مقاله
پژوهشی

حذف باکتری اشرشیاکلی از آب‌های آلوده با استفاده از سیستم الکتروشیمیایی دو قطبی

ابوالفضل حسن بیکی[۱]، عباس رضایی[۲*]، حسین معصوم بیگی[۳]، هوشیار حسینی[۴]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲]دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳]استادیار مرکز تحقیقات بهداشت نظامی و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه ا... (عج)، تهران، ایران.
[۴]دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[*]**نویسنده مسئول:** دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
پست الکترونیک: rezaee@modares.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: *حضور میکروارگانیسم‌های مختلف بویژه پاتوژن‌های انسانی در آب آشامیدنی مشکلات بهداشتی فراوانی را برای انسان ایجاد می نماید. به همین علت گندزدایی آب همواره یکی از اصلی‌ترین مراحل تصفیه آب آشامیدنی می‌باشد. باکتری اشرشیاکلی به عنوان شاخصی مناسب در تعیین کیفیت میکروبی آب و انجام گندزدایی مناسب شناخته شده است. فرآیندهای الکتروشیمیایی از جمله روش‌های توانمند در حذف آلاینده‌ها می‌باشند که توجه زیادی بویژه در حذف آلاینده های میکروبی به خود جلب کرده‌اند که این امر به دلیل اثرات زیست‌محیطی اندک، سهولت استفاده و هزینه نسبی پایین آن می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش بررسی عملکرد سلول الکتروشیمیایی با پیکربندی دو قطبی در حذف باکتری اشرشیاکلی از آب و نیز بررسی اثر پارامترهای مختلف بر کارآیی آن می‌باشد.*

مواد و روش کار: *پس از ساخت راکتور کشت خالص باکتری اشرشیاکلی، کارایی فرآیند در حذف باکتری اشرشیاکلی تحت تاثیر پارامترهای دانسیته جریان، حمایت‌کننده الکترولیتی و جمعیت اولیه باکتری مورد بررسی قرار گرفت.*

یافته ها: *بهترین کارآیی سیستم در دانسیته جریان $6\ mA/cm^2$، غلظت ۲۵/۰ گرم بر لیتر $NaCl$ و Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی و جمعیت باکتریایی $100\ cfu/ml$ حاصل گردید.*

نتیجه‌گیری: *با افزایش دانسیته جریان تا میزان $6\ mA/cm^2$، راندمان حذف باکتری به مقدار چشمگیری افزایش می یافت. در مرحله بررسی اثر نوع و غلظت حمایت کننده الکترولیتی، با افزایش غلظت $NaCl$ تا حدی مشخص، کارآیی حذف اشرشیاکلی افزایش قابل توجهی نشان داد، اما چنین پدیده‌ای در مورد Na_2SO_4 مشاهده نگردید. با افزایش جمعیت اولیه باکتری اشرشیاکلی، به مدت زمان بیشتری برای رسیدن به حذف کامل این باکتری نیاز است.*

واژه های کلیدی: *الکتروشیمی، اشرشیاکلی، دو قطبی، آب آلوده*

وصول: ۹۲/۸/۸
اصلاح: ۹۲/۱۲/۲۶
پذیرش: ۹۳/۳/۵

مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی سال ۹۴؛ دوره ۷ (۳): ۵۵۱-۵۶۰
Journal of North Khorasan University 2015;7(3):551-560

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

مقدمه

دسترسی به آب پاک و سالم برای سلامتی انسان ضروری است. حضور عوامل بیماریزا در منابع آب می تواند تهدیدی جدی برای سلامتی انسان باشد و تصفیه آب به روشی کارآمد برای رسیدن به استاندارد، یکی از نیازهای اساسی است [۱]. حضور پاتوژن‌های انسانی بویژه انواع قابل تکثیر در سیستم توزیع آب آشامیدنی یکی از نگرانی-های اصلی مسئولین صنعت آب است. اشرشیاکلی یکی از همین باکتریهاست که از طریق ورود فضولات حیوانی و انسانی به آبهای پذیرنده، منجر به آلودگی آب می شود. این باکتری در ارزیابی کیفیت باکتریولوژیک آب آشامیدنی، به عنوان اصلی‌ترین شاخص آلودگی میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲] و نباید در آب تصفیه شده وجود داشته باشد و حضور آن آب را غیر قابل شرب و نیازمند تصفیه و گندزدائی بیشتر می نماید [۳]. گندزدایی آب بخصوص به عنوان فرایند لازم اجرای تصفیه آب شرب و آب مصرفی بعضی صنایع مانند صنایع فرآوری مواد غذایی، شناگاه‌ها یک نیاز اساسی است [۴]. تصفیه متداول آب از طریق ته‌نشینی، انعقاد و فیلتراسیون و گندزدایی با کلر یا ازن انجام می‌گیرد. فرآیند گندزدایی در تصفیه متداول بعضا بصورت اولیه با هدف حذف و کاهش بار میکروبی آب خام وارده به تصفیه خانه آب و گندزدائی ثانویه با هدف حذف عوامل میکروبی باقی مانده و تامین باقیمانده گندزدا جهت حذف آلاینده های ثانویه در شبکه توزیع می‌باشد. تا به حال روش های مختلفی برای گندزدائی آب استفاده شده است. روش هایی از قبیل کلرزنی به کمک مشتقات مختلف کلر از مثل گاز کلر، هیپوکلریت کلسیم، مونوکلرآمین و دی اکسید کلر، ازن زنی، کاربرد پروکسید هیدروژن، اشعه UV و گندزدائی به کمک فرآیندهای فتوکاتالیستی و الکتروشیمیایی قابل ذکر می باشند کلرزنی مهمترین روش گندزدایی آب در زمان-های گذشته و حال می‌باشد، اما محصولات فرعی تولیدی ناشی از مصرف کلر باعث ایجاد نگرانی‌های بهداشتی و زیست محیطی بسیاری شده است. ازن اکسید کننده ای قوی می‌باشد که قادر به غیرفعال‌سازی انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها به طور موثر می‌باشد. مشکلات مربوط به تولید آن و محصولات جانبی آن از جمله عوامل محدودکننده کاربرد آن اکسیدکننده می‌باشند [۵]. گندزدایی بوسیله حرارت هم، باعث تغییر در طعم، گوارائی و مواد مغذی و املاح آب می شود و مصرف انرژی در این روش قابل توجه است و در مقیاس بزرگ قابل استفاده نمی باشد [۴]. در کنار این روش‌ها، امروزه در تحقیقات مختلف توجه خاصی به پتانسیل فرآیندهای فتوکاتالیستی و الکتروشیمیایی در گندزدایی آب شده است و نشان داده شده که این فرآیندها حتی قادر به حذف اووسیت‌های کریپتوسپوریدیوم پاروووم و اسپورهای کلستریدیومپرفرینژنس می‌باشند. این تکنولوژی به دلیل توانایی بالا در تولید اکسیدکننده‌های بسیار قوی در حین الکترولیز، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۳]. فرآیندهای الکتروشیمیایی از جمله روش‌های توانمند در حذف آلاینده‌های آلی می‌باشند و بخصوص توجه زیادی را در حذف آلاینده های میکروبی به خود جلب کرده‌اند که به دلیل اثرات زیست‌محیطی اندک، سهولت استفاده و هزینه نسبی پایین آنها می‌باشد. این تکنولوژی می‌تواند به منظور معدنی سازی مواد آلی و گندزدایی آب حتی در غیاب کلرید و بدون تولید کلر و مشتقات آن مورد استفاده قرار گیرد. دیگر مزیت گندزدایی به روش الکتروشیمیایی تخریب جدار سلولی باکتریایها به نحوی که قابل بازسازی نباشند می باشد که بسیار شدیدتر از صدمات ایجاد شده توسط افزودن مواد شیمیایی مانند کلر می‌باشد [۶]. مکانیسم تجزیه الکتروشیمیایی مواد آلی به وسیله کومنیلیس به شرح ذیل پیشنهاد شده است. آب بوسیله کاتالیز آندی الکترولیز شده و رادیکال‌های هیدروکسیل با قابلیت جذب سطحی تولید می‌شود [۵].

$$H_2O + MO_x \rightarrow MO_x[^{\bullet}OH] + H^+ + e^-$$

رادیکال‌های هیدروکسیل جذب سطحی شده قادر به تولید اکسیژن فعال می‌باشند که این اکسیژن به صورت شیمیایی جذب سطح شده است.

$$MO_x[^{\bullet}OH] \rightarrow MO_x^{+1} + H^+ + e^-$$

سپس رادیکال‌های هیدروکسیل با یکدیگر واکنش می‌دهند و اکسیژن مولکولی تولید می‌کنند تا الکترولیز آب را کامل کنند.

$$MO_x[^{\bullet}OH] \rightarrow M + O_2 + H^+ + e^-$$

مواد آلی موجود در آب به وسیله رادیکال‌های هیدروکسیل اکسید می‌شوند.

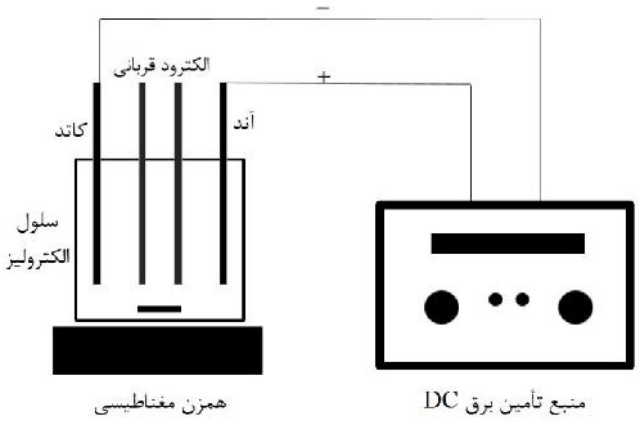
[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

$$R + MO_x[^{\bullet}OH] \rightarrow MO_x + CO_2 + z\,H^+ + z\,e^-$$
$$MO_x^{+1} + R \rightarrow MO_x + RO$$

همچنین در حضور یون‌های کلرید در فرآیند الکترولیز، در پتانسیل‌های بالاتر از ۲/۱۸۷ ولت گاز کلر در آند تشکیل می‌شود. در ادامه با تشکیل گاز کلر، اسید هیپوکلریت طی واکنش‌های الکترولیزی تولید می‌شود. اسید هیپوکلریت یک اکسیدکننده قوی دارای قابلیت اکسیداسیون ترکیبات حلقوی موجود در آب است [۷]. در خصوص چگونگی تاثیر این روش بر عوامل میکروبی مکانیزم‌های مختلفی پیشنهاد شده است. ازجمله این مکانیسم‌ها می‌توان به تاثیر اکسیدکنندگی و مرگ سلول میکروبی ناشی از مواد اکساینده تولیدی در فرآیندهای الکتروشیمیایی، تراواشدن غیرقابل برگشت غشای سلولی با اعمال میدان الکتریکی و نیز اکسیداسیون الکتروشیمیایی بخش‌های حیاتی به هنگام مواجهه با جریان الکتریسیته و یا وارد شدن در میدان الکتریکی اشاره نمود [۸]. غالب‌ترین روش گندزدایی الکتروشیمایی استفاده از اکسیدکننده‌های تولید شده طی فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد که در این دسته می‌توان به الکتروکلریناسیون اشاره کرد. تولید اکسیدکننده در این روش به چندین عامل بستگی دارد که می‌توان از جنس الکترود، ترکیب شیمیایی حمایت‌کننده الکترولیتی، جریان الکتریکی (یا ولتاژ) مصرفی، pH، دما و نوع فرآیند الکترولیز اشاره نمود [۵]. این مطالعه با هدف ارزیابی توانایی فرآیند الکتروشیمیایی بی‌پلار در حذف باکتری اشرشیاکلی از آب آلوده تحت تاثیر پیراسنجه های بهره‌برداری مختلف شامل دانسیته جریان الکتریکی، حمایت‌کننده الکترولیتی، غلظت اولیه باکتری و زمان واکنش به منظور تعیین شرایط بهینه حذف این باکتری در فن‌آوری الکتروشیمیایی می‌باشد.

روش کار

این مطالعه از نوع تجربی آزمایشگاهی است. ابتدا به منظور تهیه رقت های مورد نظر از بذر باکتری اشرشیاکلی، به روش تهیه کدورت مک فارلند، کلنی‌های رشد یافته بر روی محیط کشت نوترینت آگار در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد با استفاده از لوپ در لوله حاوی سرم فیزیولوژی استریل وارد گردید تا زمانی که با مقایسه کدورت آن با کدورت محلول استاندارد نیم مک‌فارلند، سوسپانسیون میکروبی معادل نیم مک‌فارلند بدست آید. جذب نوری این سوسپانسیون در طول موج ۶۲۵ نانومتر بایستی حدود ۰/۰۸ تا ۰/۱ باشد که در این صورت تعداد باکتری آن در هر میلی‌لیتر حدود $۱/۵\times۱۰^{۸}$ می‌باشد. سپس با رقیق سازی این نمونه، رقت های لازم باکتریایی برای افزودن به نمونه آب استریل مورد مطالعه تهیه گردید. در ادامه و طی این تحقیق کارایی فرآیند الکتروشیمیائی دو قطبی، در یک راکتور ناپیوسته استوانه‌ای شکل شیشه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر با حجم مفید ۵۰۰ ml جهت حذف باکتری اشرشیاکلی مورد آزمایشات لازم قرار گرفت. در



شکل ۱: شمایی از سیستم الکتروشیمیایی دو قطبی مورد استفاده در این مطالعه

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

این راکتور الکترودها به صورت عمودی نصب شده بودند. تمامی الکترودهای جانبی و قربانی با توجه به مطالعات گذشته از جنس استیل انتخاب شده بود [۹]. مساحت سطح مفید هر یک از الکترودها برابر ۶۰ سانتی‌متر مربع بود. از نمک های NaCl و Na_2SO_4 در غلظت‌های مختلف و بصورت جداگانه به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی استفاده شد. کارایی سیستم جهت حذف باکتری اشرشیاکلی در سوسپانسیون محتوی دانسیته میکروبی ۱۰۰۰۰-۱۰۰ عدد کلنی در میلی‌لیتر (CFU/ml) مورد بررسی قرار گرفت. از یک منبع تامین برق مستقیم (DC) با دامنه ولتاژ ۰ تا ۳۲ ولت و دامنه عبور جریان ۰ تا ۵ آمپر جهت تامین برق استفاده شد.

مراحل کار به این شکل طراحی شد که در هر مرحله اثر یک پارامتر با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای دیگر مشخص شد. با بدست آمدن مقدار بهینه یک پارامتر، این مقدار در مراحل بعدی استفاده شدبلافاصله پس از پایان زمان واکنش نمونه برداشته شده و بر روی محیط کشت نوترینت آگار کشت داده می‌شد تا تعداد باکتری‌های زنده مانده نهایی مورد سنجش قرار گیرد. همچنین جهت کنترل صحت سنجش ها قبل از شروع واکنش نمونه برداری انجام گرفته و کشت داده می‌شد. پس از ۲۴ ساعت از قرار دادن محیط‌های کشت در انکوباتور ۳۷ درجه، شمارش کلنی‌های رشد یافته صورت می‌گرفت. هر آزمایش سه نوبت تکرار شد و نتایج روی نمودارها میانگین اعداد بدست آمده سه نوبت تکرار می‌باشد.

یافته ها

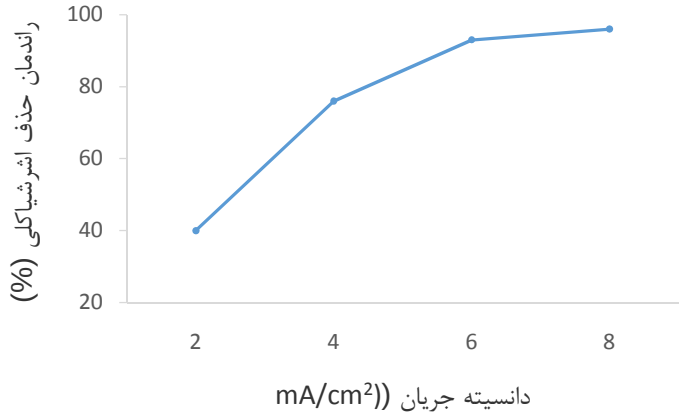
اثر دانسیته جریان بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی: نمودار ۱، درصد حذف باکتری اشرشیاکلی را در دانسیته جریان‌های mA/cm^2 ۸-۲ نشان می‌دهد. در این مرحله از تعداد باکتریایی CFU/ml ۵۰۰۰، غلظت‌های ۰/۲ گرم بر لیتر NaCl و Na_2SO_4 و مدت زمان واکنش ۳۰ دقیقه استفاده شد. هیچ‌گونه حذف باکتری اشرشیاکلی طی آزمایشات انجام گرفته در راکتور شاهد بدون استفاده از جریان الکتریکی مشاهده نگردید.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مرگ باکتری‌ها بیشتر به وسیله اکسیدکننده‌ها می‌باشد نه به دلیل جذب سطحی آن‌ها به سطح الکترود. حداکثر غیرفعال‌سازی بدست آمده در دانسیته جریان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌آمپر بر سانتی-مترمربع بعد از گذشت ۳۰ دقیقه به ترتیب به ۴۱، ۷۴، ۹۱ و ۹۶ درصد می‌رسد. با توجه به نتایج بدست آمده و افزایش ناچیز راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی با افزایش دانسیته جریان از ۶ به ۸ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و همچنین به دلیل اهمیت بالای دانسیته جریان الکتریکی از نظر اقتصادی، دانسیته جریان mA/cm^2 ۶ به عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید و در مراحل بعدی به کار گرفته شد.

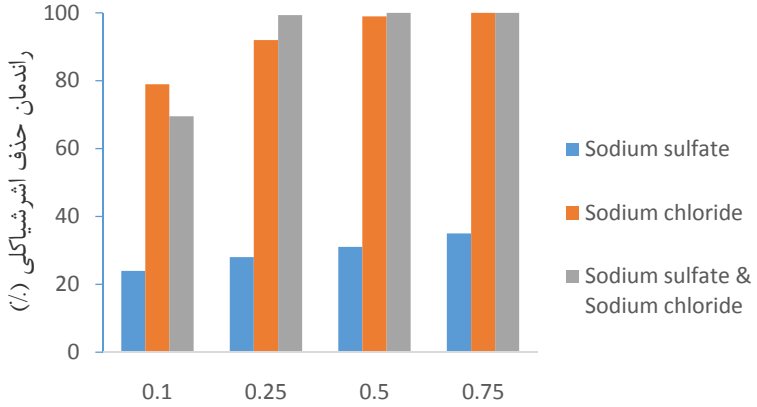
اثر حمایت کننده الکترولیتی بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی: از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر کارآیی فرآیندهای الکتروشیمیایی، ماهیت و غلظت حمایت کننده‌های الکترولیتی موجود در محلول مورد تصفیه می-باشد. حمایت‌کننده الکترولیتی شامل آنیون‌ها و کاتیون-هایی است که در محلول مورد تصفیه وجود داشته و یا جهت تامین هدایت الکتریکی محیط به آن اضافه می‌شوند و می‌تواند اثر زیادی بر سرعت انحلال فلزات، ولتاژ مصرفی و بنابراین انرژی مصرفی و پدیده سطح رخداده بین گونه-های آلاینده و هیدروکسیدهای فلزی بگذارد. پارامتر تحت تاثیر بعدی پایداری الکتروشیمیایی یون‌های موجود در الکترولیت می‌باشد. انتخاب حمایت‌کننده الکترولیتی نباید تنها با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی انجام پذیرد، بلکه توانایی حمایت‌کننده الکترولیتی جهت شرکت در فرآیندهای اکسیداسیون و احیای الکتروشیمیایی از اهمیت بالایی برخورداراست. در نتیجه این امر، بهره‌وری جریان الکتریکی و مصرف انرژی بهبود می‌یابند [۱۰].

راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی در غلظت‌های اولیه NaCl و Na_2SO_4 در نمودار۲ نشان داده شده است. بعد از الکترولیز به مدت ۳۰ دقیقه میزان حذف باکتری اشرشیاکلی مورد سنجش قرار گرفت. گندزدایی الکتروشیمیایی باکتری اشرشیاکلی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کلر در محلول، راندمان حذف افزایش می-یابد. نتایج نشان‌دهنده میزان تاثیر کلر تولیدشده به روش الکتروشیمیایی در گندزدایی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کارآیی حذف نسبت به حالتی که از نمک طعام به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی استفاده شده بود بسیار کمتر می‌باشد. راندمان حذف با افزایش غلظت نمک

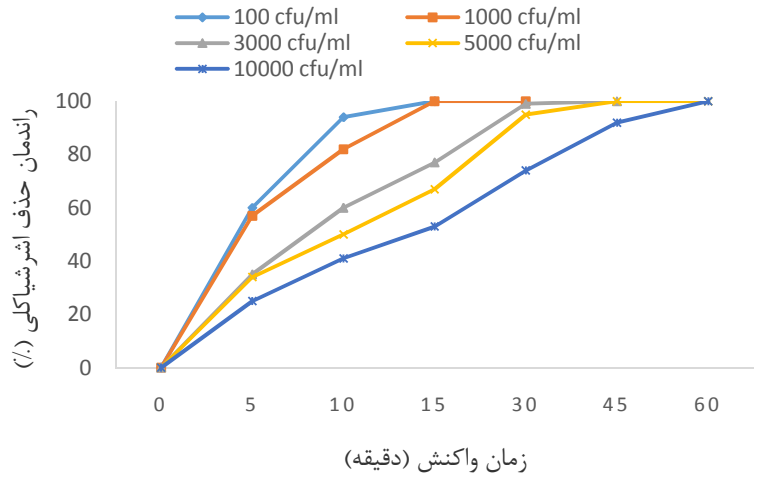
[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]



نمودار۱: اثر دانسیته جریان بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی



نمودار۲: اثر حمایت کننده الکترولیتی بر راندمان حذف اشرشیاکلی



نمودار۳: اثر تعداد باکتری اشرشیاکلی اولیه بر راندمان حذف آن در مدت زمان ۶۰ دقیقه

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

سولفات سدیم به آرامی افزایش می‌یابد و در حداکثر میزان خود از ۲۵ درصد فراتر نمی‌رود.

اثر حمایت کننده الکترولیتی بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی: با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی و ولتاژ کاربردی و همچنین با توجه به اینکه افزایش بیش از حد TDS محلول از نظر کابردی امری منطقی نمی‌باشد و به دلیل تفاوت ناچیز راندمان حذف با افزایش غلظت NaCl از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم بر لیتر، در مراحل بعدی از کلرید سدیم و سولفات سدیم هرکدام به غلظت ۰/۲۵ گرم بر لیتر به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی استفاده گردید.

اثر تعداد اولیه باکتری بر راندمان حذف اشرشیاکلی: نمودار ۳، درصد حذف باکتری اشرشیاکلی در حضور ۱۰۰-۱۰۰۰۰ CFU/ml عدد باکتری را نشان می‌دهد. در این مرحله از دانسیته جریان ۶ mA/cm^2 و غلظت‌های ۰/۲۵ گرم بر لیتر NaCl استفاده گردید. همانطور که در شکل نشان داده شده است در مدت زمان ۶۰ دقیقه راندمان حذف با افزایش تعداد اولیه باکتری از ۱۰۰ به ۱۰۰۰۰ CFU/ml به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند.

گندزدایی در نتیجه اکسیداسیون مستقیم و تولید رادیکال‌های آزاد در دقایق ابتدایی واکنش به سرعت افزایش می‌یابد و با گذشت زمان با سرعت کمتر و به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تا غلظت ۳۰۰۰ CFU/ml، بیش از ۷۰ درصد حذف تعداد باکتریایی در ۱۵ دقیقه ابتدایی واکنش انجام می‌گیرد. باگذشت زمان واکنش از سرعت حذف اشرشیاکلی کاسته می‌شود و از دقیقه ۴۵ زمان واکنش به بعد راندمان حذف افزایش ناچیزی دارد.

بحث

طبق روابط ۱، ۲ و ۳ بر روی الکترودهای آند و کاتد بترتیب عمل اکسیداسیون و احیا بصورت زیر انجام می‌پذیرد [۸]:

در کاتد:

$$H_2O + e^- \rightarrow OH^- + 0/5\ H_2$$

۱- در آند:

$$Cl^- \rightarrow 0/5\ Cl_2 + e^-$$

۲- کل:

$$H_2O + Cl^- \rightarrow OH^- + 0/5\ H_2O + 0/5\ Cl_2$$

بر طبق قانون الکترولیز فارادی مقدار اکسیژن کاهش یافته با میزان جریان الکتریکی عبوری از محلول متناسب می‌باشد. به همان مقداری که جریان الکتریکی از محلول عبور می‌کند تولید عوامل اکسیدکننده رخ می‌دهد و بنابراین راندمان حذف افزایش پیدا می‌کند. با افزایش محتوای نمک محلول میزان انرژی مصرفی به مقدار چشمگیری کاهش پیدا می‌یابد، بنابراین فرآیندهای الکتروشیمیایی برای محلول‌های نمکی مناسب‌تر هستند [۳].

میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به صورت الکتروشیمیایی به شکل مستقیم و یا تولید گونه‌های شیمیایی بسیار فعال مانند رادیکال‌های آزاد و دیگر یون‌ها (OH، [O]، HO_2، Cl_2، ClO و غیره) غیرفعال شوند [۱۰]. غیرفعال‌سازی مستقیم شامل جذب الکتریکی باکتری‌ها به سطح الکترود و تخریب‌های بعدی انجام می‌گیرد. میزان اثر غیرفعال‌سازی مستقیم و غیرمستقیم به خوبی مشخص نشده است و در بسیاری از مطالعاتی که تا کنون انجام گرفته است، نقش هر دو پدیده چشمگیر گزارش شده است [۱۱]. یکی دیگر از دلایل احتمالی راندمان بالاتر فرآیند در زمان‌های ابتدایی واکنش می‌تواند افزایش pH باشد [۵]. طبق نتایج بدست آمده در بخش بررسی اثر دانسیته جریان، دانسیته جریان بالاتر باعث ایجاد pH بالاتر می‌شود که البته نتایج آن به صورت نمودار ارایه نشده است. pH در دقایق ابتدایی واکنش به شدت افزایش یافته و در طی ۱۰ دقیقه به حدود ۸/۵ می‌رسد، اما در ادامه با کاهش روبرو می‌شود و در نهایت به حدود ۷/۵ تا ۷/۸ می‌رسد. افزایش ابتدایی pH می‌تواند به دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در کاتد، و کاهش pH می‌تواند به دلیل مصرف تدریجی آنیون‌های هیدروکسیل و همچنین تولید کاتیون‌های هیدروژن در واکنش‌های تجزیه HOCl و OCl^- در کنار واکنش HOCl در محلول مورد تصفیه باشد. علاوه بر این، تولید اسیدهای آلی مختلف باعث افت pH می‌شود [۱۲].

یکی دیگر از دلایل احتمالی راندمان بالاتر فرآیند در زمان های ابتدایی واکنش می‌تواند افزایش pH باشد [۵]. طبق نتایج بدست آمده در بخش بررسی اثر دانسیته جریان،

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

دانسیته جریان بالاتر باعث ایجاد pH بالاتر می‌شود که البته نتایج آن در شکل ارایه نشده است. pH در دقایق ابتدایی واکنش به شدت افزایش یافته و در طی ۱۰ دقیقه به حدود ۸/۵ می رسد، اما در ادامه با کاهش روبرو می‌شود و در نهایت به حدود ۷/۵ تا ۷/۸ می‌رسد. افزایش ابتدایی pH می‌تواند به دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در کاتد، و کاهشpH می‌تواند به دلیل مصرف تدریجی آنیون‌های هیدروکسیل و همچنین تولید کاتیون‌های هیدروژن در واکنش‌های تجزیه HOCl و OCl^- در کنار واکنش HOCl در محلول مورد تصفیه باشد. علاوه بر این، تولید اسیدهای آلی مختلف باعث افت pH می‌شود [۱۳]. همچنین باید ذکر گردد با افزایش pH به پتانسیل الکتریکی کمتری برای دستیابی به حداکثر حذف باکتری‌ها نیاز است. در محیط قلیایی، هدایت الکتریکی به میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از هدایت الکتریکی محیط‌های خنثی و اسیدی است. همچنین در شرایط قلیایی نسبت به شرایط اسیدی و خنثی، غیرفعال شدن الکترودها با سرعت پایین‌تری رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در دقایق ابتدایی واکنش، توانایی سیستم در گندزدایی الکتروشیمیایی بیشتر است [۵].

واکنش‌های رقابتی بین الکترودها مانند نمو اکسیژن در دانسیته جریان‌های بالاتر منجر به مصرف بار الکتریکی بیشتری می‌شود. دلیل تفاوت اندک میزان دانسیته جریان ۶ و ۸ بر نرخ حذف اشرشیاکلی می‌تواند محدودیت انتقال جرم بین محلول و الکترودها باشد [۱۳]. از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر کارآیی فرآیندهای الکتروشیمیایی، ماهیت و غلظت حمایت‌کننده‌های الکترولیتی موجود در محلول مورد تصفیه می‌باشد. حمایت‌کننده الکترولیتی شامل آنیون‌ها و کاتیون‌هایی است که در محلول مورد تصفیه وجود داشته و یا جهت تامین هدایت الکتریکی محیط به آن اضافه می‌شوند و می‌تواند اثر زیادی بر سرعت انحلال فلزات، ولتاژ مصرفی و بنابراین انرژی مصرفی و پدیده سطح رخداده بین گونه‌های آلاینده و هیدروکسیدهای فلزی بگذارد. پارامتر تحت تاثیر بعدی پایداری الکتروشیمیایی یون‌های موجود در الکترولیت می‌باشد. انتخاب حمایت‌کننده الکترولیتی نباید تنها با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی انجام پذیرد، بلکه توانایی حمایت‌کننده الکترولیتی جهت شرکت در فرآیندهای اکسیداسیون و احیای الکتروشیمیایی از اهمیت بالایی برخورداراست. در نتیجه این امر، بهره‌وری جریان الکتریکی و مصرف انرژی بهبود می‌یابند [۱۴]. در مطالعه انجام گرفته توسط کرویک[1] و همکاران (۲۰۰۵) بر روی اثر ماهیت حمایت‌کننده الکترولیتی بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی، در غلظت ۰/۰۱ مولار نمک طعام و دانسیته جریان حدود ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در طول ۶۰ دقیقه به راندمان۱۰۰ درصد می‌توان رسید. در مطالعه انجام گرفته توسط آقای کرویک و همکاران بر روی اثر ماهیت حمایت‌کننده الکترولیتی بر راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی، در غلظت ۰/۰۱ مولار نمک طعام و دانسیته جریان حدود ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در طول ۶۰ دقیقه به راندمان۱۰۰ درصد می‌توان رسید. در غلظت ۰/۰۳۶ مولار NaH_2PO_4 در دانسیته جریان ۲۷ mA/cm^2 نیز راندمان حذف ۹۹/۹ درصدی بدست آمد [۳]. این نتایج با نتایج مطالعه حاضر هماهنگی زیادی دارد. در مورد گندزدایی در حضور نمک Na_2SO_4، لی[2] و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که اکسیدکننده‌های تولیدی در حضور SO_4^{2-} مانند $S_2O_8^{2-}$ در گندزدایی شرکت می‌کنند [۱۵]. در مطالعه لوپز[3] و همکاران (۲۰۱۲)، راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی در COD بین ۶۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در عدم حضور نمک طعام بعد از گذشت ۶۰ دقیقه و در حضور نمک طعام بعد از ۱۰ دقیقه، بیش از ۹۹ درصد بدست آمد. همچنین دلت و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دانسیته جریان ۲۰ mA/cm^2 بعد از گذشت ۵ دقیقه به راندمان حذف ۱۰۰ درصد دست یافتند. در مطالعه آقای لوپز و همکاران، راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی در COD بین ۶۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در عدم حضور نمک طعام بعد از گذشت ۶۰ دقیقه و در حضور نمک طعام بعد از ۱۰ دقیقه، بیش از ۹۹ درصد بدست آمد. همچنین آقایان جیما و دلت و همکاران با استفاده از دانسیته جریان ۲۰ mA/cm^2 بعد از گذشت

1 -Kerwick
2 - Li
3 - Lopez

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

۵ دقیقه به راندمان حذف ۱۰۰ درصد دست یافتند. دلیل احتمالی راندمان کمتر مطالعه حاضر در حذف باکتری، کاربرد جریان الکتریکی پایین‌تر و تعداد اولیه باکتریایی بالاتر می‌باشد [۱۴]. همانطور که در شکل ۳ مشاهده شد، راندمان حذف اشرشیاکلی در غلظت‌های مختلف NaCl و Na_2SO_4 و دانسیته جریان‌های یکسان ارایه شده است. تعداد باکتریایی در طول زمان واکنش با کاهش روبرو می‌شود و با افزایش غلظت NaCl حذف باکتری‌ها افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر استفاده از Na_2SO_4 به عنوان حمایت‌کننده الکترولیتی در حذف الکتروشیمیایی اشرشیاکلی کمتر از نمک NaCl می‌باشد که با نتایج لی و همکاران (۲۰۰۲) مطابقت دارد [۱۶]. این نتایج پیشنهاد می‌کند NaCl با اکسید شدن به HOCl می‌تواند حذف باکتری اشرشیاکلی را افزایش دهد. قابل ذکر است پتانسیل الکتریکی سیستم در حین الکترولیز افزایش می‌یابد، اگرچه مقدار آن قابل توجه نیست. علت این امر می‌تواند تولید HOCl ناشی از تجزیه NaCl باشد که در طول زمان منجر به کاهش هدایت الکتریکی محلول می‌شود [۵]. همچنین با افزایش غلظت باکتری در محلول از میزان جریان الکتریکی عبوری کاسته می‌شود. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش غلظت اولیه باکتری، غیرفعال‌سازی سطح الکترودها قوت بیشتری می‌گیرد. در غلظت‌های بالاتر اشرشیاکلی، رقابت بین باکتری‌ها و محصولات میانی برای جذب به مناطق فعال سطح الکترودها افزایش می‌یابد. همچنین ممکن است این ترکیبات میانی در آب نامحلول باشند و با رسوب کردن بر سطح الکترودها باعث غیرفعال‌سازی الکترودها شوند [۱۷].

نتیجه‌گیری

کارآیی تکنیک الکتروشیمیایی در حذف باکتری اشرشیاکلی تحت تاثیر پیراسنجه های دانسیته جریان، حمایت‌کننده الکترولیتی و تعداد باکتریایی مختلف نشان داد با افزایش دانسیته جریان تا $6\ mA/cm^2$، راندمان حذف باکتری اشرشیاکلی تا ۹۳٪ افزایش می یابد. از طرفی در حضور غلظت بهینه NaCl یعنی ۰/۲۵گرم در لیتر، کارآیی حذف اشرشیاکلی به مقدار زیادی افزایش می یابد، اما چنین پدیده‌ای در مورد Na_2SO_4 مشاهده نگردید. با افزایش تعداد اولیه باکتری اشرشیاکلی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰۰، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حذف کامل این باکتری از کمتر از ۱۵ دقیقه به حدود ۶۰ دقیقه افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در صورت بهینه سازی پارامترهای موثر بر فرآیند گندزدایی الکتروشیمیایی، این روش می‌تواند خود را به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی جهت گندزدایی آب در صنایع مختلف مطرح کند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه تربیت مدرس به دلیل فراهم نمودن امکانات انجام این تحقیق در چهاچوب پایان نامه کارشناسی ارشد با کد پ ز ۳۳۰۲۳۱۶ تشکر و قدردانی می‌گردد.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

References

1. Weiner RE,Matthews R, Environmental engineering. 4th ed. UK: Butterworth-Heinemann, 2003, 1-50.
2. Delaedt Y, Daneels A, Declerck P, Behets J, Ryckeboer J, Peters E,“ et al”, The impact of electrochemical disinfection on Escherichia coli and Legionella pneumophila in tap water, Microbiol Research, 2008;163:192-199.
3. Kerwick MI, Reddy SM, Chamberlain AHL, Holt DM. Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection, Electrochim Acta, 2005;50:5270-5277.
4. Kim BR, Anderson JE, Mueller SA, Gaines WA, Kendall AM, Literature review efficacy of various disinfectants against Legionella in water systems, Water Res. 2002; 36(18): 4433-4444.
5. Jeong J, Kim JY, Cho M, Choi W, Yoon J, Inactivation of Escherichia coli in the electrochemical disinfection process using a Pt anode, Chemosphere, 2007;67:652-659.
6. Chizuko M, Sano K, Morimatsu S, Kiura H, Goto T, Kohno T, Hong W, Disinfection potential of electrolyzed solutions containing sodium chloride at low concentrations, Journal of Virological Methods. 2000; 85(1): 163-174.
7. Michele M, Vacca A, Polcaro AM, Palmas S, Ruiz JR, Pozzo AD, Electrochemical treatment of phenolic waters in presence of chloride with boron-doped diamond (BDD) anodes: experimental study and mathematical model, J Hazard Mater , 2010; 174(1): 314-322.
8. Rahmani AR, JonidiJafariA,Mahvi AH, Investigation of water disinfection by electrolysis, Pakistan Journal of Biological Sciences, 2005;8(6):910-13[Persian]
9. Deza MA, Araujo M, Garrido MJ, Inactivation of Escherichia coli, Listeria monocytogenes, Pseudomonas aeruginosa and Staphylococcus aureus on stainless steel and glass surfaces by neutral electrolysed water, Lett Appl Microbiol, 2005; 40(5): 341-346.
10.Drees K, Abbaszadegan M, Maier R, Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage, Water Res. 2003;37:2291-2300.
11.Matsunaga T, Nakasono S, KitajimaY, Horiguchi K, Electrochemical disinfection of bacteria in drinking water using activated carbon fibers, BiotechnolBioeng, 1994;43(5):429-433.
12.Stoner GE, Cahen GL, Sachyani M, Gileadi E, 457—The mechanism of low frequency electrochemical disinfection, J ElectroanalChem Interfacial Electrochem, 1982; 141(3): 229-243.
13.Lopez Galvez F, Posada Izquierdo GD, Selma MV, Perez Rodriguez F, Gobet J, Gil MI, “et al”, Electrochemical disinfection: An efficient treatment to inactivate Escherichia coli O157:H7 in process wash water containing organic matter, Food Microbiol, 2012;30:146-156.
14.Yıldız YŞ, Koparal AS, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation, Chemical Engineering Journal, 2008; 138(1): 63-72.
16.Li XY, Lo PSY, Ding F, Sin SHP, Electrochemical disinfection of saline wastewater effluent, journal of environmental engineering, 2002;128(8):697- 704.
17. Li M, Feng C, Zhang Z, Lei X, Chen R, Yang Y ,“ et al” ,Simoultaneous reduction of nitrate and oxidation of by-products using electrochemical method, J Hazard Mater, 2009;171:724-730.

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]

Original Article

Removal of Escherichia coli from Contaminated Water Using Bipolar Electrochemical Systems

Hasanbiki A[1], Rezaee A[2], Masoumbigi H[3], Hossini H[4]*

[1]Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares university , Tehran, Iran.
[2]Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares university , Tehran, Iran.
[3]Health Research Center and Environmental Health engineering department, Faculty of Health, Baqiyatallah University of Medical Scienc, Tehran, Iran
[4]Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares university , Tehran, Iran.
[*] **Corresponding author:** Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran
Email: rezaee@modares.ac.ir

Abstract

Background & objectives: *Presence of various microorganism, particularly human pathogens, in drinking water causes many health problems. Therefore, the water disinfection has been one of the main drinking water treatment processes. E. coli bacteria is known as an appropriate microbial water quality indicator. Electrochemical processes are very powerful for the removal of pollutants, particularly microbial contaminants, due to low environmental effects, ease of use and relative costs down for it. The aim of this study was to investigate the performance of electrochemical process in E. coli bacteria removal from water as well as the effect of various parameters on the performance of it.*

Material & Methods: *The electrochemical reactor was constructed and E. coli bacteria removal performance of under the influence of current density, initial bacteria population and supporting electrolyte type and concentration have evaluated.*

Results: *The best performance of the electrochemical system was obtained in the current density of 6 mA/cm^2, concentrations of 0.25 g/l for each NaCl and Na_2SO_4 as supporting electrolyte and CFU/100 ml initial bacterial population.*

Conclusion: *With the increasing current density up to 6 mA/cm^2, efficiency of bacteria removal was significantly increased. In investigation on effect of supporting electrolyte type and concentration were shown that by increasing the concentration of NaCl, the performance showed a significant increase E. coli removal. This performance has not been obtained in the case of Na_2SO_4 as supporting electrolyte. With increasing of the initial bacteria number, higher time were needs to the complete elimination E.coli, when the initial bacterial number were increased.*

Key words: *Electrochemical techniques, Escherichia coli, Polluted water*

Journal of North Khorasan University 2015;7(3): 551-560

Recived: 30 Oct 2013
Revised: 17 Mar 2014
Accepted: 26 May 2014

[Downloaded from journal.nkums.ac.ir on 2026-11-14]