

## حذف باکتری‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس از آب آلوده به روش الکترولیز با الکترودهای آلومینیم- آهن

### چکیده

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۴ ویرایش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۳۰ آنلاین: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

**زمینه و هدف:** گندزدایی آب به روش الکترولیز در سال‌های اخیر رو به گسترش است. هدف از انجام این پژوهش بررسی حذف باکتری‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به روش الکترولیز با الکترودهای آلومینیم- آهن به حالت تک قطبی موازی از آب آشامیدنی بود.

**روش بررسی:** مطالعه به صورت تجربی در خرداد ماه ۱۳۹۵ در آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشگاه علوم پزشکی ایران انجام گردید. نمونه‌های آب آلوده با افزودن  $10^3$ ،  $10^4$  و  $10^5$  عدد باکتری اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس در میلی‌لیتر آب آشامیدنی تهیه گردید. متغیرهای مستقل فرآیند شامل سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس با غلظت‌های مختلف باکتریایی  $10^3$ ،  $10^4$  و  $10^5$  عدد در میلی‌لیتر (pH اولیه ۷، ۸ و ۹)، زمان واکنش (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه)، فاصله بین الکترودها (۱، ۲ و ۳ cm) و چگالی جریان (۸۳/۰، ۱/۶۷ و  $3/3 \text{ mA/cm}^2$ ) جهت تعیین شرایط بهینه بررسی شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بهینه با افزایش pH از هفت به ۹ راندمان حذف سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی به طور معناداری از ۹۸ به ۷۳٪ و استافیلوکوکوس اورئوس از ۹۹/۱ به ۷۶٪ کاهش پیدا می‌کند. در غلظت اولیه  $10^4 \text{ CFU/ml}$  شرایط بهینه برای pH، چگالی جریان، زمان واکنش و فاصله بین الکترودها به ترتیب برابر ۷،  $1/67 \text{ mA/cm}^2$ ، ۲۰ دقیقه و ۲ cm به دست آمد. افزایش چگالی جریان و زمان واکنش باعث کاهش معناداری در هر دو سویه باکتری‌ها شد. میزان انرژی برق مصرفی در شرایط بهینه  $0/5128 \text{ KWh/m}^3$  محاسبه شد. آزمون آماری صورت گرفته نشان از معناداری ( $P < 0/01$ ) رابطه غلظت‌های اولیه سویه‌های باکتریایی و راندمان فرایند می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج راندمان حذف سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس بیشتر از ۹۸٪ به دست آمد.

**کلمات کلیدی:** الکترولیز، اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس، آب آشامیدنی، گندزدایی.

میترا غلامی<sup>۱</sup>، شهرام نظری<sup>۲\*</sup>  
احمد رضا یاری<sup>۳</sup>، سید محسن  
محسنی<sup>۴</sup>، سودابه علیزاده متبوع<sup>۵</sup>

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز رشد استعدادهای پژوهشی و فناوری دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۳- مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران

۴- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

۵- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل، ایران.

\* نویسنده مسئول: تهران، اتوبان همت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت.

تلفن: ۰۲۱-۸۶۷۰۴۶۳۳

E-mail: shahramnazari73@yahoo.com

### مقدمه

در سرتاسر جهان در میان کودکان زیر ۱۴ سال روزانه بیش از ۴۵۰۰ مرگ و میر به علت بیماری‌های ناشی از آب رخ می‌دهد.<sup>۱</sup> سالانه ۳/۴ میلیون نفر در کشورهای در حال توسعه در اثر بیماری‌های ناشی از آب از بین می‌روند.<sup>۲</sup> بنابراین گندزدایی آب آشامیدنی برای پیشگیری از بیماری‌های واگیردار ضروری است. خاصیت ضدباکتریایی گسترده در دمای محیط و در زمان کوتاه، ارزان

دسترس نداشتن به آب سالم برای آشامیدن، بهداشت و امنیت غذایی باعث بروز دشواری‌هایی طاق فرسا برای انسان‌ها گردیده است. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۲ در حدود ۷۸۰ میلیون نفر به منابع آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند.<sup>۱</sup>

و حذف کوچک‌ترین ذرات کلوییدی، کاربرد آسان، مصرف کمتر مواد شیمیایی و نیاز به تجهیزات ساده از جمله مزیت‌های این روش می‌باشد.<sup>۱۵-۱۲</sup> از مهم‌ترین عوامل موثر در کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی pH محیط راکتور، غلظت اولیه آلاینده، زمان واکنش، شدت جریان الکتریکی، نوع الکترود و آرایش آن می‌باشد که تغییر هر یک از این پارامترها باعث ایجاد تغییرات در ماهیت واکنش‌های الکتروشیمیایی، هزینه‌های مربوط به انرژی و در نهایت راندمان حذف می‌گردد.<sup>۱۶</sup>

در روش الکتروشیمیایی جریان الکتریکی در حضور مولکول اکسیژن سبب تولید هیدروژن پراکسید و ازن می‌شود و همچنین زمانی که یون کلر در محلول وجود داشته باشد سبب تولید کلر آزاد و دی‌اکسید کلر می‌شود. محصول اصلی در آند اکسیژن و کلر است که با اسیدی شدن آب در نزدیکی آند همراه است. محصول اصلی در کاتد هیدروژن است که با قلیایی شدن آب در نزدیکی کاتد و تولید رسوبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم همراه است.<sup>۱۷</sup> عمل اکسیداسیون و احیا در فرآیند الکتروشیمیایی به ترتیب در الکترودهای آند و کاتد همراه با تولید اکسیدان‌های هیدروژن پراکسید در کاتد، کلر آزاد و دی‌اکسید کلر در حضور یون کلرید و ازن در حضور اکسیژن در آند انجام می‌شود.<sup>۱۸،۱۵</sup> کلر، ازن و گونه‌های فعال اکسیژن باعث کاهش چشمگیر میکروارگانیسم‌ها می‌شود، ولی محصولات جانبی این اکسیدکننده‌ها یک مساله بسیار مهم در گندزدایی آب می‌باشد. به همین دلیل برخی مطالعات نگران روش الکترولیز در تصفیه آب می‌باشند.<sup>۱۹</sup>

مطالعه حاضر با هدف تعیین کارایی فرآیند الکترولیز در تصفیه آب آشامیدنی آلوده به سویه‌های باکتریایی گرم منفی اشرشیاکلی (شاخص آلودگی میکروبی آب آشامیدنی) و گرم مثبت *استافیلوکوکوس اورئوس* با الکترودهای آلومینیوم و آهن با آرایش تک قطبی موازی انجام شد.

## روش بررسی

مطالعه به صورت تجربی در خرداد ماه ۱۳۹۵ در آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشگاه علوم پزشکی ایران انجام گردید. برای تنظیم هدایت الکتریکی از سدیم کلرید و برای تنظیم pH از سود و

بودن، عدم تولید محصولات جانبی گندزدایی مضر برای سلامتی در طی استفاده و پس از آن، حلالیت بالا و عدم خوردگی از ویژگی‌های یک گندزدای مناسب می‌باشد.<sup>۴</sup> گندزدهای شیمیایی که به‌طور معمول برای تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل کلر آزاد، کلرآمین‌ها، ازن و پرتو فرابنفش می‌باشد.<sup>۷-۵</sup> برای اهداف گندزدایی، بیشتر تصفیه‌خانه‌های آب معمولاً از کلر و مشتقات آن استفاده می‌کنند. کلرزنی روش قابل اطمینان، جا افتاده و پیشرفته است. مهم‌ترین نگرانی مهندسان و مردم از این ماده، تشکیل تری‌هالومتان‌ها و سلامتی انسان‌ها، مزه و بوی نامطبوع می‌باشد.<sup>۸</sup> در طی فرآیند گندزدایی در محیط آبی از واکنش بین کلر و ترکیبات آلی طبیعی انواع مختلفی از محصولات جانبی گندزدایی از قبیل هالواستیک اسیدها، هالوتون‌ها، نیتروز دی‌متیل آمین‌ها و هالواستونیتریل‌ها به‌وجود می‌آید.<sup>۹،۸</sup> برخی از فرآورده‌های جانبی گندزدایی احتمالاً باعث ایجاد سرطان‌هایی مانند کولورکتال و مثانه می‌شود.<sup>۳</sup>

در حضور یون‌های پروماید، ازن موجب تشکیل برومات می‌شود. کلرآمین در مقایسه با کلر یک گندزدای ضعیف‌تر می‌باشد و سبب تشکیل فرآورده‌های جانبی گندزدای سمی‌تر مانند N نیتروز دی‌متیل آمین‌ها (NDMA) می‌شود.<sup>۱۰</sup> بنابراین به‌کارگیری یک روش جایگزین بدون تولید محصولات جانبی گندزدایی و کارایی بالا در حذف میکروب‌های بیماری‌زا، ضروری می‌باشد. روش الکتروشیمیایی در دهه‌های اخیر جهت حذف آلاینده‌های مختلف و حفظ کیفیت محیط زیست و ارتقاء سلامت جوامع به‌طور موفقیت آمیز در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>۵</sup>

در این روش تغییرات شیمیایی در اثر واکنش‌های انتقال الکترون در سطح مشترک الکتروود و محلول اتفاق می‌افتند به همین دلیل جزو فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می‌شود. انعقاد، تجزیه، کاهش، جذب، اکسیداسیون، ته‌نشینی و شناورسازی از مکانیسم‌های اصلی حذف میکروارگانیسم‌ها توسط فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد.<sup>۱۱،۱۲</sup> فرآیندهای الکتروشیمیایی با مکانیسم‌های مختلفی سبب حذف میکروارگانیسم‌ها می‌شوند، به همین دلیل از واژه‌های مختلفی برای این فرآیند از جمله گندزدایی الکترولیتیکی، گندزدایی الکتروشیمیایی، آب فعال شده و اکسیداسیون آندی استفاده می‌شود.<sup>۱۳،۵</sup> اقتصادی بودن، قابلیت سازگاری بهتر با محیط زیست، تولید آب با جامدات محلول پایین‌تر در مقایسه با فرآیندهای شیمیایی

نوع (DAZHENG DC Power supply PS-302D (Hong Kong  
NMX Technology Co., Ltd., China) بود که قابلیت تولید جریان  
الکتریسیته تا ۳۰ ولت را داشت. از یک همزن آهنربایی (Magnet)  
جهت برقراری اختلاط درون راکتور استفاده شد، جهت تامین اختلاط  
لازم، سرعت همزن مغناطیسی در ۲۰۰ rpm تنظیم گردید.

نمای کلی راکتور الکتروشیمیایی و جزئیات آرایش تک قطبی و  
نحوه قرارگیری بارهای الکتریکی بر روی الکترودها در شکل ۱ نشان  
داده شده است.

الکترودها از صفحات آلومینیم و آهن تجاری بودند. پیش از  
انجام هر آزمایش سطح الکترودها برای حذف ناخالصی با کاغذ  
سمباده ساییده و سپس در محلول HCL قرار داده شدند و پس از آن  
با آب مقطر به مدت یک دقیقه شستشو داده شدند.

در مطالعه حاضر تاثیر پنج 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 *استافیلوکوکوس اورئوس* از آب  
آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفتند. در هر مرحله از آزمایش حجم  
یک و نیم لیتر از آب دارای غلظت باکتریایی  $10^4$  CFU/ml با pH  
مختلف وارد راکتور شده و فرآیند الکترولیز با جریان برق مستقیم در  
چگالی جریان‌های معین (۰/۸۳، ۱/۶۷ و  $3/3$  mA/cm<sup>2</sup>) و فاصله‌های  
معین (۱، ۲ و ۳ cm) بین الکترودها انجام گرفت.<sup>۹-۷</sup>

در سه سطح ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه از درون راکتور  
نمونه‌برداری جهت تعیین راندمان حذف باکتری‌ها انجام شد. در هر  
مرحله یک پارامتر بهره‌برداری بهینه تعیین و در انتها با توجه به  
چگالی جریان، فاصله بین الکترودها، زمان واکنش و pH بهینه، کارایی  
فرآیند برای غلظت‌های اولیه  $10^3$ ،  $10^4$  و  $10^5$  CFU/ml مشخص شد.  
کلیه آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه (۲۰ °C) انجام شد.

pH، ولتاژ و درجه حرارت در طی آزمایشات کنترل گردید. تعداد  
کل نمونه برابر ۴۰۵ عدد به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری pH از  
دستگاه Mettler Toledo 2050e pH meter (Mettler Toledo GmbH,  
Urduf, Switzerland) برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی محلول  
از Mettler Toledo 7100e conductivity meter (Mettler Toledo  
GmbH, Urduf, Switzerland) و برای اندازه‌گیری دمای محلول از  
دماسنج جیوه‌ای استفاده گردید. از محلول الکترولیز شده در حدود

اسیدکلریک ۱ نرمال استفاده گردید. محلول آبی مورد بررسی پیش از  
آزمایشات استریل گردید. پس از استریل، آلوده‌سازی با سویه‌های  
باکتریایی *اشرشیاکلی* ATCC 25922 و *استافیلوکوکوس اورئوس* ATCC 25923 با غلظت‌های مختلف به‌صورت سنتتیک  
انجام شد.

سویه‌های باکتری استفاده شده در این مطالعه شامل باکتری‌های  
گرم منفی *اشرشیاکلی* ATCC 25922 و گرم مثبت *استافیلوکوکوس اورئوس* ATCC 25923 می‌باشد که از مرکز پژوهش‌های صنعتی  
ایران خریداری گردید. سوش باکتریایی *اشرشیاکلی* و  
*استافیلوکوکوس اورئوس* در محیط کشت نوترینت برات (Nutrient  
Broth) در شرایط هوازی و به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $37^{\circ}\text{C}$   
گرمخانه‌گذاری شدند. سپس با لوپ استریل از محیط کشت نوترینت  
برات مقداری برداشته و بر روی محیط‌های کشت اختصاصی (برای  
*اشرشیاکلی* از محیط کشت جامد مک کانکی و برای *استافیلوکوکوس اورئوس* از محیط کشت جامد مانتول سالت استفاده گردید) هر سویه  
باکتری به حالت خطی یکنواخت کشت داده شد. سپس محیط‌ها به  
حالت وارونه در گرمخانه با دمای  $37^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت در  
شرایط هوازی گرمخانه‌گذاری شدند.<sup>۲۰</sup>

در این پژوهش، استاندارد مک‌فارلند به‌عنوان مرجعی برای  
مطابقت دادن کدورت ناشی از سوسپانسیون باکتری استفاده شد. از  
آن‌جایی که تعداد باکتری تلقیح شده یکی از مهمترین متغیرهایی است  
که بر نتیجه این پژوهش اثر می‌گذارد، تراکم سوسپانسیون میکروبی  
تلقیحی باید استاندارد باشد. با توجه به اینکه غلظت باکتریایی نیم  
مک فارلند برابر  $1/5 \times 10^8$  CFU/ml می‌باشد برای به‌دست آوردن  
سایر رقت‌های باکتریایی ( $10^3$ ،  $10^4$  و  $10^5$  CFU/ml) از رقیق‌سازی  
استفاده گردید.<sup>۲۱</sup>

جهت انجام آزمایشات از راکتور با مشخصات زیر استفاده  
گردید، ابعاد محفظه پلکسی گلاس:  $170 \times 105 \times 135$  mm، دو الکترو  
آلومینیم و آهن (در مجموع چهار الکترو) که هر کدام دارای ابعاد  
 $100 \times 40 \times 2$  mm به‌صورت متناوب به حالت تک قطبی موازی  
(Monopolar) به منبع جریان برق مستقیم (DC Power) متصل شد،  
فاصله بین الکترودها ۱-۳ cm و فاصله الکترودها از کف ۲ cm معین  
گردید. الکترو آلومینیم به قطب مثبت منبع تغذیه و الکترو آهن به  
قطب منفی منبع تغذیه متصل گردید. منبع برق جریان مستقیم از

فرآیند در حذف سویه‌های باکتریایی استفاده شد.

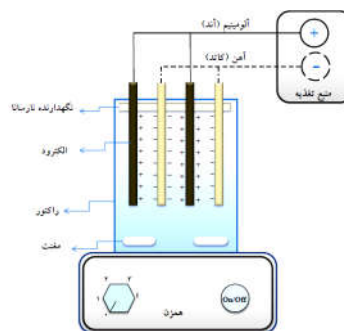
## یافته‌ها

همانطور که نمودار ۱ نشان می‌دهد درجه حرارت محلول با افزایش زمان واکنش و هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. بیشترین درجه حرارت محلول در هدایت الکتریکی ۱۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و زمان تماس ۲۰ دقیقه، برابر  $45^{\circ}\text{C}$  به‌دست آمد. تغییرات درجه حرارت آن از ابتدا تا انتهای زمان واکنش  $23^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. کمترین درجه حرارت محلول برای هدایت الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر به‌دست آمد و تغییرات درجه حرارت آن از ابتدا تا انتهای زمان واکنش برابر  $2^{\circ}\text{C}$  می‌باشد.

کلر باقیمانده در طی فرآیند الکترولیز تشکیل نشد. به همین خاطر یک آزمایش الکترولیز با یک چگالی جریان  $1/67 \text{ mA/cm}^2$  بر روی ۱/۵ l محلول که محتوی  $2 \text{ mg/l}$  کلر باقیمانده بود انجام گردید. پس از ۱۵ دقیقه مشاهده شد کلر باقیمانده صفر می‌باشد.

فاصله بین الکترودها تاثیری بر روی فرآیند الکترولیز ندارد. به‌طوری که در فاصله ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متری بین الکترودها و در شرایط بهینه ( $\text{pH}=7$ )، هدایت الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر، غلظت اولیه باکتریایی  $10^4 \text{ CFU/ml}$ ، چگالی جریان  $1/67 \text{ mA/cm}^2$  و زمان واکنش ۲۰ دقیقه حذف برای باکتری‌های *اشرشیاکلی* به‌ترتیب برابر ۹۹، ۹۸ و  $97/4\%$  و برای *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌ترتیب برابر  $99/1$ ،  $99/4$  و  $98/2\%$  به‌دست آمد. در واقع کاهش باکتری‌ها تقریباً ثابت و بیشتر از  $97\%$  بود. به همین خاطر در همه آزمایشات فاصله بین الکترودها ۲ cm در نظر گرفته شد. در فاصله ۲ cm میان الکترودها و میزان رسانایی الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌ترتیب ۹۸ و  $99/1\%$  بود.

نتایج تاثیر pH بر روی کاهش باکتری‌ها نشان داد که با افزایش pH راندمان حذف هر دو سویه باکتری کاهش می‌یابد. در pH برابر ۸، ۷ و ۹ و در شرایط بهینه (هدایت الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر، غلظت اولیه باکتریایی  $10^4 \text{ CFU/ml}$ ، چگالی جریان  $1/67 \text{ mA/cm}^2$ ، فاصله بین الکترودها ۲ cm و زمان واکنش ۲۰ دقیقه) راندمان حذف برای باکتری‌های *اشرشیاکلی* به‌ترتیب برابر ۹۸، ۹۱ و



شکل ۱: راکتور الکتروشیمیایی و اتصال تک‌نقطه‌ای موازی الکترودها به منبع تغذیه

۵ ml برداشت و پس از ۳۰ دقیقه زمان ته‌نشینی، از محلول رویی به مقدار معین جهت کشت روی محیط اختصاصی آگار هر شد. (۱) 
$$E\% = \left( \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100$$

سویه باکتری، برداشت شد. راندمان حذف باکتری‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه E. درصد حذف باکتری‌ها،  $C_{in}$  تعداد کلنی‌های ورودی و  $C_{out}$  تعداد کلنی‌های خروجی پس از فرآیند الکترولیز است. کلیه آزمایشات برای سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌صورت جداگانه انجام گردید.

برای به‌دست آوردن میزان الکترود مصرفی جهت تصفیه هر لیتر آب آشامیدنی در ابتدا و انتهای فرآیند وزن الکترودها با استفاده از یک ترازوی دقیق اندازه گرفته شد و تغییرات وزن الکترودها به‌عنوان میزان الکترود مصرفی گزارش گردید.

جهت محاسبه مقدار انرژی مصرفی در طی فرآیند الکترولیز از معادله ۲ استفاده گردید. (۲) 
$$E = \frac{UIT}{V}$$

در این رابطه، E: مقدار انرژی مصرفی ( $\text{kWh/m}^3$ )، I: جریان ( $\text{mA/m}^2$ )، U: ولتاژ موجود در راکتور (V)، V: حجم آب داخل راکتور (متر مکعب)، T: زمان انجام فرآیند (ساعت). برای سنجش آماری داده‌ها از SPSS software, version 14 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA) و از Excel 2013 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) برای رسم نمودارها استفاده گردید. از آنالیز واریانس One-way ANOVA جهت بررسی رابطه معناداری میان غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی و غلظت باقیمانده و تعیین درستی راندمان

جدول ۱: نتایج راندمان حذف (بر حسب %) سویه‌های باکتریایی در غلظت‌های اولیه مختلف (pH=۷، زمان واکنش ۲۰ min و چگالی جریان ۱/۶۷ mA/cm<sup>2</sup>، فاصله بین الکترودها ۲ cm، هدایت الکتریکی ۰/۷۵ mS/cm و زمان ته‌نشینی ۳۰ min)

غلظت‌های اولیه سویه‌های باکتریایی <i>اشرشیاکلی</i> و <i>استافیلوکوکوس اورئوس</i> (CFU/m)	تکرار نمونه برداری	سویه‌های باکتریایی
۱۰ <sup>۵</sup>	۱۰ <sup>۴</sup>	۱۰ <sup>۳</sup>
۷۵	۹۷/۸	۹۸
۷۲	۹۸/۲	۹۹/۵
۷۴/۲	۹۸	۹۹/۲
۷۳/۷	۹۸	۹۸/۹
۱/۳۷	۰/۹۶	۰/۶۴
۷۷	۹۸/۹	۹۹/۳
۷۵	۹۹/۲	۹۹/۷
۷۶	۹۹/۱	۱۰۰
۷۶	۹۹/۱	۹۹/۷
۱/۴۱	۱	۱

جدول ۲: آنالیز واریانس One-way ANOVA بین فاکتور غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* و غلظت باقیمانده آن‌ها

P	F-Value	Adj MS	Adj SS	DF	Source
۰/۰۰۰	۶۵۲/۴۲	۶۱۴۶۵۳۵۵۹	۱۲۲۹۳۰۷۱۱۸	۲	Initial concentration
		۹۴۲۱۱۰	۵۶۵۲۶۵۹	۶	Error
			۱۲۳۴۹۵۹۷۷۷	۸	Total
۰/۰۰۰	۸۲۳/۰۹	۸۲۵۸۶۵۹۰۰	۱۶۵۱۷۳۱۸۰۰	۲	Initial concentration
		۱۰۰۳۳۶۷	۶۰۲۰۲۰۰	۶	Error
			۱۶۵۱۷۵۲۰۰۰	۸	Total

\* P<۰/۰۱ معنادار در نظر گرفته شد.

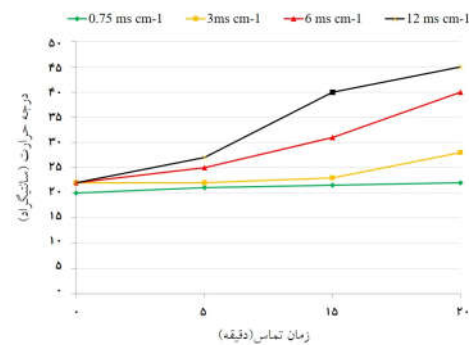
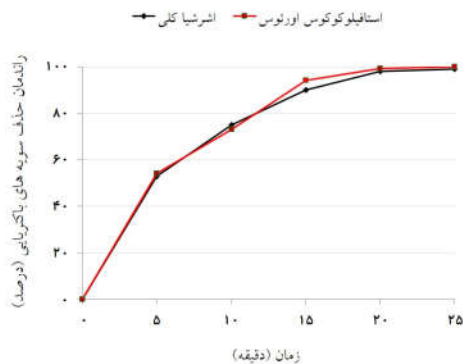
جدول ۳: میزان تغییرات وزن الکترودهای مورد استفاده در فرآیند

نوع الکتروود	وزن در ابتدای فرآیند (g)	وزن در پایان فرآیند (g)	الکتروود مصرفی*
آلومینیوم	۲۱/۴۵۲۰	۲۱/۴۳۱	۰/۰۱۴۰
	۲۱/۷۵۸	۲۱/۷۴۳	۰/۰۱
آهن	۸۵/۲۷۱۱	۸۵/۲۷	۰/۰۰۰۷۴
	۸۸/۳۰۸۵	۸۸/۳۰۶۹	۰/۰۰۱

\* حجم مورد تصفیه در راکتور ۱/۵ لیتر بود به همین دلیل از ضریب ۰/۶۶۷ جهت تبدیل حجم مفید راکتور (۱/۵ l) به لیتر استفاده شد.

جدول ۴: میزان انرژی مصرفی به تفکیک شدت جریان، زمان واکنش و pH مختلف (غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس  $10^4$  CFU/ml، فاصله بین الکترودها ۲ cm، هدایت الکتریکی  $0.75$  mS/cm و زمان تنشینی ۳۰ min)

انرژی مصرفی ( $KWh/m^3$ )			زمان واکنش (دقیقه)	چگالی جریان ( $mA/cm^2$ )
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	
۰/۱۹۴	۰/۲۱۷	۰/۲	۲۵	
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	
۰/۶۸۸	۰/۶۹۹۷	۰/۶۳	۲۵	
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	
۲/۵۰۴۵	۲/۳۲۶۲	۲/۲۵۹	۲۵	



نمودار ۲: تاثیر زمان تماس بر روی راندمان فرآیند الکترولیز (pH=۷)  
 فاصله بین الکترودها ۲ cm، هدایت الکتریکی  $0.75$  mS/cm، غلظت باکتریایی  $10^4$  CFU/ml و زمان تنشینی ۳۰ min.

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

بهینه محاسبه شد (جدول ۳). جدول ۴ میزان انرژی مصرفی را در شرایط مختلف چگالی جریان (۰/۸۳، ۱/۶۷ و ۳/۳ mA/cm<sup>2</sup>)، زمان واکنش (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه) و pH (۷، ۸ و ۹) نشان می‌دهد. غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* ۱۰<sup>۴</sup> CFU/ml می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص شده است، هرچند میزان انرژی در شرایط مختلف بهره‌برداری متفاوت بود ولی با توجه به مقدار راندمان حذف سوش‌های باکتریایی، چگالی جریان ۱/۶۷ mA/cm<sup>2</sup> و زمان واکنش ۲۰ دقیقه از نظر میزان انرژی مصرفی شرایط مناسب برای بهره‌برداری بود.

### بحث

مقدار منعقدکننده و همچنین میزان تولید هیدروژن، پراکسید هیدروژن، ازن و سایر گونه‌های مولکولی و یونی به شدت جریان وابسته هستند.<sup>۵</sup> همچنین جریان عبوری از طریق محلول سبب تغییر درجه حرارت محلول می‌شود.<sup>۳۳</sup> درجه حرارت می‌تواند سبب غیر فعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها بشود.<sup>۲۴</sup>

به‌منظور کنترل درجه حرارت در طی تصفیه با فرآیند الکترولیز یک مطالعه اولیه در مورد انتخاب پارامتر هدایت الکتریکی انجام شد. فرآیند الکترولیز به‌صورت ناپیوسته با یک کنترل ولتاژ (۳۰ ولت) انجام گرفت. همان‌طور که نمودار ۱ نشان می‌دهد درجه حرارت محلول با افزایش زمان و هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن این‌که بیشتر باکتری‌های پاتوژن در درجه حرارت ۴۵-۱۵ °C قابلیت زیستن دارند. درجه حرارت محلول با انتخاب محلول‌هایی با هدایت الکتریکی کمتر، در درجه حرارت کمتر از ۴۰ °C کنترل گردید.

بنابراین کاهش مشاهده شده در تعداد باکتری‌ها را فقط به میدان الکتریکی به‌کار 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، دریافتند که درجه حرارت محلول با افزایش هدایت الکتریکی بیشتر می‌شود، بنابراین برای کنترل درجه حرارت، از محلول‌هایی با هدایت

۷۳٪ و برای *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌ترتیب برابر ۹۹/۱، ۹۳ و ۷۶٪ به‌دست آمد. هم‌زمان با انجام مراحل بهینه‌سازی، تغییرات pH نمونه آب داخل راکتور در ابتدا و انتهای زمان واکنش اندازه‌گیری شدند. تغییرات آن به‌طور متوسط ۰/۶۷ بوده است. نتایج حاصل از تاثیر تغییرات چگالی جریان بر راندمان حذف سویه‌های *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* در شرایط بهینه (pH=۷) زمان واکنش ۲۰ دقیقه، فاصله بین الکترودها ۲ cm، هدایت الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و غلظت اولیه باکتریایی ۱۰<sup>۴</sup> CFU/ml نشان داد که با افزایش چگالی جریان راندمان حذف سویه‌های باکتریایی افزایش پیدا می‌کند. در چگالی جریان ۰/۸۳، ۱/۶۷ و ۳/۳ راندمان حذف به‌ترتیب برای باکتری‌های *اشرشیاکلی* برابر ۸۰، ۹۸ و ۱۰۰٪ و برای *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌ترتیب برابر ۸۴، ۹۹/۱ و ۱۰۰٪ به‌دست آمد.

نمودار ۲ نتایج حاصل از حذف سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* را در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه را نشان می‌دهد. با افزایش زمان واکنش راندمان حذف هر دو سویه باکتری افزایش پیدا کرد. با افزایش زمان واکنش از پنج به ۲۰ دقیقه راندمان حذف هر دو سویه باکتری ب چشمگیر بود، به‌طوری که راندمان حذف سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌ترتیب به ۹۸ و ۹۹/۱٪ رسید.

در نهایت پس از بهینه‌سازی هر یک از پارامترها، بهترین حالت از نظر راندمان فرآیند، بهره‌برداری و اقتصادی در شرایط pH=۷، شدت جریان ۱/۶۷ mA/cm<sup>2</sup>، فاصله بین الکترودها ۲ cm، هدایت الکتریکی ۰/۷۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و زمان واکنش ۲۰ دقیقه به‌دست آمد. مطابق با شرایط بهینه مشخص شده، تاثیر غلظت‌های اولیه باکتریایی به‌صورت سری‌های جداگانه بررسی شد که نتایج آن در جدول ۱ ارایه شده است.

نتایج آنالیز واریانس One-way ANOVA بین فاکتور غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی*، *استافیلوکوکوس اورئوس* و غلظت باقیمانده آن‌ها در جدول ۲ آمده است. آنالیز آماری صورت گرفته حاکی از آن است که رابطه معناداری بین غلظت‌های اولیه باکتریایی و راندمان فرآیند وجود دارد (P<۰/۰۱). با اندازه‌گیری تغییرات وزن الکترودهای آند (آلومینوم) و کاتد (آهن) در ابتدا و انتهای فرآیند میزان الکترو مصرفی جهت تصفیه هر لیتر آب آشامیدنی در شرایط

صرفه‌جویی در هزینه‌های برق مصرفی و همچنین راندمان بالای حذف سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* در چگالی جریان  $1/67 \text{ mA/cm}^2$ ، چگالی جریان بهینه جهت حذف سویه‌های باکتریایی از آب آشامیدنی  $1/67 \text{ mA/cm}^2$  در نظر گرفته شد. زمان واکنش پارامتری موثر بر راندمان حذف باکتری‌ها می‌باشد<sup>۲۸</sup> که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در گام‌های بعدی از بهینه‌سازی شرایط، تغییرات این پارامتر و اثرگذاری آن بر راندمان فرآیند بررسی شده است. مطابق با آنچه که انتظار می‌رفت افزایش زمان واکنش باعث افزایش راندمان فرآیند شده، به گونه‌ای که در دقیقه پنجم از فرآیند، راندمان حذف سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به ترتیب برابر ۵۳٪ و ۵۴٪ به دست آمد. با افزایش زمان واکنش به ۲۰ دقیقه راندمان حذف ۹۸٪ و ۹۹٪ به ترتیب برای سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به دست آمد.

بر اساس قانون فارادی، زمان واکنش، اثر مستقیم در حل شدن فلز آند دارد. بنابراین بر اساس این قانون با افزایش زمان واکنش یون‌های آلومینیم از سطح الکترود آلومینیم جدا می‌شود و در نتیجه غلظت  $\text{Al}^{3+}$  و فلاک‌های هیدروکسید آلومینیم افزایش می‌یابد و راندمان فرآیند الکترولیز را تحت تاثیر قرار می‌دهد.<sup>۳۱</sup>

افزایش زمان واکنش باعث افزایش راندمان فرآیند الکترولیز می‌شود. ولی از طرفی باعث افزایش هزینه‌های برق مصرفی و الکترود مصرفی می‌گردد. به همین علت زمان واکنش ۲۰ دقیقه به عنوان بهترین شرایط از نظر راندمان حذف و صرفه‌جویی هزینه‌ها انتخاب شد. غلظت‌های اولیه سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به عنوان یکی از فاکتورهای تاثیرگذار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج جدول ۱ گویای آن است که با افزایش غلظت اولیه باکتریایی از مقدار  $10^3$  به مقدار  $10^4$ ، درصد راندمان حذف تقریباً ثابت بوده و تغییرات آن شامل چند دهم درصد می‌باشد. اما با افزایش غلظت اولیه از مقدار  $10^4$  به مقدار  $10^5$  راندمان حذف به شدت کاهش یافته و برای سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به ترتیب به مقادیر  $74/2$ ٪ و  $76$ ٪ رسید. مهمترین دلیل این تاثیرگذاری در راندمان فرآیند، افزایش مقدار باکتری‌های موجود در راکتور در مقابل مقدار ماده منعقد کننده می‌باشد. چرا که غلظت‌های مختلف باکتریایی در شرایط یکسان

الکتریکی کمتر ( $0/6$  میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) استفاده کردند.<sup>۲۵</sup> مکانیسم اصلی حذف باکتری‌ها توسط فرآیند الکترولیز به طور 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  $1-0/2$  ولت) می‌تواند سبب تشکیل منافذ در غشاء شود که این پدیده ایجاد منافذ به وسیله الکتریسیته (Electroporation) نامیده می‌شود.<sup>۲۷ و ۲۸</sup>

چگالی جریان الکتریکی به عنوان یکی از فاکتورهای موثر بر راندمان حذف در گام‌های بعدی از بهینه‌سازی شرایط مورد بررسی قرار گرفت. این فاکتور بر سرعت انجام واکنش‌های الکترولیز از طریق تاثیر بر میزان یون‌های فلزی که از سطح الکترود کنده می‌شوند، تاثیرگذار است.<sup>۲۸</sup>

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کمترین راندمان حذف در کمترین مقدار چگالی جریان ( $1/83 \text{ mA/cm}^2$ ) برای سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به ترتیب  $80$ ٪ و  $84$ ٪ می‌باشد. با افزایش چگالی جریان به  $1/67 \text{ mA/cm}^2$  راندمان حذف *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به ترتیب  $18$ ٪ و  $15$ ٪ افزایش پیدا کرد که در مقایسه با حالت قبلی تفاوت چشمگیری داشت. علت افزایش راندمان فرآیند، تجزیه بیشتر الکترودهای آلومینوم و تولید هیدروکسیدهای فلزی بیشتری باشد که ناشی از مقدار شدت جریان عبوری از نمونه آبی است.

هیدروکسید آلومینوم از طریق انحلال یون‌های فلزی از الکترود واکنش دهنده آند (آلومینوم) تشکیل می‌شود که ابتدا باعث ناپایداری میکروارگانیسم‌ها می‌گردد و سپس با تجمع فازهای ناپایدار باعث تشکیل لخته و حذف میکروارگانیسم‌ها از طریق ته‌نشینی/جداسازی می‌شود.<sup>۲۹</sup>

از این رو در شدت جریان کم، مقدار یون‌های آلومینوم جدا شده از الکترودها کمتر بوده و به همان نسبت راندمان فرآیند در حذف باکتری‌ها کم‌تر است. نتایج این مطالعه در خصوص تغییرات چگالی جریان و تاثیر آن بر راندمان حذف باکتری‌ها با نتایج گزارش شده در سایر مطالعات مشابه همسو و سازگار است.<sup>۳۰ و ۳۱</sup> با توجه به



هر لیتر آب برای آلومینوم و آهن به ترتیب ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۰۸۷ g بوده است. نتایج جدول ۳ حاکی از آن است که الکتروکاتد تغییر وزنی در طول فرآیند نداشته و می‌توان مقدار مصرف آن را صفر لحاظ کرد. بنابراین هزینه اصلی الکتروکاتد مصرفی مربوط به آلومینوم می‌باشد که بایستی در طراحی سیستم‌های تصفیه آب مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی میزان انرژی مصرفی در فرآیند الکترولیز نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان و همچنین با افزایش زمان واکنش مقدار انرژی مصرفی افزایش می‌یابد که این یافته همسو با سایر مطالعات در این زمینه می‌باشد.<sup>۳۶،۳۵</sup> طبق شرایط بهینه شده برای فرآیند مورد مطالعه میزان انرژی برق مصرفی برابر با ۰/۵۵۱۲۸ kWh/m<sup>3</sup> می‌باشد. اگرچه راندمان فرآیند با افزایش زمان واکنش و چگالی جریان افزایش خواهد داشت. اما در حالت بهینه به هزینه‌های اقتصادی ناشی از مصرف الکتروکاتد و مصرف انرژی باید توجه نمود.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش pH راندمان فرآیند در حذف سویه‌های باکتریایی *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. با افزایش چگالی جریان و زمان واکنش راندمان فرآیند به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. از طرفی افزایش غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی باعث کاهش راندمان فرآیند شده است. فاصله بین الکترودها تاثیر چندانی بر روی راندمان فرآیند در حذف سویه‌های 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 سویه‌های باکتریایی مورد مطالعه در عدم حضور اکسیدانت‌های قوی ناشی از فرآیند الکتروشیمیایی بیشتر از ۹۸٪ به‌دست آمد. بنابراین می‌توان از فرآیند الکترولیز در حذف باکتری‌های بیماری‌زای از آب آشامیدنی استفاده کرد.

*سپاسگزاری:* این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی تحت عنوان "بررسی کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی با الکتروکاتد آلومینیم-آهن در حذف باکتری *اشرشیاکلی* و *استافیلوکوکوس اورئوس* از محیط آبی" مصوب دانشگاه علوم پزشکی ایران در سال ۱۳۹۵ به کد ۲۸۵۸۴-۱۹۳-۰۲-۹۵ می‌باشد که با حمایت کمیته تحقیقات دانشجویی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران اجرا شده است.

محیطی وارد راکتور می‌شوند و از سوی دیگر میزان انرژی و به تبع آن مقدار ماده منعقدکننده تولید شده ثابت است.

بنابراین با افزایش غلظت اولیه باکتریایی راندمان حذف کاهش پیدا می‌کند. در فرآیند الکترولیز و طبق شرایط تعریف شده برای فاکتورهای تاثیرگذار مقادیر مشخصی ترکیبات هیدروکسیدی تولید می‌گردد که این ترکیب تنها مقدار معینی از میکروارگانیزم را حذف می‌نماید.

از این‌رو قادر به حذف مقادیر بیش از حد از میکروارگانیزم مورد نظر نیست. بنابراین افزایش غلظت اولیه میکروارگانیزم 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.<sup>۳۲،۲۵</sup>

بر اساس نتایج راندمان فرآیند در حذف باکتری‌ها در غلظت‌های اولیه ۱۰<sup>۳</sup> و ۱۰<sup>۴</sup> CFU/ml مطلوب بوده است. راندمان فرآیند در غلظت‌های ۱۰<sup>۵</sup> CFU/ml چندان قانع‌کننده نبوده است و نیاز به بررسی‌های بیشتر می‌باشد. البته مطالعات مختلف نشان داده است، در تصفیه‌خانه‌های آب، آب ورودی به واحد گندزدا دارای کلیفرم‌های مدفوعی کمتر از ۱۰۰ CFU/ml می‌باشد.<sup>۳۳،۳۴</sup> بنابراین استفاده از فرآیند الکترولیز به‌عنوان واحد گندزدا در حذف باکتری‌های بیماری‌زا می‌تواند به‌کار رود.

جهت بررسی رابطه معناداری میان غلظت اولیه سویه‌های باکتریایی و غلظت باقیمانده و تعیین درستی راندمان فرآیند در حذف سویه‌های باکتریایی از آنالیز واریانس One-way ANOVA استفاده شد. که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. آزمون آماری صورت گرفته بر روی داده‌های جدول ۱ حاکی از آن است که غلظت باقیمانده سویه‌های باکتریایی از غلظت اولیه آن تبعیت می‌کند و این بیانگر آن است که رابطه معناداری بین غلظت اولیه باکتریایی و راندمان فرآیند وجود دارد. بر اساس نتایج جدول ۲ این رابطه با ضریب اطمینان ۹۹٪ معنادار و یک رابطه قوی می‌باشد. در خصوص مقدار الکتروکاتد مصرفی، همان‌طور که انتظار می‌رفت الکتروکاتد یا قربانی شونده (آلومینوم) دارای کاهش وزنی بیشتری نسبت به الکتروکاتد (آهن) نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که میانگین الکتروکاتد مصرفی به ازای تصفیه

## References

- WHO. Progress on sanitation and drinking-water-2014 update, 2014.
- Misra AK, Singh V. A delay mathematical model for the spread and control of water borne diseases. *J Theor Biol* 2012;301:49-56.
- 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.
- Rutala WA, Weber DJ. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities. In: Control CfD, editor, 2008.
- Kraft A. Electrochemical water disinfection: A short review. *Platinum Metals Rev* 2008;52(3):177-85.
- Brahmi M, Hassen A. Ultraviolet radiation for microorganism inactivation in wastewater. *J Environ Prot* 2012;3(2): 194-202.
- Gholami M, Nazari S, Farzadkia M, Majidi G, Alizadeh Matboo S. Assessment of nanopolyamidoamine-G7 dendrimer antibacterial effect in aqueous solution. *Tehran Univ Med J* 2016;74(3):159-67.
- 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.
- Karagas MR, Villanueva CM, Nieuwenhuijsen M, Weisel CP, Cantor KP, Kogevinas M. Disinfection byproducts in drinking water and skin cancer? A hypothesis. *Cancer Causes Control* 2008;19(5):547-8.
- Choi J, Valentine RL. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product. *Water Res* 2002;36(4):817-24.
- Sahu O, Mazumdar B, Chaudhari PK. Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. *Environ Sci Pollut Res Int* 2014;21(4):2397-413.
- Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *J Environ Manage* 2009;90(5):1663-79.
- Mollah MY, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC): science and applications. *J Hazard Mater* 2001;84(1):29-41.
- Massoudinejad M, Nazari S, Sarkhosh M, Ahmadi E, Yaghoobinejad R, Mohseni S. Efficiency of electrocoagulation/electro-otation processes to remove turbidity from effluent of filtration process in Tehranpars water treatment plant. *J Health* 2017;8(2):121-32.
- 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.
- Ghernaout D, Ghernaout B. From chemical disinfection to electrodisinfection: The obligatory itinerary? *Desalination Water Treatment* 2010;16(1-3):156-75.
- Yang Z, Li Y, Slavik MF. Antibacterial efficacy of electrochemically activated solution for poultry spraying and chilling. *J Food Sci* 1999;64(3):469-72.
- Tolentino-Bisneto R, Bidoia ED. Effects of the electrolytic treatment on *Bacillus subtilis*. *Brazilian J Microbiol* 2003;34:48-50.
- Davis CP, Shirliff ME, Trieff NM, Hoskins SL, Warren MM. Quantification, qualification, and microbial killing efficiencies of antimicrobial chlorine-based substances produced by iontophoresis. *Antimicrob Agents Chemother* 1994;38(12):2768-74.
- Rice EW, Baird R, Eaton A, Clesceri L. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.
- 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.
- Kobyra 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.
- Donini J, Kan J, Szykarczuk J, Hassan T, Kar K. The operating cost of electrocoagulation. *Canadian J Chem Eng* 1994;72(6):1007-12.
- Wouters PC, Alvarez I, Raso J. Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing. *Trends Food Sci Technol* 2001;12(3):112-21.
- Ricordel C, Miramon C, Hadjiev D, Darchen A. Investigations of the mechanism and efficiency of bacteria abatement during electrocoagulation using aluminum electrode. *Desalination Water Treatment* 2014;52(28-30):5380-9.
- Barashkov N, Eisenberg D, Eisenberg S, Shegebaeva GS, Irgibaeva I, Barashkova I. Electrochemical chlorine-free AC disinfection of water contaminated with *Salmonella typhimurium* bacteria. *Russian J Electrochem* 2010;46(3):306-11.
- Machado LF, Pereira RN, Martins RC, Teixeira JA, Vicente AA. Moderate electric fields can inactivate *Escherichia coli* at room temperature. *J Food Eng* 2010;96(4):520-7.
- 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):67-71.
- 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. *Desalination Water Treatment* 2015;56(10):2672-81.
- 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.
- 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. *Solar Energy Mater Solar Cells* 2013;117:73-80.
- 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.
- 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 environmental chemical factors. *Water Res* 2002;36(13):3289-97.
- 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. *Drinking Water Eng Sci* 2008;1(1):1-6.
- 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.
- Yildiz YŞ, Şenyigit E, İrdemez Ş. 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.

## Removal of *E. coli* and *S. aureus* from polluted water using electrolysis method with Al-Fe electrodes

Mitra Gholami Ph.D.<sup>1</sup>  
 Shahram Nazari Ph.D.<sup>2\*</sup>  
 Ahmad Reza Yari Ph.D.<sup>3</sup>  
 Seyed Mohsen Mohseni Ph.D.<sup>4</sup>  
 Soudabeh Alizadeh Matboo  
 B.Sc.<sup>5</sup>

1- Department of Environmental Health Engineering, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2- Department of Environmental Health Engineering, Developmental Center for Student Research and Technology Talent, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

3- Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran

4- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

5- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran.

\* Corresponding author: Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Hemmat Highway, Tehran, Iran.  
 Tel: +98- 21- 86704633  
 E-mail: Shahramnazari73@yahoo.com

### Abstract

Received: 13 Jan. 2017 Revised: 09 May 2017 Accepted: 20 May 2017 Available online: 21 May 2017

**Background:** Electrolysis is an electrochemical method for the treatment of water. recently water disinfection by electrochemical methods has been increasingly carried out. The aim of this applied research was to investigate the removal of *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) bacteria from drinking water by using electrolysis method with Al-Fe electrodes parallel with the monopole mode.

**Methods:** An experimental study was conducted in the laboratory of microbiology, Iran University of Medical Science in May 2017. In this study, the contaminated water samples were prepared through adding  $10^3$ ,  $10^4$  and  $10^5$  *E. coli* and *S. aureus* bacteria per 1 milliliters (mL) of drinking water. Independent variables Included: different concentrations of *E.coli* and *S. aureus* bacteria ( $10^3$ ,  $10^4$  and  $10^5$  CFU/ml), reaction time (5, 10, 15, 20 and 25 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 98 to 73% and 99.1 to 76%, respectively. In initial concentration of 104 CFU/ml, optimum conditions were obtained for current density, reaction time and electrodes gap, 1.67 mA/cm<sup>2</sup>, 20 min and 2 cm, respectively. With increasing current density and reaction time in both strains of bacteria, were decreased significantly. The electrodes gap do not have much impact on the efficiency of the process. The amount of electrical energy consumed in optimal conditions was calculated 0.5128 kilowatt-hour (kWh/h). Statistical analysis shows that exist significant relationship ( $P<0.01$ ) between initial concentrations of bacterial strains and efficiency of the process.

**Conclusion:** According to the results, *E. coli* and *S. aureus*, removal efficiency were obtained more than 98%, therefore electrolysis process can be used in the removal of pathogenic bacteria from drinking water

**Keywords:** disinfection, drinking water, electrolysis, escherichia coli, staphylococcus aureus.