

## حذف باکتری‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس آرنوس از آب شرب با استفاده از انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی

شهرام نظری<sup>۱</sup>، عزیز کامران<sup>۲</sup>، زهرا جدی<sup>۳</sup>، خالد ناصر<sup>۳</sup>، زهرا جوانمردی<sup>۳</sup>، طیبه صادقی<sup>۴</sup>، سید محسن محسنی<sup>۵</sup>، معصومه رحمتی نیا<sup>۶</sup>، سودابه علیزاده متبوع<sup>۷\*</sup>

<sup>۱</sup>مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران؛ <sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی خلیخال، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران؛ <sup>۳</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی خلیخال، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران؛ <sup>۴</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران؛ <sup>۵</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی ایران، تهران، ایران؛ <sup>۶</sup>گروه مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۴

### چکیده:

**زمینه و هدف:** انعقاد الکتریکی یک روش الکتروشیمیایی برای تصفیه آب است. در سال‌های اخیر گندزدایی آب به روش الکترولیز رو به گسترش است. هدف از انجام این تحقیق بررسی حذف باکتری‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به روش انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی با الکترودهای استیل ضدزنگ - گرافیت نمدی به حالت تک قطبی موازی از آب آشامیدنی می باشد.

**روش بررسی:** مطالعه حاضر به صورت تجربی و در سیستم ناپیوسته انجام گردید. نمونه های آب آلوده با افزودن  $10^6$  و  $10^5$  و  $10^4$  عدد باکتری اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در هر میلی لیتر آب آشامیدنی تهیه گردید. متغیرهای مستقل فرآیند شامل سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس با غلظت های مختلف باکتریایی ( $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$  عدد در میلی لیتر)، زمان واکنش (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه)، pH اولیه (۷، ۸ و ۹) فاصله بین الکترودها (۱، ۲ و ۳ سانتی متر) و چگالی جریان (۰/۸۳، ۱/۶۷ و ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع) جهت تعیین شرایط بهینه بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از آنالیز واریانس One-way ANOVA استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان می دهد که در شرایط بهینه با افزایش pH از ۷ به ۹ راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی به طور معنی داری از ۱۰۰٪ به ۸۰٪ و استافیلوکوکوس اورئوس از ۱۰۰٪ به ۸۳٪ کاهش پیدا می کند. در غلظت اولیه  $10^5$  عدد باکتری در میلی لیتر شرایط بهینه برای چگالی جریان، زمان واکنش و فاصله بین الکترودها به ترتیب در ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، ۲۰ دقیقه و ۲ سانتی متر به دست آمد.

**نتیجه گیری:** بر اساس نتایج، راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در شرایط بهینه ۱۰۰٪ به دست آمد؛ بنابراین می توان از فرآیند انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی در حذف باکتری های بیماری زای از آب آشامیدنی استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** انعقاد الکتریکی، شناورسازی الکتریکی، اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس، گندزدایی.

### مقدمه:

گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۶ تقریباً ۷۴۸ میلیون نفر به منابع آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند (۱). در سرتاسر جهان در میان کودکان زیر

امروزه بیشتر کشورهای جهان در تأمین آب آشامیدنی با دشواری‌هایی مواجه هستند که در کشورهای در حال توسعه شدیدتر است. بر اساس

\*نویسنده مسئول: اردبیل- دانشگاه علوم پزشکی اردبیل- گروه بهداشت محیط- کمیته تحقیقات دانشجویی- تلفن: ۰۹۱۴۹۵۳۹۱۷۳

E-mail: soudabehalizadeh@ymail.com

۱۴ سال روزانه بیش از ۴۵۰۰ مرگ و میر به علت بیماری های ناشی از آب رخ می دهد (۲). در اثر بیماری های ناشی از آب سالانه ۳/۴ میلیون نفر در کشورهای درحال توسعه از بین می روند (۳)؛ بنابراین برای پیشگیری از بیماری های واگیردار گندزدایی آب آشامیدنی ضروری است. یک گندزدای مناسب بایستی ویژگی های از قبیل خاصیت ضد باکتریایی گسترده در دمای محیط و در زمان کوتاه، ارزان بودن، عدم تولید محصولات جانبی گندزدایی مضر برای سلامتی در طی استفاده و بعد از آن، عدم خوردگی و حلالیت بالا در آب داشته باشد (۴).

معمول ترین روش های حذف میکروارگانیسم های بیماری زا، گندزدایی فیزیکی و شیمیایی آب، جداسازی توسط غشاء، حرارت، پرتو فرابنفش، استفاده از کلر و مشتقات آن و ازن زنی است (۵،۶). در بیشتر تصفیه خانه های آب برای گندزدایی معمولاً از کلر و مشتقات آن استفاده می شود. کلرزنی روش قابل اطمینان، جاافتاده و پیشرفته است. ولی تشکیل تری هالومتان ها و سلامتی انسان ها، مزه و بوی نامطبوع مهم ترین نگرانی مهندسان و مردم از این ماده است (۷)؛ بنابراین بکارگیری یک روش جایگزین بدون تولید محصولات جانبی گندزدایی و کارایی بالا در حذف میکروب های بیماری زا، ضروری می باشد.

در دهه های اخیر تکنیک الکتروشیمیایی به طور موفقیت آمیز در کشورهای توسعه یافته جهت حذف آلاینده های مختلف و حفظ کیفیت محیط زیست و ارتقاء سلامت جوامع مورد استفاده قرار گرفته است. این تکنیک جزء فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می شود که تغییرات شیمیایی در اثر واکنش های انتقال الکترون در سطح مشترک الکتروود و محلول اتفاق می افتد. از مکانیسم اصلی حذف میکروارگانیسم ها توسط فرآیند الکتروشیمیایی می توان به انعقاد، تجزیه، کاهش، جذب، اکسیداسیون، ته نشینی و شناورسازی اشاره کرد (۸).

به دلیل اینکه فرآیندهای الکتروشیمیایی با مکانیسم های مختلفی سبب حذف میکروارگانیسم ها می شوند، واژه های مختلفی برای این فرآیند نظیر گندزدایی الکترولیتیکی، گندزدایی الکتروشیمیایی، الکترولیز، آب فعال شده و اکسیداسیون آندی مطرح گردیده است (۹،۸). در این مطالعه از واژه الکترولیز به جای انعقاد الکتریکی- شناورسازی الکتریکی استفاده شده است. از جمله مزیت های این روش می توان به سهولت کاربرد، نیاز به تجهیزات ساده، سازگاری بهتر با محیط زیست، تطبیق پذیری، ایمن بودن، انتخاب پذیری، اثربخشی هزینه، تولید لجن کمتر، تولید آب با TDS کمتر در مقایسه با فرآیندهای شیمیایی و حذف کوچک ترین ذرات کلوئیدی اشاره کرد (۱۰،۱۱). همچنین در این روش به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی و مشکل خنثی سازی مواد شیمیایی اضافه شده، احتمال آلودگی ثانویه وجود ندارد. در مناطقی که جریان برق در دسترس نیست می توان از یک تابلوی خورشیدی برای انجام این فرآیند استفاده کرد (۱۲).

از جمله مطالعاتی که در زمینه حذف آلودگی میکروبی با فرآیند الکترولیز صورت گرفته می توان به مطالعه Zhu و همکاران اشاره کرد که با الکترودهای فولادی و گرافیت نمدی با جریان الکتریکی در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ آمپر به کارایی حذف ۹۹/۹۹٪ رسیده بودند (۱۳).

در مطالعه ای که Ghernaout و همکاران بر روی کارایی الکترولیز در حذف سویه باکتری اشرشیاکلی با استفاده از ۳ نوع الکتروود بررسی کرده بودند، یافتند که الکتروود استیل ضدزنگ بیشترین کارایی را در تخریب سلول های اشرشیاکلی در مقایسه با الکترودهای فولاد ضدزنگ و فولاد معمولی دارد (۱۴).

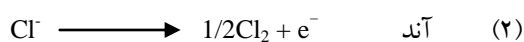
Kraft به بررسی حذف سویه های مختلف باکتریایی با روش الکتروشیمیایی پرداخت و نشان داد که روش الکتروشیمیایی یک روش مناسب و جایگزین در گندزدایی آب خنک سازی بر علیه اشرشیاکلی،

لژیونلاپنوموفیلا و استافیلوکوکوس اورئوس و پسودوموناس آئروژینوزا می باشد (۹).

نوع الکتروود و آرایش آن، pH محیط راکتور، شدت جریان الکتریکی، غلظت اولیه آلاینده و زمان واکنش از مهم ترین عوامل موثر در کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون است که تغییر هر یک از این پارامترها باعث ایجاد تغییرات در ماهیت واکنش های الکتروشیمیایی، تغییرات هزینه های مربوط به انرژی مصرفی و در نهایت تغییر راندمان حذف می گردد (۱۵). اتفاق افتادن فرآیند گندزدایی بر پایه اکسیژن اجتناب از تولید فرآورده های جانبی مضر، قابلیت اطمینان بالایی در گندزدایی آب آشامیدنی، آب خنک سازی صنعتی و آب استخر دارد که از جمله مزایای گندزدایی آب به روش الکتروشیمیایی است (۱۶). در روش الکتروشیمیایی تولید هیدروژن نسوزید (واکنش ۱) و ازن در حضور مولکول اکسیژن و جریان الکتریکی اتفاق می افتد. همچنین زمانی که یون کلر در محلول وجود داشته باشد سبب تولید کلر آزاد و دی اکسید کلر می شود.



محصول اصلی در آند اکسیژن و کلر است (واکنش ۲) که با اسیدی شدن آب در نزدیکی آند همراه است. محصول اصلی در کاتد هیدروژن است (واکنش ۳) که با قلیایی شدن آب در نزدیکی کاتد و تولید رسوبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم همراه است (۱۶). به عبارتی دیگر در فرآیند الکتروشیمیایی عمل اکسیداسیون و احیا به ترتیب در الکترودهای آند و کاتد همراه با تولید اکسیدان های هیدروژن پراکسید در کاتد، کلر آزاد و دی اکسید کلر در حضور یون کلرید و ازن در حضور اکسیژن در آند انجام می شود (۹).



الکترودهای کربنی شامل گرافیت نمدی، الیاف کربنی، الکتروود کربنی و کربن شبکه ای می توانند سبب تولید پراکسید هیدروژن بشوند (۱۷).

از میان الکترودهای کربنی گرافیت نمدی از سطح ویژه بسیار بالایی برخوردار می باشد. سطح ویژه بزرگ به دلیل متخلخل بودن و منافذ قابل دسترس زیاد می باشد. به عبارتی سطح ویژه بزرگ به دلیل فیبرهای نازک سطح بیرونی (۱۰-۸ میکرومتر) و قابلیت نفوذ جریان در صفحات بزرگ بینایی بین فیبرها که توانایی جریان آزاد از محلول را دارد، ناشی می شود. همچنین ذخیره سازی اکسیژن در داخل صفحات گرافیت نمدی بسیار بالا می باشد و با واکنش توسط الکترون های آزاد که از طرف آند در طی اکسیداسیون تولید می شود، می تواند سبب تولید گونه های رادیکال OH، ازن، اکسیژن یونی و دیگر شکل های اکسیژن که خاصیت باکتری کشی دارند، بشود. این خواص همان مزایایی است که این الکتروود نسبت به سایر الکتروودها برخوردار می باشد (۱۸).

روش انعقاد الکتریکی به ایجاد عوامل ناپایدار کننده جهت خنثی سازی آلاینده ها و شناورسازی الکتریکی به تولید حباب های گاز جهت شناورسازی مواد سبک و حذف آن ها از سیستم توسط انجام کفاب گیری اشاره دارد (۱۹، ۲۰). روشی که برای حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، روش انعقاد و شناورسازی الکتریکی با الکتروود استیل ضدزنگ و گرافیت نمدی می باشد که در آن از ترکیب دو روش انعقاد و شناورسازی الکتریکی استفاده شده است.

با توجه به وجود مشکلات آلودگی آب با میکروارگانیسم ها، محدودیت های متعدد روش های متداول در گندزدایی آب و مزایای متعدد فرآیند الکتروولیز به عنوان فرآیند قابل استفاده در نقطه مصرف، این مطالعه با هدف تعیین کارایی فرآیند الکتروولیز در تصفیه آب آشامیدنی آلوده به سویه های باکتریایی گرم منفی اشرشیاکلی (شاخص های آلودگی میکروبی آب آشامیدنی) و گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس با الکترودهای استیل ضدزنگ و گرافیت نمدی با آرایش تک قطبی موازی انجام شد.

**روش بررسی:**

مطالعه حاضر به صورت تجربی با استفاده از یک راکتور الکتروشیمیایی ناپیوسته در مقیاس آزمایشگاهی انجام گردید. برای تنظیم هدایت الکتریکی از سدیم کلرید و برای تنظیم pH از سود و اسید کلریک ۱ نرمال

استفاده گردید. از یک محلول آبی استریل با مشخصات جدول شماره ۱ استفاده شد. به محلول غلظت های مختلفی از اشرشیاکلی ATCC 25922 و استافیلوکوکوس اورئوس ATCC 25923 اضافه شد.

**جدول شماره ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب شبکه توزیع شهری اردبیل**

پارامتر	واحد	غلظت
سختی کل	mg/L CaCO <sub>3</sub>	۲۷۷/۵۵
سختی کلسیم	mg/L CaCO <sub>3</sub>	۱۳۱/۷۷۵
قلیائیت کل	mg/L CaCO <sub>3</sub>	۲۲۵/۵
سدیم	mg/L	۱۷۳/۳۸
پتاسیم	mg/L	۱۹/۰۷
نترات	mg/L	۶/۰۱
نیتريت	mg/L	۰/۲۲
سولفات	mg/L	۶۷/۰۲
کلراید	mg/L	۹۶/۲۳
فلوراید	mg/L	۰/۸۰
کدورت	NTU	۰/۴۶
هدایت الکتریکی	ms/cm	۰/۷۵
TDS	mg/L	۵۷۶/۴۵
pH	-----	۷/۵۳
دما	°C	۱۸°C

سوش باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در محیط کشت نوترینت براث در شرایط هوایی و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس گرمخانه گذاری شدند. سپس با لوپ استریل از محیط کشت نوترینت براث مقداری برداشته و بر روی محیط های کشت اختصاصی (برای اشرشیاکلی از محیط کشت جامد مک کانکی و برای استافیلوکوکوس اورئوس از محیط کشت جامد مانیتول سالت استفاده گردید) هر سویه باکتری به

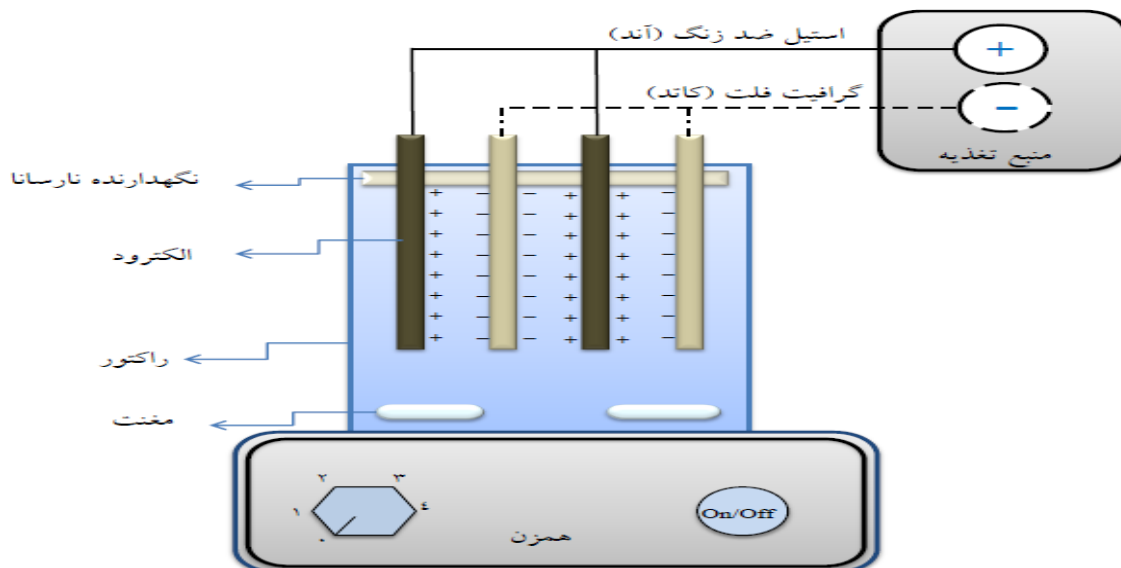
حالت خطی یکنواخت کشت داده شد. سپس محیط ها به حالت وارونه در گرمخانه با دمای ۳۷ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در شرایط هوایی گرمخانه گذاری شدند (۲۱).

در این پژوهش، استاندارد مک فارلند به عنوان مرجعی برای مطابقت دادن کدورت ناشی از سوسپانسیون باکتری استفاده شد (۲۲). از آنجایی که تعداد باکتری تلقیح شده یکی از مهم ترین متغیرهایی است که بر نتیجه این پژوهش اثر می گذارد، تراکم سوسپانسیون میکروبی

موازی (Monopolar) به منبع جریان برق مستقیم (DC Power) متصل شد. فاصله الکترودها از کف ۲ سانتی متر و فاصله بین الکترودها ۳-۱ سانتی متر معین گردید. الکترود استیل ضدزنگ به قطب مثبت منبع تغذیه و الکترود گرافیت نمدی به قطب منفی منبع تغذیه متصل گردید. منبع برق جریان مستقیم از نوع (Dazheng DC Power supply PS-302D) بود که قابلیت تولید جریان الکتریسیته تا ۳۰ ولت را داشت. جهت برقراری اختلاط درون راکتور حین انجام فرآیند از یک همزن آهنربایی (Magnet) استفاده شد، به طوری که جهت تأمین اختلاط لازم کل راکتور روی یک همزن مغناطیسی با سرعت ۲۰۰ rpm قرار گرفت. در همه آزمایش‌ها سرعت همزن مغناطیسی ثابت در نظر گرفته شد. شماتیک کلی راکتور الکتروشیمیایی و جزئیات آرایش تک قطبی و نحوه قرارگیری بارهای الکتریکی بر روی الکترودها در تصویر شماره ۱ نشان داده شده است.

تلقیحی باید استاندارد باشد. جذب نوری کدورت ایجاد شده توسط محلول نیم مک فارلند (شامل اسیدسولفوریک و کلروباریوم) در طول موج ۶۱۰ نانومتر به وسیله اسپکتروفومتر (مدل Hach) اندازه‌گیری گردید که دارای میزان جذب نوری ۰/۱-۰/۰۹ بود. کلنی‌های باکتری تا حدی به آب اضافه گردید تا کدورت ایجاد شده توسط باکتری‌ها معادل با کدورت اندازه‌گیری شده در لوله استاندارد ۰/۵ مک فارلند باشد. با توجه به اینکه غلظت باکتریایی نیم مک فارلند برابر  $1/5 \times 10^8$  CFU/ml می‌باشد، برای به دست آوردن سایر رقت‌های باکتریایی ( $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$ ) از رقیق‌سازی استفاده گردید.

راکتور با مشخصات زیر جهت انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت؛ محفظه‌ای از جنس پلکسی گلاس به ابعاد  $170 \times 105 \times 135$  میلی‌متر، دو الکترود استیل ضدزنگ و گرافیت نمدی که هر کدام دارای ابعاد  $100 \times 40 \times 2$  میلی‌متر به صورت متناوب به حالت تک قطبی



تصویر شماره ۱: راکتور الکتروشیمیایی و اتصال تک قطبی موازی الکترودها به منبع تغذیه

این مطالعه تأثیر ۵ متغیر مستقل چگالی جریان، زمان واکنش، فاصله بین الکترودها، pH اولیه و غلظت اولیه باکتری‌ها به منظور تعیین کارایی فرآیند الکترولیز در حذف باکتری‌های گرم منفی اشرشیاکلی و گرم مثبت

قبل از انجام هر آزمایش برای حذف ناخالصی از الکترودها، سطح الکترودها با کاغذ سمباده ساییده شدند و سپس در محلول HCL فرو برده شدند و پس از آن با آب مقطر به مدت یک دقیقه آبکشی شدند. در

استاندارد آب و فاضلاب انجام گردید (۱۹). لازم به ذکر است که انتخاب این محدوده pH مطابق با مقادیر pH گزارش شده برای آب های آشامیدنی، سطحی و زیرزمینی می باشد، همچنین این محدوده سازگار با شرایط تصفیه خانه آب می باشد که در آن مقدار pH آب مورد تصفیه معمولاً نزدیک به ۷ است.

برای به دست آوردن میزان الکتروود مصرفی جهت تصفیه هر لیتر آب آشامیدنی در ابتدا و انتهای فرآیند وزن الکتروودها با استفاده از یک ترازوی دقیق (دقت ۰/۰۰۰۰۱ گرم، مدل GR) اندازه گرفته شد و تغییرات وزن الکتروودها به عنوان میزان الکتروود مصرفی گزارش گردید. جهت محاسبه مقدار انرژی مصرفی در طی فرآیند الکتروولیز از معادله ۲ استفاده گردید (۲۳):

$$E = \frac{IUT}{V} \quad (2)$$

در این رابطه: E: مقدار انرژی مصرفی (کیلو وات ساعت بر مترمکعب)، I: چگالی جریان (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)، U: ولتاژ موجود در راکتور (ولت)، V: حجم آب داخل راکتور (متر مکعب)، T: زمان انجام فرآیند (ساعت).

برای سنجش آماری داده ها از SPSS software, version 14 (SPSS, Inc. Chicago, IL, USA) Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) برای رسم نمودارها استفاده گردید. جهت بررسی رابطه معنی داری میان غلظت اولیه سویه های باکتریایی و غلظت باقیمانده و تعیین درستی راندمان فرآیند در حذف سویه های باکتریایی از آنالیز واریانس One-way ANOVA استفاده شد.

### یافته ها:

همانطور که نمودار شماره ۱ نشان می دهد، درجه حرارت محلول با افزایش زمان واکنش و هدایت الکتریکی افزایش می یابد. بیشترین درجه حرارت محلول در هدایت الکتریکی ۱۲ میلی زمینس بر سانتی متر و زمان تماس ۲۰ دقیقه، برابر ۵۰ درجه سلسیوس به دست

استافیلوکوکوس اورئوس از آب آشامیدنی بررسی گردید. در هر مرحله از آزمایش حجم ۱/۵ لیتر از آب دارای غلظت باکتریایی CFU/ml ۱۰<sup>۵</sup> با pH مختلف (۳ سطح ۷، ۸ و ۹) وارد راکتور شده و فرآیند الکتروولیز با جریان برق مستقیم در چگالی جریان های معین (۰/۸۳، ۱/۶۷ و ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع) و فاصله های معین (۱، ۲ و ۳ سانتی متر) بین الکتروودها انجام گرفت. پس از سپری شدن زمان لازم در ۴ سطح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه از درون راکتور نمونه برداری جهت تعیین راندمان حذف باکتری ها انجام شد. در هر مرحله یک پارامتر بهره برداری بهینه تعیین و در انتها با توجه به چگالی جریان، فاصله بین الکتروودها، زمان واکنش و pH بهینه، کارایی فرآیند برای غلظت های اولیه CFU/ml ۱۰<sup>۴</sup>، ۱۰<sup>۵</sup> و ۱۰<sup>۶</sup> مشخص شد.

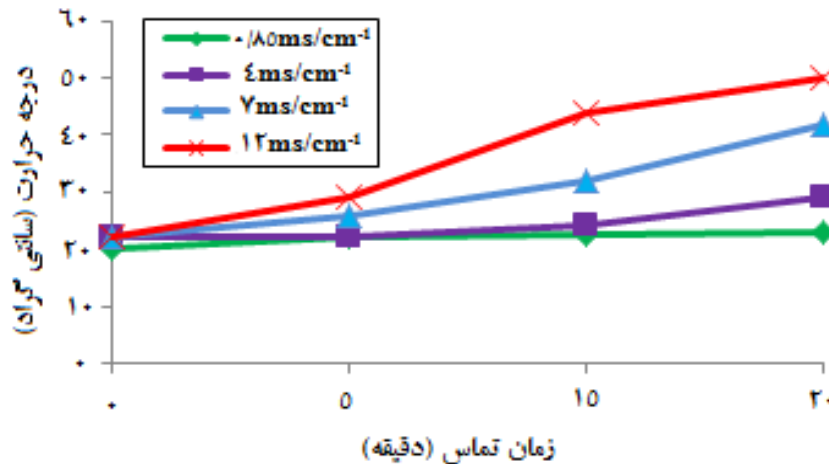
کلیه آزمایش ها در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه سلسیوس) انجام شد. pH، ولتاژ و درجه حرارت در طی آزمایشات اندازه گیری شد. برای اندازه گیری pH هدایت الکتریکی و دمای محلول به ترتیب از pH متر (مدل Hack)، هدایت سنج الکتریکی (مدل Hack) و دماسنج جیوه ای استفاده گردید. در حدود ۵ میلی لیتر نمونه از محلول الکتروولیز شده برداشت و به لوله های در پیچ دار استریل انتقال داده شد. بعد از ۳۰ دقیقه زمان ته نشینی، از محلول رویی برداشت و رقیق سازی های لازم انجام و سپس حجم ۱۰۰ میکرولیتر از محلول رقیق سازی شده برداشت کرده و بر روی محیط کشت اختصاصی آگار هر سویه باکتری کشت داده شد. راندمان حذف باکتری ها از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$E\% = \left( \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100$$

که E% درصد حذف باکتری ها، C<sub>in</sub> تعداد کلنی های ورودی و C<sub>out</sub> تعداد کلنی های خروجی پس از فرآیند الکتروولیز است. کلیه آزمایشات برای سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به صورت جداگانه انجام گردید. تمامی آزمایشات بر اساس دستورالعمل های موجود در کتاب آزمایش های

بر سانتی متر به دست آمد و تغییرات درجه حرارت آن از ابتدا تا انتهای زمان واکنش برابر ۳ درجه سلسیوس می باشد.

آمد که تغییرات درجه حرارت آن از ابتدا تا انتهای زمان واکنش ۲۸ درجه سلسیوس می باشد. کمترین درجه حرارت محلول برای هدایت الکتریکی ۰/۸۵ میلی زیمنس



**نمودار شماره ۱:** تغییر درجه حرارت با افزایش زمان تماس و هدایت الکتریکی در طی فرآیند الکترولیز ولتاژ ۳۰ ولت.

۲ سانتی متر در نظر گرفته شد. در فاصله ۲ سانتی متری میان الکترودها و میزان رسانایی الکتریکی ۰/۸۵ میلی زیمنس بر سانتی متر کاهش سوپه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ۱۰۰٪ رسید (جدول شماره ۲).

همانطور که جدول شماره ۲ نشان می دهد، فاصله بین الکترودها تأثیر زیادی بر روی فرآیند الکترولیز ندارد. در واقع کاهش باکتری ها تقریباً ثابت و بیشتر از ۹۸٪ بود. به همین خاطر در همه آزمایشات فاصله بین الکترودها

**جدول شماره ۲:** تأثیر فاصله الکترودها بر روی راندمان فرآیند الکترولیز در حذف سوپه های باکتریایی

فاصله بین الکترودها	۱ سانتی متر	۲ سانتی متر	۳ سانتی متر
کاهش باکتری اشرشیاکلی (درصد)	۹۹	۱۰۰	۹۸/۳
کاهش باکتری استافیلوکوکوس اورئوس (درصد)	۹۹/۶	۱۰۰	۹۸/۷

$pH=7$  هدایت الکتریکی ۰/۸۵ ms/cm، غلظت اولیه باکتریایی  $CFU/ml$   $10^8$ ، چگالی جریان ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، زمان واکنش ۲۰ دقیقه و زمان ته نشینی ۳۰ دقیقه.

می کند. هم زمان با انجام مراحل بهینه سازی، تغییرات pH نمونه آب داخل راکتور در ابتدا و انتهای زمان واکنش اندازه گیری شدند. جدول شماره ۳ نتایج حاصل از تغییرات pH را در ابتدا و انتهای زمان واکنش نشان می دهد. تغییرات آن به طور متوسط ۰/۹ بوده است.

جدول شماره ۳ نتایج تأثیر pH بر روی راندمان حذف باکتری ها را نشان می دهد. زمانی که pH اولیه از ۷ به ۹ افزایش می یابد، راندمان حذف سوپه های باکتریایی اشرشیاکلی به طور معنی داری از ۱۰۰٪ به ۸۰٪ و استافیلوکوکوس اورئوس از ۱۰۰٪ به ۸۳٪ کاهش پیدا

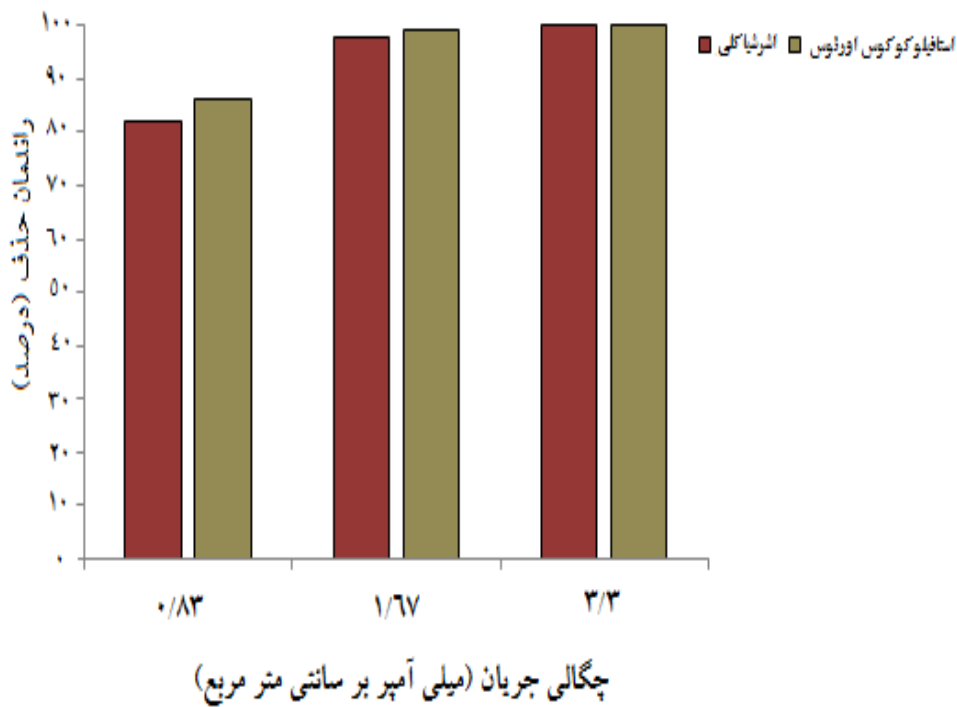
**جدول شماره ۳: تأثیر pH اولیه بر روی راندمان**

**فرآیند الکترولیز**

pH اولیه	۷	۸	۹
pH نهایی	۷/۹	۸/۸	۱۰
کاهش اشرشیاکلی (درصد)	۱۰۰	۹۴	۸۰
کاهش استافیلوکوکوس اورئوس (درصد)	۱۰۰	۹۷	۸۳

چگالی جریان ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، هدایت الکتریکی ۰/۸۵ ms/cm، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر، غلظت اولیه باکتریایی CFU/ml ۱۰<sup>۵</sup> و زمان ته نشینی ۳۰ دقیقه.

تأثیر تغییرات چگالی جریان بر راندمان حذف سویه های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل در نمودار شماره ۲ نشان می دهد که با افزایش چگالی جریان راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس افزایش پیدا می کند. به طوری که با افزایش چگالی جریان از ۰/۸۳ به ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و زمان تماس ۲۰ دقیقه و در شرایط بهینه راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب از ۸۲٪ و ۸۶٪ به ۱۰۰٪ رسید.



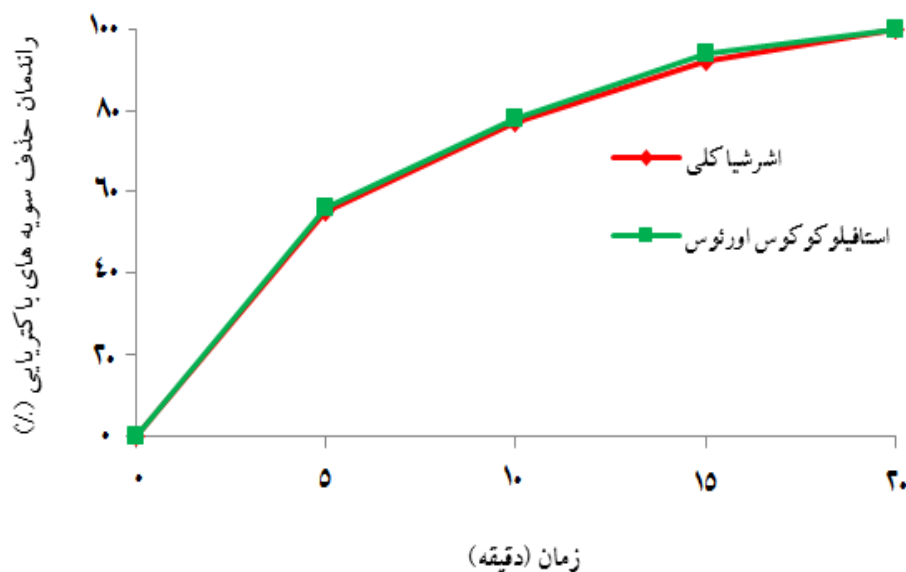
**نمودار شماره ۲: تأثیر چگالی جریان بر روی راندمان فرآیند الکترولیز**

pH=۷، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر، غلظت باکتریایی CFU/ml ۱۰<sup>۵</sup> و زمان ته نشینی ۳۰ دقیقه.

دوسویه باکتری افزایش پیدا کرد. با افزایش زمان واکنش از ۵ به ۲۰ دقیقه راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب از ۵۵٪ و ۵۶٪ به ۱۰۰٪ رسید.

نمودار شماره ۳ نتایج حاصل از حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس را در زمان های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه را نشان می دهد. با افزایش زمان واکنش راندمان حذف هر





### نمودار شماره ۳: تأثیر زمان تماس بر روی راندمان فرآیند الکترولیز

۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر، غلظت باکتریایی  $10^6$  CFU/ml و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه.

زمان واکنش ۲۰ دقیقه به دست آمد. مطابق با شرایط بهینه مشخص شده، تأثیر غلظت های اولیه باکتریایی به صورت سری های جداگانه بررسی شد که نتایج آن در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

در نهایت پس از بهینه‌سازی هر یک از پارامترها، بهترین حالت از نظر راندمان فرآیند، بهره برداری و اقتصادی در شرایط  $pH=7$ ، شدت جریان ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر و

### جدول شماره ۴: نتایج راندمان حذف (بر حسب درصد) سویه های باکتریایی در غلظت های اولیه مختلف

غلظت های اولیه سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس (CFU/ml)			تکرار نمونه برداری	سویه های باکتریایی
$10^6$	$10^5$	$10^4$		
۷۷	۱۰۰	۱۰۰	تکرار اول	اشرشیاکلی
۷۴	۱۰۰	۹۹/۷	تکرار دوم	
۷۶	۱۰۰	۹۹/۳	تکرار سوم	
۷۵/۶۷	۱۰۰	۹۹/۶۷	میانگین	
۱/۲۴۶	۰	۰/۲۸۶	انحراف معیار	
۷۹	۱۰۰	۱۰۰	تکرار اول	استافیلوکوکوس اورئوس
۷۷	۱۰۰	۱۰۰	تکرار دوم	
۷۸	۱۰۰	۹۹/۶	تکرار سوم	
۷۸	۱۰۰	۹۹/۸۷	میانگین	
۰/۸۱۶	۰	۰/۲۷	انحراف معیار	

$pH=7$ ، زمان واکنش ۲۰ دقیقه و چگالی جریان ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه.

نتایج آنالیز واریانس One-way ANOVA بین فاکتور غلظت اولیه سویه های باکتریایی اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس و غلظت باقیمانده آن ها در جدول شماره ۵ آمده است. آنالیز آماری صورت گرفته حاکی از آن است که رابطه معنی داری بین غلظت های اولیه باکتریایی و راندمان فرآیند وجود دارد ( $P < 0/01$ ).

**جدول شماره ۵: آنالیز واریانس One-way ANOVA بین فاکتور غلظت اولیه سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس و غلظت باقیمانده آن ها**

P	F	Adj MS	Adj SS	DF	Source	سویه های باکتریایی
0/000	761/18	59203001111	1/18406E+11	2	Initial concentration	اشرشیاکلی
		77778189	466669133	6	Error	
			1/18873E+11	8	Total	
0/000	1451/90	48397066844	96794133689	2	Initial concentration	استافیلوکوکوس اورئوس
		33333511	200001067	6	Error	
			96994134756	8	Total	

\*: مقدار  $P < 0/01$  معنی دار است.

با اندازه گیری تغییرات وزن الکترودهای آند (استیل ضدزنگ) و کاتد (گرافیت نمدی) در ابتدا و انتهای فرآیند، میزان الکتروود مصرفی جهت تصفیه هر لیتر آب آشامیدنی در شرایط بهینه محاسبه شد (جدول شماره ۶).

**جدول شماره ۶: میزان تغییرات وزن الکترودهای مورد استفاده در فرآیند**

نوع الکتروود	وزن در ابتدای فرآیند	وزن در پایان فرآیند	الکتروود مصرفی *
استیل ضدزنگ	85/265	85/2395	0/017
	85/21	85/1875	0/015
گرافیت نمدی	5/34	5/3397	0/00023
	4/95	4/9498	0/00019

واحد تمامی اعداد گرم می باشد؛ \*: حجم مورد تصفیه در راکتور 1/5 لیتر بود، به همین دلیل از ضریب 0/667 جهت تبدیل حجم مفید راکتور (1/5 لیتر) به لیتر استفاده شد.

جدول شماره ۷ میزان انرژی مصرفی را در شرایط مختلف چگالی جریان (0/83، 1/67 و 3/3 میلی آمپر بر سانتی متر مربع)، زمان واکنش (5، 10، 15 و 20 دقیقه) و pH (9، 7) نشان می دهد. غلظت اولیه سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس  $10^5$  CFU/ml می باشد. همانطور که در جدول شماره ۷

مشخص شده است، هرچند میزان انرژی در شرایط مختلف بهره‌برداری متفاوت است، ولی با توجه به مقدار راندمان حذف سوش های باکتریایی، چگالی جریان ۳/۳ میلی‌آمپر بر سانتی متر مربع و زمان واکنش ۲۰ دقیقه از نظر میزان انرژی مصرف شرایط مناسب برای بهره‌برداری است.

**جدول شماره ۷: میزان انرژی مصرفی به تفکیک شدت جریان، زمان واکنش و pH های مختلف**

انرژی مصرفی (کیلو وات ساعت بر متر مکعب)			زمان واکنش (دقیقه)	چگالی جریان (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)
pH=۹	pH=۸	pH=۷		
۰/۰۴۰۷	۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۲	۵	۰/۸۳
۰/۰۸۳۴	۰/۰۹۲۶	۰/۰۸۶۰	۱۰	
۰/۱۲۵۶	۰/۱۳۹۴	۰/۱۲۹۵	۱۵	
۰/۱۶۲۸	۰/۱۸۱۲	۰/۱۶۸	۲۰	
۰/۱۳۹۸	۰/۱۳۹۳	۰/۱۲۸۲	۵	۱/۶۷
۰/۲۸۱۶	۰/۲۸۰۵	۰/۲۵۸۴	۱۰	
۰/۴۲۳۴	۰/۴۲۱۹	۰/۳۸۸۶	۱۵	
۰/۵۵۹۲	۰/۵۵۷۳	۰/۵۱۲۸	۲۰	
۰/۵۰۲۷	۰/۴۶۷۲	۰/۴۵۳۸	۵	۳/۳
۱/۰۰۸۴	۰/۹۳۷۳	۰/۹۱۰۶	۱۰	
۱/۵۱۴۱	۱/۴۰۷۶	۱/۳۶۷۴	۱۵	
۲/۰۱۲۸	۱/۸۷۰۹	۱/۸۱۷۲	۲۰	

غلظت اولیه سویه های باکتریایی  $10^5$  CFU/ml، فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه.

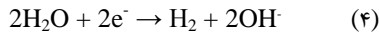
## بحث:

الکتريکی افزایش می یابد. در یک ولتاژ ثابت ( $\Delta V$ )، جریان ( $I$ )، الکترولیز به مقاومت ( $R$ )، محلول بین الکترودها وابسته است ( $I = \Delta V / R = \Delta V / G$ ). افزایش هدایت الکتريکی ( $G$ ) محلول سبب افزایش جریان الکتريکی می‌شود و در نتیجه درجه حرارت محلول به واسطه افزایش ژول ( $RI^2$ ) افزایش پیدا می کند (نمودار شماره ۱).

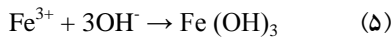
با توجه به اینکه اکثر باکتری های پاتوژن در درجه حرارت ۴۵-۱۵ درجه سلسیوس قابلیت زیستن دارند، بنابراین درجه حرارت محلول با انتخاب محلول هایی با هدایت الکتريکی پایین تر، در درجه حرارت کمتر از ۴۰ درجه سلسیوس کنترل گردید. البته با توجه به اینکه هدایت الکتريکی یک پارامتر کلیدی

شدت جریان تعیین کننده مقدار منعقدکننده و همچنین میزان تولید هیدروژن، پراکسید هیدروژن، ازن و سایر گونه های مولکولی و یونی می باشد (۹). همچنین جریان عبوری از طریق محلول سبب تغییر درجه حرارت محلول می شود (۲۴). تأثیر درجه حرارت بر روی غیرفعال سازی میکروبی از طریق میدان مغناطیسی گزارش شده است (۲۵). به منظور کنترل درجه حرارت در طی تصفیه با فرآیند الکترولیز یک مطالعه اولیه در مورد انتخاب پارامتر هدایت الکتريکی انجام شد. فرآیند الکترولیز به صورت ناپیوسته با یک کنترل ولتاژ (۳۰ ولت) انجام گرفت.

همانطور که نمودار شماره ۱ نشان می دهد، درجه حرارت محلول با افزایش زمان و هدایت



در محلول این یون‌ها واکنش داده و منجر به تشکیل گونه‌های مختلف مونومریک و پلی مریک و نهایتاً بر طبق کمپلکس سنتیک های ته‌نشینی به  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  تبدیل می‌شود (معادله ۵).



$\text{Fe}(\text{OH})_3$  تولید شده دارای مناطق سطح بزرگی برای جذب ترکیبات آلی یا به دام انداختن ذرات کلوئیدی دارا می‌باشد (۲۸،۲۷). در این مطالعه علت راندمان بالا در حذف سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس را می‌توان به رادیکال‌های OH (اکسیدکننده قوی) تولید شده در کاتد و  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  تولید شده در آنند نسبت داد. با توجه به اینکه مراکز حیاتی سلول‌های باکتریایی توسط غشاء که از لایه‌های فسفولیپید با قسمت آبگریز و آبدوست تشکیل شده‌اند، حفاظت می‌شود. اجزاء پروتئینی در اطراف غشاء اجازه تعویض یون با محیط اطراف سلولی را می‌دهد.

تخریب غشای فسفولیپیدی نیازمند یک اکسیدانت با توانایی عبور از غشاء و رسیدن به مرکز حیاتی را دارد (۲۹). همچنین  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  تولید شده حالت رسوبی داشته و باکتری‌ها می‌توانند در محل‌های فعال روی این لخته‌ها جذب شوند و با ته‌نشینی و یا شناورسازی از سیستم حذف شوند (۳۰). در درجه بعد کاهش باکتری‌ها را می‌توان به واسطه جذب بر روی الکترودها نیز نسبت داد.

Drees و همکاران نشان دادند که مولکول‌های لیوپولی ساکارید غشای خارجی باکتری گرم منفی اشرشیاکلی به دلیل داشتن بار منفی، بر روی الکترودها روی به‌عنوان قطب مثبت (آند) جذب شود (۳۱).

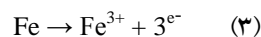
فاصله بین الکترودهای آند و کاتد ۱، ۲ و ۳ سانتی متر معین گردید که مطابق با آن ولتاژ میدان مغناطیسی به ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۱۰ ولت بر سانتی متر قرار داده شد. همانطور که جدول شماره ۲ نشان می‌دهد فاصله بین الکترودها تأثیر زیادی بر روی فرآیند الکترولیز

الکترولیز است؛ بنابراین هدایت الکتریکی باید به قدر کافی بیشتر باشد تا جریان الکتریکی بتواند از طریق محلول عبور کند.

همانطور که نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد کمترین تغییرات درجه حرارت محلول (از ۲۰ به ۲۳ درجه سلسیوس) برای هدایت الکتریکی ۰/۸۵ میلی‌زیمنس بر سانتی متر به دست آمد. در فاصله ۲ سانتی متری میان الکترودها و میزان رسانایی الکتریکی ۰/۸۵ میلی‌زیمنس بر سانتی متر در شرایط بهینه کاهش سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ۱۰٪ رسید (جدول شماره ۲). به همین خاطر در همه آزمایشات میزان رسانایی الکتریکی ۰/۸۵ میلی‌زیمنس بر سانتی متر در نظر گرفته شد؛ بنابراین کاهش مشاهده شده در تعداد باکتری‌ها را فقط به میدان الکتریکی به کار رفته در فرآیند تصفیه می‌توان نسبت داد.

Ricordel و همکاران در مطالعه‌ای که بر روی مکانیسم و راندمان کاهش باکتری‌های اشرشیاکلی از طریق فرآیند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودهای آلومینیم در محیط آبی انجام داده بودند، یافتند که درجه حرارت محلول با افزایش هدایت الکتریکی محلول افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین برای کنترل درجه حرارت از محلول‌هایی با هدایت الکتریکی کمتر (۰/۶ میلی‌زیمنس بر سانتی متر) استفاده کردند. همچنین این مطالعه نشان داد که کاهش باکتری‌های اشرشیاکلی فقط به واسطه میدان الکتریکی به کار بسته شده می‌باشد (۲۶).

فرآیند الکترولیز بر روی پارامترهای شیمیایی محلول الکترولیز شده تأثیر دارد. در طی تصفیه، ترکیبات آلی می‌تواند از طریق احیاء یا از طریق جذب بر روی لجن تولید شده حذف شود. یون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  و OH به ترتیب از واکنش‌های آندی و کاتدی به وجود می‌آیند که به ترتیب در معادله سه و چهار نشان داده شده است.



ندارد. با افزایش فاصله بین الکترودها راندمان حذف تقریباً ثابت بوده و تغییرات آن شامل چند دهم درصد می‌باشد. به همین خاطر در اکثر آزمایشات فاصله بین الکترودها ۲ سانتی متر در نظر گرفته شد.

مکانیسم اصلی حذف باکتری‌ها توسط فرآیند الکترولیز به‌طور کامل شناخته نشده است. سلول‌های بیولوژیکی وقتی در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، می‌توانند پاسخ‌های فیزیولوژیک عمیقی از خود نشان دهند. اغلب این پاسخ‌ها بر روی تغییر پتانسیل عبوری از غشاء استوار هستند که از طریق کاربرد یک میدان مغناطیسی خارجی حاصل می‌شود.

اگر قدرت میدان مغناطیسی بیش از یک مقدار آستانه باشد (بین ۱-۲ ولت) می‌تواند سبب تشکیل منافذ در غشاء شود که این پدیده ایجاد منافذ به‌وسیله الکتروپوریشن (Electroporation) نامیده می‌شود. کمترین مقدار پتانسیل عبوری از غشاء که به قطب‌های سلول می‌رسد و با قطر سلول متناسب است. در ضمن سلول‌های بزرگ‌تر حساسیت بیشتری نسبت به سلول‌های کوچک‌تر دارند و بیشترین آسیب در قطب‌های سلول‌ها ایجاد می‌شود. پتانسیل بحرانی همچنین به ساختار غشاء و درجه حرارت بستگی دارد. با افزایش درجه حرارت یا تنش غشاء پتانسیل بحرانی یا مقدار آستانه کاهش پیدا می‌کند (۳۲).

pH محیط نقش مهمی در سرعت و راندمان فرآیندهای شیمیایی نظیر الکترولیز دارد. در فرآیند الکترولیز مقدار pH محلول طی واکنش تغییر پیدا می‌کند. این مقدار تغییر به قلیائیت آب، جنس الکترودها و pH اولیه آب بستگی دارد. به علت اینکه تشکیل لخته به‌شدت به pH وابسته است. به همین دلیل جهت کنترل راندمان فرآیند باید مقدار pH محیط به‌طور مداوم کنترل و تنظیم شود. معمولاً در طی فرآیند الکترولیز pH افزایش پیدا می‌کند که از دلایل آن می‌توان به تولید هیدروژن در کاتد و همچنین آزادسازی دی‌اکسید کربن محلول از طریق اختلاط ایجادشده از حباب‌های هیدروژن اشاره کرد.

نتایج مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که تأثیر این پارامتر به نوع آلاینده و نوع فرآیند مورد استفاده بستگی دارد (۲۶). جدول شماره ۳ نتایج تأثیر pH بر روی کاهش باکتری‌ها را نشان می‌دهد. بهترین pH‌ها در حذف سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس، حالت‌های خنثی و مقداری قلیایی می‌باشد. هر چه به سمت شرایط قلیایی می‌رویم، راندمان حذف کاهش می‌یابد. زمانی که pH اولیه از ۷ به ۹ افزایش می‌یابد، راندمان حذف سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی به‌طور معنی‌داری از ۱۰۰٪ به ۸۰٪ و استافیلوکوکوس اورئوس از ۱۰۰٪ به ۸۳٪ کاهش پیدا می‌کند. دلیل این می‌تواند به خاطر حلالیت آهن در pH‌های مختلف باشد.

در pH‌های ۷ و ۸/۵ شکل غالب یون‌های آهن،  $Fe(OH)_3$  می‌باشد که حالت رسوبی داشته و باکتری‌ها می‌توانند در محل‌های فعال روی این لخته‌ها جذب شوند و با ته‌نشینی و یا شناورسازی از سیستم حذف شوند (۳۰)؛ بنابراین کاهش باکتری‌ها به دلیل به دام افتادن ذرات در لخته‌های تشکیل‌شده می‌باشد و حل شدن دوباره لخته‌ها سبب آزادسازی تعدادی از باکتری‌ها در محلول می‌شود. علاوه بر این افزایش واکنش‌های شیمیایی در pH معادل ۷ به حداکثر افزایش انتقال الکترون بین باکتری و الکترودها کاهش فولینگ الکترودها منجر می‌شود (۹). به دلیل اینکه در تصفیه آب pH مطلوب ۷ می‌باشد و طبق نتایج به‌دست‌آمده راندمان در pH=۷ بیشتر از سایر pH‌های دیگر می‌باشد. در این مطالعه pH=۷ به‌عنوان بهترین شرایط از لحاظ بازدهی حذف و بهره‌برداری فرآیند تصفیه انتخاب شد.

در فرآیند الکترولیز با اعمال جریان الکتریکی بر روی الکترودها واکنش شروع می‌شود. تغییرات شدت جریان بر میزان تولید منعقدکننده و راندمان فرآیند تأثیر دارد و از نظر بهینه‌سازی مصرف انرژی و در نهایت از جنبه اقتصاد فرآیند باید مورد بررسی قرار

گیرد. در صورتی که بهینه سازی پارامتر شدت جریان به درستی انجام بگیرد، علاوه بر راندمان فرآیند، بر اقتصاد فرآیند و کاهش هزینه های مستقیم (انرژی برق) و غیرمستقیم (مقدار الکتروود مصرفی) تأثیرگذار است. تأثیر تغییرات چگالی جریان بر راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است.

چگالی جریان الکتریکی به عنوان یکی از فاکتورهای موثر بر راندمان حذف در گام های بعدی از بهینه سازی شرایط مورد بررسی قرار گرفت. این فاکتور بر سرعت انجام واکنش های الکترولیز از طریق تأثیر بر میزان یون های فلزی که از سطح الکتروود کننده می شوند، تأثیرگذار است (۳۳). جهت بهینه سازی چگالی جریان، فاصله بهینه شده بین الکتروودها (۲ سانتی متر)، pH بهینه شده (pH=۷) و زمان واکنش ۲۰ دقیقه در طی فرآیند لحاظ شدند و چگالی جریان در ۳ سطح مختلف ۰/۸۳، ۱/۶۷ و ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع اعمال شد.

نتایج حاصل در نمودار شماره ۲ نشان می دهد که کمترین راندمان حذف در کمترین مقدار چگالی جریان برای سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب ۰/۸۲٪ و ۰/۶۳٪ بود. با افزایش چگالی جریان به ۱/۶۷ میلی آمپر بر سانتی متر مربع راندمان حذف اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب ۱۶٪ و ۱۳/۳٪ افزایش پیدا کرد که در مقایسه با حالت قبلی تفاوت چشمگیری داشت. علت افزایش راندمان فرآیند، تجزیه بیشتر الکتروودهای استیل ضدزنگ و تولید هیدروکسیدهای فلزی بیشتر می باشد که ناشی از مقدار شدت جریان عبوری از نمونه آبی است.

هیدروکسید آهن از طریق انحلال یون های فلزی از الکتروود واکنش دهنده آند (استیل ضدزنگ) تشکیل می شود که ابتدا باعث ناپایداری میکروارگانیزم ها می گردد و سپس با تجمع فازهای ناپایدار باعث تشکیل لخته و حذف میکروارگانیزم ها از طریق ته نشینی /

جداسازی می شود (۳۴). لذا در شدت جریان کم، مقدار یون های آهن جدا شده از الکتروودها کمتر بوده و به همان نسبت راندمان فرآیند در حذف باکتری ها کمتر است. نتایج این مطالعه در خصوص تغییرات چگالی جریان و تأثیر آن بر راندمان حذف باکتری ها با نتایج گزارش شده در سایر مطالعات مشابه همسو و سازگار است (۳۲، ۱۴).

همانطور که نمودار شماره ۲ نشان می دهد با تغییر چگالی جریان از ۱/۶۷ تا ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب از ۹۸٪ و ۹۹/۳٪ به ۱۰۰٪ رسیده است. طبق موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران باید کلیه آب های آشامیدنی از نظر باکتری شاخص اشرشیاکلی یا کلیفرم های گرمایا در هر ۱۰۰ میلی لیتر از آب آشامیدنی منفی باشد (۳۵)؛ بنابراین چگالی جریان بهینه جهت حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس از آب آشامیدنی ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شد.

نمودار شماره ۳ نتایج حاصل از حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس را در زمان های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه را نشان می دهد. زمان واکنش به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در تمام واحدهای فرآیندی و عملیاتی در تصفیه خانه مورد مطالعه بوده است (۳۳). در گام های بعدی از بهینه سازی شرایط، تغییرات این پارامتر و اثرگذاری آن بر راندمان فرآیند بررسی شده است. از pH، فاصله بین الکتروودها و چگالی جریان بهینه شده در گام های قبلی یعنی pH=۷، فاصله بین الکتروودها ۲ سانتی متر و چگالی جریان ۳/۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع جهت انجام بهینه سازی زمان واکنش در ۴ زمان واکنش ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه استفاده شده است. مطابق با آنچه انتظار می رفت، افزایش زمان واکنش باعث افزایش راندمان فرآیند شده، به گونه ای که در دقیقه پنجم از فرآیند، راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب برابر ۵۵٪ و ۵۶٪ به دست آمد.

هیدروکسیدی تولید می‌گردد که این ترکیب تنها مقدار معینی از میکروارگانسیم را حذف می‌نماید. لذا قادر به حذف مقادیر بیش از حد از میکروارگانسیم مورد نظر نیست؛ بنابراین افزایش غلظت اولیه میکروارگانسیم باعث کاهش راندمان فرآیند می‌گردد. نتیجه به‌دست آمده همسو با نتایج سایر مطالعات مشابه می‌باشد که در آن‌ها نیز با افزایش غلظت اولیه باکتریایی راندمان حذف آن توسط فرآیند الکترولیز کاهش داشته است و برای افزایش راندمان حذف، شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش باید افزایش داده شود (۳۷،۲۶).

طبق نتایج راندمان فرآیند در حذف باکتری ها در غلظت های اولیه  $10^4$  و  $10^5$  CFU/ml مطلوب می باشد. راندمان فرآیند در غلظت های  $10^6$  CFU/ml چندان قانع کننده نبوده است و نیاز به بررسی های بیشتر می باشد. البته مطالعات مختلف نشان داده است، در تصفیه خانه های آب، آب ورودی به واحد گندزدا دارای کلیفرم های مدفوعی کمتر از  $100$  CFU/ml می باشد (۳۹،۳۸)؛ بنابراین استفاده از فرآیند الکترولیز به عنوان واحد گندزدا در حذف باکتری های بیماری زای می تواند بکار رود.

جهت بررسی رابطه معنی داری میان غلظت اولیه سویه های باکتریایی و غلظت باقیمانده و تعیین درستی راندمان فرآیند در حذف سویه های باکتریایی از آنالیز واریانس One-way ANOVA استفاده شد که نتایج آن در جدول شماره ۵ آمده است. آزمون آماری صورت گرفته بر روی داده های جدول شماره ۵ حاکی از آن است که غلظت باقیمانده سویه های باکتریایی از غلظت اولیه آن تبعیت می کند و این بیانگر آن است که رابطه معنی داری بین غلظت اولیه باکتریایی و راندمان فرآیند وجود دارد. طبق نتایج جدول شماره ۵ این رابطه با ضریب اطمینان ۹۹٪ معنی دار و یک رابطه قوی می باشد. در خصوص مقدار الکتروود مصرفی، همانطور که انتظار می رفت الکتروود آند یا قربانی شونده (استیل ضدزنگ) دارای کاهش وزنی بیشتری نسبت به الکتروود کاتد (گرافیت نمدی) است. به گونه ای که میانگین الکتروود مصرفی به ازای تصفیه هر لیتر آب برای استیل

با افزایش زمان واکنش به ۱۵ دقیقه راندمان حذف ۹۸٪ و ۹۹٪ به ترتیب برای سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به دست آمد. با افزایش زمان واکنش از ۱۵ به ۲۰ دقیقه راندمان حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ۱۰۰٪ رسید. بر طبق قانون فارادی، زمان واکنش، اثر مستقیم در حل شدن فلز آند دارد؛ بنابراین طبق این قانون با افزایش زمان واکنش یون های  $Fe^{3+}$  از سطح الکتروود استیل ضدزنگ جدا می شود و در نتیجه غلظت  $Fe^{3+}$  و فلاک های هیدروکسید آهن افزایش می یابد و راندمان فرآیند الکترولیز را تحت تأثیر قرار می دهد (۳۶). افزایش زمان واکنش باعث افزایش راندمان فرآیند الکترولیز می شود، ولی از طرفی باعث افزایش هزینه های برق مصرفی و الکتروود مصرفی می گردد. زمان واکنش ۲۰ دقیقه به عنوان بهترین شرایط از نظر راندمان حذف انتخاب شد.

غلظت های اولیه سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج جدول شماره ۴ حاکی از آن است که با افزایش غلظت اولیه باکتریایی از مقدار  $10^4$  به مقدار  $10^5$  CFU/ml، راندمان حذف ۲۳٪/۰ کاهش پیدا کرده است؛ اما با افزایش غلظت اولیه از مقدار  $10^5$  به مقدار  $10^6$  CFU/ml راندمان حذف به شدت کاهش یافت و برای سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به ترتیب به مقادیر ۶۷٪/۷۵ و ۷۸٪ رسید. مهم ترین دلیل این تأثیرگذاری در راندمان فرآیند افزایش مقدار باکتری های موجود در راکتور در مقابل مقدار انعقاد کننده می باشد. چراکه غلظت های مختلف باکتریایی در شرایط یکسان محیطی وارد راکتور می شوند و از سوی دیگر میزان انرژی و به تبع آن مقدار ماده منعقد کننده تولید شده ثابت است؛ بنابراین با افزایش غلظت اولیه باکتریایی راندمان حذف کاهش پیدا می کند.

در فرآیند الکترولیز و طبق شرایط تعریف شده برای فاکتورهای تأثیرگذار مقادیر مشخصی ترکیبات

به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. از طرفی افزایش غلظت اولیه سویه های باکتریایی باعث کاهش راندمان فرآیند شده است.

فاصله بین الکترودها تأثیر چندانی بر روی راندمان فرآیند در حذف سویه های باکتریایی ندارد. در طی فرآیند الکترولیز با افزایش زمان واکنش درجه حرارت محلول افزایش پیدا کرد که با انتخاب هدایت الکتریکی مناسب درجه حرارت محلول کنترل گردید. با توجه به اینکه راندمان حذف سویه های باکتریایی مورد مطالعه در شرایط بهینه ۱۰۰٪ به دست آمد؛ بنابراین می توان از فرآیند الکترولیز در حذف باکتری های بیماری زای از آب آشامیدنی استفاده کرد. در نهایت، روش گزارش شده می تواند در حذف سویه های باکتریایی از محیط های آبی روشی مطمئن، موثر، سریع و اقتصادی باشد که با بهره گیری از آن مشکلات مربوط به وجود پاتوژن ها در آب آشامیدنی تا حد زیادی رفع خواهد شد.

### تشکر و قدردانی:

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی تحت عنوان بکارگیری فرآیند انعقاد الکتریکی با الکترودهای استیل ضدزنگ- گرافیت فلت در حذف باکتری های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس از محیط آبی مصوب دانشگاه علوم پزشکی اردبیل در سال ۱۳۹۵ به کد ۲۸۶۸۷-۱۹۶-۰۴-۹۵ می باشد که با حمایت کمیته تحقیقات دانشجویی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی اردبیل اجرا گردیده است.

ضدزنگ و گرافیت نمدی به ترتیب ۰/۰۱۶ و ۰/۰۰۲۱ گرم بوده است. نتایج جدول شماره ۶ حاکی از آن است که الکترودها کاتد تغییر وزنی در طول فرآیند نداشته و می توان مقدار مصرف آن را صفر لحاظ کرد؛ بنابراین هزینه اصلی الکترودها مصرفی مربوط به استیل ضدزنگ می باشد که بایستی در طراحی دستگاه های تصفیه آب مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج حاصل از بررسی میزان انرژی مصرفی در فرآیند الکترولیز نشان می دهد که با افزایش شدت جریان و همچنین با افزایش زمان واکنش مقدار انرژی مصرفی افزایش می یابد که این یافته همسو با سایر مطالعات در این زمینه می باشد (۴۱،۴۰). طبق شرایط بهینه شده برای فرآیند مورد مطالعه میزان انرژی برق مصرفی برابر با ۱/۸۱۷۲ کیلو وات ساعت بر متر مکعب می باشد. اگرچه راندمان فرآیند با افزایش زمان واکنش و چگالی جریان افزایش خواهد داشت؛ اما در حالت بهینه به هزینه های اقتصادی ناشی از مصرف الکترودها و مصرف انرژی باید توجه نمود.

### نتیجه گیری:

حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس از آب آشامیدنی با استفاده از فرآیند الکترولیز با الکترودهای استیل ضدزنگ و گرافیت نمدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می دهد که با افزایش pH راندمان فرآیند در حذف سویه های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرد. همچنین با افزایش چگالی جریان و زمان واکنش راندمان فرآیند

### منابع:

1. Organization WH. Draft global health sector strategy on viral hepatitis, 2016-2021-the first of its kind. WHO, Geneva. 2015.
2. Misra AK, Singh V. A delay mathematical model for the spread and control of water borne diseases. J Theor Biol. 2012; 301: 49-56.
3. Chowdhury S, Rodriguez MJ, Sadiq R. Disinfection byproducts in Canadian provinces: Associated cancer risks and medical expenses. J Hazard Mater. 2011; 187(1-3): 574-84.



5. Rutala WA, Weber DJ. The Society for Healthcare Epidemiology of America. Guideline for disinfection and sterilization of prion-contaminated medical instruments. *Infect Control Hosp Epidemiol.* 2010; 31(2): 107-17.
5. Liu C, Zhang D, He Y, Zhao X, Bai R. Modification of membrane surface for anti-biofouling performance: Effect of anti-adhesion and anti-bacteria approaches. *J Membr Sci.* 2010; 346(1): 121-30.
6. Gholami M, Nazari S, Farzadkia M, Majidi G, Matboo SA. Assessment of nanopolyamidoamine-G7 dendrimer antibacterial effect in aqueous solution. *Tehran Univ Med J.* 2016; 74(3): 159-67.
7. Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, Schoeny R, Demarini DM. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutat Res.* 2007; 636(1-3): 178-242.
8. Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *J Environ Manage.* 2009; 90(5): 1663-79.
9. Kraft A. Electrochemical water disinfection: A short review. *Platin Met Rev.* 2008; 52(3): 177-85.
10. Massoudinejad M, Sh N, Sarkhosh M, Ahmadi E, Mohseni S, Yaghoobinejad R. Efficiency of electrocoagulation/ electroflotation processes to remove turbidity from effluent of filtration process in tehranpars water treatment plant. *J Health.* 2017; 8(2): 121-32.
11. Isanloo H, Mohseni SM, Nazari S, Sarkhosh M, Alizadeh Matboo S. Efficiency of electrical coagulation process in reduction of water turbidity. *J Health.* 2014; 5(1): 67-74.
12. Mollah MY, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC)--science and applications. *J Hazard Mater.* 2001; 84(1): 29-41.
13. Zhu B, Clifford DA, Chellam S. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes. *Water Res.* 2005; 39(13): 3098-108.
14. Ghernaout D, Badis A, Kellil A, Ghernaout B. Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters. *Desalination.* 2008; 219(1-3): 118-25.
15. Gholami M, Nazari S, Yari AR, Mohseni SM, Matboo SA. Removal of *E. coli* and *S. aureus* from polluted water using electrolysis method with Al-Fe electrodes. *Tehran Univ Med J.* 2017; 75(2): 85-95.
16. Atabakhsh P, Amin M, Mortazavi H, Yaran M, Akhavan Sepahi A, Nouhi A, et al. Identification of total and fecal coliforms and heterotrophic to microbiological method and *E. coli* O157: H7 to immunological, and real time PCR methods in Isfahan water treatment plant. *Iran J Health Environ.* 2010; 3(3): 335-46.
17. Zhang G, Yang F, Gao M, Fang X, Liu L. Electro-Fenton degradation of azo dye using polypyrrole/ anthraquinonedisulphonate composite film modified graphite cathode in acidic aqueous solutions. *Electrochim Acta.* 2008; 53(16): 5155-61.
18. Oren Y, Soffer A. Graphite felt as an efficient porous electrode for impurity removal and recovery of metals. *Electrochim acta.* 1983; 28(11): 1649-54.
19. Sadeddin K, Naser A, Firas A. Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant. *Desalination.* 2011; 268(1-3): 204-7.
20. Ali I, Khan TA, Asim M. Removal of arsenic from water by electrocoagulation and electro dialysis techniques. *Sep Purif Rev.* 2011; 40(1): 25-42.
21. Federation WE, Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA. 2005.
22. Gholami M, Nazari S, Farzadkia M, Mohseni SM, Alizadeh Matboo S, Akbari Dourbash F, et al. Nano polyamidoamine-G7 dendrimer synthesis and assessment the antibacterial effect in vitro. *Tehran Univ Med J.* 2016; 74(1): 25-35.
23. Kobyta M, Ulu F, Gebologlu U, Demirbas E, Oncel MS. Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: different connection modes and Fe-Al electrodes. *Sep Purif Technol.* 2011; 77(3): 283-93.
24. Donini J, Kan J, Szykarczuk J, Hassan T, Kar K. The operating cost of electrocoagulation. *Can J Chem Eng.* 1994; 72(6): 1007-12.

25. Wouters PC, Alvarez I, Raso J. Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing. *Trends Food Sci Technol.* 2001; 12(3-4): 112-21.
26. Ricordel C, Miramon C, Hadjiev D, Darchen A. Investigations of the mechanism and efficiency of bacteria abatement during electrocoagulation using aluminum electrode. *Desalin Water Treat.* 2014; 52(28-30): 5380-9.
27. Akyol A. Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination.* 2012; 285: 91-9.
28. Tchamango S, Nanseu-Njiki CP, Ngameni E, Hadjiev D, Darchen A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Sci Total Environ.* 2010; 408(4): 947-52.
29. Li M. Sterilization of *Escherichia coli* cells by the application of pulsed magnetic field. *J Env Sci.* 2004; 16(2): 348-52.
30. Tir M, Moulai-Mostefa N. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. *Journal of hazardous materials.* 2008; 158(1): 107-15.
31. Drees KP, Abbaszadegan M, Maier RM. Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage. *Water Res.* 2003; 37(10): 2291-300.
32. Barashkov N, Eisenberg D, Eisenberg S, Shegebaeva GS, Irgibaeva I, Barashkova I. Electrochemical chlorine-free AC disinfection of water contaminated with *Salmonella typhimurium* bacteria. *Russ J Electrochem.* 2010; 46(3): 306-11.
33. Malakootian M, Mansoorian H, Moosazadeh M. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination.* 2010; 255(1-3): 67-71.
34. Bouguerra W, Barhoumi A, Ibrahim N, Brahmi K, Aloui L, Hamrouni B. Optimization of the electrocoagulation process for the removal of lead from water using aluminium as electrode material. *Desalin Water Treat.* 2015; 56(10): 2672-81.
35. Sadeghi G, Mohammadian M, Nourani M, Peyda M, Eslami A. Microbiological quality assessment of rural drinking water supplies in Iran. *J Agric Soc Sci.* 2007; 3(1): 31-3.
36. Zhang S, Zhang J, Wang W, Li F, Cheng X. Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2013; 117: 73-80.
37. Abadias M, Usall J, Oliveira M, Alegre I, Viñas I. Efficacy of neutral electrolyzed water (NEW) for reducing microbial contamination on minimally-processed vegetables. *Int J Food Microbiol.* 2008; 123(1-2): 151-8.
38. Nola Ms, Njine T, Djuikom E, Foko VS. Faecal coliforms and faecal streptococci community in the underground water in an equatorial area in Cameroon (Central Africa): The importance of some environmental chemical factors. *Water Res.* 2002; 36(13): 3289-97.
39. Siebel E, Wang Y, Egli T, Hammes F. Correlations between total cell concentration, total adenosine tri-phosphate concentration and heterotrophic plate counts during microbial monitoring of drinking water. *Drink Water Eng Sci.* 2008; 1(1): 1-6.
40. Yildiz YS, Senyigit E, Irdemez S. Optimization of specific energy consumption for Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using Taguchi-neural method. *Neural Comput Appl.* 2013; 23(3-4): 1061-9.
41. Al-Shannag M, Al-Qodah Z, Bani-Melhem K, Qtaishat MR, Alkasrawi M. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: kinetic study and process performance. *Chem Eng J.* 2015; 260: 749-56.

## Removal of *E.coli* and *S. aureus* from aqueous solution by using electrocoagulation/ electroflotation process

Nazari Sh<sup>1</sup>, Kamran A<sup>2</sup>, Jeddi Z<sup>3</sup>, Naseri Kh<sup>3</sup>, Javanmardi Z<sup>3</sup>, Sadeghi T<sup>4</sup>, Mohseni SM<sup>5</sup>, Rahmatinya M<sup>6</sup>, Alizadeh Matboo S<sup>7\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, I.R. Iran;

<sup>2</sup>Health Education Dept., Khalkhal Faculty of Medical Sciences, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, I.R. Iran; <sup>3</sup>Environmental Health Dept., Khalkhal Faculty of Medical Sciences, Student Research Committee, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, I.R. Iran;

<sup>4</sup>Environmental Health Dept., Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, I.R. Iran;

<sup>5</sup>Environmental Health Dept., Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, I.R. Iran;

<sup>6</sup>Environmental Health Dept., Iran University of Medical Sciences, Tehran, I.R. Iran,

<sup>7</sup>Environmental Health Dept., Student Research Committee, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, I.R.

Received: 14/Dec/2016

Accepted: 7/Jun/2017

**Background and aims:** Electrocoagulation is an electrochemical method for the treatment of water and waste water. Water disinfection by electrochemical methods has been increasingly carried out recently. The aim of this applied research is to investigate the removal of *E. coli* and *S. aureus* bacteria from drinking water by using Electrocoagulation (EC) - Electroflotation (EF) with Stainless Steel - Graphite felt electrodes parallel with the monopole mode.

**Methods:** An experimental study was conducted in a batch system. In this study, the contaminated water samples were prepared by adding  $10^4$ ,  $10^5$  and  $10^6$  CFU/ml *E. coli* and *S. aureus*. Independent variables Including: different concentrations of *E.coli* and *S. aureus* bacteria ( $10^4$ ,  $10^5$  and  $10^6$  CFU/ml), reaction time (5, 10, 15 and 20 min), initial pH (7, 8 and 9), electrode gap (1, 2 and 3 cm), current density (0.83, 1.67 and 3.3 mA/cm<sup>2</sup>) to determine the optimum conditions were investigated. One-way ANOVA was used to analyze the results.

**Results:** The results show that in the optimum conditions with increasing the pH from 7 to 9 removal efficiency of bacterial strains of *E.coli* and *S. aureus* were decreased significantly from 100% to 80% and 100% to 83%, respectively. In initial concentration of 105 CFU/ml, optimum conditions were obtained for current density, reaction time and electrodes gap; 3.3 mA/cm<sup>2</sup>, 20 min and 2 cm, respectively.

**Conclusion:** According to the results, *E.coli* and *S. aureus* removal efficiency in optimum conditions was obtained, 100%. Thus, the EC/EF process can be used for removal of pathogenic bacteria from drinking water.

**Cite this article as:** Nazari Sh, Kamran A, Jeddi Z, Naseri Kh, Javanmardi Z, Sadeghi T, Mohseni SM, Rahmatinya M, Alizadeh Matboo S. Removal of *E.coli* and *S. aureus* from Aqueous Solution by Using Electrocoagulation/ Electroflotation Process. J Shahrekord Univ Med Sci. 2018; 20(2): 59-77.

**\*Corresponding author:**

Environmental Health Dept., Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, I.R. Iran.  
Tel: 00989149539173, E-mail: soudabehalizadeh@ymail.com