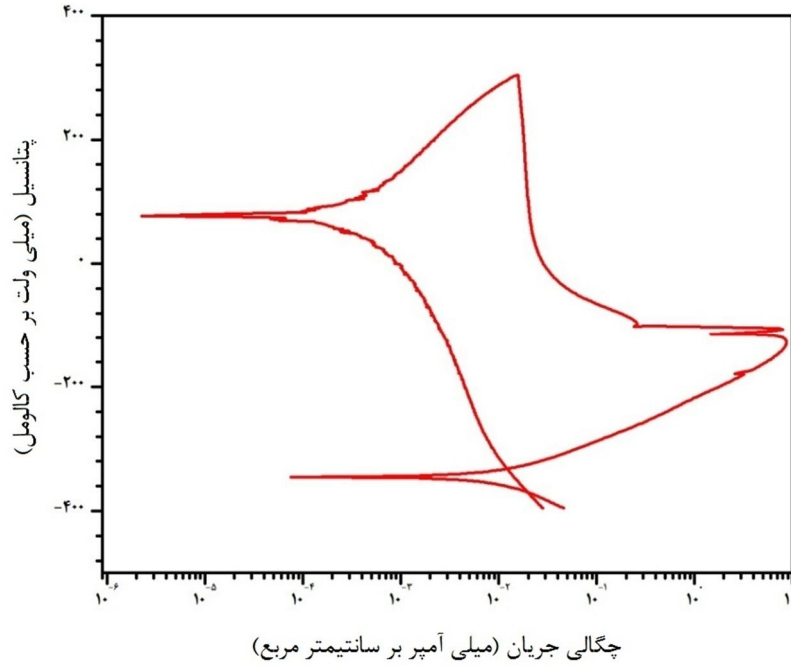
دمای محلول (درجه سانتی‌گراد)	شیب Tafel آندی (میلی‌ولت بر دهه)	شیب Tafel کاتدی (میلی‌ولت بر دهه)	شدت جریان خوردگی (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)
50	193/92	24/051	0/0001054
60	190/96	30/87	0/0001082
70	253/64	42/24	0/000139

جدول 4- میزان کاهش ضخامت در دماهای مختلف در هر سال

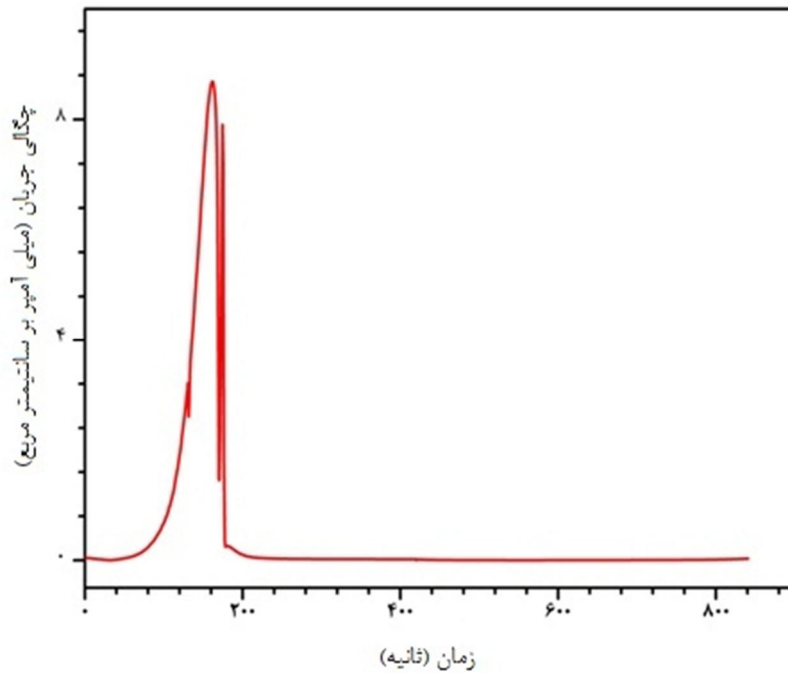
میزان کاهش ضخامت (سانتی متر)	دما (درجه سانتی‌گراد)
0/000122	50
0/000125	60
0/000161	70

با توجه به شکل 8 و مشاهده تنها یک پیک در نمودار، فولاد حساس نمی‌باشد که این امر به دلیل کم بودن کربن فولاد توجیه پذیر خواهد بود. در این حالت کربن کم فولاد مانع از تشکیل کاربیدها شده و فولاد را در برابر حساس شدن مقاوم خواهد بود.

این مقادیر نرخ بسیار کم خوردگی در لوله را نشان می‌دهند و با در نظر گرفتن ضخامت اولیه لوله (4 میلی‌متر) عمر بسیار بالایی از لوله قابل انتظار بوده است. نتایج آزمون لوپ دوتایی در شکل 7 و 8 ارائه شده است.



شکل 7- نمودار پتانسیل بر حسب جریان به دست آمده از آزمون دابل لوپ



شکل 8- تغییرات جریان بر حسب زمان بر اساس آزمون دابل لوپ



### دلایل خوردگی و ارائه روش‌های حفاظتی

با توجه به تصاویر تهیه شده و نتایج آزمون‌ها، تخریب لوله ناشی از خوردگی یکنواخت در اثر تماس آن با محلول اسید سولفوریک تولید شده نمی‌تواند باشد، بلکه با توجه به نحوه تخریب لوله و تشکیل حفرات بر روی سطح آن، می‌توان گفت عامل اصلی تخریب، خوردگی حفره‌ای می‌باشد. در این نوع خوردگی وجود یک یون مهاجم مانند کلراید یا سولفور در محیط، موجب شکست موضعی لایه رویین و انحلال شدید فلز زیر لایه و تشکیل حفرات در سطح فولاد می‌گردد (Frankel, 1998). جهت مقابله با این خوردگی روش‌های متعددی پیشنهاد شده است، به عنوان مثال افزایش میزان کروم و مولیبدن در فولاد زنگ نزن، ضمن بهبود خواص لایه رویین، مقاومت فولاد را در برابر خوردگی حفره‌ای افزایش می‌دهد. راه حل دیگر افزودن ممانعت کننده مانند کرومات و مولیبدات به محیط می‌باشد (Ilevbare & Burstein, 2003; Eghbali *et al.*, 2011). این ممانعت کننده‌ها با تغییر خواص لایه رویین و تغییر محلول داخل حفره باعث متوقف شدن فرایند رشد حفره می‌گردند. بنابراین بر اساس مطالب ذکر شده راه حل‌های زیر برای کنترل خوردگی در سیستم مورد بررسی پیشنهاد می‌گردد.

### تعویض جنس لوله

یکی از راه حل‌های کاهش خوردگی، استفاده از فولادهای زنگ‌نزن با مقاومت به خوردگی بالاتر می‌باشد، به عنوان مثال فولادهای دوفازی 2205 یا فولاد فریتی 904L جهت ساخت مناسب‌تر خواهند بود (Ilevbare & Burstein, 2003; Eghbali *et al.*, 2011). این فولادها با دارا بودن عناصر آلیاژی از جمله مولیبدن و نیکل در ترکیب شیمیایی خود، دارای مقاومت بالاتری در برابر خوردگی موضعی می‌باشند؛ اگر چه مباحث اقتصادی نیز در انتخاب ماده باید در نظر گرفته شود. همچنین می‌توان از مواد غیرفلزی با مقاومت مناسب در برابر دما نیز در ساخت لوله بهره گرفت، به عنوان مثال لوله‌های تفلونی با مقاومت بالا

در برابر دما و دارا بودن استحکام کافی می‌توانند جایگزین مناسبی باشند.

### اعمال پوشش‌های غیرسمی و مقاوم به دمای بالا

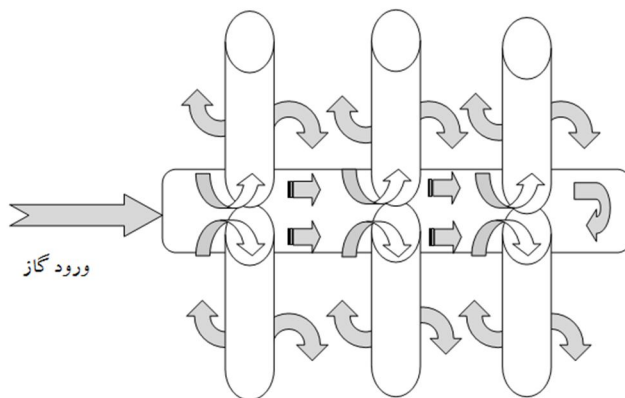
یکی از راه حل‌ها جهت مقابله با خوردگی در محیط‌های مختلف، اعمال پوشش‌های مقاوم به خوردگی بر روی سطح می‌باشد، به عنوان مثال پوشش‌های آلی با ایجاد سد محافظ بر روی سطح باعث محافظت قطعه در برابر خوردگی می‌گردند، بنابراین در سیستم مذکور با توجه به بالا بودن دمای گاز انتقالی، کاربرد رنگ‌های مقاوم به دما می‌تواند راه حل مناسبی جهت مقابله با خوردگی باشد. در این روش نکته حائز اهمیت غیرسمی بودن پوشش اعمالی بر روی سیستم با توجه به محل کارکرد لوله می‌باشد.

### اصلاح طراحی لوله

با توجه به عواملی مانند سنگینی گاز دی‌اکسیدگوگرد، حرکت آن از ناحیه نزدیک به کف لوله، میعان گاز و همچنین حضور رطوبت در محیط، تشکیل موضعی محلول‌های خورنده حاوی سولفور در کف مشاهده شده است (Wang & Kido, 2006; Wang & Kido, 2007; Panossian *et al.*, 2012). این ترکیبات به دلیل دارا بودن یون مهاجم سولفور باعث خوردگی حفره‌ای لوله می‌گردند (Stewart & Williams, 1992; Brossia & Kelly, 1998). حفرات ایجاد شده در شکل 3 نمایش داده شده است. با توجه به سمی بودن ممانعت کننده‌های معدنی و عدم امکان کاربرد آن به نظر می‌رسد با اصلاح سیستم طراحی می‌توان خوردگی را در فرایند مذکور به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. تعدادی از پژوهشگران نیز بر نقش طراحی در کنترل خوردگی تاکید کرده‌اند؛ Panossian و همکاران (2003) تأثیر طراحی سیستم بر خوردگی جریان‌های چرخشی را به صورت شبیه سازی سیلان گاز در آزمایشگاه نشان داده‌اند. علاوه بر این نقش طراحی بر کاهش نرخ خوردگی، در تحقیقات متعدد دیگری نیز اثبات شده است (Arnold & Edwards, 2012; Efirid *et al.*, 1993).

شکل 9 نحوه چگونگی سیلان گاز در لوله تخریب

شده نشان می‌دهد.



شکل 9- نحوه سیلان گاز در لوله پخش کننده گاز  $SO_2$

خوردگی موضعی در کف لوله را به همراه خواهد داشت. بنابراین انتقال لوله‌های انشعابی به قسمت تحتانی مطابق شکل 11-ب ضمن تسهیل نمودن فرایند خروج گاز، مانع از تجمع آن، در کف لوله می‌گردد. لذا نرخ خوردگی کاهش یافته و طول عمر لوله افزایش خواهد یافت.

- ایجاد شیب در لوله اصلی و انشعابات

شکل 12-الف نمای جانبی لوله انتقال تخریب شده همراه با محل‌های اتصال لوله‌های انشعاب را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. لوله موجود کاملاً به صورت افقی می‌باشد. بنابراین ایجاد شیب اندک به میزان چند درجه (به عنوان مثال 2 درجه) در لوله، مطابق شکل 12-ب، با تسریع خروج گاز، مانع تجمع آن در کف لوله و تشکیل نواحی خورنده می‌گردد.

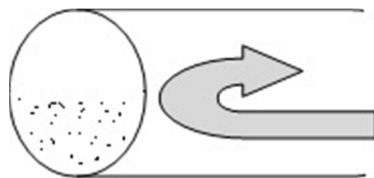
همچنین می‌توان لوله‌های انشعابی را نیز شیب دار ساخت، در این حالت ایجاد شیب رو به پایین و در جهت جریان در لوله‌های انشعابی، تاثیر بسزایی در خروج آسان تر گاز نیز خواهد داشت.

با توجه به شکل 10 در لوله مربوطه، گاز پس از رسیدن به انتهای لوله از سمت پایین به بالا برگشت خواهد کرد. با توجه به رفتار گاز، وقوع خوردگی تا ارتفاع معین در قسمت کف و انتهایی لوله به دلیل برخورد گاز به آن ناحیه و تشکیلات ترکیبات خورنده قابل توجیه می‌باشد.

در پژوهش حاضر نیز نقص طراحی لوله‌های پخش‌کننده گاز  $SO_2$ ، موجب تجمع موضعی مواد خورنده حاوی گوگرد شده است، بنابراین انجام اصلاحات جهت تسهیل خروج گاز از لوله اصلی‌ترین نکته در طراحی مجدد می‌باشد. بر این اساس پیشنهاد زیر جهت مقابله با تجمع گاز در کف لوله و وقوع خوردگی موضعی پیشنهاد می‌گردد:

- انتقال لوله‌های انشعابی از وسط لوله اصلی به قسمت‌های تحتانی.

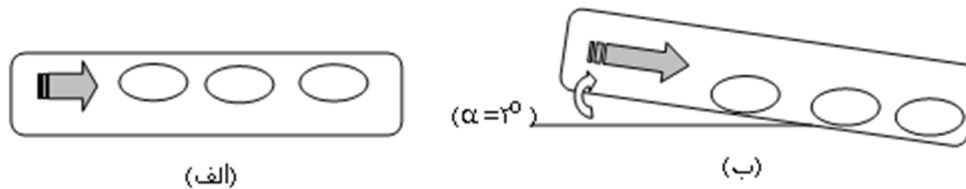
شکل 11-الف نحوه قرارگیری لوله‌های انشعابی در لوله تخریب شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فاصله ایجاد شده مابین کف و لوله انشعابی، موجب تجمع گاز در کف شده که این امر با گذشت زمان،



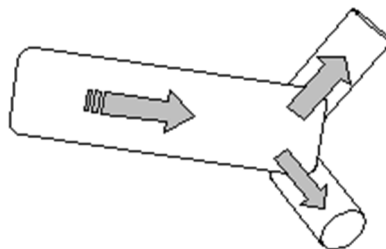
شکل 10- نحوه برخورد گاز به انتهای لوله



شکل 11- انتقال لوله‌های انشعابی از وسط به قسمت تحتانی (نمای رو به رو)



شکل 12- ایجاد شیب در لوله اصلی



شکل 13- ایجاد شیب در لوله‌های انشعابی در مسیر جریان و رو به پایین

مثال با تغییر در مکان انشعابات و ایجاد شیب در لوله اصلی می‌توان خروج گاز از لوله را تسریع نمود. انتخاب مواد مناسب و تغییر جنس لوله می‌تواند راه حل دیگری جهت کاهش خوردگی باشد. در این راستا استفاده از لوله‌های فولادی با میزان کروم بالاتر مانند فولاد دوفازی 2205 یا فولاد فریتی 904L مناسب‌تر خواهد بود. علاوه بر این می‌توان از لوله‌های تفلونی نیز استفاده نمود.

اعمال پوشش‌های غیرسمی مقاوم به دما نیز می‌تواند راه حلی دیگر جهت مقابله به خوردگی باشد.

#### نتیجه گیری

با توجه به جنس فولاد و نتایج آزمون‌های خوردگی، خوردگی یکنواخت ناشی از تماس لوله با محلول تولید شده در مخزن نمی‌تواند عامل اصلی تخریب لوله باشد. علت اصلی خوردگی، تشکیل موضعی محلول‌های خورنده در داخل لوله می‌باشد که باعث ایجاد حفرات در آن شده است. این محلول‌ها حاوی ترکیبات گوگرد بوده که در اثر میعان گاز و رطوبت موجود در محیط تشکیل می‌شوند.

میزان خوردگی لوله را می‌توان با انجام اصلاحاتی در طراحی و تسهیل سیلان گاز کاهش داد، به عنوان

#### منابع

- 1- Ahmed, W. H., Bello, M. M., El Nakla, M., Al Sarkhi, A., & Badr, H. M. 2014. Experimental investigation of flow accelerated corrosion under two-phase flow conditions. Nuclear Engineering and Design, 267: 34-43.
- 2- Arnold JR, R. B., & Edwards, M. 2012. Potential reversal and the effects of flow pattern on galvanic corrosion of lead. Environmental Science & Technology, 46: 10941-10947.
- 3- Brossia, C., & Kelly, R. 1998. Occluded solution chemistry control and the role of alloy sulfur on the initiation of crevice corrosion in type 304ss. Corrosion Science, 40: 1851-1871.

- 4- Clarke, W., Cowan, R., & Walker, W. 1978. Comparative methods for measuring degree of sensitization in stainless steel. *Intergranular Corrosion of Stainless Alloys*, ASTM STP, 656: 99.
- 5- Eford, K., Wright, E., Boros, J., & Hailey, T. 1993. Correlation of steel corrosion in pipe flow with jet impingement and rotating cylinder tests. *Corrosion*, 49: 992-1003.
- 6- Eghbali, F., Moayed, M., Davoodi, A., & Ebrahimi, N. 2011. Critical pitting temperature (CPT) assessment of 2205 duplex stainless steel in 0.1 M NaCl at various molybdate concentrations. *Corrosion Science*, 53: 513-522.
- 7- Farias, C. A., & Lins, V. F. C. 2011. Corrosion Resistance of Steels Used in Alcohol and Sugar Industry. *Chemical Engineering & Technology*, 34: 1391-1403.
- 8- Frankel, G. S. 1998. Pitting Corrosion of Metals: a review of the critical factors. *Journal of the Electrochemical Society*, 145: 2186-2198.
- 9- HONIG, P. 1963 , *Principles of sugar technology*. Vol. III, Germany.
- 10- Ilevbare, G., & Burstein, G. 2003. The inhibition of pitting corrosion of stainless steels by chromate and molybdate ions. *Corrosion Science*, 45: 1545-1569.
- 11- Kain, V., Prasad, R. C., & De, P. K. 2002. Testing sensitization and predicting susceptibility to intergranular corrosion and intergranular stress corrosion cracking in austenitic stainless steels. *Corrosion*, 58: 15-37.
- 12- Kokawa, H., Shimada, M., & SATO, Y. 2000. Grain-boundary structure and precipitation in sensitized austenitic stainless steel. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 52: 34-37.
- 13- Lagrenee, M., Mernari, B., Chaibi, N., Traisnel, M., Vezin, H., & Bentiss, F. 2001. Investigation of the inhibitive effect of substituted oxadiazoles on the corrosion of mild steel in HCl medium. *Corrosion Science*, 43: 951-962.
- 14- Mol, J., Hinton, B., Van Der Weijde, D., De Wit, J., & Van Der Zwaag, S. 2000. A filiform corrosion and potentiodynamic polarisation study of some aluminium alloys. *Journal of Materials Science*, 35: 1629-1639.
- 15- Panossian, Z., Almeida, N. L. D., Sousa, R. M. F. D., Pimenta, G. D. S., & Marques, L. B. S. 2012. Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: a review. *Corrosion Science*, 58: 1-11.
- 16- Papavinasam, S., Doiron, A., & Revie, R. W. 2003. Effect of rotating cage geometry on flow pattern and corrosion rate. *Corrosion*, 2003. 16-20 Mar. San Diego, California.
- 17- Sourmail, T., Too, C., & Bhadeshia, H. 2003. Sensitisation and evolution of chromium-depleted zones in Fe-Cr-Ni-C systems. *ISIJ International*, 43 (11): 1814-1820.
- 18- Stewart, J., & Williams, D. 1992. The initiation of pitting corrosion on austenitic stainless steel: on the role and importance of sulphide inclusions. *Corrosion Science*, 33: 457-474.
- 19- Wang, R., & Kido, M. 2006. Corrosion behavior of pure iron beneath a micro-droplet of sulfuric acid solution investigated by atomic force microscopy. *Scripta Materialia*, 55: 633-636.

- 20- Wang, R., & Kido, M. 2007. Corrosion behavior of pure iron by different droplet volume of sulfuric acid solution. *Materials Transactions*, 48: 1451.
- 21- Wasnik, D. N., Kain, V., Samajdar, I., Verlinden, B., & De, P. K. 2002. Resistance to sensitization and intergranular corrosion through extreme randomization of grain boundaries. *Acta Materialia*, 50: 4587-4601.
- 22- Wesley, S., Goyal, H., & Mishra, S. 2012. Corrosion behaviour of ferritic steel, austenitic steel and low carbon steel grades in sugarcane juice. *Journal of Materials*, 2: 9-22.
- 23- Wesley, S., Maurya, D., Goyal, H., & Negi, S. 2013. Experimental investigation of microbiologically influenced corrosion of selected steels in sugarcane juice environment. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29: 2353-2357.

## Failure analysis of the sulphur dioxide transporter pipe to the diffusion water producer tank in the sugar plant of Mashhad

Abbas Afrasiabi<sup>1\*</sup>, Mehrdad Zia Hoseinpoor<sup>2</sup>, Ziba Mirzakhazadeh<sup>3</sup>,  
Mohammad Ayyoubi Far<sup>4</sup>, Seyed Moosa Siadati<sup>5</sup>, Abdolmajid Maskooki<sup>6</sup>

1- Assistant Professor, Department of Food Machinery, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

\* Corresponding author (afrazyab@ut.ac.ir)

2- Department of Corrosion and Protection of Materials, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

3- Department of Corrosion and Protection of Materials, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

4- MSc. of Materials Engineering, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

5- MSc. of Materials Engineering, Khorasan Science & Technology Park, Mashhad, Iran

6- Associate Professor, Department of Food Processing, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

### Abstract

The diffusion process in the production of sugar is a determining process which affects the final quality of sugar. The pH of water which is used in this process is being controlled by adding sulphur dioxide gas to the water. In this research, the reason of corrosion of the sulphur dioxide gas transporter pipe to the diffusion water producer tank has been studied. In this way, the quantitative analysis of the base metal and weld zone, and X-ray diffraction analysis of the corrosion products has been applied. In addition, the corrosion rate of the base metal has been determined by the potentiodynamic polarisation technique at the temperatures between 50 to 70°C and also the DLEPR method has been used for the weld zone. The Results showed that the main reason of the corrosion of the pipe was the accumulation of the gas in the bottom of the pipe and the concentrated sulphur containing droplets which led to the localised corrosion of the pipe. Finally, changing the position of the branch pipes, shelving the pipe and changing the material are being suggested.

**Keywords:** Corrosion, Diffusion water, Failure analysis, SO<sub>2</sub>, Sugar plant