

# ارتقای عملکردی سامانه ترکیبی فنتون و الکتروشیمیایی (فرد- فنتون) برای تثبیت بهینه لجن مازاد بیولوژیکی و مصرف بهینه انرژی

گاگیک بدلیانس قلی‌کندی<sup>۱\*</sup>، مینا نیلی اردکانی<sup>۲</sup>

۱. دانشیار مهندسی محیط‌زیست، آب و فاضلاب، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی- مهندسی شهید عباسپور

۲. کارشناس ارشد مهندسی عمران، آب و فاضلاب، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی- مهندسی شهید عباسپور.

nili\_1388@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۵/۱۹

تاریخ وصول مقاله: ۹۳/۱۲/۲۷

## چکیده

در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی و ارتقای عملکردی سامانه فرد- فنتون برای تثبیت لجن مازاد بیولوژیکی (بررسی موردی: لجن تصفیه خانه فاضلاب شهید محلاتی)، عوامل مؤثر شامل جنس الکترودهای قابل استفاده در سامانه (استیل، گرافیت و آهن)، غلظت بار آلی ورودی، فاصله بین الکترودها، تزریق مرحله‌ای مواد شیمیایی، غلظت سولفات سدیم و نسبت سطح الکترودها به حجم سامانه بررسی شد. همچنین، با توجه به اهمیت مصرف انرژی الکتریکی در سامانه‌های الکتروشیمیایی و تلاش برای کمینه کردن آن، تحلیل و تخمین انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه مذکور انجام شد. مطابق نتایج بررسی‌ها، بهترین جنس الکترودها، گرافیت، فاصله بهینه بین الکترودها ۱/۵ سانتی متر، تعداد مراحل بهینه معرف فنتون برابر ۵ مرحله، غلظت بهینه سولفات سدیم برای ایجاد هدایت الکتریکی برابر ۰/۱۱۱ مول بر لیتر و نسبت بهینه سطح الکترودها به حجم راکتور برابر ۱۰۰ سانتی متر مربع بر لیتر است. تحت شرایط بهینه تعیین شده، بازده حذف مواد جامد معلق فرار (VSS) برابر ۸۶ درصد با مصرف انرژی الکتریکی برابر با ۱/۶ کیلووات ساعت به ازای حذف هر کیلوگرم VSS است که در مقایسه با فرایند هضم هوازی لجن (یکی از فرایندهای متعارف تثبیت لجن) از بازدهی تقریباً دو برابر و مصرف انرژی الکتریکی تقریباً نصف برخوردار است.

## کلیدواژه

ارتقای عملکردی، تثبیت لجن مازاد بیولوژیکی، سامانه ترکیبی فنتون و الکتروشیمیایی، مصرف انرژی.

## ۱. سرآغاز

فنتون و الکتروشیمیایی که سامانه فرد- فنتون نیز نامیده می‌شود، از کارآمدی لازم برای حذف VSS<sup>۱</sup> به میزان حداکثر ۸۱ درصد و سرعت بالای تجزیه مواد آلی (حدوداً ۳ برابر روش فنتون) برخوردار است (بدلیانس قلی‌کندی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Gholikandi, et al., 2014). در این سامانه، واکنش‌های (۱) (واکنش فنتون) و (۲) مهم‌ترین و مؤثرترین واکنش‌هایی هستند که به وقوع می‌پیوندند و در نتیجه، عامل اصلی اکسیداسیون مواد آلی یعنی رادیکال

روش لجن فعال از جمله گزینه‌های معمول استفاده شده برای تصفیه فاضلاب به شمار می‌رود. با توجه به حجم شایان توجه لجن مازاد بیولوژیکی حاصل در این سامانه‌ها و هزینه‌های چشمگیر مرتبط با تصفیه و دفع بهداشتی لجن مذکور، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص راهکارهای نوین کارآمد انجام شده و همچنان در حال انجام است. گروه تحقیق در بررسی گذشته نشان دادند که سامانه ترکیبی

## ۲. مواد و روش بررسی

بررسی‌های پایلوتی در مقیاس آزمایشگاهی در زمستان ۱۳۹۲ و بهار ۱۳۹۳ انجام شد. نمونه‌های لجن مازاد تحت بررسی از محل لجن برگشتی در تصفیه‌خانه شهید محلاتی (سامانه لجن فعال با هوادهی گسترده) برداشت شد. مشخصات لجن مزبور در جدول ۱ ارائه شده است. راکتور آزمایشگاهی استوانه‌ای از جنس پلکسی‌گلاس به حجم ۰/۹ لیتر حاوی دو آند و دو کاتد است (شکل ۱). راهبری پایلوت با استفاده از الکترودهای از جنس آهن، فولاد ضدزنگ و گرافیت به ابعاد ۱×۶۰×۱۴۰ میلی‌متر، به عمق قرارگیری ۱۰۰ میلی‌متر در لجن و با سطح تماس هر الکتروده با لجن برابر ۱۰۰×۶۰ میلی‌متر انجام گرفت. فاصله بین الکترودها برای تعیین فاصله بهینه، متغیر در نظر گرفته شد. اختلاط در راکتور با استفاده از موتور الکتریکی (zheng, zs-ri, 6(V) DC, 366 rpm) انجام شد. به دلیل تأثیر منفی همزن مغناطیسی در یون آهن و عملکرد کاتالیزوری آن در فرایند فنتون، از استفاده از آن صرف‌نظر شد. برای تنظیم آمپراژ سامانه از منبع تغذیه دیجیتال (Mps, DC-3003D, 0-3 (A), 0-30 (V)) و از مواد مصرفی شامل سولفات آهن و پراکسید هیدروژن (معرف فنتون)، اسید سولفوریک و سود (به منظور تنظیم pH)، سولفات سدیم (به منظور ایجاد هدایت الکتریکی) و کاغذ صافی ساخت شرکت واتمن (شماره ۴۲) استفاده شد.

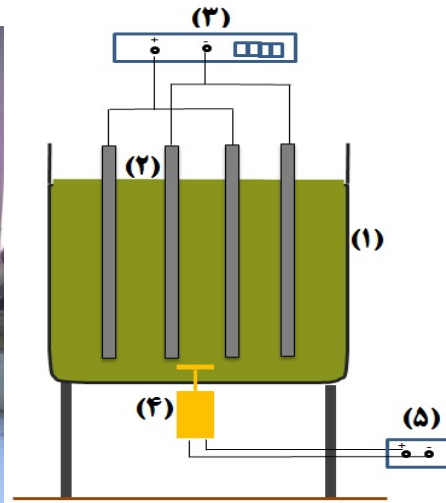
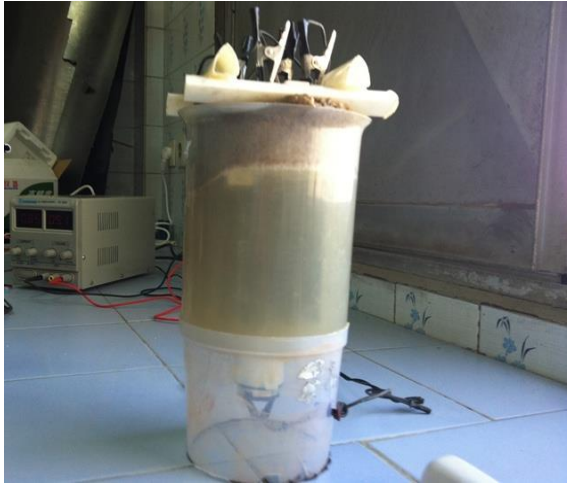
جدول ۱. مشخصات کیفی لجن مازاد بیولوژیکی تصفیه‌خانه فاضلاب شهید محلاتی

MLSS <sup>۲</sup> (R.A.S <sup>۲</sup> )	(g/L)	۱۱±۱/۲
MLVSS <sup>۴</sup> (R.A.S)	(g/L)	۹/۵±۰/۸
pH		۶/۵۳-۷/۳۳
Temperature	(°C)	۱۳/۸-۱۵/۶
<sup>۵</sup> COD	(mg/L)	۶۰۵۱-۱۱۱۶۴
VSS	(mg/L)	۳۵۳۶-۷۷۸۲
<sup>۶</sup> VS	(mg/L)	۴۰۸۶-۸۳۸۲
<sup>۷</sup> TSS	(mg/L)	۴۰۸۸-۸۴۳۲
TSS/VSS		۰/۸۶-۰/۹۲

هیدروکسیل حاصل می‌شود ( Brillas, et al., 2009; Oturan and Aaron, 2014; Sirés, et al., 2014; Gholikandi, 2015a; Gholikandi, 2015b).



نظر به اینکه تا امروز نتایج بررسی‌های بسیار محدودی در خصوص به کارگیری سامانه اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی فرد- فنتون برای تصفیه لجن ارائه شده‌اند، در این تحقیق برای نخستین بار بهینه‌سازی ساختاری و ارتقای عملکردی سامانه فرد- فنتون مبتنی بر نتایج بررسی پیشین (بهترین نسبت غلظت آهن به پراکسید هیدروژن برابر ۰/۵۸، مقدار بهینه pH برابر ۳/۱، مدت زمان بهینه ماند ۴ ساعت با غلظت ۱۲۵۵ میلی‌گرم بر لیتر و چگالی جریان ۲/۷ میلی‌آمپر در هر سانتی‌متر مربع الکتروده در یک لیتر) از طریق مطالعه عوامل مؤثر شامل جنس الکترودهای استفاده‌شده (فولاد ضدزنگ، گرافیت و آهن)، غلظت بار آلی ورودی، فاصله بین الکترودها، تزریق مرحله‌ای مواد شیمیایی، غلظت سولفات سدیم (عامل ایجاد هدایت الکتریکی در محیط) و نسبت سطح الکترودها به حجم سامانه، همچنین تحلیل و تخمین مصرف انرژی در سامانه مذکور و مقایسه آن با سامانه هضم هوازی لجن انجام شد.

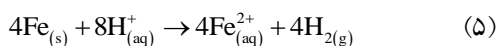


شکل ۱. طرح‌واره سامانه آزمایشگاهی فرد- فنتون (نیلی و بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۹۳)

(۱. راکتور فرد- فنتون؛ ۲. الکترودها (آند و کاتد)؛ ۳. منبع تغذیه متغیر؛ ۴. همزن- موتور الکتریکی و ۵. منبع تغذیه با خروجی ثابت)

ترتیب برابر با ۷۵، ۷۰ و ۵۶ درصد است.

آزمایش‌ها با افزودن غلظت یون آهن دوظرفیتی به میزان ۹۰۹/۴۴ میلی‌گرم بر لیتر انجام شدند تا نسبت بهینه آهن به پراکسید هیدروژن برابر با ۰/۵۸ (بدلیانس قلی‌کندی و همکاران، ۱۳۹۳) حاصل شود. استفاده از الکتروآهن طبق واکنش‌های ۳، ۴ و ۵ موجب آزاد شدن آهن دوظرفیتی در محیط (Daneshvar, et al., 2007; Modirshahla, et al., 2008) و در نتیجه، افزایش بیش از حد بهینه غلظت موجود کاتالیزور آهن حاصل می‌شود.



این امر مطابق واکنش ۶، مصرف رادیکال هیدروکسیل (Nidheesh and Gandhimathi, 2014) و در نتیجه کاهش کارآمدی سامانه را در پی دارد. الکتروآهن گرافیت در واکنش‌های شیمیایی سامانه شرکت نمی‌کند. بنابراین، نسبت بهینه آهن به پراکسید هیدروژن برقرار می‌ماند و حداکثر کارآمدی سامانه حاصل می‌شود. الکتروآهن ضدزنگ نیز که متشکل از عناصر آهن، کربن و کروم است، طبیعتاً بازدهی بین الکتروآهن و گرافیت دارد.

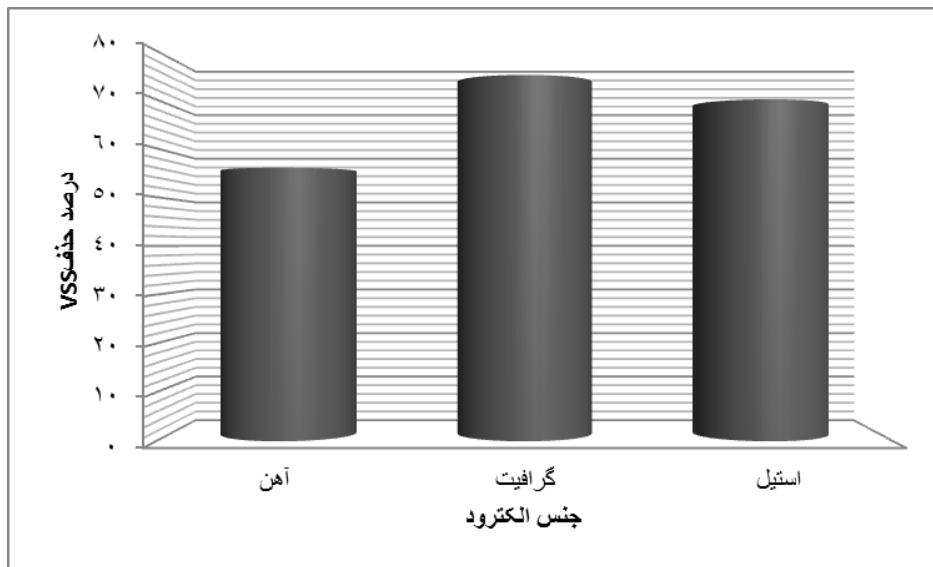
### ۳. نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌ها

پس از تنظیم مقدار pH لجن با استفاده از اسید سولفوریک و سود، نمونه اولیه به حجم ۵۰ سی‌سی برای اندازه‌گیری VSS اولیه برداشت و پس از آن سولفات آهن و پراکسید هیدروژن به سامانه تزریق شد. الکترودها پس از اتصال به منبع تغذیه درون سامانه قرار گرفتند و شدت جریان تنظیم شد. پس از ۲۴۰ دقیقه، نمونه ثانویه به حجم ۵۰ سی‌سی برای اندازه‌گیری VSS خروجی از عمق ۱۰۰ میلی‌متری پایلوت آزمایشگاهی برداشت شد. همچنین، ولتاژ طی انجام آزمایش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها مطابق روش استاندارد متد (APHA, 2012) صورت گرفتند و هر مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای کنترل خطای ممکن ۳ بار تکرار شد.

### ۴. نتایج

#### ۴.۱. جنس الکتروآهن

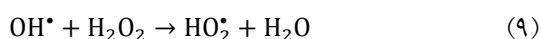
در این بررسی از سه نوع الکتروآهن از جنس‌های آهن، فولاد ضدزنگ و گرافیت استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کارآمدی حذف VSS در سامانه آزمایشی با استفاده از الکترودهای گرافیت، فولاد ضدزنگ و آهن به



شکل ۲. نمودار نتایج آزمایش رابطه بین میزان حذف VSS و جنس الکترودهای استفاده شده در سامانه

#### ۲.۴. غلظت بار آلی ورودی

رادیکال هیدروکسیل تولیدی علاوه بر اکسید کردن ترکیبات آلی (R) طبق معادله ۷، در واکنش‌های دیگری همچون ۶، ۸، ۹ و ۱۰ نیز شرکت می‌کند (Nidheesh and Gandhimathi, 2014; Muruganandham and Swaminathan, 2004) و در نتیجه، غلظت آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، تمامی غلظت رادیکال هیدروکسیل تولیدی صرف اکسیداسیون ترکیبات آلی موجود نمی‌شود و بخشی از آن صرف اکسید کردن دیگر یون‌های موجود در محیط از قبیل آهن دو ظرفیتی، سولفات، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروپروکسیل می‌شود.



با افزایش غلظت بار آلی ورودی، نسبت غلظت بار آلی به رادیکال هیدروکسیل افزایش می‌یابد، در حالی که نسبت غلظت یون‌های آهن دو ظرفیتی در واکنش ۶، سولفات در واکنش ۸، پراکسید هیدروژن در واکنش ۹ و رادیکال

( $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58, pH=3$ ) شدت جریان: ۶۵۰ میلی آمپر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی گرم بر لیتر، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی متر مربع بر لیتر) مبنای انتخاب گرافیت، آهن و فولاد ضد زنگ در وهله اول سادگی دسترسی و هزینه‌های بهره‌برداری نسبتاً کم آن‌ها بود. در انتخاب جنس الکترودها، علاوه بر کارآمدی حذف VSS به عوامل دیگری همچون امکان ایجاد آلودگی در محیط واکنش و بروز خوردگی نیز توجه شد.

بر خلاف آهن و فولاد ضد زنگ، گرافیت عنصری سازگار با محیط زیست است و به دلیل خستگی بودن آن و شرکت نداشتن در واکنش، باقیمانده‌ای در محیط واکنش از خود بر جای نمی‌گذارد. الکترود فولاد ضد زنگ در مقایسه با دو الکترود دیگر گران تر است. الکترود آهن در محیط اسیدی، پس از مدت زمان کوتاهی دچار خوردگی شدید می‌شود. در مقابل، الکترود گرافیت مشکل خوردگی ندارد، اما بسیار شکننده است. با توجه به موارد بالا، گرافیت به منزله جنس بهینه الکترود قابل استفاده در سامانه تعیین شد.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت بار آلی ورودی، کارآمدی سامانه در خصوص حذف VSS افزایش می‌یابد. شیب روند افزایشی مزبور بسیار ملایم است و در بازه غلظت بار آلی ورودی برابر با ۳۵۰۰-۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، کارآمدی سامانه از ۷۷ به ۸۱ درصد می‌رسد.

هیدروپروکسید در واکنش ۱۰ به رادیکال هیدروکسیل تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند. بنابراین، طبق روابط استوکیومتری، با افزایش غلظت ترکیبات آلی ورودی به سامانه تحت بررسی، غلظت بیشتر رادیکال هیدروکسیل برای اکسیدکردن ترکیبات آلی (واکنش ۷) مصرف می‌شود و در نتیجه کارآمدی سامانه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که



شکل ۳. نمودار نتایج آزمایش رابطه بین کارآمدی حذف VSS و غلظت مواد آلی ورودی به سامانه

شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترود: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر

می‌شوند (واکنش ۲) و کارآمدی سامانه افزایش می‌یابد.

$$P = RI^2 \quad (11)$$

در معادله ۱۱، P: توان، R: مقاومت و I: شدت جریان است.

اما وقتی این فاصله از مقدار معینی بیشتر شود (۱/۵ سانتی‌متر)، افزایش توان اعمالی از یک سو موجب برگشت واکنش ۱۲ و ترسیب سولفات آهن و از سوی دیگر موجب افزایش جاذبه الکترواستاتیکی و انعقاد الکتریکی می‌شود. در نتیجه هر دو پدیده مذکور، غلظت یون آهن دوظرفیتی در محیط کاهش می‌یابد (Daneshvar, et al., 2007). طبق واکنش فنتون ۱ از تولید رادیکال هیدروکسیل

#### ۳.۴. فاصله بین الکترودها

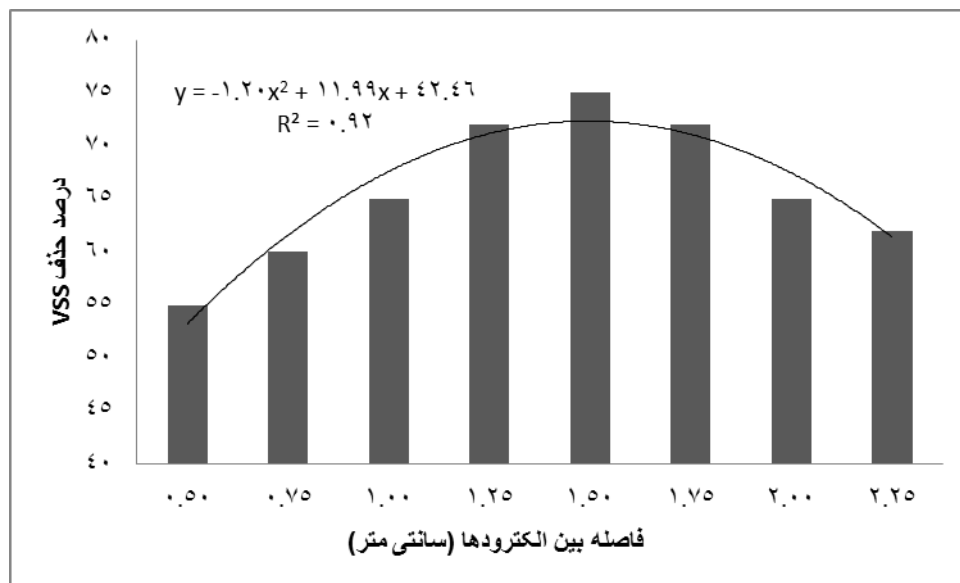
همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، تأثیر فاصله بین الکترودها در کارآمدی سامانه معادله‌ای درجه دوم است؛ با افزایش فاصله از ۰/۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر، کارآمدی سامانه از ۵۵ به ۷۵ درصد افزایش می‌یابد و در فاصله ۱/۵ سانتی‌متر حداکثر کارآمدی حاصل می‌شود. با افزایش فاصله بیش از این مقدار کارآمدی سامانه کاهش می‌یابد و به ۶۲ درصد می‌رسد. با افزایش فاصله بین الکترودها مقاومت سامانه و با توجه به ثابت بودن شدت جریان (۶۵۰ میلی‌آمپر)، توان اعمالی به سامانه طبق معادله ۱۱ افزایش می‌یابد. در نتیجه مقادیر بیشتر آهن سه ظرفیتی احیا

آهن دوظرفیتی و پراکسید هیدروژن برای تولید رادیکال هیدروکسیل (واکنش فنتون ۱) و از سوی دیگر تعداد برخورد رادیکال هیدروکسیل تولیدی و ترکیبات آلی برای اکسیدشدن (واکنش ۷) و کارآمدی سامانه کاهش می‌یابد.

برای اکسیداسیون ترکیبات آلی نیز کاسته می‌شود و در نتیجه کارآمدی سامانه کاهش می‌یابد.



از طرفی با افزایش فاصله و مقاومت سامانه، حرکت یون‌های تولیدی کندتر می‌شود و از یک سو تعداد برخورد



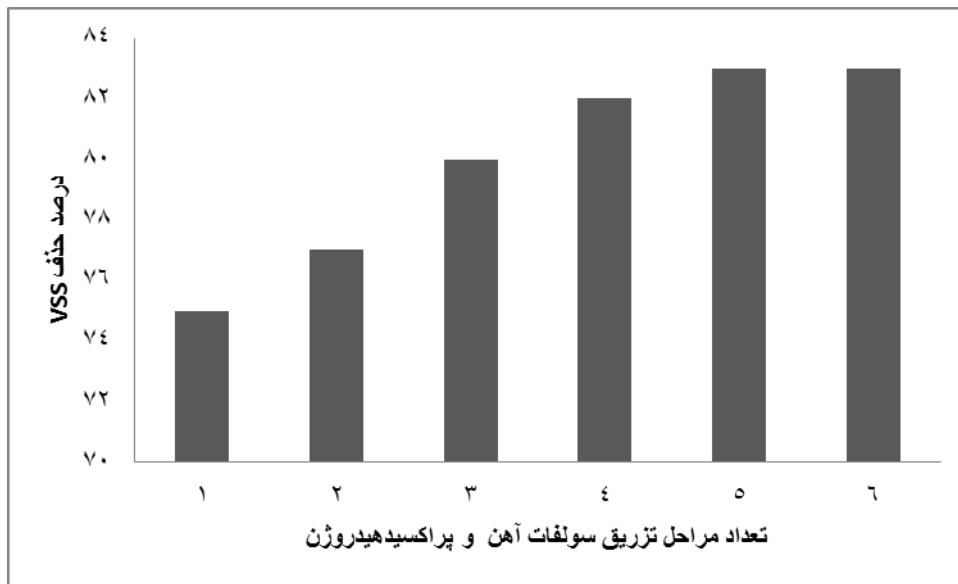
شکل ۴. منحنی نتایج آزمایش مربوط به رابطه بین میزان حذف VSS و فاصله بین الکترودهای استفاده‌شده در سامانه

( $\text{pH}=3$ ,  $\frac{\text{Fe}^{2+}}{\text{H}_2\text{O}_2}=0.58$ , شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر)

مرحله کمتر است)، در حالی که نسبت غلظت یون‌های آهن دوظرفیتی در واکنش ۶، سولفات در واکنش ۸، پراکسید هیدروژن در واکنش ۹ و رادیکال هیدروپروکسیل در واکنش ۱۰ به رادیکال هیدروکسیل، در هر دو حالت یکسان است. بنابراین، طبق روابط استوکیومتری، غلظت رادیکال هیدروکسیل بیشتری برای اکسیدکردن ترکیبات آلی در واکنش ۷ در حالت تزریق چندمرحله‌ای مصرف می‌شود و در نتیجه کارآمدی سامانه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مراحل تزریق از ۱ به ۵ مرحله، بازده حذف افزایش می‌یابد و از ۷۵ به ۸۳ درصد می‌رسد، سپس ثابت می‌ماند.

#### ۴.۴. تزریق مرحله‌ای معرف فنتون

همان‌گونه که در بخش ۲.۴ نیز توضیح داده شد، همه غلظت رادیکال هیدروکسیل تولیدی صرف اکسیداسیون ترکیبات آلی موجود نشده است و بخشی از آن صرف اکسیداسیون دیگر یون‌های موجود در محیط از قبیل آهن دوظرفیتی، سولفات، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروپروکسیل می‌شود. در تزریق چندمرحله‌ای، نسبت غلظت بار آلی به رادیکال هیدروکسیل در مرحله اول بیشتر از این نسبت در حالت تزریق تک‌مرحله‌ای است (غلظت بار آلی در هر دو حالت یکسان است، اما غلظت رادیکال هیدروکسیل در حالت تزریق چندمرحله‌ای به دلیل تقسیم شدن معرف های فنتون به مراحل مختلف، در هر

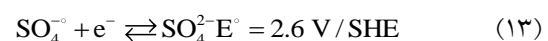


شکل ۵. منحنی نتایج آزمایش رابطه بین میزان حذف VSS و تزریق مرحله‌ای مواد شیمیایی

شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، مدت‌زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی‌متر، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر)  $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58, pH=3$

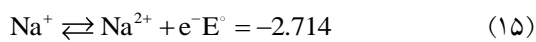
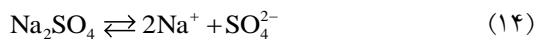
#### ۵.۴. هدایت الکتریکی الکترولیت

هدایت الکتریکی، قابلیت حرکت یون‌هاست که به سرعت انتقال الکترون کمک می‌کنند. الکترولیت‌ها هدایت الکتریکی را بهبود می‌بخشند و استفاده از آن‌ها به خصوص در محلول‌هایی که هدایت خوبی ندارند ضروری است (Jiang and Zhang, 2007). همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، با افزودن سولفات سدیم تا مقدار ۰/۱۱۱ مول بر لیتر، کارآمدی حذف VSS افزایش می‌یابد و به ۸۸ درصد می‌رسد، اما با افزایش بیشتر سولفات سدیم، کاهش چشمگیری در کارآمدی حذف سامانه مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به ترتیب زیر توجیه کرد: پس از افزودن پراکسید هیدروژن به سامانه، با اضافه کردن سولفات آهن، واکنش‌های ۱۲، ۱، ۸ و ۱۳ به ترتیب انجام می‌شوند و با اعمال جریان الکتریکی، واکنش ۲ با  $E^{\circ}=0.771 \text{ V/SHE}$  به وقوع می‌پیوندد (Nidheesh, et al., 2013; Zhou, et al., 2007).



حال با افزودن سولفات سدیم، به ترتیب واکنش‌های

۱۴، ۱۵، ۸ و ۱۳ انجام می‌شوند.



پتانسیل‌های احیای ذکر شده برای شرایط استاندارد (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت یون‌ها برابر با ۱ مول بر لیتر و فشار ۱ اتمسفر) صادق‌اند. در غیر این صورت باید برای محاسبه پتانسیل احیا از معادله نرنست<sup>۹</sup> (معادله ۱۶) استفاده کرد.

$$E = E^{\circ} + 2.3 \frac{RT}{n.f} \log \frac{[a_{ox}]}{[a_{red}]} \quad (16)$$

که در آن:  $E^{\circ}$  = پتانسیل احیای استاندارد؛  $R$  = ثابت جهانی گازها برابر با ۱/۹۸۷ کالری بر کیلومول؛  $T$  = دمای مطلق بر حسب کلوین؛  $f$  = ثابت فارادی برابر با ۲۳۰۶۱ کالری بر ولت؛  $n$  = تعداد الکترون مبادله شده؛  $[a_{ox}]$  = غلظت اجزای اکسیدشونده و  $[a_{red}]$  = غلظت اجزای احیاشونده بر حسب مول بر لیتر است.

با جایگذاری مقادیر  $R$ ،  $T$  و  $f$  در معادله ۱۶ و ساده‌سازی آن، معادله ۱۷ به دست می‌آید.

استفاده از معادله ۱۷ و پتانسیل احیای کلی محلول نیز به کمک معادله ۱۸ محاسبه شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

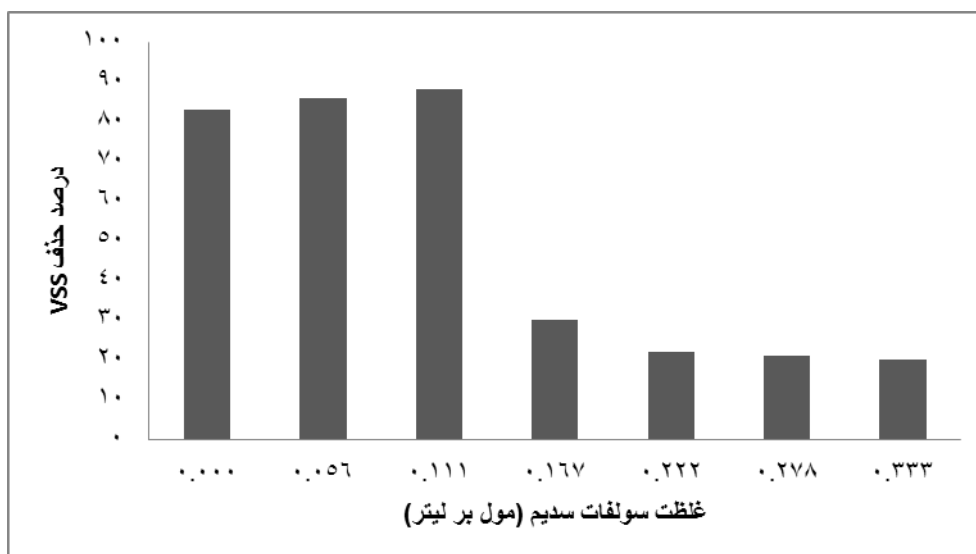
$$E = E_{[a_{ox}]} - E_{[a_{red}]} \quad (18)$$

$$E = E^{\circ} + \frac{0.05916}{n} \log \frac{[a_{ox}]}{[a_{red}]} \quad (17)$$

نظر به اینکه غلظت یون‌های موجود برابر ۱ مولار نیست، پتانسیل‌های احیای یون‌های سدیم، سولفات و آهن موجود در محیط در غلظت‌های مختلف سولفات سدیم با

جدول ۲. پتانسیل احیای محلول در غلظت‌های مختلف سولفات سدیم

پتانسیل احیای کلی محلول (V/SHE)	پتانسیل احیای یون آهن (V/SHE)	پتانسیل احیای یون سولفات (V/SHE)	پتانسیل احیای یون سدیم (V/SHE)	سولفات سدیم اضافه شده (مول بر لیتر)
۶/۰۹۱	۰/۷۷۷	۲/۶۰۶	-۲/۷۰۸	۰/۰۵۶
۶/۰۹۶	۰/۷۸۲	۲/۶۱۱	-۲/۷۰۳	۰/۱۱۱
۶/۰۹۸	۰/۷۸۴	۲/۶۱۳	-۲/۷۰۱	۰/۱۶۷
۶/۰۹۹	۰/۷۸۵	۲/۶۱۴	-۲/۷۰۰	۰/۲۲۲
۶/۱۰۰	۰/۷۸۶	۲/۶۱۵	-۲/۶۹۹	۰/۲۷۸
۶/۱۰۰	۰/۷۸۶	۲/۶۱۵	-۲/۶۹۹	۰/۳۳۳



شکل ۶. منحنی نتایج آزمایش رابطه بین میزان حذف VSS و غلظت سولفات سدیم

شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۵، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر)  $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58$ , pH=3)

می‌آید و موجب افزایش سرعت احیای آهن سه‌ظرفیتی به دوظرفیتی می‌شود. بنابراین، کارآمدی سامانه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت سولفات سدیم روند افزایشی

با توجه به جدول بالا درمی‌یابیم که با افزودن میزان اولیه ۰/۰۵۶ مولار سولفات سدیم، پتانسیل احیای موجود در محلول افزایش می‌یابد و به کمک نیروی الکتروشیمیایی

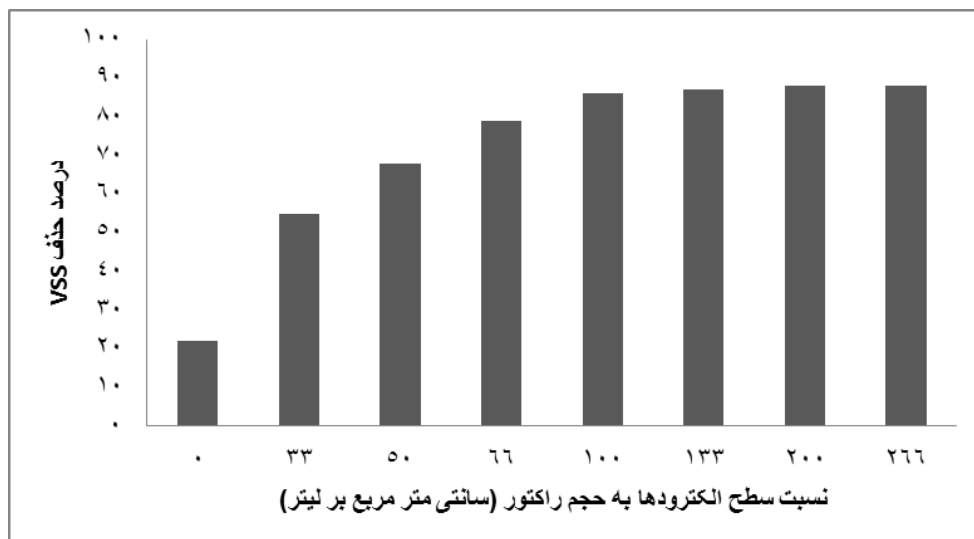


سانتی‌متر مربع بر لیتر بررسی شد. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است در نبود الکتروود، جریان الکتریکی بر سامانه اعمال نمی‌شود و در نتیجه فرایند فنتون، فرایند حاکم بر سامانه است. تحت این شرایط، کارآمدی بسیار پایین (۲۲ درصد) سامانه قابل مشاهده است. پس از قرارگیری الکتروودها در سامانه و برقراری جریان الکتریکی (فرایند فرد- فنتون) کارآمدی سامانه به ۵۵ درصد افزایش می‌یابد. در بازه ۰-۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر با افزایش سطح الکتروود، کارآمدی سامانه با شیب تندی از ۲۲ به ۷۹ درصد افزایش می‌یابد در حالی که در بازه ۶۶-۱۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر افزایش کارآمدی سامانه تنها برابر ۷ درصد و در بازه ۱۰۰-۲۰۰ تنها برابر ۲ درصد است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح الکتروود به بیش از ۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر تأثیری در افزایش کارآمدی سامانه ندارد. افزایش سطح الکتروود با مقاومت سامانه رابطه عکس و با شدت جریان رابطه مستقیم دارد. طبق معادله ۱۱ توان اعمالی با مقاومت و مجذور شدت جریان رابطه مستقیم دارد.

پتانسیل احیا به تدریج کم تا در نهایت ثابت می‌شود. هنگامی که غلظت سولفات سدیم از حد معینی (۰/۱۱۱ مول بر لیتر) فراتر رود، غلظت یون سولفات در محیط بالاتر می‌رود و از یک سو با یون آهن دوظرفیتی که موجب انجام واکنش فنتون (۱) می‌شود واکنش می‌دهد و رسوب می‌کند و موجب کاهش غلظت آن می‌شود و از یک سو طبق واکنش ۸ با رادیکال هیدروکسیل که عامل اصلی اکسندگی ترکیبات آلی در محیط است واکنش می‌دهد و آنیون رادیکال سولفات که قدرت اکسندگی کمتری نسبت به رادیکال هیدروکسیل دارد (Brillas, et al., 2009) را تولید می‌کند. به عبارت دیگر، قدرت اکسندگی محیط را کاهش می‌دهد. این در حالی است که افزایش پتانسیل احیای محلول با افزایش غلظت سولفات سدیم به بیش از ۰/۱۱۱ مول بر لیتر بسیار ناچیز است و تأثیر منفی کاهش غلظت یون آهن دوظرفیتی و قدرت اکسندگی محیط در تأثیر مثبت افزایش پتانسیل احیای محلول غلبه می‌کند و سبب کاهش کارآمدی سامانه می‌شود.

#### ۶.۴. نسبت سطح الکتروودها به حجم سامانه

تأثیر این فاکتور در بازه حذف VSS در بازه ۰-۲۶۶



شکل ۷. منحنی نتایج آزمایش رابطه بین میزان حذف VSS و نسبت سطح الکتروودها به حجم راکتور

( $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58$ , pH=3) چگالی جریان: ۲/۷ میلی‌آمپر در هر سانتی‌متر مربع الکتروود در یک لیتر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکتروودها: گرافیت، فاصله بین الکتروودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۵، غلظت سولفات سدیم: ۰/۱۱۱ مول بر لیتر)

## ۱.۷.۴. مدت زمان ماند

آزمایش‌ها در مدت زمان ماند ۲۴۰ دقیقه انجام شدند. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، ولتاژ در ۹۰ دقیقه اول انجام آزمایش با شیب تندی رو به کاهش است، سپس از دقیقه ۹۰ تا ۲۱۰، شیب روند کاهشی ملایم‌تر و در نهایت در ۳۰ دقیقه انتهایی آزمایش ثابت شده است. مقاومت محلول همواره افت پتانسیل ایجاد می‌کند که نقش چشمگیری در ولتاژ سلول دارد (Daneshvar, et al., 2007). با گذشت زمان غلظت ترکیبات آلی کاهش می‌یابد، در نتیجه مقاومت سامانه، افت پتانسیل و ولتاژ اعمالی از سوی منبع تغذیه برای اعمال شدت جریان ثابت (۶۵۰ میلی آمپر) کاهش می‌یابد. تغییرات در شیب روند کاهشی ولتاژ نیز نشان‌دهنده این مطلب است که عمده غلظت ترکیبات آلی در ۹۰ دقیقه اول آزمایش کاهش می‌یابد، بنابراین این شیب در ابتدای نمودار تند است. با توجه به کاهش عمده غلظت ترکیبات آلی پس از ۹۰ دقیقه اول آزمایش، تعداد برخورد رادیکال هیدروکسیل با ترکیبات آلی کاهش می‌یابد و شیب ملایم‌تر می‌شود تا جایی که پس از ۲۱۰ دقیقه از شروع آزمایش، غلظت ترکیبات آلی تغییری نمی‌کند و در نتیجه ولتاژ ثابت می‌شود. از آنجا که انرژی الکتریکی مصرفی طبق معادله ۱۹ علاوه بر ولتاژ به زمان نیز وابسته است، با افزایش مدت زمان ماند، مصرف انرژی الکتریکی، مطابق شکل ۸، در حال افزایش است (Ghosh, et al., 2011).

(۱۹)

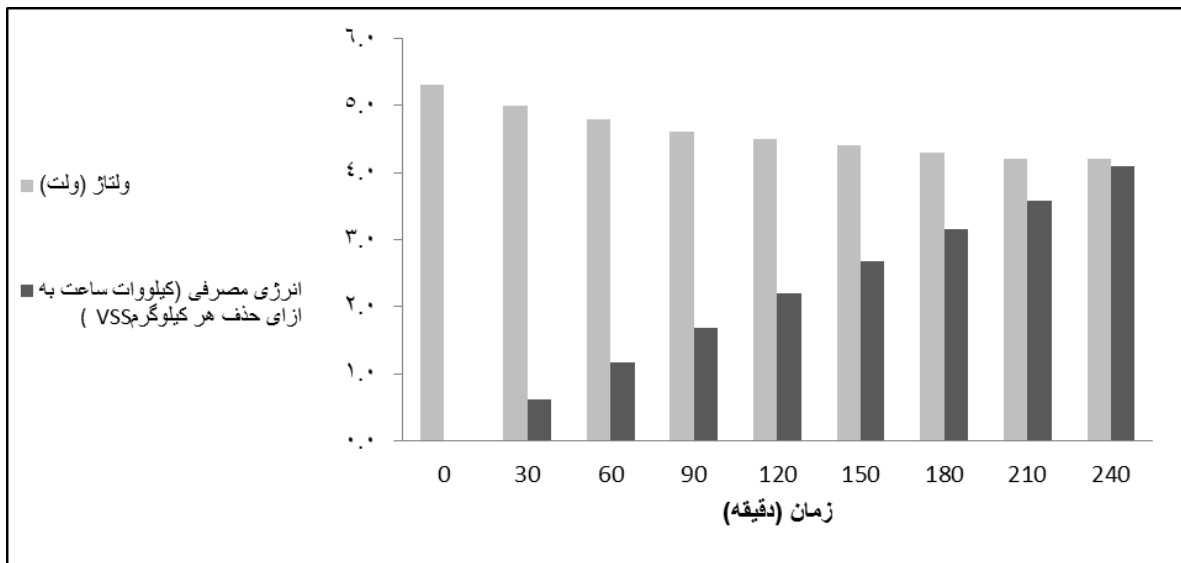
$$UED \left( \frac{\text{kwh}}{\text{kgVSS}_{\text{removal}}} \right) = \frac{V \cdot I \cdot t}{VSS_{\text{in}} \cdot \eta} \cdot \frac{1000}{100}$$

در معادله ۱۹، UED: انرژی موردنیاز بر حسب کیلووات ساعت به ازای حذف یک کیلوگرم VSS؛ V: ولتاژ بر حسب ولت؛ I: شدت جریان بر حسب آمپر؛ t: مدت زمان ماند بر حسب ساعت؛ V: حجم راکتور بر حسب لیتر؛ VSS<sub>in</sub>: مواد جامد معلق ورودی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و : بازده حذف بر حسب درصد است.

تأثیر افزایش شدت جریان در تأثیر کاهش مقاومت غلبه می‌کند و توان اعمالی افزایش می‌یابد. با افزایش توان، غلظت آهن سه‌ظرفیتی احیاشده (واکنش ۲) و در نتیجه کارآمدی سامانه افزایش می‌یابد. افزایش شیب کارآمدی سامانه نیز به این دلیل روی می‌دهد که در صورت مساحت کم الکتروود، افزایش غلظت یون آهن سه‌ظرفیتی که به واسطه افزایش توان در مدت زمان ماند ثابت احیا می‌شود بسیار زیاد است و در نتیجه افزایش اندک توان روی کارآمدی سامانه تأثیر زیادی دارد و شیب نمودار به تندی رو به افزایش می‌گذارد. افزایش توان اعمالی به سامانه در سطح الکتروود برابر با ۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر به دلیل احیای همه غلظت یون آهن سه‌ظرفیتی تأثیری در بازده حذف VSS و پس از آن افزایش سطح تأثیری در کارآمدی سامانه ندارد.

## ۷.۴. روند مصرف انرژی الکتریکی

از آنجا که مصرف انرژی الکتریکی یکی از موارد مهم و قابل توجه در مباحث الکتروشیمی است و همواره سعی در کمینه‌شدن آن است، لازم است به آن توجه شود. در ادامه پارامترهای مؤثر در مصرف انرژی الکتریکی شامل مدت زمان ماند، غلظت ترکیبات آلی ورودی، فاصله بین الکتروودها، غلظت سولفات سدیم (برای ایجاد هدایت الکتریکی در محلول) و نسبت سطح الکتروودها به حجم راکتور را بررسی و تحلیل و مقدار انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه فرد-فتون را با سیستم هوازی هضم لجن مقایسه می‌کنیم. شایان یادآوری است که جز در خصوص پارامتر «غلظت بار آلی ورودی» که به‌وضوح توضیح داده شده است، در موارد دیگر روند مصرف انرژی الکتریکی به ازای حذف یک کیلوگرم VSS و مصرف انرژی الکتریکی کل یکسان و منظور از انرژی الکتریکی مصرفی، انرژی الکتریکی مصرفی به ازای حذف یک کیلوگرم VSS است.



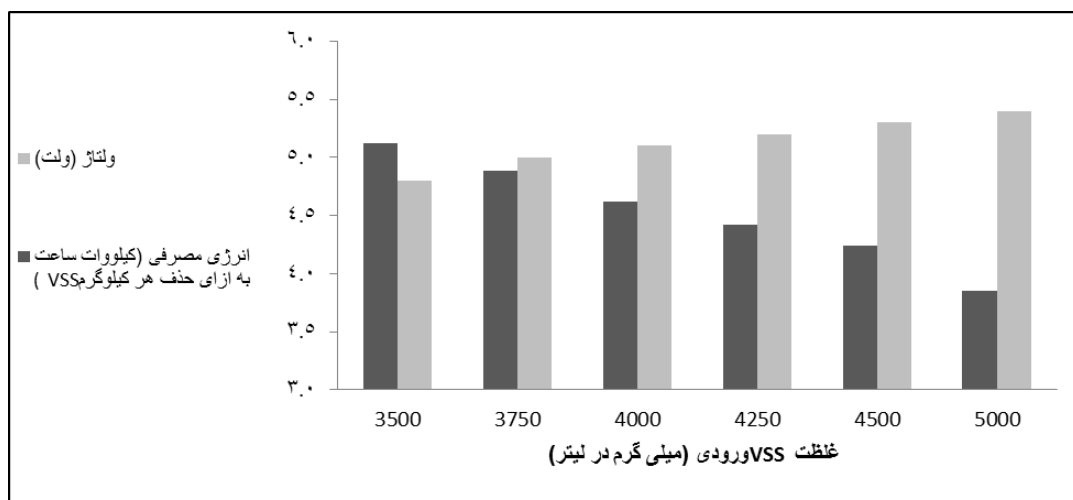
شکل ۸. منحنی تغییرات ولتاژ و انرژی الکتریکی مصرفی در مدت زمان ۴ ساعت

( $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58$ , pH=3) شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر

علاوه بر ولتاژ به غلظت VSS ورودی و بازده حذف نیز مربوط است و با افزایش غلظت VSS ورودی، بازده حذف نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳)، انرژی الکتریکی به ازای حذف ۱ کیلوگرم VSS کاهش می‌یابد (شکل ۹) (در حالی که انرژی الکتریکی مصرفی کل افزایش می‌یابد).

#### ۲.۷.۴. غلظت بار آلی ورودی

هرچه غلظت بار آلی ورودی بیشتر باشد، مقاومت سامانه افزایش می‌یابد. در نتیجه افت پتانسیل و ولتاژ اعمالی از سوی منبع تغذیه برای اعمال شدت جریان ثابت (۶۵۰ میلی‌آمپر) افزایش می‌یابد. از آنجا که طبق معادله ۱۹ انرژی الکتریکی مصرفی به ازای حذف ۱ کیلوگرم VSS ورودی،



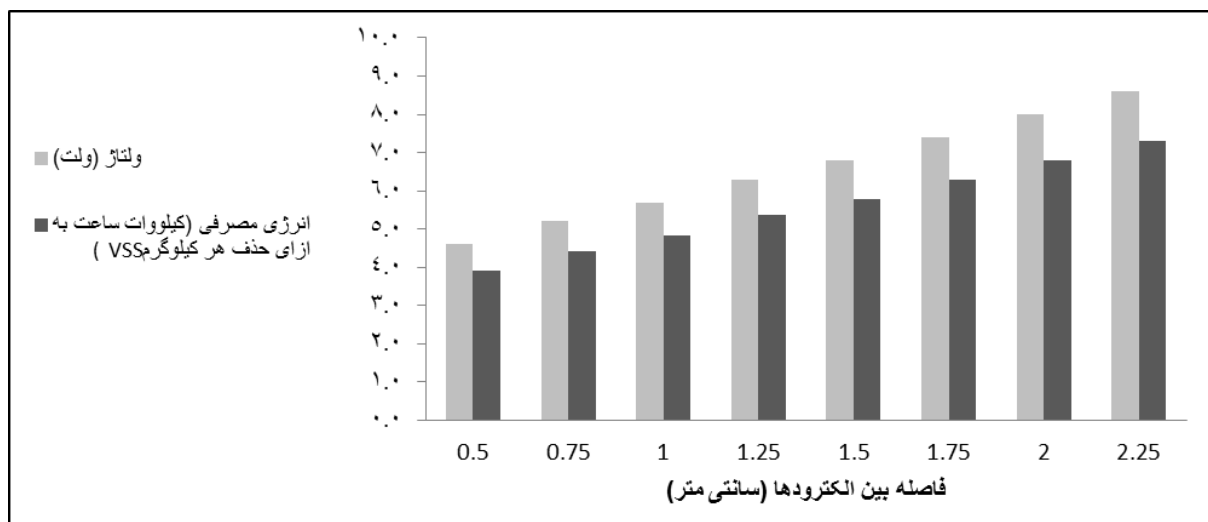
شکل ۹. منحنی رابطه ولتاژ و انرژی الکتریکی مصرفی با غلظت VSS ورودی

( $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2}=0.58$ , pH=3) شدت جریان: ۶۵۰ میلی‌آمپر، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی‌متر مربع بر لیتر

### ۳.۷.۴. فاصله بین الکترودها

تغذیه برای اعمال شدت جریان ثابت (۶۵۰ میلی آمپر) و انرژی الکتریکی مصرفی نیز طبق معادله ۱۹ افزایش می یابد (شکل ۱۰).

هنگامی که فاصله بین الکترودها افزایش می یابد، یون های تولیدی کندتر حرکت می کنند و مقاومت سامانه افزایش می یابد. در نتیجه افت پتانسیل و ولتاژ اعمالی از سوی منبع



شکل ۱۰. منحنی رابطه انرژی الکتریکی مصرفی با فاصله بین الکترودها

شدت جریان: ۶۵۰ میلی آمپر، مدت زمان ماند: ۲۴۰ دقیقه، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی گرم بر لیتر، جنس الکترودها: گرافیت، فاصله بین الکترودها: ۱/۵ سانتی متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰ مول بر لیتر، نسبت سطح الکترودها به حجم راکتور: ۲۶۶ سانتی متر مربع بر لیتر

کیلووات ساعت به ازای حذف ۱ کیلوگرم VSS کاهش می یابد). به عبارت دیگر، ایجاد هدایت الکتریکی در کاهش مصرف انرژی الکتریکی تأثیر چشمگیری می گذارد، اما افزایش آن تأثیر کمی روی کاهش مصرف انرژی دارد.

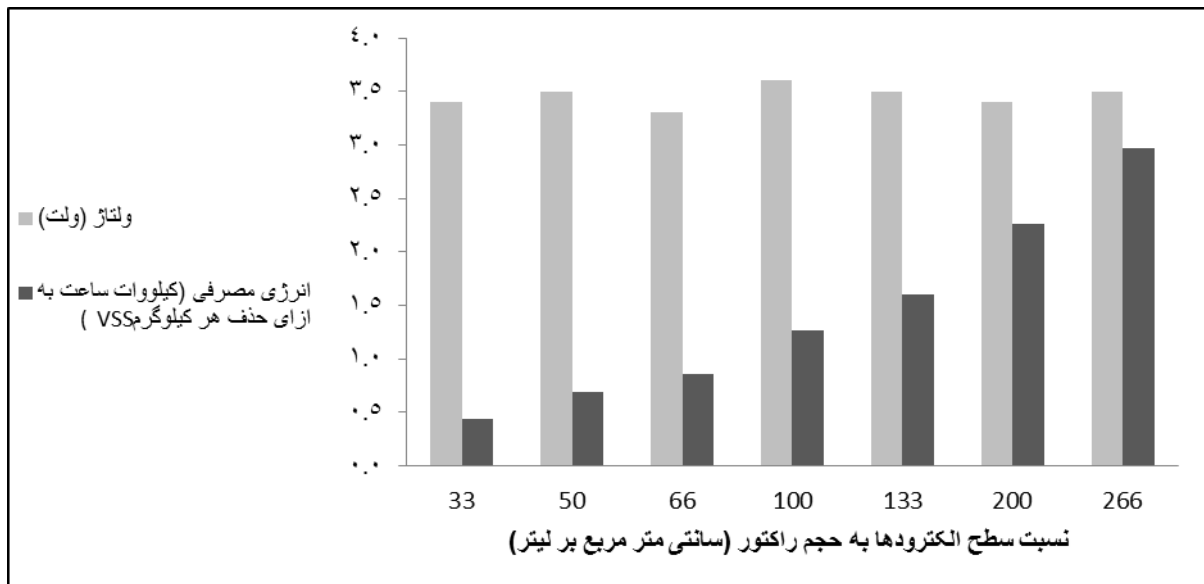
### ۴.۷.۴. هدایت الکتریکی

با افزایش غلظت سولفات سدیم در محلول، هدایت الکتریکی محلول افزایش می یابد، حرکت یون های تولیدی تسهیل می شود و مقاومت سامانه کاهش می یابد. در نتیجه افت پتانسیل و ولتاژ اعمالی از سوی منبع تغذیه برای اعمال شدت جریان ثابت (۶۵۰ میلی آمپر)، همچنین انرژی الکتریکی مصرفی طبق معادله ۱۹ کاهش می یابد (شکل ۱۱). افزایش شیب در ابتدای نمودار به این معنی است که وارد شدن سولفات سدیم به سامانه و ایجاد هدایت الکتریکی به میزان زیادی مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می دهد (انرژی الکتریکی مصرفی ۱/۶۳ کیلووات ساعت به ازای حذف ۱ کیلوگرم VSS کاهش می یابد)، اما پس از آن، شیب کاهش مصرف انرژی با افزایش سولفات سدیم به دلیل وجود هدایت الکتریکی که از قبل در محیط ایجاد شده، کمتر می شود (انرژی الکتریکی مصرفی ۰/۳۶

### ۵.۷.۴. سطح مقطع الکترودها

با افزایش سطح الکترودها، مقاومت سامانه کاهش و شدت جریان اعمالی به سامانه افزایش می یابد (چگالی جریان در آزمایش ها ثابت و برابر ۲/۷ میلی آمپر در هر سانتی متر مربع الکترودها در هر لیتر در نظر گرفته شد). بنابراین، طبق معادله ۲۰ ولتاژ اعمالی به سامانه ثابت است و انرژی الکتریکی مصرفی با افزایش شدت جریان، طبق معادله ۱۹ افزایش می یابد (شکل ۱۲).

$$V = R * I \quad (20)$$



شکل ۱۲. منحنی رابطه انرژی الکتریکی مصرفی با نسبت سطح الکتروود به حجم راکتور

چگالی جریان:  $\frac{Fe^{2+}}{H_2O_2} = 0.58$ , pH=3, ۲/۷ میلی‌آمپر در هر سانتی‌متر مربع الکتروود در یک لیتر، غلظت پراکسید هیدروژن: ۱۵۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، جنس الکتروودها: گرافیت، فاصله بین الکتروودها: ۱/۵ سانتی‌متر، تعداد مراحل تزریق معرف: ۱، غلظت سولفات سدیم: ۰/۱۱۱ مول بر لیتر

لجن است (Wang, et al., 2008) که بازده حذف VSS آن برابر ۳۵-۵۰ درصد است و انرژی الکتریکی مصرفی آن برابر ۲/۵-۳ کیلووات ساعت به ازای حذف هر کیلوگرم VSS است (Ghazy, et al., 2011; Metcalf, 2003). بدین ترتیب می‌توان گفت بازده حذف VSS در سامانه فرد-فتون حدوداً دو برابر فرایند متعارف هضم هوازی لجن است و در عین حال، انرژی الکتریکی مصرفی در این سامانه تقریباً نصف فرایند هضم هوازی لجن است.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در ادامه تحقیقات پیشین که در نتیجه آن، سامانه فرد-فتون به منزله یکی از روش‌های مؤثر و نوین تثبیت لجن معرفی شد، برای نخستین بار بهینه‌سازی ساختاری و ارتقای عملکردی سامانه مذکور با توجه ویژه به مصرف بهینه انرژی انجام شد. برای این منظور، پارامترهای مؤثر در عملکرد بهینه فرایندی سامانه شامل جنس الکتروود، غلظت بار آلی ورودی، فاصله بین الکتروودها، تزریق مرحله‌ای مواد شیمیایی، غلظت سولفات سدیم و نسبت سطح الکتروودها

## ۶.۷.۴. مقدار انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه فرد-

### فتون و مقایسه آن با سامانه هوازی هضم لجن

تفاوت چشمگیری در کارآمدی سامانه در نسبت سطح الکتروود به حجم راکتور برابر با ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر به چشم نمی‌خورد (۲ درصد افزایش کارآمدی) (شکل ۷)، اما در عین حال اختلاف انرژی الکتریکی و مساحت الکتروود مصرفی بسیار زیاد است (۱/۷ کیلووات ساعت به ازای حذف هر کیلوگرم VSS اختلاف انرژی الکتریکی (شکل ۱۲) و ۱۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر اختلاف الکتروود مصرفی). به منظور مصرف کمتر انرژی الکتریکی و سطح الکتروود و در نتیجه هزینه کمتر، نسبت بهینه سطح الکتروود به حجم راکتور برابر با ۱۰۰ سانتی‌متر مربع بر لیتر در نظر گرفته می‌شود. در این صورت بازده حذف VSS برابر ۸۶ درصد و انرژی الکتریکی مصرفی (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی مصرفی همزن موجود در سامانه) برابر ۱/۶ کیلووات ساعت به ازای حذف هر کیلوگرم VSS است.

فرایند هضم هوازی یکی از فرایندهای متعارف تثبیت

بررسی‌های مرتبط در زمینه توان فرایندی آن برای حذف یا تنظیم غلظت مواد دیگر ممکن موجود در لجن مازاد بیولوژیکی ادامه یابد.

#### یادداشت‌ها

1. Volatile Suspended Solids (VSS)
2. Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)
3. Return Activated Sludge (R.A.S.)
4. Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS)
5. Chemical Oxygen Demand (COD)
6. Volatile Solids (VS)
7. Total Suspended Solids (TSS)
8. Voltage versus Standard Hydrogen Electrode (V/SHE)
9. Nernst equation
10. Unit Energy Demand (UED)

به حجم سامانه و شرایط بهینه راهبری مبتنی بر آن‌ها، همچنین رابطه پارامترهای مذکور با میزان انرژی مصرفی و محدوده بهینه راهبری برای دستیابی به حداکثر کارآمدی ممکن بررسی شد. نتایج این تحقیقات نشان داد که تحت شرایط بهینه ساختاری و عملکردی حاصل، تثبیت لجن با کارآمدی حذف VSS برابر ۸۶ درصد همراه مصرف انرژی الکتریکی برابر با ۱/۶ کیلووات ساعت به ازای حذف هر کیلوگرم VSS است. در مقایسه با سامانه هضم هوازی لجن به منزله یکی از فرایندهای متعارف تثبیت لجن، سامانه فرد-فتون دارای بازدهی تقریباً دو برابر و حدوداً نصف مصرف انرژی الکتریکی است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که فناوری فرد-فتون از مزیت‌های برجسته‌ای در خصوص تصفیه بهینه لجن برخوردار است و لازم است که

#### منابع

- بدلیانس قلی‌کندی، گ، مسیحی، ح.ر. و میرابی، م. ۱۳۹۳. «استفاده همزمان فرایندهای فتون و الکتروشیمیایی برای کاهش بار آلی لجن مازاد بیولوژیکی»، محیط‌شناسی، دوره ۴۰، شماره ۱، صص ۱۷۷-۱۸۸.
- نیلی، م، بدلیانس قلی‌کندی، گ. ۱۳۹۳. «بهینه‌سازی و ارتقای عملکردی رآکتور ترکیبی فتون و الکتروشیمیایی جهت تثبیت لجن مازاد بیولوژیکی در مقیاس آزمایشگاهی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و فاضلاب دانشگاه شهید بهشتی پردیس فنی- مهندسی شهید عباسپور، تهران.
- APHA. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th edition, American Public Health Association /Water Environment Federation, Washington, DC, USA
- Brillas, E., Sires, I. and Oturan, M. A. 2009. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. Chemical Reviews. 109:pp. 6570-6631
- Daneshvar, N., Khataee, A., Amani Ghadim, A. and Rasoulifard, M. 2007. Decolorization of CI Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). Journal of hazardous materials. 148: pp. 566-572
- Ghazy, M., Dockhorn, T. and Dichtl, N. 2011. Economic and environmental assessment of sewage sludge treatment processes application in Egypt. International Water Technology Journal. 1: pp. 1-19
- Gholikandi, G. B. and Ardakani, M. N. 2015a. Advanced oxidation processes (AOPs): an overview. In Enhanced Electrochemical Advanced Oxidation Processes for Wastewater Sludge Stabilization and Reuse; Gholikandi, G. B., Ed.; Nova Science Publishers: New York; pp. 31-56
- Gholikandi, G. B. and Masihi, H. 2015b. Electrochemical advanced oxidation processes based on Fenton's reaction. In Enhanced Electrochemical Advanced Oxidation Processes for Wastewater Sludge Stabilization and Reuse; Gholikandi, G. B., Ed.; Nova Science Publishers: New York; pp. 57-94
- Gholikandi, G. B., Masihi, H., Azimpour, M., Abrishami, A. and Mirabi, M. 2014. Optimizing stabilization of waste-activated sludge using Fered-Fenton process and artificial neural network modeling (KSOFM, MLP). Environmental Science and Pollution Research. 21:pp. 7177-7186
- Ghosh, P., Samanta, A. N. and Ray, S. 2011. Reduction of COD and removal of Zn<sup>2+</sup> from rayon industry wastewater by combined electro-Fenton treatment and chemical precipitation. Desalination. 266: pp. 213-217

- Jiang, C.C. and Zhang, J.F. 2007. Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Zhejiang University Science A*. 8: pp. 1118-1125
- Metcalf, E. 2003. Inc., *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill
- Modirshahla, N., Behnazhadi, M. and Mohammadi-Aghdam, S. 2008. Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation. *Journal of hazardous materials*. 154: pp.778-786
- Muruganandham, M. and Swaminathan, M. 2004. Decolourisation of Reactive Orange 4 by Fenton and photo-Fenton oxidation technology. *Dyes and Pigments*. 63: pp. 315-321
- Nidheesh, P. and Gandhimathi, R. 2014. Removal of Rhodamine B from aqueous solution using graphite-graphite electro-Fenton system. *Desalination and Water Treatment*. 52: pp.1872-1877
- Nidheesh, P. V., Gandhimathi, R. and Ramesh, S. T. 2013. Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 20: pp. 2099-2132
- Oturan, M. A. and Aaron, J. J. 2014. Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44: pp.2577-2641
- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A. and Panizza, M. 2014. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review. *Environmental Science and Pollution Research*. 21: pp. 8336-8367
- Wang, F., Rudolph, V. and Zhu, Z. 2008. *Sewage Sludge Technologies*. In *Ecological Engineering*; Elsevier B. V.: Australia; pp. 3227-3242
- Zhou, M., Yu, Q., Lei, L. and Barton, G. 2007. Electro-Fenton method for the removal of methyl red in an efficient electrochemical system. *Separation and Purification Technology*. 57: pp.380-387