مقاله پژوهشی
مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان
دوره ۱۹، تیر ۱۳۹۹، ۳۹۶-۳۸۳

حذف سولفات از محلول‌های آبی به روش الکتروشیمی با استفاده از الکترود کربن پارچه‌ای ساندویچ پانل شده با استیل مش: یک مطالعه آزمایشگاهی

فاطمه خواجه[۱]، عباس رضایی[۲]

دریافت مقاله: ۹۸/۶/۱۶ ارسال مقاله به نویسنده جهت اصلاح: ۹۸/۷/۱۰ دریافت اصلاحیه از نویسنده: ۹۹/۲/۳۱ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۱۰

چکیده

زمینه و هدف: سولفات یکی از آلاینده های شیمیایی درآب می‌باشد که در غلظت های بالا در انسان اثرات بهداشتی نامطلوبی نظیر مشکلات گوارشی و مشکلات خونی ایجاد می‌نماید. تبدیل سولفات به موادی نظیر سولفید هیدروژن می‌تواند موجب خوردگی لوله‌های فلزی گردد. لذا هدف این مطالعه تعیین تأثیر حذف سولفات به روش الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود کربن پارچه‌ای ساندویچ پانل شده با استیل مش بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه آزمایشگاهی از فرآیند الکتروشیمی واجد الکترود کربن پارچه جهت حذف سولفات از فاضلاب سنتتیک استفاده گردید. جهت افزایش رسانایی الکترود کربن پارچه از پایه استیل مش استفاده شد. اثر متغیرهایی نظیر غلظت سولفات، pH محلول، دانسیته جریان و زمان تماس مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت تعیین میزان سولفات از روش استاندارد ایجاد کدورت با کلرید باریم و سنجش توربیدیمتری استفاده گردید. بر مبنای نتایج اخذ شده از آزمایشات، میانگین و انحراف معیار تعیین و بر مبنای روش آماری student T-test تحلیل نتایج صورت گرفت.

یافته‌ها: با توجه به نتایج، شرایط بهینه حذف سولفات در pH= ۹ ، غلظت اولیه سولفات ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، جریان ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه و زمان ۹۰ دقیقه بود. حذف سولفات با راندمان ۹۳/۲۱ درصد حاصل گردید. با افزایش دانسیته جریان، زمان تماس و pH اولیه محلول آبی، راندمان حذف سولفات افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصله نشان داد که فرآیند الکتروشیمی واجد الکترود کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش می‌تواند فرآیندی کارآمد جهت حذف سولفات از محیط‌های آبی باشد که به علت عدم خوردگی الکترود کربن پارچه دارای صرفه اقتصادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سولفات، کربن پارچه ای، الکتروشیمی، ساندویچ پانل، استیل مش

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- (نویسنده مسئول) استاد، گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
تلفن: ۸۲۸۸۳۵۷۵-۰۲۱، دورنگار: ۸۲۸۸۳۵۷۵-۰۲۱، پست الکترونیکی:rezaee@modares.ac.ir

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

مقدمه

سولفات به عنوان یک آلاینده شیمیایی غیر سمی در نظر گرفته می‌شود که اگر غلظت آن فراتر از حد استاندارد شود، می‌تواند اثرات بهداشتی نامطلوبی بر گروه های حساس نظیر کودکان و نوزادان ایجاد نماید [۱]. سولفات به عنوان یک ماده سمی در نظر گرفته نمی‌شود، اما در صورت مصرف غلظت بالای آن می‌تواند باعث اسهال، مشکلات گوارشی، تغییراتی در میزان مت‌هموگلوبین و سولفموگلوبین در انسان و حیوانات شود [۲]. فاضلاب صنایع فلزی و فاضلاب ناشی از زهکشی معادن اسیدی و غنی از سولفات و فلزات حل شده‌ای مانند: کادمیوم، مس، نیکل، آهن، سرب و روی می‌باشد [۳]. صنایعی چون پالایشگاه‌های نفت، پتروشیمی، تولید حلال، چوب و کاغذ، روغن‌های خوراکی و صنایع تولید کشمش (به دلیل استفاده از سولفات در فرآیند فرآوری) واجد مقادیر زیادی سولفات می‌باشند [۶-۴]. به علت تخلیه پساب صنایع به آب‌های طبیعی غلظت سولفات می‌تواند از ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر هم تجاوز نماید [۷]. با این حال سولفات یک آنیون اصلی است که در همه جا وجود دارد به عنوان مثال: غلظت آن در رودخانه ها ۶۳۰-۰ میلی‌گرم، در دریاچه ها ۲۵۰-۲ میلی‌گرم در لیتر، در آب‌های زیر زمینی ۲۳۰-۰ میلی‌گرم در لیتر و سطح معمول سولفات در آب دریا تقریباً ۲۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد [۹-۸]. تخلیه فاضلاب غنی از سولفات می‌تواند باعث خوردگی لوله‌های فلزی و آلودگی هوا به دلیل احیاء سولفات به سولفید هیدروژن شود [۱۰]. سولفات در غلظت‌های پایین سمی نیست اما در غلظت‌های بالا می‌تواند به گونه‌های آب شیرین آسیب برساند [۲]. سولفات در محیط‌های آبی طی فرآیند هیدرولیز به اسید سولفوریک تبدیل می‌شود که عاملی سمی برای موجودات آبزی می‌باشد [۲,۴]. حذف سولفات قبل از تخلیه به محیط زیست اجباری است [۱۱]. فرآیندهایی چون اسمز معکوس، فرآیند غشایی، الکترودیالیز، روش احیاء بیولوژیکی سولفات توسط باکتری‌های احیاء کننده سولفات، روش‌های شیمیایی نظیر استفاده از آهک و نمک‌های باریوم و روش الکتروشیمی جهت تصفیه سولفات از آب و فاضلاب پیشنهاد شده‌اند [۱۵-۱۲]. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش‌های غشایی از کارآیی بالایی برخوردارند اما به دلیل گرفتگی منافذ غشاء و هزینه‌های برق مصرفی جهت پمپاژ مقرون به صرفه نمی‌باشد. روش‌های شیمیایی نیز علاوه بر تولید میزان بالایی از لجن و افزودن مواد ناخواسته مشکلاتی چون هزینه بالایی نیز دارند. از جمله نگرانی‌های مطرح در روش تصفیه بیولوژیکی متصاعد شدن گاز سولفید هیدروژن در نتیجه احیاء بیولوژیکی سولفات می‌باشد [۲۰-۱۶]. روش الکتروشیمیایی به علت حضور ترکیبات سمی و مقاوم به تجزیه بیولوژیکی در پساب‌های صنعتی می‌توان گفت یک روش مناسب و کاربردی است که جهت تصفیه آب و فاضلاب مورد توجه واقع شده است. این روش دارای مزایایی از جمله عدم نیاز به صرف هزینه در بخش‌های تصفیه فیزیکی و شیمیایی، تشکیل لخته های سنگین‌تر در روش الکتروشیمی نسبت به روش انعقاد شیمیایی، که این امر موجب سهولت ته نشینی

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

لخته‌ها می‌گردد. میزان لجن تولید شده در این روش در مقایسه با لجن تولیدی در فرآیند انعقاد شیمیایی کم‌تر است [۱۲]. در واکنش‌های شیمیایی اکسیداسیون - احیاء، مرحله اساسی، مبادله یک یا چند الکترون است:

معادله (۱) $OX_1 + ne^- \longrightarrow RED_1$

معادله (۲) $RED_2 \longrightarrow OX_2 + ne^-$

$OX_1 + RED_2 \longrightarrow OX_2 + RED_1$

که در آن OX و RED به ترتیب اشکال اکسیدی و احیایی را نشان می‌دهند. اهمیت یک واکنش اکسیداسیون – احیا در مفهوم حاضر، به این واقعیت مربوط می‌شود که انتقال الکترون‌ها از احیاء کننده به اکسیدکننده را می‌توان با ارتباط دو الکترود به یک منبع جریان الکتریکی خارجی به وجود آورد. در یک الکترود (آند) احیاء کننده یک یا چند الکترون به الکترود فلزی منتقل می‌کند همانند معادله ۲، در صورتی‌که برای حفظ موازنه الکتریکی در مجموع، تعداد برابری از الکترون‌ها باید الکترود را ترک کنند و از درون مدار خارجی بگذرند. به طور هم‌زمان، کاتد نیز تعداد مشابهی از الکترون‌ها را به اکسید کننده واگذار می‌کند (معادله ۱). همه این ها یک مدار الکتریکی کامل را به وجود می‌آورند [۲۳-۲۱] . در این مطالعه سعی بر آن شد که از روشی اقتصادی، مؤثر و سازگار با محیط زیست جهت حذف سولفات و رساندن آن به حد استاندارد استفاده شود. از ویژگی‌های بارزکربن پارچه (الیاف کربن دو جهته) که در این مطالعه به عنوان الکترود مورد استفاده قرار گرفته است نسبت به سایر الکترودها، رسانایی بسیار خوب، مقاومت در برابر خوردگی، ضریب انبساط حرارتی بسیار کم می‌توان ذکر کرد. لذا می‌توان با بهره‌گیری از این خصوصیات مؤثر کربن پارچه به خصوص عدم خوردگی در فرایند الکتروشیمی، در هزینه اولیه سرمایه گذاری سود برد. به علت عدم خوردگی الکترود میزان لجن تولیدی نیز کم‌تر خواهد بود که علاوه بر سازگاری با محیط زیست، این امر نیز موجب می‌گردد از نظر اقتصادی هزینه کم‌تری جهت تثبیت و تصفیه لجن در بر داشته باشد. در این راستا اثر پارامترهای مؤثر بر فرآیند، مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت. هدف از این مطالعه تعیین کارآیی فرآیند الکتروشیمی با الکترودهای کربن پارچه ساندویچ پنل شده با مش استیل در حذف سولفات از محیط آبی، به منظور کاهش خطرات ناشی از سولفات در آب آشامیدنی بر روی سلامتی انسان، تحقق استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی و راه اندازی یک روش جدید و کم هزینه جهت حذف سولفات از محیط‌های آبی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق حذف سولفات با فرآیند الکتروشیمی به صورت یک مطالعه آزمایشگاهی در سال۱۳۹۷ در گروه بهداشت محیط دانشگاه تربیت مدرس با کد اخلاق مصوب IR.MODARES.REC.1397.236 انجام گرفت. در این مطالعه اثر متغیرهای غلظت (۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) ، pH (۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹) ، زمان (۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ دقیقه) و دانسیته جریان (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه) مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش های مختلف در تحقیق حاضر از مواد سولفات سدیم، سدیم کلراید، اسید هیدروکلریک و

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

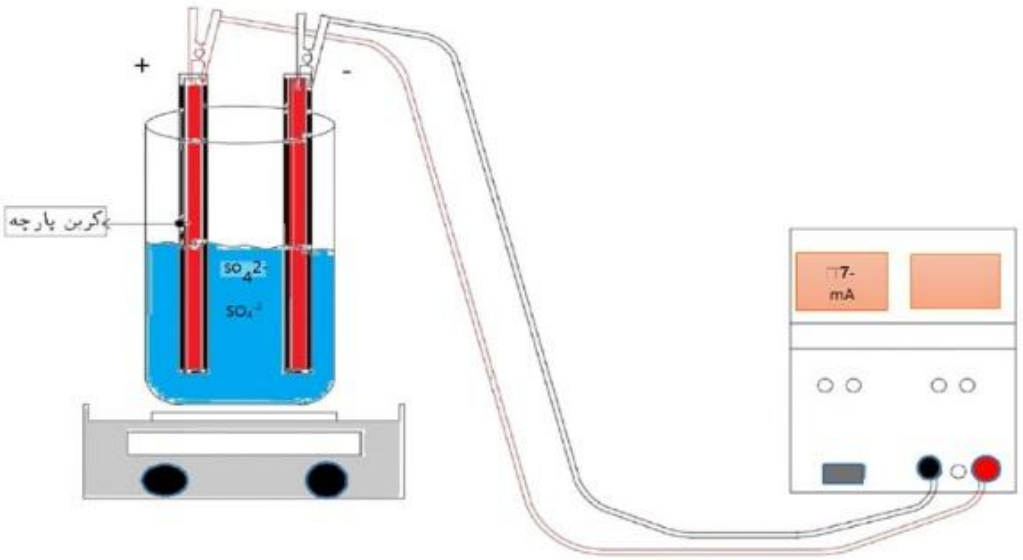
هیدروکسید سدیم زیر استفاده گردید (مرک، آلمان). تمامی مواد مورد استفاده دارای خلوص آزمایشگاهی بودند. جهت تهیه محلول ذخیره سولفات با غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار ۰/۲۹۵۸ گرم از سولفات سدیم در یک لیتر آب مقطر حل شد. محلول‌های کاری با غلظت‌های مورد نظر با رقیق سازی محلول ذخیره تهیه گردید [۵]. جهت تنظیم pH محلول‌های کاری از محلول یک مولار اسید هیدروکلریک و هیدروکسید سدیم استفاده گردید. برای انجام آزمایشات انعقاد الکتریکی، از بشر با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر به عنوان راکتور ناپیوسته استفاده شد [۱۸]. به منظور تأمین جریان الکتریسیته مورد نظر از منبع تغذیه PS-305D (ساخت کشور چین) استفاده شد. با توجه به این امر که با کاهش مقاومت، میزان رسانایی افزایش می‌یابد، در راستای افزایش کارآیی فرآیند الکتروشیمی و جهت القاء بیش‌تر جریان الکتریکی، کربن پارچه با الکترود مش استیل ساندویچ پانل گردید (شکل۱). لازم به ذکر است که مقاومت رسانایی کربن پارچه به تنهایی ۱۲/۵ اهم و مقاومت کربن پارچه ساندویچ پانل شده با مش استیل ۱۱ اهم می‌باشد، برای اندازه‌گیری مقاومت الکترود از مولتی متر دیجیتال (مدل Mastech 8229 ، چین) استفاده شد. در این سیستم با توجه به خصوصیات کربن پارچه (رسانایی و عدم خوردگی) و مش استیل به ابعاد ۰/۲× ۵×۱۰ سانتی‌متر استفاده گردید. جهت ایجاد شرایط یک‌نواخت در رآکتور از دستگاه مگنت استیرر (مدل آلفا 860- HC، چین) استفاده گردید. جهت ایجاد جریان مناسب در الکترولیت در انجام تمام آزمایشات از کلرید سدیم ۰/۰۱ درصد استفاده شد. جهت سنجش pH و پتانسیل اکسیداسیون احیاء از pH متر کاغذی محصول شرکت اراک شیمی و از دستگاه (ORP) Oxidation Reduction Potential (مدل Eutech، مالزی) استفاده گردید. جهت انجام آزمایش در هر بار نمونه برداری از سه نقطه آندی، کاتدی و بین دو الکترود ۱۰ میلی‌لیتر نمونه برداشت شده و قبل از آنالیز، نمونه‌ها با یک‌دیگر مخلوط می‌شدند. جهت فراهم شدن نمونه یکنواخت از همزن مغناطیسی استفاده می‌گردید. در آزمایش‌های انجام گرفته به دلیل اختلاف ناچیز انحراف معیارهای محاسبه شده، بررسی‌های آماری تأیید آزمایش‌ها را نشان می‌داد. جهت سنجش میزان حذف سولفات از پساب، از روش کدورت سنجی با استفاده از محلول یک‌نواخت ساز سولفات و کلرید باریوم استفاده گردید. طبق استاندارد (SO_4^{2-}-۴۵۰۰) ذکر شده در کتاب روش‌های استاندارد آزمایش های آب و فاضلاب، ۴ میلی‌لیتر نمونه را به داخل ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته و پس از به حجم رساندن ۲۰ میلی‌لیتر محلول یک نواخت ساز سولفات به نمونه اضافه کرده و روی همزن مغناطیسی با استفاده از مگنت به مدت ۶۰ ثانیه با سرعت ثابت با یک‌دیگر مخلوط شدند. در حین اختلاط کلرید باریوم به میزان ۰/۴ میلی‌گرم به محلول اضافه شد. بعد از گذشت زمان حدود ۵ دقیقه، جذب نوری نمونه در طول موج ۴۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر (مدل UV Rayleigh china 920,چین) مورد سنجش قرار گرفت (۲۴). جهت تعیین درصد حذف سولفات و دانسیته جریان به

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

ترتیب از روابط ۳ و ۴ استفاده گردید [۵]. در این روبط C_1 و C_2 به ترتیب غلظت اولیه و غلظت نهایی بر حسب میلی گرم در لیتر، I شدت جریان، J دانسیته جریان (میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه) و A سطح فعال الکترودها (سانتی متر مربع) می‌باشد. جهت اطمینان از صحت نتایج اخذ شده هر آزمایش سه بار تکرار شده و با استفاده از روش آماری student T- test نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۳، فراوانی نسبی و مطلق ترسیم و تفسیر گردید.

$$\text{درصد حذف} = \frac{C1-C2}{C1} \times 100 \qquad (۳)$$

$$J = \frac{I}{A} \qquad (۴)$$



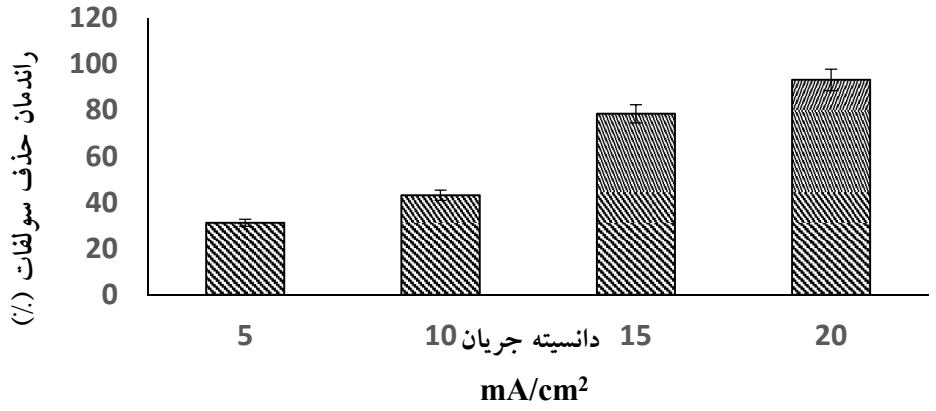
شکل ۱- شمایی از راکتور طراحی شده جهت حذف سولفات به روش الکتروشیمی با الکترودهای کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش از محلول آبی

نتایج

در تحقیق حاضر، فرآیند الکتروشیمی با استفاده از الکترودهای کربن پارچه ساندویچ پانل شده با مش استیل به عنوان یک تکنولوژی تصفیه جهت حذف سولفات از محیط‌های آبی به کار برده شد و راندمان حذف آن در شرایط ولتاژ، غلظت‌های اولیه، pH و زمان‌های واکنش مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر دانسیته جریان بر میزان حذف سولفات در شرایط مختلف در نمودار ۱ ارائه شده است. با توجه به میزان سولفات باقی مانده در دانسیته جریان‌های مختلف کار شده در این تحقیق، حداکثر میزان حذف سولفات در بالاترین دانسیته جریان اعمالی فراهم شده است. راندمان حاصله در دانسیته جریان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌آمپر به ترتیب ۳۱/۲۵، ۴۳/۱۵، ۷۸/۵ و۹۳/۲۱ درصد تعیین شد. از این رو دانسیته جریان۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور

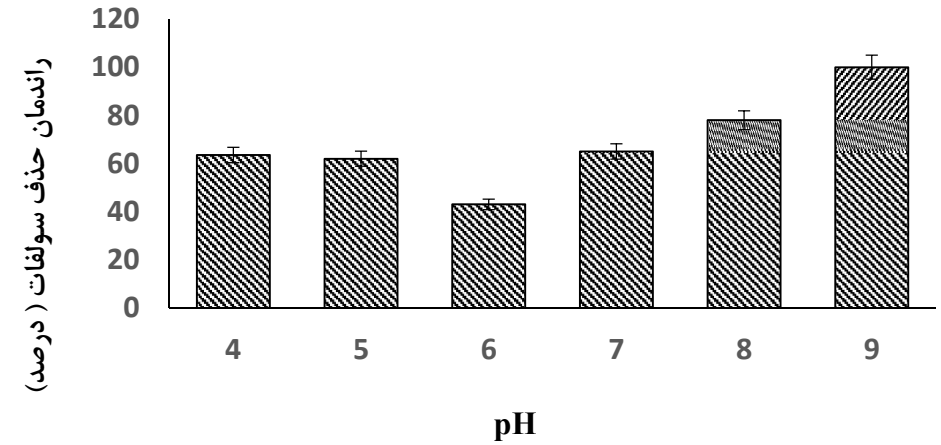
[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

ثانیه به عنوان فاکتور بهینه در آزمایش‌های بعد در نظر گرفته شد.



نمودار ۱- تأثیر دانسیته جریان بر میزان حذف سولفات به روش الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش از محلول‌های آبی (تحت شرایط: زمان ۹۰ دقیقه، غلظت سولفات ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، pH= ۷)

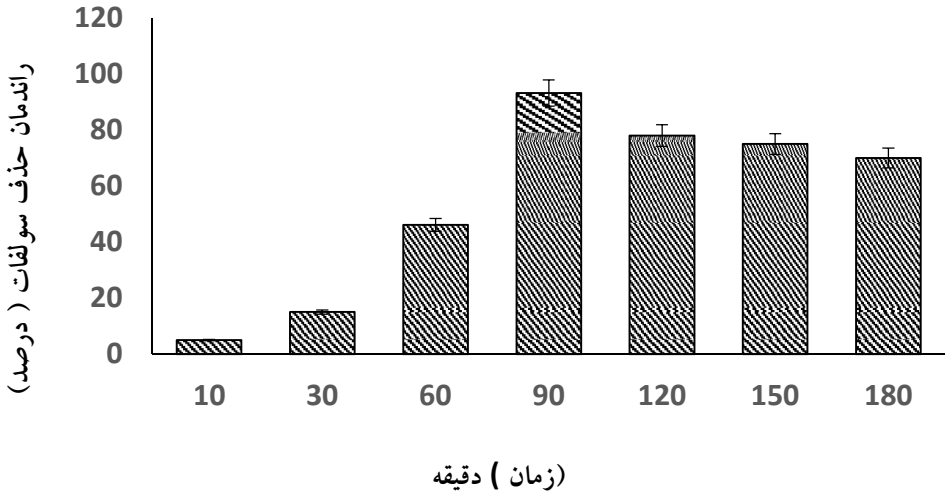
اثر pH اولیه محلول بر کارآیی حذف الکتروشیمیایی سولفات از دیگر پارامترهای مورد ارزیابی در این مطالعه بود. تغییرات ناشی از اثر این پارامتر در محدوده‌های مختلف اسیدی-قلیایی در نمودار ۲ قابل مشاهده است. اگر چه در pH کم‌تر از ۶ افزایش راندمان نشان می‌دهد، اما بیش‌ترین راندمان مشاهده شده در pH= ۹ و برابر ۹۹/۹۹ درصد اخذ گردید. در pH= ۷ راندمان ۶۵ درصد در مدت زمان ۷۴ دقیقه و با صرف زمان بیش‌تر (۱۲۵ دقیقه) راندمان ۹۹/۹۹درصد اخذ گردید.



نمودار ۲- تأثیر pHاولیه سولفات بر میزان حذف سولفات به روش الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش از محلول‌های آبی (تحت شرایط زمان ۹۰ دقیقه، غلظت سولفات ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، جریان اعمال شده ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه)

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

تأثیر زمان بهره‌برداری فرآیند الکتروشیمی در حذف سولفات از محیط آبی در جریان اعمالی ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه، سولفات ۱۰۰میلی‌گرم در لیتر و pH=۷ در نمودار ۳ ارائه شده است. میزان حذف سولفات در زمان‌های اولیه شروع آزمایش کم بود بعد از حدود ۲۰ دقیقه روند افزایشی پیدا نمود. حداکثر میزان حذف سولفات در محدوده زمانی صفر تا ۱۸۰ دقیقه، در زمان ۹۰ دقیقه حاصل گردید. حداکثر راندمان اخذ شده ۹۳/۲۱ درصد اخذ شد. از این رو زمان ۹۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه جهت انجام آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته شد.



نمودار ۳- تأثیر زمان بهره برداری بر میزان حذف سولفات به روش الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش از محلول‌های آبی (تحت شرایط غلظت سولفات ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، جریان اعمالی ۲۰ میلی آمپر بر مجذور ثانیه و pH= ۷)

درصد حذف الکتروشیمیایی سولفات در غلظت‌های اولیه در نمودار ۴ ارائه شده است. بیش‌ترین میزان حذف سولفات در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید. راندمان حاصله برای غلظت‌های ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۹۱ ،۵۴، ۳۲ و ۲۵ درصد تعیین شد. در این مرحله غلظت بهینه سولفات برابر ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و دانسیته جریان ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه جهت ادامه آزمایش‌های بعدی در نظر گرفته شد.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]



نمودار ٤- تأثیر غلظت اولیه سولفات بر میزان حذف سولفات به روش الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود کربن پارچه ساندویچ پانل شده با استیل مش از محلول‌های آبی (تحت شرایط: زمان ۹۰ دقیقه،جریان اعمال شده۲۰ میلی آمپر، pH= ۷)

بحث

دانسیته جریان الکتریسیته یکی از پارامترهای مهم کنترل کننده سرعت واکنش در فرآیندهای الکتروشیمی می‌باشد. زیرا علاوه بر تعیین میزان ماده منعقد کننده تزریقی به محلول، بر میزان تولید حباب‌ها، اندازه و بزرگی لخته‌های تولیدی نیز مؤثر است که این خود می‌تواند راندمان تصفیه فرآیند الکتروشیمی را تحت تأثیر قرار دهد [۲۵]. با توجه به میزان تغییرات سولفات باقی‌مانده در دانسیته جریان‌های مختلف به کار گرفته در این تحقیق حداکثر میزان حذف سولفات در دانسیته اعمالی ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه اخذ شده است. به عبارتی میزان دانسیته جریان اعمال شده به طور مستقیم بر میزان حذف سولفات اثر گذار می‌باشد. افزایش دانسیته جریان از ۵ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه به ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه سبب افزایش حذف سولفات از ۳۱/۲۵ به ۹۳/۲۱ درصد شد (نمودار ۱). افزایش بازدهی سیستم در این حالت نیز مطابق با قانون فارادی می‌باشد. دلیل این امر این است که با افزایش دانسیته وکاهش اندازه حباب ها راندمان شناورسازی افزایش می‌یابد [۲۶]. Gao و همکارانش گزارش نمودند که مقدار الکترون بیش‌تری به واسطه افزایش دانسیته جریان رها شده و این امر موجب بالا رفتن سرعت فرآیند و افزایش راندمان می‌گردد [۲۳]. با کاهش میزان ولتاژ، زمان مورد نیاز به راندمان‌های مشابه افزایش می‌یابد که این نتایج با تحقیقات Mouedhen و همکارانش در رابطه با حذف الکتروشیمیایی کروم VI با استفاده از الکترودهای آهنی و آلومنیومی مطابقت دارد [۲۵]. در این راستا، Lam و همکارانش در میزان جریان ۲-۱/۶ آمپر راندمان ۶۹ درصد را برای این روش گزارش نمودند [۱۶]. در مجموع با توجه به نتایج، ولتاژ ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه جهت رسیدن به راندمان مطلوب پیشنهاد می‌شود. انحلال آند در بیش‌ترین دانسیته جریان به دلیل عدم خوردگی کربن پارچه مشاهده نشد. برمبنای نتایج مشاهده شده می‌توان نتیجه‌گیری نمود

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

که پارامترهای اندازه گیری شده و محاسبه شده به هم نزدیک بوده و صحت آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. در تمامی فرآیندهایی که مرتبط با جابجایی الکترون و یون پروتون هستند pH به عنوان یکی از فاکتورهای موجود در نظر گرفته می‌شود. مکانیسم ترسیب در pHهای اسیدی ۳ تا ۴ در فرآیند الکتروشیمی غالب می‌باشد، چون pH های پایین از تشکیل هیدروکسیدهای مؤثر جلوگیری می‌کند. اما در pH ۴ تا ۹ مکانیسم جذب غالب می‌باشد. اشکال آمورف در pHهای بالای ۹ تشکیل می‌گردد و این امر همراه با مصرف یون هیدروکسید است. این اشکال در فرآیند جذب وارد می‌شوند. از دیگر راه‌های ممانعت از پیشروی غیر فعال‌سازی الکترودی، بهره برداری فرآیند در شرایط مطلوب از نظر pH می‌باشد [۴]. نتایج به دست آمده از این تحقیق با یافته‌های حاصل از مطالعه انجام شده توسط Bazrafshan و همکارانش در رابطه با حذف کادمیوم توسط فرآیند الکتروشیمی مطابقت دارد [۱۸].همچنین Tran و همکارانش گزارش کردند که در pH۶=/۸ راندمان ۸۰ درصد گزارش نموده‌اند [۱۷]. نتایج حاصل نشان داد با افزایش زمان ماند، راندمان حذف افزایش می‌یابد. با توجه به قانون فارادی نسبت مستقیمی بین میزان لخته تشکیل شده و زمان انجام واکنش وجود دارد و با افزایش زمان انجام واکنش میزان لخته در دسترس بیش‌تر شده و در این امر منجر به افزایش راندمان می‌شود. این امر با یافته‌های به دست آمده از مطالعه Adhoum و همکارانش در بررسی تصفیه فاضلاب آب‌کاری حاوی مس، روی و کروم VI توسط فرآیند الکتروشیمی مطابقت داشت [۲۶]. پژوهش حاضر نشان داد با افزایش دانسیته جریان، pH راندمان حذف سولفات افزایش می‌یابد. حذف بهینه سولفات در ولتاژ ۲۰ میلی‌آمپر بر مجذور ثانیه، ۹ =pH و زمان ماند ۹۰ دقیقه حاصل شد. Hossini و همکارانش زمان بهینه جهت حذف سولفات با روش الکتروشیمیایی را ۱۱۰ دقیقه و راندمان حاصله را ۷۱/۶ درصد گزارش نمودند [۵]. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که غلظت اولیه سولفات راندمان حذف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طوری که با افزایش غلظت‌های اولیه، راندمان حذف سولفات کاهش می‌یابد و این امر نشان می‌دهد جهت حذف غلظت‌های اولیه بالاتر به ولتاژهای بیش‌تر و زمان واکنش طولانی‌تر نیاز است. برعکس هرچه میزان یون‌های سولفات در محیط کم‌تر باشد، میزان بازدهی کل فرآیند الکتروشیمی افزایش می‌یابد. این امر با نتایج حاصل از مطالعات Chaudary و همکارانش در بررسی حذف الکترولتیکی کروم VI از محلول‌های آبی مطابقت دارد [۲۷]. از محدودیت‌های روش پیشنهادی نیاز به الکترودهای تخصصی کربن پارچه ای و راهبری تخصصی می‌باشد. جهت انجام مطالعات آتی، بررسی حذف سولفات توسط انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودها با جنس دیگر و الکترودها با جنس‌های مختلف در یک رآکتور، حذف هم‌زمان سولفات با فلزات سنگین توسط انعقاد الکتریکی و مطالعه لجن تولیدی و روش‌های کاهش حجم لجن پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور حذف سولفات از محلول‌های آبی، از فرآیند الکتروشیمی واجد الکترودهای کربن پارچه بر پایه استیل مش استفاده شد میزان لجن تولیدی در این

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

روش در مقایسه با روش الکتروشیمی معمول کم‌تر بود، لذا با توجه به نتایج اخذ شده در این مطالعه می‌توان پیشنهاد کرد استفاده از فرآیند الکتروشیمی واجد الکترودهای کربن پارچه بر پایه استیل مش جهت حذف سولفات از محلول‌های آبی، دارای صرفه اقتصادی بیش‌تر از نظر پیشگیری از خوردگی الکترود می‌باشد. از طرفی در هزینه‌های آبگیری و دفع لجن نهایی به علت تولید لجن کم‌تر صرفه‌جویی می‌شود.

تشکر و قدردانی

اطلاعات ارائه شده حاصل کار تحقیقاتی صورت گرفته در گروه بهداشت محیط دانشکده پزشکی دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد و لازم است از دانشگاه تربیت مدرس به دلیل کمک‌های مادی و معنوی برای انجام این مطالعه کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

References

[1] Volkel S, Berenbrink M. Sulphaemoglobin formation in fish: a comparison between the haemoglobin of the sulphide-sensitive rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) and of the sulphide-tolerant common carp (Cyprinus carpio). *J Exp Biol* 2000; 203(6): 1047-58.

[2] Backer LC, Esteban E, Rubin CH, Kieszak S, McGeehin MA. Assessing Acute Diarrhea from sulfate in drinking water. 2001; 93(9): 76-84.

[3] Al Zuhair S, El-Naas MH, Al Hassani H. Sulfate inhibition effect on sulfate reducing bacteria. *J Hazard Mater* 2008; 1(2): 39-44.

[4] Demiral H, Demiral I, Tümsek F, Karabacakoğlu B. Adsorption of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models. *Chem Eng J* 2008; 144(2): 188-96.

[5] Hossini H, Rezaee A, Shirmardi M, Naeimabadi A. Sulfate removal from wastewater using electrocoagulation process: evaluation of

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]
[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]

[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

effective parameters and costs. *J North Khorasan Univ Med Sci* 2015; 6(4): 787-96.

[6] Agboola O, Mokrani T, Sadiku ER, Kolesnikov A, Olukunle OI, Maree JP. Characterization of Two Nanofiltration Membranes for the Separation of Ions from Acid Mine Water. *Mine Water Environ* 2017; 36(3): 401-8.

[7] Aguiar A, Andrade L, Grossi L, Pires W, Amaral M. Acid mine drainage treatment by nanofiltration: A study of membrane fouling, chemical cleaning, and membrane ageing. *Sep Purif Technol* 2018; 192: 185-95

[8] Liu Z, Li L, Li Z, Tian X. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate-reducing bacteria in an expanded granular sludge bed reactor. *Mine Water Environ* 2018; 39(14): 1814-22.

[9] Kiran MG, Pakshirajan K, Das G. A new application of anaerobic rotating biological contactor reactor for heavy metal removal under sulfate reducing condition. *Chem Eng J* 2017; 321: 67-75.

[10] Zou Y, Wang X, Khan A, Wang P, Liu Y, Alsaedi A. Environmental remediation and application of nanoscale zero-valent iron and its composites for the removal of heavy metal ions: a review. *Enviorn Sci Technol* 2016; 50(14): 7290-304.

[11] Kiran MG, Pakshirajan K, Das G. Heavy metal removal from aqueous solution using sodium alginate immobilized sulfate reducing bacteria: mechanism and process optimization. *J Environ Manage* 2018; 218: 486-96.

[12] Bowell R. A review of sulfate removal options for mine waters. *Mine Water Environ* 2004: 75-88.

[13] Lakshmipathiraj P, Raju GB, Basariya MR, Parvathy S, Prabhakar S. Removal of Cr (VI) by electrochemical reduction. *Sep Purif Technol* 2008; 60(1):96-102.

[14] Jüttner K, Galla U, Schmieder H. Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. *Electrochim Acta* 2000; 45(15-16): 2575-94.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]

[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

[15] Janssen L, Koene L. The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection. *Chem Eng J* 2002; 85(2-3): 137-46.

[16] Lam V, Li G, Song C, Chen J, Fairbridge C, Hui R, et al. A review of electrochemical desulfurization technologies for fossil fuels. *Fuel Process Technol* 2012*; 98: 3*0-8.

[17] Tran T-K, Chiu K-F, Lin C-Y, Leu H-J. Electrochemical treatment of wastewater: Selectivity of the heavy metals removal process. *Int J Hydrogen Energ* 2017; 42(45): 27741-8.

[18] Bazrafshan E, Mahvi A. Removal of cadmium from aqueous environments by electrocoagulation process using aluminum electrodes. *J North Khorasan Univ Med Sci* 2007; 21: 14-18.

[19] Emamjomeh MM, Sivakumar M. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. *J Environ Manage* 2009; 90(2): 1204-12.

[20] Hu C, Lo S, Kuan W, Lee Y. Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation–flotation. *Water* Res 2005; 39(5): 895-901.

[21] Heidmann I, Calmano W. Removal of Cr (VI) from model wastewaters by electrocoagulation with aFe electrodes. *Sep Purif Technol* 2008; 61(1): 15-21.

[22] Akbari Jonosh Z, Rezaee A, Ghaffarinejad A, Electrocatalytic nitrate reduction using Fe0/Fe3O4 nanoparticles

immobilized on nickel foam: Selectivity and energy consumption studies. *J Clen Product* 2020; 242: 118569-81.

[23] Gao P, Chen X, Shen F, Chen G. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter. *Sep Purif Technol* 2005; 43(2): 117-23.

[24] Dou W, Zhou Z, Jiang L, Jiang A, Huang R, Tian X, Zhang W, Chen D. Sulfate removal from wastewater using ettringite precipitation:

Magnesium ion inhibition and process optimization. *J Environ Manag* 2017; 196:518-526.

[25] Mouedhen G, Feki M, De Petris-Wery M, Ayedi H. Electrochemical removal of Cr (VI) from aqueous media using iron and aluminum as electrode materials: towards a better understanding of the involved phenomena. *J Hazard Mater* 2009; 168(2-3): 983-91.

[26] Adhoum N, Monser L, Bellakhal N, Belgaied J-E. Treatment of electroplating wastewater containing Cu2+, Zn2+ and Cr (VI) by electrocoagulation. *J Hazard Mater* 2004; 112(3-207)13-7.

[27] Chaudhary AJ, Goswami NC, Grimes SM. Electrolytic removal of hexavalent chromium from aqueous solutions. *J Chem Technol Biotech* 2003; 78(8): 877-83.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]

[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]

Electrochemical Sulfate Removal from Aqueous Solution Using Sandwich Panel Carbon Cloth Electrode by Steel Mesh: A laboratory study

F. Khoja[1], A. Rezaee[2]

Received: 07/09/2019 Sent for Revision: 02/10/2019 Received Revised Manuscript: 20/05/2020 Accepted: 30/05/2020

Background and Objectives: Sulfate is one of the chemical pollutants in water that can cause adverse health effects such as digestive and blood problems at high concentrations in humans. Conversion of sulfate to substances such as hydrogen sulfide can corrode metal pipes. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of electrochemical sulfate removal using a sandwich panel carbon cloth electrode with stainless steel mesh.

Materials and Methods: In this laboratory study, the electrochemical process including of carbon cloth electrode was used to remove sulfate from synthetic wastewater. Stainless steel mesh base was utilized to increase the conductivity of the carbon cloth electrode. The effects of variables such as sulfate concentration, pH value, current density and contact time were investigated. The standard method of turbidity assay using barium chloride was used to determine sulfate concentration. Based on the obtained results, mean and standard deviation were determined and data analysis was done by Student t-test.

Results: The obtained results indicated that the optimum conditions for sulfate removal were pH 9, 100 mg/L initial sulfate concentration, current density of 20 mA/s^2 during 90 min. 93.21% efficiency was obtained for the sulfate removal. Increasing the current density, the contact time and initial pH value, the sulfate removal efficiency increased.

Conclusions: The obtained results showed that the electrochemical process including sandwich panel of carbon cloth with stainless steel electrode is an efficient and effective process for removal of sulfate from aqueous solution which can be utilized continuously due to no corrosion of carbon cloth electrode.

Key words: Sulfate, Carbon cloth, Electrochemistry, Sandwich panel, Stainless steel mesh

Funding: This study was funded by Tarbiat Modares University.

Conflict of interest: None declared.

Ethical approval: The Ethics Committee of Tarbiat Modares University (IR.MODARES.REC.1397.236).

How to cite this article: Khoja F, Rezaee A. Electrochemical Sulfate Removal from Aqueous Solution Using Sandwich Panel Carbon Cloth Electrode with Steel Mesh: A Laboratory Study. *J Rafsanjan Univ Med Sci* 2020; 19 (4): 383-96. [Farsi]

1- MSc Student, Dept. of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ORCID: 0000-0001-7197-5030

2- Prof., Dept. of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ORCID: 0000-0001-5042-2963

(Corresponding Author) Tel: (021) 82883575, Fax: (021) 82883575, E-mail: rezaee@modares.ac.ir

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1399.19.4.3.2]

[DOI: 10.29252/jrums.19.4.383]