

# حذف گاز هیدروژن سولفید به وسیله تولید در جای فرآت (VI) در محلول قلیایی

اکبر رحیمی،

گروه مهندسی شیمی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

مجتبی نصر اصفهانی\*

گروه شیمی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

**چکیده:** پژوهش حاضر یک روش نوین برای حذف ترکیب‌های بودار در سامانه‌های اکسایش به روش گازشویی در محلول تولید در جای یون فرآت است که در آن گاز هیدروژن سولفید به سرعت در محلول قلیایی جذب شده و به سرعت به وسیله یون فرآت که به روش الکتروشیمیایی به طور درجا تولید شده است اکسید می‌شود. تولید یون فرآت در محلول قلیایی (NaOH) مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌ها نشان داد دمای بهینه تولید یون فرآت در غلظت ۱۴ مولار محلول الکترولیت، دمای ۵۰ درجه سلسیوس و افزایش ولتاژ در محدوده ۱ الی ۱۰ ولت باعث تولید بیشتر این یون می‌شود. در بررسی تجزیه خود به خودی یون فرآت مشخص شد در طول زمان ۱۰۰ دقیقه ۸۰٪ از یون آهن تولید شده تجزیه شده و افزایش دمای محلول از ۲۳ تا ۸۰ درجه سلسیوس منجر به تجزیه ۵۷٪ از یون فرآت می‌شود. در بخش دوم این پژوهش، از یون فرآت تولید شده به طور درجا برای حذف هیدروژن سولفید استفاده شد. تغییرهای دما و غلظت محلول یون آهن و میزان جریان گاز دارای هیدروژن سولفید از محلول بر بازده حذف هیدروژن سولفید بررسی شد و مشخص شد دمای بهینه در حذف این ماده در شرایط آزمایش ۵۰ درجه سلسیوس است. در افزایش غلظت یون آهن شش ظرفیتی از ۰/۶ تا ۱/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر یون آهن، ۹۸٪ هیدروژن سولفید از گاز دارای آن حذف شد. همچنین در جریان گاز عبوری از محلول به میزان ۱ لیتر بر دقیقه، ۹۵٪ هیدروژن سولفید موجود حذف شد.

**واژه‌های کلیدی:** الکتروشیمیایی، هیدروژن سولفید، حذف، یون فرآت، درجا

**KEYWORDS:** Electrochemistry, Hydrogen sulphide, Removal, Ferrate(VI) ion, In situ

## مقدمه

این ماده برای انسان و حیوانات مرگ‌آور است. قدرت بویایی انسان می‌تواند هیدروژن سولفید را حتی در غلظت‌های پایین تا ۰/۴ ppm حس کند. آستانه تحمل برای انسان از نظر سمی بودن ۱۰ ppm می‌باشد. بنابراین با افزایش غلظت گاز سلامتی انسان به خطر می‌افتد [۳]. حذف هیدروژن سولفید از جریان‌های سیال به دلایل گوناگونی مورد نیاز است. اگر یک جریان مایع به‌عنوان یک جریان فاضلاب منتشر شود حذف گوگرد از این جریان برای مقابله با انتشار گازهای گوگردی

هیدروژن سولفید در مکان‌های زیادی مانند آب چاه، دریاچه‌ها، منطقه‌های نفتی فاضلاب‌های بی‌هوازی و پساب‌های صنعتی یافت می‌شود. فعالیت‌های انسانی که در آن هیدروژن سولفید تولید می‌شود شامل صنایع کاغذ، واحدهای شیمیایی و صنایع نساجی می‌باشد [۱]. گاز پالایشگاهی گاز طبیعی و گاز حاصل از احتراق ذغال سنگ دارای گاز اسیدی هیدروژن سولفید می‌باشد [۲]. هیدروژن سولفید دارای بوی ناخوشایند است و حتی در مقدارهای کم سمی می‌باشد.

\*E-mail: m-nasresfahani@iaun.ac.ir

\* عهده‌دار مکاتبات

و (ب) انجام واکنش شیمیایی کاهش فرآت در جریان سیال محتوی ماده آلاینده مورد نظر و تصفیه آلاینده در جریان خروجی به وسیله فرآت. با استفاده از روش تولید درجای فرآت نه تنها در زمان و هزینه تصفیه آلاینده مورد نظر، بلکه در ذخیره سازی و هزینه های حمل و نقل این ماده نیز صرفه جویی می شود.

در چندین پژوهش از یون فرآت برای حذف گاز  $H_2S$  استفاده شده است [۱۹]. به تازگی در پژوهشی برای حذف همزمان  $NO$  و  $SO_2$  از گازی که به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می گیرد در فرآیند گازشویی مرطوب از فرآت استفاده شده است. نتیجه های این پژوهش نشان داد فرآت می تواند به عنوان یک ماده واکنش گر مؤثر برای تصفیه گازها مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. بر این اساس آلاینده های بودار مانند هیدروژن سولفید یا مرکاپتان های موجود در گازهای گوناگون، به آسانی در محلول قلیایی جذب شده و به سرعت به وسیله فرآت اکسید می شود. یکی از عیب های مهم یون فرآت ناپایداری آن می باشد که امکان تولید با خلوص بالا و حمل و نقل آن را تا محل مصرف محدود نموده است، بنابراین در این پژوهش تلاش شده است با رویکردی جدید گازهای محتوی آلاینده های بودار نظیر هیدروژن سولفید را در محلول غلیظ قلیایی که به طور درجا<sup>۱</sup> در آن یون فرآت توسط فرآیند الکتروشیمیایی تولید می شود، تصفیه نموده و حذف این آلاینده ها مورد بررسی قرار گیرد. به طور خلاصه هدف های این پژوهش عبارت است از: (الف) بررسی بازده تولید فرآت به روش الکتروشیمیایی (ب) بررسی میزان تخریب خود به خودی فرآت و (ج) بررسی بازده فرآیند حذف هیدروژن سولفید توسط فرآت به طور درجا.

## بخش تجربی

### مواد

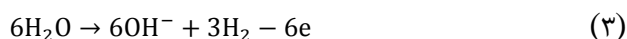
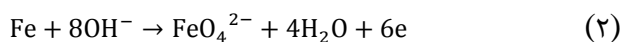
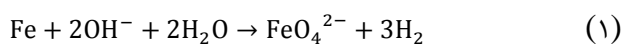
آند از جنس فولاد کربنی با ترکیب شیمیایی جدول ۱ به صورت ورق تخت و با اندازه های ۴ سانتی متر عرض و ۱۰ سانتی متر طول و کاتد از جنس فولاد زنگ نزن با ترکیب شیمیایی جدول ۲ به صورت ورق تخت و به اندازه آند جهت تولید فرآت به روش الکتروشیمیایی انتخاب شد. در کلیه آزمون ها از آب دوبار تقطیر تهیه شده از شرکت اطلس شیمی و سود (NaOH) صنعتی تولید داخل با خلوص ۹۸٪ ساخت شرکت نیروکلر در ساخت محلول الکترولیت استفاده شد.

### تولید آهن شش ظرفیتی به روش الکتروشیمیایی

سنتز الکتروشیمیایی فرآت در فاز محلول در یک بشر با حجم مؤثر ۱۰۰۰ میلی لیتر انجام شد. در این بشر فلز آهن معمولی به عنوان آند

که باعث آلودگی هوا می شود لازم و ضروری است. اگر این جریان مایع به عنوان سوخت سوزانده شود حذف گوگرد برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست لازم است و در صورتی که این جریان سیال در فرآیندهای گوناگون شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد حذف هیدروژن سولفید جهت جلوگیری از مسمومیت کاتالیست های مورد استفاده و خوردگی تجهیزات بسیار حیاتی می باشد [۴،۵]. فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی مرسوم که برای حذف هیدروژن سولفید مورد استفاده قرار می گیرد شامل جذب به روش کربن فعال، گازشویی، فرآیند کلاوس، احتراق، تصفیه در محیط اسیدی - قلیایی و حذف زیستی در دمای پایین می باشد [۶،۷]. هزینه های مربوط به نگهداری و فرآیند این روش ها بسیار بالاست و در بیش تر مواقع باعث ایجاد آلاینده های ثانویه می شود [۹]. در طی سال های گذشته اکسایش شیمیایی مورد توجه و پژوهش قرار گرفته است. از جمله اکسیدکننده هایی که برای حذف هیدروژن سولفید مورد استفاده قرار گرفته است می توان به هیدروژن پراکسید [۱۰] پرمنگنات پتاسیم [۱۱] و هیپوکلریت [۱۲] اشاره نمود. هر کدام از این اکسید کننده دارای مشکلاتی مانند هزینه بالا و یا تولید فرآورده های اکسایش آلاینده می باشند.

یون فرآت ( $FeO_4^{2-}$ ) یا یون آهن شش ظرفیتی به تازگی به عنوان یکی از قوی ترین مواد اکسیدکننده شناخته شده است [۱۳]. کاهش سریع آهن شش ظرفیتی یا فرآت به آهن سه ظرفیتی در عملیات اکسایش بدون ایجاد آلاینده های محیط زیست، باعث شده است از فرآت در بازه بزرگی از کاربردهای حذف آلاینده ها استفاده شود [۱۴،۱۵]. فرآت دارای قابلیت انتخاب پذیری چشمگیری برای واکنش شیمیایی سریع با ترکیب های گوگرددار مانند ترکیب های غیر ارگانیک و ارگانیک، در مدت زمان چند ثانیه تا چند دقیقه و تبدیل آن ها به فرآورده های بی خطر می باشد [۱۳،۱۶]. فرآت به روش های شیمیایی و الکتروشیمیایی قابل سنتز می باشد. فرآت به روش الکتروشیمیایی از روش الکترولیز محلول قلیایی قوی طبق واکنش (۱) سنتز می شود. واکنش (۲) در آند و واکنش (۳) در کاتد رخ می دهد [۱۷،۱۸].

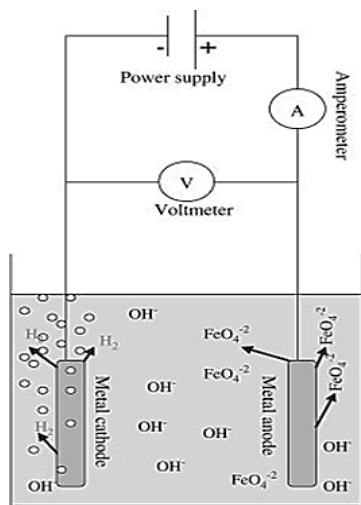


تولید الکتروشیمیایی فرآت دو مرحله تقسیم می شود: (الف) تولید فرآت در محلول غلیظ قلیایی سود با غلظت ۱ تا ۱۴ مولار

(۱) In-situ



شکل ۱- پایلوت طراحی شده جهت حذف گاز هیدروژن سولفید به روش درجا به وسیله یون فرات .



شکل ۲- شمای تولید یون فرات به روش الکتروشیمیایی از طریق الکترولیز محلول سود

DR/4000U به وسیله اندازه گیری جذب در طول موج ۵۱۰ نانومتر با توجه به غلظت محلول اندازه گیری شد [۲۲]. غلظت هیدروژن سولفید در ورودی و خروجی ظرف واکنش به وسیله گازسنج هیدروژن سولفید مدل CROWCON اندازه گیری شد.

### نتیجه ها و بحث

#### تولید یون فرات به روش الکتروشیمیایی

بررسی اختلاف پتانسیل در تولید یون فرات

یون فرات به روش الکتروشیمیایی با الکترولیز محلول قلیایی طبق واکنش کلی ۱ و واکنش در آند ۲ و واکنش در کاتد ۳ مطابق شکل شمایی ۳ تولید شد [۲۱].

جدول ۱- مشخصات ترکیب درصد فولاد کربنی

| Mo   | Ni   | Cr   | S       | P      | Mn   | Si   | C    | Fe | ترکیب |
|------|------|------|---------|--------|------|------|------|----|-------|
| <۰/۱ | <۰/۴ | <۰/۴ | <۰/۰۲۵۰ | <۰/۰۲۵ | ۰/۶۰ | ۰/۱۵ | ۰/۷۰ | ۹۸ | درصد  |
|      |      |      |         |        | ۰/۹۰ | ۰/۳۵ | ۰/۸۰ |    |       |

جدول ۲- مشخصات ترکیب درصد فولاد ضدزنگ

| Mo  | Ni  | Cr   | S      | P      | Mn   | Si    | C    | Fe | ترکیب |
|-----|-----|------|--------|--------|------|-------|------|----|-------|
| ۰/۱ | ۷/۳ | ۱۹/۳ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۰۲۷۶ | ۱/۸۱ | ۰/۳۹۰ | ۰/۰۶ | ۷۱ | درصد  |

و فلز آهن ضد زنگ به عنوان کاتد مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مطالعه های گذشته محلول آبی سود به عنوان الکترولیت از محلول های با غلظت همانند از پتاسیم هیدروکسید و یا لیتیم هیدروکسید لیتیم برای تولید فرات تحت شرایط الکتریکی همانند مؤثرتر می باشد [۲۱]. بنابراین محلول آبی سود در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. تولید فرات در دمای محیط با اعمال میزان ولتاژ ۱ تا ۱۰ ولت انجام شد. پیش از انجام عملیات الکترولیز، ورق آهن با کاغذ سمباده صیقلی و با آب مقطر شستشو داده شد. فرآیند الکترولیز در شرایط ولتاژ اعمال شده ثابت با دستگاه ولت سنج کنترل می شد.

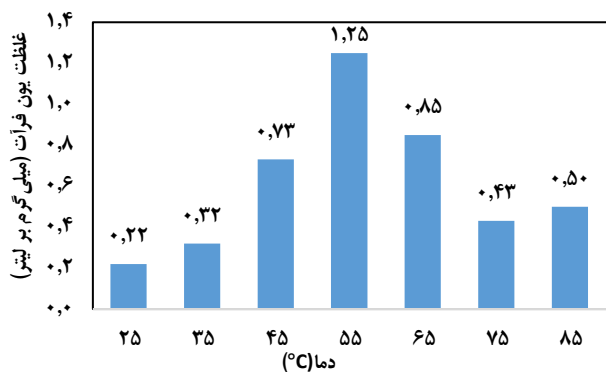
#### حذف هیدروژن سولفید از گاز حامل با عبور از محلول تولید شده فرات

به منظور بررسی بازده حذف گاز هیدروژن سولفید در تمام مرحله های آزمایش از گاز حامل د گاز هیدروژن سولفید گرید ۳/۵ مخلوط شده با گاز ازت در فشار ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و با غلظت ۱۰۰ ppm در یک کپسول ۲ لیتری استفاده شد. آزمایش حذف هیدروژن سولفید در سامانه گازشویی مرطوب انجام شد. این سامانه با دو الکترود کاتد و آند تجهیز و با محلول آبی سود پر شد و تولید همزمان فرات برای حذف هیدروژن سولفید انجام شد. حجم مؤثر در این فرایند ۷۰۰ میلی لیتر می باشد. گاز حامل هیدروژن سولفید پس از عبور از شیر تنظیم کننده فشار که بروی سیلندر فشار بالای گاز نصب شده بود از گازشور نصب شده بروی درب بشر به محلول فرات تزریق شد و جهت ایجاد تماس مؤثرتر حباب های گاز با محلول از یک همزن مغناطیسی استفاده شد. پایلوت طراحی شده آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

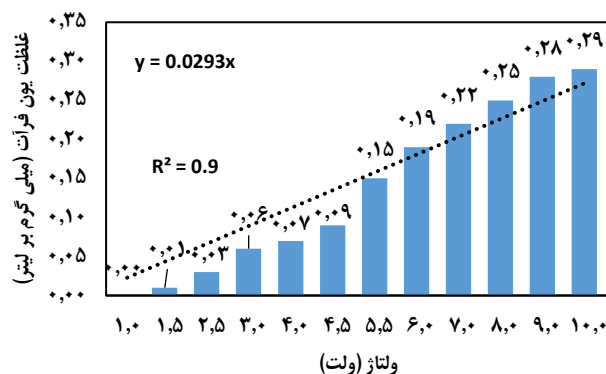
#### روش های اندازه گیری متغیرهای آزمایش

در این آزمایش غلظت فرات در محلول آبی با دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی - فرابنفش<sup>۱</sup> ساخت شرکت HACH

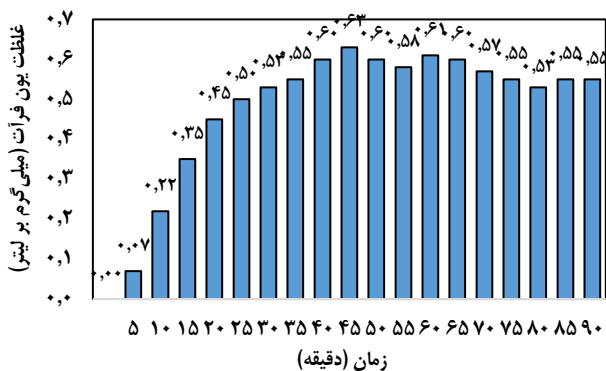
(۱) UV-Visible Spectrophotometer



شکل ۴- تغییرهای غلظت یون فرات تولید شده نسبت به دمای محیط واکنش به روش الکتروشیمیایی با محلول الکترولیت به غلظت ۱۴ مولار، زمان واکنش ۱۵ دقیقه در اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت.



شکل ۳- تغییرهای غلظت یون فرات تولید شده به روش الکتروشیمیایی نسبت به تغییرات اختلاف پتانسیل با محلول الکترولیت به غلظت ۱۴ مولار، زمان واکنش ۱۵ دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.



شکل ۵- تغییرهای غلظت یون فرات تولید شده نسبت به زمان واکنش به روش الکتروشیمیایی با محلول الکترولیت به غلظت ۱۴ مولار و اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.

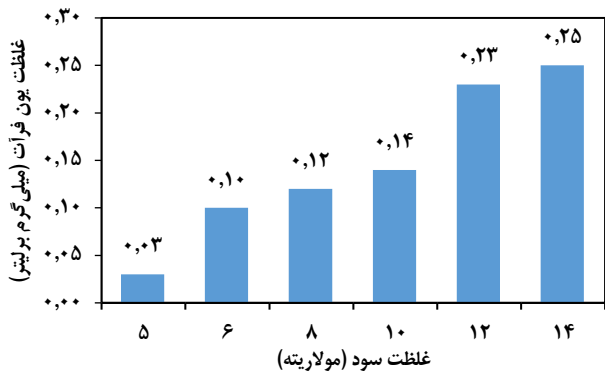
با توجه به این که افزایش دما باعث افزایش سرعت تجزیه یون فرات می شود افزایش دما به بالاتر از ۵۵ درجه سلسیوس باعث کاهش غلظت یون فرات می شود. با توجه به این نتیجه ها دمای بهینه تولید یون فرات، ۵۰ درجه سلسیوس انتخاب شد.

#### بررسی تأثیر زمان فرایند الکتروشیمیایی در تولید یون فرات

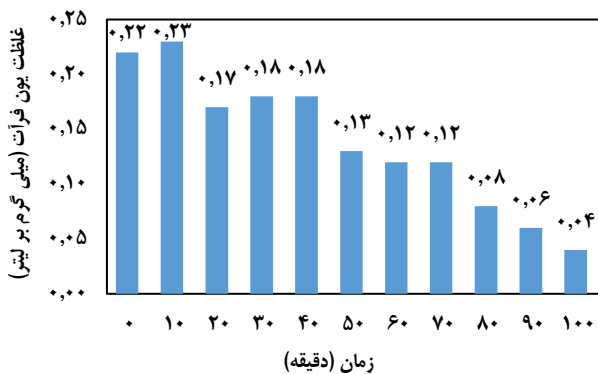
به منظور بررسی تأثیر زمان واکنش الکترولیز بر غلظت فرات تولید شده، زمان واکنش الکترولیز تا ۹۰ دقیقه افزایش یافت. شکل ۵ نتیجه تغییرهای غلظت یون فرات را نسبت به افزایش زمان واکنش الکترولیز نشان می دهد. مطابق با شکل ۵ با افزایش زمان واکنش الکترولیز غلظت یون فرات تولید شده نیز افزایش می یابد تا جایی که در ۴۵ دقیقه بیشترین میزان یون فرات تولید می شود و پس از این زمان تولید یون فرات تا زمان ۹۰ دقیقه تغییرهای چندانی نشان نمی دهد.

#### بررسی تأثیر دمای محیط واکنش در تولید یون فرات

به منظور بررسی تأثیر دما بر بازده تولید یون فرات آزمایش با محلول الکترولیت به غلظت ۱۴ مولار و واکنش الکتروشیمیایی به مدت زمان ۱۵ دقیقه و اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت در دماهای ۲۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس انجام شد. نتیجه تغییرهای غلظت یون فرات تولید شده نسبت به دمای محیط واکنش در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴ افزایش دما در محدوده ۲۵ الی ۵۵ درجه سلسیوس می تواند منجر به افزایش تولید یون فرات شود. در مقابل افزایش دما در محدوده ۵۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس باعث کاهش تولید یون فرات شده است.



شکل ۶- تغییرات غلظت یون فرات تولید شده به روش الکتروشیمیایی نسبت به غلظت محلول الکترولیت با زمان واکنش الکترولیز ۱۵ دقیقه و اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.



شکل ۷- تغییرات غلظت یون فرات پس از تولید نسبت به زمان در دمای محیط

از آن در محیط‌های صنعتی محدود می‌نماید. بنابراین تولید و استفاده از یون فرات در فرآیندهای تصفیه آلاینده‌ها به صورت درجا به شدت برای فرات توصیه می‌شود.

### حذف هیدروژن سولفید به وسیله یون فرات

#### تأثیر غلظت یون فرات در حذف هیدروژن سولفید

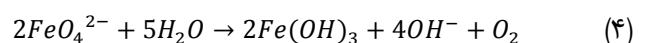
آهن شش ظرفیتی یا فرات می‌تواند در pH های گوناگون به صورت یون‌های  $FeO_4^{2-}$ ،  $HFeO_4^-$ ،  $H_2FeO_4$ ،  $H_3FeO_4^+$  و  $FeO_4^{2-}$  محلول وجود داشته باشد. در محلول غلیظ قلیایی، آهن شش ظرفیتی بیش تر به صورت یون‌های  $HFeO_4^-$  و  $FeO_4^{2-}$  دیده شده است [۲۴]. هیدروژن سولفید در محلول قلیایی به یون‌های  $H^+$  و  $HS^-$  یونیزه می‌شود. یون آهن شش ظرفیتی با  $HS^-$  واکنش داده و تبدیل به یون آهن پنج ظرفیت می‌شود. پژوهش‌ها انجام شده نشان داده است واکنش اکسایش یون آهن پنج ظرفیتی با ترکیب‌های گوگردار ۳ تا ۵ برابر سریع‌تر از یون آهن شش ظرفیتی انجام می‌گیرد [۲۵]. بنابراین در ادامه واکنش یون آهن پنج ظرفیتی، هیدروژن سولفید را اکسید

#### بررسی تأثیر غلظت محلول سود در تولید یون فرات

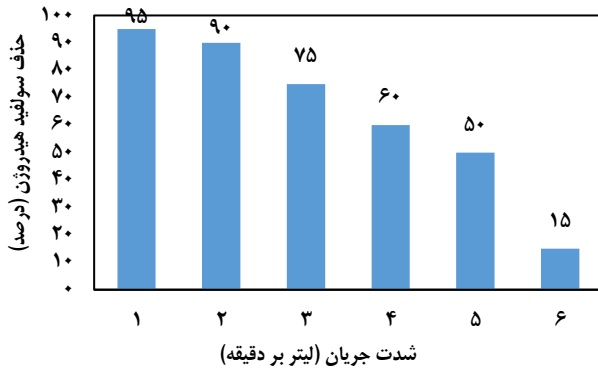
به منظور بررسی تأثیر غلظت محلول الکترولیت سود در غلظت یون فرات تولید شده، آزمایش تولید یون فرات در غلظت‌های گوناگون سود در محدوده ۵ الی ۱۴ مولار انجام شد. شکل ۶ نتیجه تغییرات غلظت یون فرات را با افزایش غلظت محلول الکترولیت سود نشان می‌دهد. مطابق با این شکل با افزایش غلظت سود تا ۱۴ مولار، تولید یون فرات افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. غلظت‌های کم محلول الکترولیت سود (۱ تا ۴ مولار) بر روی سطح آند لایه بنفش رنگ دیده شد ولی تغییر رنگ محسوس در توده محلول الکترولیت دیده نشد و این بیانگر این است که در غلظت‌های کم سود نرخ تجزیه خود به خودی یون آهن شش ظرفیتی از نرخ تولید آن بیش تر است. در غلظت‌های بالای ۵ مولار محلول سود یون آهن شش ظرفیتی با توجه به رنگ آن (بنفش تیره) سریعاً تشخیص داده شد و سرعت تولید آن با افزایش زمان به طور پیوسته افزایش یافت. در محلول غلیظ الکترولیت با توجه به حضور غلظت بالایی از یون هیدروکسید طبق واکنش (۳) تعادل به سمت راست و تولید یون فرات بیش تر جابجا می‌شود. از طرف دیگر در غلظت‌های بالای محلول الکترولیت (۱۴ مولار)، محلول الکترولیت بسیار گرانبه و هدایت الکتریکی و سرعت انتقال الکترون در سطح آند کاهش می‌یابد که در نتیجه آن سرعت افزایش تولید یون فرات کاهش یافته است.

#### بررسی تجزیه خودبه خودی فرات نسبت به زمان

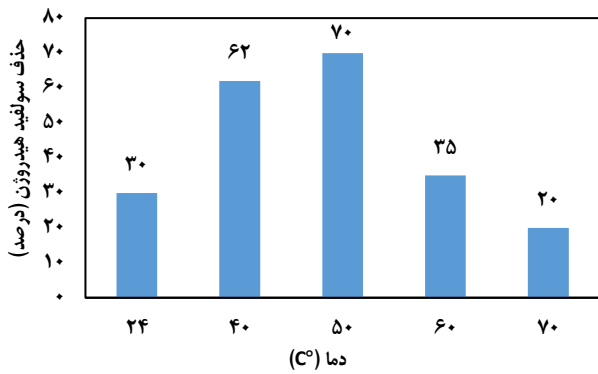
بررسی تجزیه خودبه خودی فرات در محلول آبی پدیده بسیار مهمی جهت استفاده از آن در فرآیندهای اکسایش می‌باشد. در حالت کلی در محلول‌های غلیظ الکترولیت سود یون فرات مطابق واکنش (۴) به صورت خودبه خودی تجزیه می‌شود:



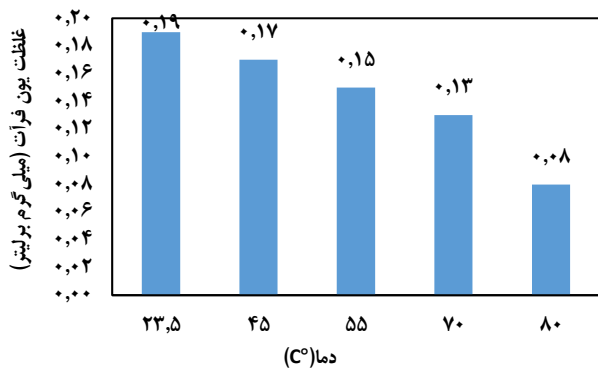
به این منظور تغییرات غلظت یون فرات در محلول نسبت به زمان در بازه های زمانی ۱۰ دقیقه یکبار در دمای محیط اندازه گیری شد. نتیجه‌های تغییرات غلظت یون فرات نسبت به زمان پس از تولید در شکل ۷ نشان داده شده است. نرخ تجزیه یون فرات به عامل‌هایی همچون غلظت اولیه یون فرات، غلظت سایر یون‌های موجود در آب، pH محلول و دمای محیط بستگی دارد [۲۳]. غلظت یون فرات تولید شده به طور متوسط بعد از ۱۰۰ دقیقه پس از تولید به حدود ۱۸ درصد مقدار اولیه کاهش می‌یابد. این نتیجه‌ها نشان دهنده سرعت تجزیه به نسبت بالای یون فرات تولید شده می‌باشد که استفاده



شکل ۹- تأثیر شدت جریان عبوری گاز دارای هیدروژن سولفید از محلول یون فرآت تولید شده به طور درجا بر بازده حذف هیدروژن سولفید



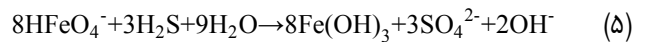
شکل ۱۰- تأثیر افزایش دمای محلول دارای یون فرآت تولید شده به طور درجا بر حذف هیدروژن سولفید از گاز دارای آن



شکل ۱۱- تأثیر افزایش دمای محلول دارای یون فرآت تولید شده به طور درجا بر غلظت یون فرآت باقیمانده

دارای یون فرآت، یون فرآت تجزیه شده و غلظت آن کاهش می‌یابد و به‌طور ویژه سرعت تجزیه یون فرآت در دماهای بیش‌تر از ۵۰ درجه سلسیوس شدت بیش‌تری یافته است که به‌طور مؤثری می‌تواند بازده حذف هیدروژن سولفید را در دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سلسیوس کاهش داد که با داده‌های شکل ۱۰ مطابقت دارد. در این مرحله از آزمایش نخست دمای محلول دارای یون فرآت افزایش داده شد و سپس گاز دارای هیدروژن سولفید از آن عبور داده شد.

کرده و فرآورده‌های واکنش را مطابق واکنش ۵ تولید می‌شود:



نتیجه‌های تأثیر غلظت یون فرآت بر واکنش حذف هیدروژن سولفید در شکل ۸ نشان داده شده است. بر این اساس گاز دارای هیدروژن سولفید در مدت زمان ۱۰ دقیقه از محلول الکترولیت دارای یون آهن شش ظرفیتی عبور داده شد و درصد حذف هیدروژن سولفید آن اندازه گیری شد. مطابق با شکل ۸ افزایش غلظت یون آهن شش ظرفیتی تولید شده باعث افزایش نرخ حذف هیدروژن سولفید از گاز دارای آن می‌شود.

#### بررسی تأثیر شدت جریان عبوری گاز دارای سولفید هیدروژن از محلول دارای یون فرآت

زمان تماس یون فرآت به عنوان عامل اکسید کننده و آلاینده سولفید هیدروژن نقش مهمی در بازده حذف هیدروژن سولفید دارد. نتیجه‌های تأثیر شدت جریان عبوری گاز دارای هیدروژن سولفید از محلول دارای یون فرآت بر واکنش حذف هیدروژن سولفید در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۹ در شدت جریان‌های عبوری کم گاز از محلول دارای یون فرآت، زمان ماند گاز در محلول افزایش یافته و جزء بیش‌تری از هیدروژن سولفید با یون آهن اکسید می‌شود.

#### بررسی تأثیر تغییر دمای محلول دارای یون فرآت بر حذف هیدروژن سولفید از گاز دارای هیدروژن سولفید

دما یکی از عامل‌های مؤثر بر سرعت واکنش‌های شیمیایی است. نتیجه‌های تأثیر تغییر دمای محلول دارای یون فرآت بر حذف هیدروژن سولفید از گاز دارای هیدروژن سولفید در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود افزایش دمای ظرف واکنش (محلول یون آهن شش ظرفیتی در تماس با گاز دارای هیدروژن سولفید) از ۲۳ تا ۵۰ درجه سلسیوس، باعث افزایش بازده حذف هیدروژن سولفید از گاز دارای آن می‌شود و افزایش دما از ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس سبب کاهش بازده حذف هیدروژن سولفید می‌شود. افزایش دما از ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس باعث کاهش حلالیت هیدروژن سولفید در محلول غلیظ قلیایی شده و در نتیجه زمان ماند آن را کاهش می‌دهد و به‌دنبال آن بازده حذف هیدروژن سولفید کاهش می‌یابد. از آنجا که افزایش دمای محلول دارای یون فرآت به‌طور متضاد می‌تواند باعث تجزیه یون فرآت شود و در نتیجه به‌طور وارون باعث کاهش بازده حذف هیدروژن سولفید از گاز حامل شود، تأثیر تغییر دما بر تجزیه یون فرآت مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های تأثیر افزایش دمای محلول دارای یون فرآت بر غلظت یون فرآت موجود در محلول در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۱ با افزایش دمای محلول



## نتیجه گیری

هیدروژن سولفید را آشکار می‌کند. گاز هیدروژن سولفید به همراه گاز حامل نیتروژن از محلول فرات که به طور درجا تولید شده بود به منظور حذف هیدروژن سولفید عبور داده شد. با افزایش غلظت یون فرات از ۰/۶ تا ۱/۶۵ میلی گرم بر لیتر در غلظت ۱۴ مولار محلول الکترولیت هیدروژن سولفید از گاز حامل به میزان ۹۵٪ حذف شد. دمای بهینه برای حذف هیدروژن سولفید در شرایط غلظت ثابت یون فرات دمای ۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. با کاهش شدت جریان عبوری گاز دارای هیدروژن سولفید از محلول دارای یون فرات از ۶ به ۱ لیتر بر دقیقه که باعث افزایش زمان ماند گاز در محلول می‌شود، حذف هیدروژن سولفید تا ۹۵٪ امکان پذیر شد.

در این پژوهش یون فرات به روش الکتروشیمیایی تولید و به منظور حذف هیدروژن سولفید از گاز حامل هیدروژن سولفید به صورت درجا مورد استفاده قرار گرفت. شرایط سنتز یون فرات با توجه به دستگاه-های مورد استفاده در تولید یون فرات بر اساس اختلاف پتانسیل اعمال شده، دمای محیط واکنش، زمان فرآیند الکترولیز و غلظت محلول الکترولیت بهینه سازی شد. شرایط بهینه برای تولید یون فرات مقدارهای اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت، دمای محیط واکنش ۵۵ درجه سلسیوس، زمان فرآیند الکترولیز ۱۵ دقیقه و غلظت محلول سود ۱۴ مولار به دست آمد. هر چند از نظر اقتصادی استفاده از غلظت ۱۲ مولار سود توجه بیشتری دارد. پایداری یون فرات تولید شده نسبت به زمان مورد بررسی قرار گرفت و به طور متوسط بعد از ۱۰۰ دقیقه پس از تولید به حدود ۱۸ درصد مقدار اولیه کاهش می‌یابد که نشان دهنده ناپایداری آن و اهمیت استفاده از روش درجا برای حذف

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

## مراجع

- [1] Chou S., "Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide", Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Georgia USA(2004).
- [2] Wiheeb A.D., Shamsudin I. K., Ahmad M. A., Murat M. N., Kim J., Othman M. R., *Present Technologies for Hydrogen Sulfide Removal from Gaseous Mixtures*, *Rev. Chem. Eng.*, **29(6)**: 449–470 (2013).
- [3] Chou C.H., Selene J., "World Health Organization & International Programme on Chemical Safety. Hydrogen Sulfide: Human Health Aspects". World Health Organization, Georgia USA(2003).
- [4] Pourzolfaghar H., Mohd Halim, S. I., Izhar S., *Review of H<sub>2</sub>S Sorbents at Low-Temperature Desulfurization of Biogas*, *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, **5(1)**: 22-28 (2014).
- [5] Sánchez J. M., Ruiz E., Otero J., *Selective Removal of Hydrogen Sulfide from Gaseous Streams Using a Zinc-Based Sorbent*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44(2)**: 241–249 (2005).
- [6] Ikeda H., Asaba H., Takeuchi Y., *Removal of H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SH and (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N from Air by use of Chemically Treated Activated Carbon*, *J. Chem. Eng. Jap.*, **21(1)**: 91-97 (1988).
- [7] Kasperczyk D., Urbaniec K., Barbusinski K., Rene E. R., Colmenares-Quintero R. F., *Application of a Compact Trickle-Bed Bioreactor for the Removal of Odor and Volatile Organic Compounds Emitted from a Wastewater Treatment Plant*, *Journal of Environmental Management*, **236**: 413-419 (2019).
- [8] Gabriel D., Deshusses M. A., *Retrofitting Existing Chemical Scrubbers to Biotrickling Filters for H<sub>2</sub>S Emission Control*, *PNAS*, **100(11)**: 6308–6312 (2003).
- [9] Chu H., Lee W., Horng K., Tseng T.K., *The Catalytic Incineration of (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S and its Mixture with CH<sub>3</sub>SH Over a Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst*, *Journal of Hazardous Materials*, **82(1)**: 43-53 (2001).

- [10] Do J., Chen C.-P., [In Situ Oxidative Degradation of Formaldehyde with Electrogenerated Hydrogen Peroxide](#), *J. Electrochem. Soc.* **140(6)**:1632 (1993)
- [11] Kao C.M., Huang K. D., Wang J. Y., Chen T. Y., Chien H. Y., [Application of Potassium Permanganate as an Oxidant for in Situ Oxidation of Trichloroethylene-Contaminated Groundwater: A Laboratory and Kinetics Study](#), *J. Hazard. Mater.*, **153(3)**: 919–927(2008).
- [12] Saravanathamizhan R., Soloman P.A., Balasubramanian N., Ahmed-Basha C., [Optimization of In-Situ Electro-Oxidation of Formaldehyde by the Response Surface Method](#), *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, **22(2)**: 213-220 (2008).
- [13] Sharma V. K., [Oxidation of Inorganic Contaminants by Ferrates \(VI, V, and IV\)-Kinetics and Mechanisms: A Review](#), *J. Environ. Manage.*, **92(4)**: 1051–1073 (2011).
- [14] Jiang Y., Goodwill J.E., Tobiason J.E., Reckhow D.A., [Effect of Different Solutes, Natural Organic Matter, and Particulate Fe\(III\) on Ferrate\(VI\) Decomposition in Aqueous Solutions](#), *Environ. Sci. Technol.*, **49(5)**: 2841–2848 (2015).
- [15] Han Q., Wang H., Dong W., Liu T., Yin Y., Fan H., [Degradation of Bisphenol A by Ferrate\(VI\) Oxidation: Kinetics, Products and Toxicity Assessment](#), *Chem. Eng. J.*, **262**: 34–40 (2015).
- [16] Sharma V.K., Luther G.W., Millero F.J., [Mechanisms of Oxidation of Organosulfur Compounds by Ferrate\(VI\)](#), *Chemosphere*, **82(8)**: 1083–1089 (2011).
- [17] Stanford C., Jiang J.-Q., Alsheyab M., [Electrochemical Production of Ferrate \(Iron VI\): Application to the Wastewater Treatment on a Laboratory Scale and Comparison with Iron \(III\) Coagulant](#), *Water, Air, Soil Pollut.*, **209(1–4)**: 483–488 (2010).
- [18] Licht S., Yu X., [Electrochemical Alkaline Fe\(VI\) Water Purification and Remediation](#), *Environ. Sci. Technol.*, **39(20)**: 8071–8076 (2005).
- [19] Yan X., Sun J., Kenjiathan A., Dai X., Ni B.-J., Yuan Z., [Rapid and Strong Biocidal Effect of Ferrate on Sulfidogenic and Methanogenic Sewer Biofilms](#), *Water Research*, **169**: 115208 (2020).
- [20] Xia D., He C., Zhu L., Huang Y., Dong H., Su M., Abou Asi M., Bian D., [A Novel Wet-Scrubbing Process Using Fe\(vi\) for Simultaneous Removal of SO<sub>2</sub> and NO](#), *J. Environ. Monit.*, **13(4)**: 864–870 (2011).
- [21] Yu X., Licht S., [Advances in Electrochemical Fe\(VI\) Synthesis and Analysis](#), *J. Appl. Electrochem.*, **38(6)**: 731–742 (2008).
- [22] Luo Z., Strouse M., Jiang J.-Q., Sharma V.K., [Methodologies for the Analytical Determination of Ferrate\(VI\): A Review](#), *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, **46(5)**: 453–460 (2011).
- [23] Mácová Z., Bouzek K., Híveš J., Sharma V.K., Terryn R.T., Baum J.C., [Research Progress in the Electrochemical Synthesis of Ferrate\(VI\)](#), *Electrochim. Acta*, **54(10)**: 2673–2683 (2009).
- [24] Sharma V.K., [Oxidation of Nitrogen-Containing Pollutants by Novel Ferrate\(VI\) Technology: A Review](#), *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, **45(6)**: 645–667 (2010).
- [25] Sharma V.K., Cabelli D., [Reduction of Oxyiron\(V\) by Sulfite and Thiosulfate in Aqueous Solution](#), *J. Phys. Chem. A*, **113(31)**: 8901–8906 (2009).