

## بررسی کارایی پیل نمک‌زدایی میکروبی اصلاح‌شده در شیرین سازی آب شور دریا

عبدالمجید قلیزاده (PhD)\*، علی اصغر نشاط (PhD)<sup>۱</sup>، فاطمه پاکروان (BSc)<sup>۲</sup>، محمد میری (PhD)<sup>۳</sup>، محمود تقوی (PhD)<sup>۴</sup>، علی نیکونهاد (PhD)<sup>۵</sup>

۱-دانشکده علوم پزشکی اسفراین، اسفراین، ایران

۲-دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۳-گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران

۴-گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی گناباد، گناباد، ایران

۵-گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران

دریافت: ۹۷/۱/۲۷ اصلاح: ۹۷/۵/۱۶، پذیرش: ۹۷/۶/۱۳

### خلاصه

**سابقه و هدف:** فقدان مقادیر کافی آب شیرین یک چالش جهانی است. شیرین سازی آب را می‌توان با استفاده از سیستم‌های حرارتی یا غشایی انجام داد که هرکدام به انرژی قابل توجهی نیاز دارند. پیل نمک‌زدایی میکروبی (Microbial Desalination Cell=MDC) فناوری نوینی است که شیرین سازی آب، تولید الکتریسیته و تصفیه فاضلاب را در یک راکتور انجام می‌دهد. با توجه به تولید جریان و یون‌زدایی کم این فناوری، این مطالعه با هدف بهبود کارایی فرآیند انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه تجربی، قابلیت فرآیند MDC اصلاح‌شده جهت شیرین سازی آب دریا (حاوی ۲۰ g/L NaCl) بررسی شد. بدین منظور، محلول کاتد تحت دمش با ازن (O<sub>3</sub>-MDC)، و محلول میانی در معرض امواج فراصوت قرار گرفت و عملکرد راکتور طی یک دوره راهبری از لحاظ تولید جریان و نمک‌زدایی با راکتور شاهد تحت دمش با اکسیژن (O<sub>2</sub>-MDC) و بدون امواج فراصوت مقایسه شد. حدود ۷۵ نمونه از هر راکتور برداشت شد. تشکیل بیوفیلم روی آند توسط اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM) و باکتری‌های غالب با تعیین توالی ژن ۱۶S rRNA بررسی شدند.

**یافته‌ها:** با اعمال امواج فراصوت بر محلول نمکی خام و بعد از ۲۴ ساعت راهبری O<sub>2</sub>-MDC، ولتاژ تولیدی راکتور از ۱۱۹±۳/۹ به ۱۳۱±۴/۷ میلی ولت افزایش یافت. در یک چرخه راهبری، حداکثر چگالی جریان O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۱/۱۶ و ۵/۲۷ A/m<sup>2</sup> بود و اختلاف معنی داری در نتایج تولید ولتاژ آنها وجود داشت (p<۰/۰۰۱). راندمان نمک‌زدایی O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۷۴٪ و ۵۵/۵۸٪ بدست آمد. پروتئوباکتری‌ها، فیرمیکوبیت‌ها و اسیدوباکتری‌ها باکتری‌های غالب بیوفیلم را شامل می‌شدند.

**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج این مطالعه MDC اصلاح‌شده با ازن و امواج فراصوت در صورت راهبری صحیح گزینه مناسبی برای نمک‌زدایی آب شور دریا می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پیل نمک‌زدایی میکروبی، پیل سوختی میکروبی، منابع انرژی بیوالکتریک، آب شور.

### مقدمه

نمک‌زدایی، تولید جریان و تصفیه فاضلاب به‌طور هم‌زمان و در یک راکتور انجام شود. چنین دستگاهی «پیل نمک‌زدایی میکروبی» (Microbial Desalination Cell, MDC) خوانده می‌شود (۱۲-۱۰). در MDC باکتری‌ها با متابولیسم کردن مواد آلی در محفظه آند، الکترون و پروتون آزاد می‌کنند. الکترون‌ها از طریق مدار خارجی به سمت کاتد مهاجرت کرده، اما پروتون‌ها که نمی‌توانند از غشای آنیونی و مدار خارجی عبور کنند در آند باقی می‌مانند. جهت جبران اختلاف بار الکتریکی بین دو الکترود، آنیون و کاتیون‌های موجود در اتاقک میانی به ترتیب به سمت اتاقک آند و کاتد کشیده می‌شوند. در نتیجه در یک راکتور نمک‌زدایی آب، تصفیه فاضلاب و تولید الکتریسیته انجام می‌شود (۱۴ و ۱۳). Kokabian و همکاران میزان جریان ۱/۱ W/m<sup>2</sup> را در یک چرخه راهبری MDC به دست آوردند (۱۵). Kalleary و همکاران نشان دادند MDC قادر است مالاشیت گرین و زرد سان ست را ۴۰ تا

فقدان مقادیر کافی آب شیرین یک چالش جهانی است زیرا حدود ۹۷٪ از آب‌های موجود شور بوده و حتی نمی‌توان از آن برای آبیاری کشاورزی استفاده کرد (۳-۱). لذا هم‌اکنون در بسیاری از نقاط دنیا نمک‌زدایی آب و تصفیه فاضلاب‌های شور جهت استفاده مجدد به‌عنوان یک شیوه تأمین آب موردنیاز جوامع مطرح است (۴ و ۲). به‌طور کلی، شیرین سازی آب را می‌توان با استفاده از سیستم‌های حرارتی یا غشایی انجام داد که هرکدام به انرژی قابل توجهی نیاز دارند (۶ و ۵). هزینه انرژی ۴۰٪ از کل هزینه آب‌شیرین‌کن‌ها را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان مثال، دستگاه اسمز معکوس به ازای تولید هر مترمکعب آب شیرین از آب شور، حدود ۷-۳ KW/h برق مصرف می‌کند (۷). یکی از روش‌های نوین جایگزین، استحصال انرژی از میکروارگانیسم‌ها در پیل‌های سوختی میکروبی (Microbial Fuel Cell, MFC) است (۸ و ۹). یک MFC را می‌توان به‌گونه‌ای اصلاح نمود که در آن عمل

این مقاله حاصل پایان‌نامه عبدالمجید قلیزاده دانشجوی دکتری رشته مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی یزد می‌باشد.

\* مسئول مقاله؛ دکتر عبدالمجید قلیزاده

آدرس: اسفراین، دانشکده علوم پزشکی، معاونت آموزشی، تلفن: ۰۵۸-۳۱۵۵۰۶۲۲

آنولیت) با محلول تغذیه خارجی (۱۰۰ mL) با سرعت ۰/۰۵ mL/min (زمان هیدرولیکی ۲۴ ساعت) با دو پمپ پرستالتیک در گردش بود. آنولیت به مدت ۱۰ دقیقه تحت تزریق گاز N<sub>2</sub> (۴۰ mL/min) قرار گرفت (۱۷) و هر ۴۸ ساعت جایگزین می‌شد. اتاقک میانی با محلول ۲۰ g/L NaCl پر شد. جهت بررسی اثر اعمال امواج فراصوت بر کارایی راکتور، آزمایش‌هایی به صورت موازی روی راکتور حاوی اکسیژن بجای ازن (O<sub>2</sub>-MDC) در شرایط پردازش و عدم پردازش محلول نمکی با امواج فراصوت در فرکانس ۲۲ KHz و زمان ۱۵ دقیقه (۱۹) انجام و نتایج با راکتور حاوی ازن (O<sub>3</sub>-MDC) مقایسه شدند. زمانی که غلظت نمک در اتاقک میانی کمتر از ۱ g/L می‌شد این محلول تعویض می‌شد (یک چرخه راهبری). اتاقک کاتد با بافر فسفات پر و هر ۴۸ ساعت تعویض شد. از ازن به عنوان گیرنده الکترون در اتاقک کاتد استفاده شد. ازن توسط ژنراتور ازن و با استفاده از گاز ورودی اکسیژن (خلوص ۹۵٪) تولید، و به طور مداوم (۳۶ mg/min) به کاتولیت (محلول اتاقک کاتد) تزریق شد.

میزان نمک‌زدایی و تولید جریان در O<sub>3</sub>-MDC، و راکتور حاوی محلول نمکی پردازش شده با امواج فراصوت با مقادیر به دست آمده در راکتورهای شاهد (O<sub>2</sub>-MDC و مدارباز، بدون پردازش با امواج فراصوت) مقایسه شدند. اندازه‌گیری شوری آب با برداشت هر ۲۴ ساعت نمونه از محلول میانی و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) آن با استفاده از هدایت سنج (HQ40d) انجام شد. بعد از اندازه‌گیری، محلول به اتاقک برگردانده شد. ولتاژ تولیدی (E, V) هر ۵ دقیقه توسط مولتی‌متر ثبت شد. جریان (A, I) طبق قانون اهم تعیین شد. غلظت ازن در گاز ورودی و خروجی با تیتراسیون یدومتری اندازه‌گیری شد (۲۰). چگالی توان (P<sub>An</sub>, W/m<sup>2</sup>) بر اساس سطح مقطع آند (A<sub>An</sub>, m<sup>2</sup>) اندازه‌گیری شد.

$$P_{An} = \frac{E^2}{A_{An} R_{ex}}$$

منحنی قطبیت با اندازه‌گیری ولتاژ راکتور در مقاومت‌های ۱۰ Ω تا ۱ MΩ (۱۰ min برای هر مقاومت) ترسیم شد. نرخ کل نمک‌زدایی (TDR, mg/h) به صورت زیر محاسبه شد:

$$TDR = \frac{(C_0 - C_t)V_d}{t}$$

که C<sub>0</sub> و C<sub>t</sub> غلظت اولیه و نهایی NaCl؛ V<sub>d</sub> (L) حجم مایع میانی و t (h) زمان نمک‌زدایی است. تشکیل بیوفیلم در سطح آند با استفاده از میکروسکوپ اسکن الکترونی، و رشد باکتری در O<sub>3</sub>-MDC توسط PCR ژن ۱۶S rRNA پایش شد. نمونه‌ها از آنولیت و بخش میانی آند تهیه شدند. نمونه‌های آنولیت بدون هیچ پیش‌پردازشی برداشت شدند. روش استخراج DNA و تکثیر ژن به تفصیل در مطالعات قبلی آمده است (۱۳). در مجموع حدود ۱۵۰ نمونه از راکتورهای O<sub>3</sub>-MDC و O<sub>2</sub>-MDC در یک ران راهبری با دو بار تکرار برداشت شد (هر کدام حدود ۷۵ نمونه). داده‌ها در نرم‌افزار SPSS Ver. 20 و با استفاده از آزمون‌های ویلکسون و T-زوجی آنالیز و p < ۰/۰۵ معنی دار در نظر گرفته شد.

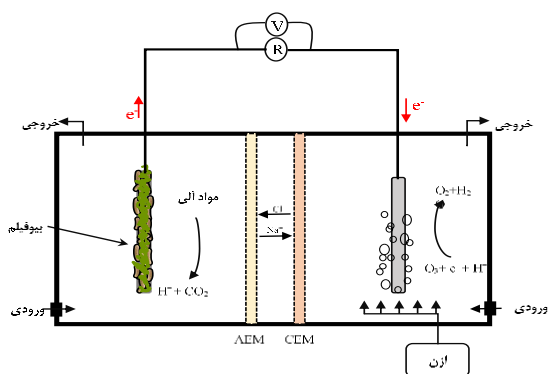
### یافته‌ها

اثر اعمال امواج فراصوت و تولید بیوالکتریسته: EC محلول نمکی خام mS/cm ۳۵/۷±۱/۲ بدست آمد، این مقدار پس از پیش‌پردازش با امواج فراصوت mS/cm ۳۹/۵±۲/۴ بود. در مدت‌زمان ۲۴ ساعت راهبری O<sub>2</sub>-MDC، ولتاژ و EC آب‌شور

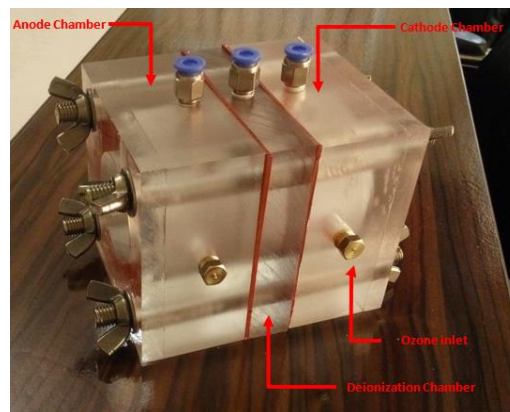
۹۰٪ و شوری آب را حدود ۶۲٪ حذف کند (۱۶). با این حال، فرآیند با چالش تولید جریان و یون‌زدایی کم روبروست. این مطالعه با هدف افزایش عملکرد MDC با امواج فراصوت جهت بهبود یونیزاسیون نمک و همچنین معرفی الکترون گیرنده ازن در پیل‌های میکروبی انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه تجربی، پس از تصویب در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی یزد با کد IR.SSU.SPH.REC.1395.35 انجام شد. پیل MDC با سه اتاقک آند، میانی و کاتد با قطر ۵ cm و حجم به ترتیب ۳۸، ۷۵ و ۷۵ mL طراحی گردید (شکل ۱). ابتدا راکتور به مدت یکماه به صورت MFC (۱۷) سپس به صورت MDC بهره‌برداری شد، یعنی غشای آنیونی (AEM, AR204SXR412, Ionic, USA) بین اتاقک آند و میانی و غشای کاتیونی (CEM, CR67, MK111, USA) بین اتاقک میانی و کاتد قرار گرفت.



الف

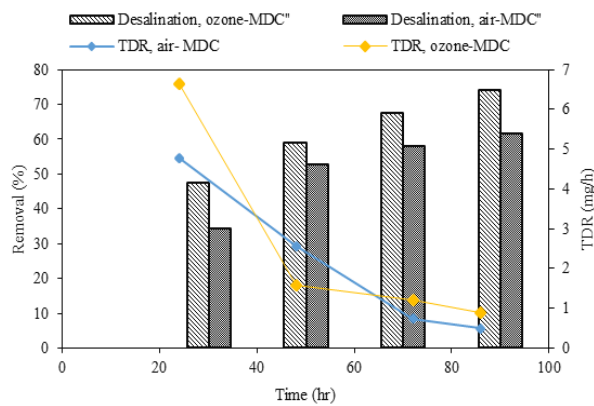


ب

شکل ۱. نمای شماتیک (الف) و واقعی (ب) راکتور MDC اصلاح‌شده

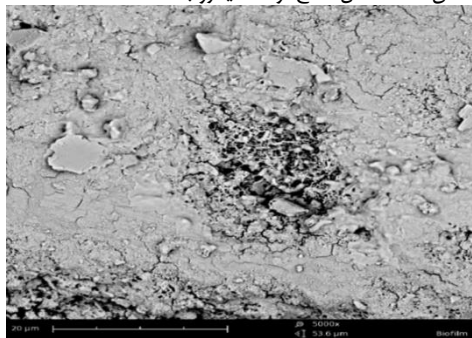
قبل از آزمایش، غشاها به ترتیب در محلول ۱ مولار NaOH و HCl به مدت ۲ ساعت مستغرق، سپس با آب دیونیزه شستشو شدند. الکتروآند (۳۰×۲۵ mm) با گرافیت متخلخل و الکتروکاتد پارچه کربنی (Carbon Cloth) پوشش داده شده با ۰/۵ g/cm<sup>2</sup> پلاتین انتخاب و توسط مدار سیمی تیتانیوم و با مقاومت ۱۰۰ اهم به یکدیگر متصل شدند (۱۸). اتاقک آند با لجن بی‌هوازی فاضلاب و همچنین پیتون و اثر (۲۵ g/L) و ۱/۶ g C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>، ۴/۴ g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>، ۳/۴ g NH<sub>4</sub>Cl، ۱/۵ g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>•3H<sub>2</sub>O، ۰/۱ g MgCl<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O، ۰/۱ g CaCl<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O و ۰/۱ g KCl (در لیتر آب مقطر) تغذیه شد. همچنین این محلول

**نمک‌زدایی:** مشخص شد که نمک‌زدایی سریع‌تر در تولید جریان بالاتر بدست می‌آید (شکل ۳). TDR متوسط O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۲/۲۱±۰/۲۱ و ۲/۵۸±۰/۳۸ mg/h بود. در ۲۴ ساعت اول، O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC بیش از ۱/۲±۰/۱۸ و ۱/۳±۰/۳۵٪ نمک را حذف کردند. O<sub>2</sub>-MDC توانست میانگین جریان ۰/۴۲±۰/۰۲ mA را تولید، و ۵۵/۵۸±۰/۰۲٪ نمک را از محلول میانی حذف کند؛ درحالی‌که در O<sub>3</sub>-MDC میانگین جریان ۱/۴۱±۰/۳۱ mA افزایش ۱۸ درصدی در عملکرد نمک‌زدایی است. در نمونه‌های مدارباز (شاهد) O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۱۹٪ و ۲۱٪ نمک را حذف کردند.

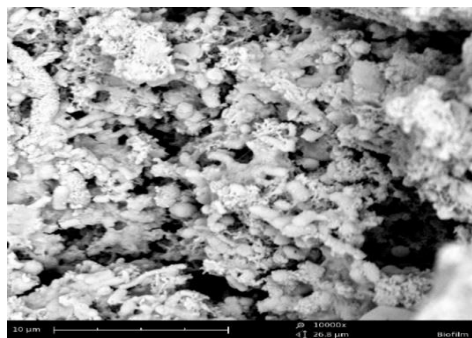


شکل ۳. TDR در O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC (برحسب mg NaCl/h)

**ریخت‌شناسی سطح آند:** بررسی تصاویر SEM سطح آند قبل و بعد از آزمایش (شکل ۴) نشان‌دهنده تغییر قابل‌توجه در ریخت‌شناسی آند است، به‌طوری‌که الکترود تازه دارای سطح صاف و بدون میکروارگانسیم است، درحالی‌که تصویر آند استفاده شده نشان‌دهنده اشغال سطح توسط میکروب‌ها است.



الف

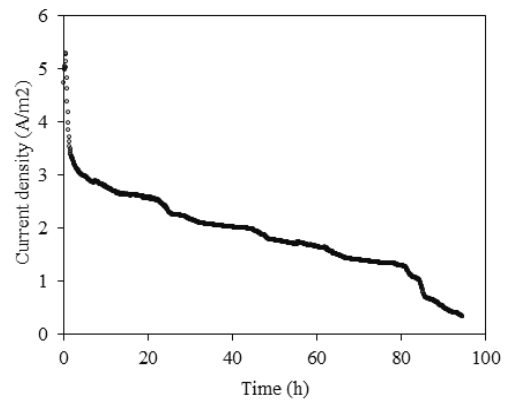


ب

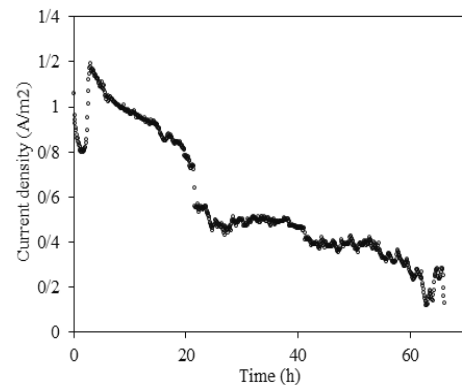
شکل ۴. تصاویر SEM الف: قبل، و ب: بعد از اتمام آزمایشات

پیش‌پردازش شده به ترتیب ۱۳۱±۴/۷ mV، ۲۷/۶±۲ mS/cm بود. این مقادیر در محلول خام برابر با ۱۱۹±۳/۹ mV و ۲۸/۱±۱/۵ mS/cm بود. از این‌رو، آزمایش‌های بعدی عمل پیش‌پردازش انجام شد.

حداکثر ولتاژ مدارباز (OCV) در O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۶۲۸±۳/۳ و ۱۳۳۱±۱۱/۶ میلی‌ولت به‌دست آمد. این مقدار در حالت مداربسته به ترتیب ۱۷۸±۱/۸ mV و ۷۹۳±۵/۷ mV بود (شکل ۲ الف و ب)). همچنین، حداکثر چگالی جریان O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC به ترتیب ۱/۱۶±۰/۵۷ A/m<sup>2</sup> و ۵/۲۷±۰/۵ A/m<sup>2</sup> بود؛ چگالی جریان در O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC در فاز تأخیری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت اما شیب کاهش در O<sub>3</sub>-MDC بیشتر بود، با این‌حال ولتاژ O<sub>3</sub>-MDC در تمام زمان‌های راهبری بیشتر از O<sub>2</sub>-MDC بود.



الف



ب

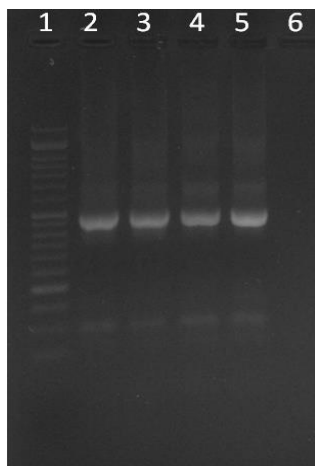
شکل ۲. پروفایل‌های الکتریکی راهبری الف: O<sub>2</sub>-MDC و ب: O<sub>3</sub>-MDC. ولتاژ مداربسته، محلول ۲۰g/L NaCl

همچنین با توجه به غیرنرمال بودن داده‌ها از آزمون ویلکاکسون جهت آنالیز داده‌ها استفاده شد و معنی داری اختلاف نتایج دو راکتور در حالت مداربسته مطابق آزمون تأیید شد ( $p < 0.001$  و  $Z = -27/84$ ). منحنی قطبیت: حداکثر چگالی توان O<sub>3</sub>-MDC برابر با ۴/۰۶±۰/۶۳ W/m<sup>2</sup> بود که حدود ۱۱ برابر مقدار آن در O<sub>2</sub>-MDC (۰/۳۶۹±۰/۰۴ W/m<sup>2</sup>) است. استفاده از O<sub>3</sub>-MDC جهت نمک‌زدایی آب‌شور باعث کاهش مقاومت درونی نسبت به O<sub>2</sub>-MDC شد بطوریکه براساس منحنی قطبیت، مقاومت‌های داخلی ۳۰۵±۴ و ۷۱±۲/۵ اهم به‌ترتیب در O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC برآورد شد. این نتایج یازده بالاتری از نسبت به اکسیژن به‌عنوان گیرنده‌های الکترون در راکتور را نشان می‌دهد. آنالیز داده‌های حاکی از اختلاف معنی داری در دو راکتور O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC بود ( $p < 0.05$ ).

جدول ۱ آمده است. بیوفیلیم آند جامعه میکروبی متنوع‌تری نسبت به آنولیت داشت. پروتئوباکتری‌ها (Proteobacteria) از جوامع میکروبی غالب در بیوفیلیم آند و آنولیت بودند. فیرمیکوت‌ها (Firmicutes) و اسیدوباکتری‌ها (Acidobacteria) نیز در نمونه‌های بیوفیلیم شناسایی شدند، درحالی‌که در آنولیت وجود نداشتند. با این حال، اسپیلون پروتئوباکتری‌ها و باکتریوئیدها (Bacteroidia) فقط در آنولیت وجود داشت.

**باکتری‌های غالب:** تعیین توالی ژن rRNA ۱۶s برای نشان دادن جوامع باکتریایی استفاده شد (۲۱ و ۲۲).

شکل ۵ محصول PCR نمونه‌های این مطالعه را نشان می‌دهد. نمونه‌های برداشت‌شده از آنولیت و آند (باند‌های ۲ تا ۵) حضور باکتری‌ها را نشان می‌دهند درحالی‌که در نمونه شاهد (باند ۶) هیچ‌گونه طیفی تشکیل نشد لذا باکتری در این باند حضور نداشته است. همچنین باکتری‌های موجود در بیوفیلیم آند و آنولیت در



شکل ۵. محصول تکثیر شده با استفاده از پرایمر عمومی

اندازه محصول: ۴۶۸ جفت باز، ترتیب نمونه‌ها به ترتیب از چپ به راست: ستون ۱: DNA ladder ۵۰bp، ستون ۲: نمونه جدا شده از الکتروده، ستون ۳: نمونه جدا شده از الکتروده، ستون ۴: نمونه آنولیت، ستون ۵: نمونه آنولیت، ستون ۶: نمونه شاهد

جدول ۱. باکتری‌های شناسایی‌شده در نمونه‌های آنولیت و آند راکتور نمک‌زدایی میکروبی

شماره در بانک ژن	مشابهت (%)	رده	کلاس	خانواده	شناسه توالی
<b>بیوفیلیم آند</b>					
HG763957.1	۸۸	اسیدوباکتری	اسیدوباکتری	اسیدوباکتریاسه	MA1
HQ877094.1	۹۱	پروتئوباکتری	گاما پروتئوباکتری	کروماتیاسه (Chromatiaceae)	MA2
KC009941.1	۸۷	پروتئوباکتری	گاما پروتئوباکتری	اکتوتیورهودوسپیراسه (Ectothiorhodospiraceae)	MA3
KP772724.1	۸۷	پروتئوباکتری	بتا پروتئوباکتری	بورخولدریاسه (Burkholderiaceae)	MA4
KU045501.1	۸۹	فیرمیکوت	کلستریدیا	کلستریدیاسه	MA5
<b>آنولیت</b>					
KF721645.1	۸۹	پروتئوباکتری	اسپیلون پروتئوباکتری	کامپیلوباکتریاسه	MS1
GU955392.1	۸۶	باکتریوئیت	باکتریوئید	پروتلاسه	MS2

## بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه اعمال امواج فراصوت بر تولید الکتروسیسته و حذف شوری اثر مثبت داشت. این یافته به این دلیل است که در آب‌های خیلی شور یون‌های کلرور و سدیم به هم نزدیک بوده، به هم می‌چسبند و تشکیل بلور می‌دهند، لذا بخشی از یون‌ها در آب غیرفعال می‌باشند (۱۳)؛ اعمال امواج فراصوت بر محلول نمکی سبب افزایش تحرک یونی و دیونیزاسیون بهتر آن‌ها می‌گردد. اثر مثبت امواج فراصوت در بسیاری از مطالعات محیطی (۲۵-۲۳) به اثبات رسیده است. ولتاژ تولیدی در O<sub>3</sub>-MDC به مراتب بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده در O<sub>2</sub>-MDC بود. ازن مولکولی بسیار واکنش‌پذیر است و پتانسیل اکسیداسیون بالاتری (۲/۰۷ V) نسبت به اکسیژن

در این صورت تقریباً تمامی الکترون‌هایی که از طریق مدار خارجی وارد اتاقک کاتد می‌شوند اکسید شده، بین آند و کاتد اختلاف پتانسیل افزایش می‌یابد که عامل کارایی بالاتر از آن است. تزریق ازن به محلول کاتولیت، مواد جانبی خطرناک تولید نمی‌کند و کارایی آن در طیف وسیعی از pH حفظ می‌شود. در یک راکتور بیوالکتروشیمیایی، ازن به مدت کوتاهی به اکسیژن تبدیل می‌شود؛ که این اکسیژن دوباره در واکنش شرکت خواهد کرد (۲۶). چگالی جریان تولیدشده در O<sub>2</sub>-MDC و O<sub>3</sub>-MDC در مرحله اولیه راهبری افزایش، سپس کاهش یافت. این روند الکتریکی در مطالعات مشابه دیگر نیز دیده می‌شود، زیرا به علت افت تدریجی

یافته‌ای قبلاً ذکر گردید. سیستم مدارباز (شاهد)  $O_2$ -MDC و  $O_3$ -MDC به ترتیب تنها ۱۹٪ و ۲۱٪ نمک را حذف کردند که نشان می‌دهد نمک‌زدایی آب عمدتاً به علت تولید جریان الکتریکی بوده و سایر عوامل مانند اسمز طبیعی، تبادل یونی نقش جزئی داشته‌اند. پروتئوباکتری‌ها از جوامع میکروبی غالب در بیوفیلم آند و آنولیت بودند. پروتئوباکتری‌ها به‌طور گسترده‌ای در مطالعات قبلی به‌عنوان الکترون‌زا گزارش شده‌اند و دلیل آن احتمالاً وجود رقابت در انتقال الکترون‌های خارج سلولی می‌باشد (۳۶ و ۳۵ و ۲۷). اسپیلون پروتئوباکتری‌ها و باکتریوئیدها فقط در نمونه‌های آنولیت وجود داشتند. باکتریوئیدها نیز باکتری‌های میله‌ای گرم منفی هستند که در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی و آب شور گزارش شده‌اند (۳۸ و ۳۷). حضور اسیدوباکتری‌ها ممکن است بدلیل pH پایین آنولیت  $O_3$ -MDC باشد، زیرا این‌ها قادرند در برابر اسیدها، آلودگی فلزی و محیط‌های سخت مقاومت کنند. حضور فیرمیکوت‌ها وجود شرایط بی‌هوازی را تأیید می‌کند زیرا این باکتری‌ها بی‌هوازی هستند (۴۰ و ۳۹).

Rabaey و همکاران نتیجه گرفتند که گاماپروتئوباکتری و فیرمیکوت‌ها ظرفیت تولید الکتریسیته دارند (۹). محدودیت‌های مطالعه حاضر شامل عدم شناسایی سهم هریک از باکتری‌ها در راکتور به دلیل کمبود امکانات، هزینه تولید ازن، عدم بررسی در طولانی‌مدت و عدم بررسی میزان ماده آلی حذف‌شده می‌باشد. لذا انجام مطالعات بیشتر پیشنهاد می‌گردد. در کل، پیش‌تصفیه محلول نمکی با امواج فراصوت و اعمال الکترون‌گیرنده ازن در اتاقک کاتد بجای اکسیژن می‌تواند عملکرد MDC را به‌عنوان یک فرآیند نمک‌زدایی آب یا یک پیش‌تصفیه برای فرآیندهای آب‌شیرین‌کن پایین‌دست بهبود بخشد، با این‌حال عملیاتی شدن فرآیند نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد.

### تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی یزد به جهت حمایت‌های مالی و معنوی از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

هدایت الکتریکی محلول نمکی و مصرف سوبسترا مقاومت داخلی افزایش می‌یابد (۲۸ و ۲۷). بعلاوه، افزایش تدریجی غلظت نمک در آنولیت می‌تواند فعالیت میکروبی را مهار کند (۲۹ و ۱۳).

مقاومت‌های داخلی (شیب منحنی قطبیت)  $O_2$ -MDC و  $O_3$ -MDC به ترتیب ۳۰۵ و ۷۱ اهم به‌دست آمد. در عمل، مقاومت داخلی سیستم بیوالکتروشیمیایی به‌شدت بر جریان خروجی الکتریکی تأثیر می‌گذارد و به عواملی مانند مواد آند و کاتد، اندازه راکتور، خواص شیمیایی محلول، دما، هدایت الکتریکی محلول، تحرک یون و سطح الکتروود و نوع الکترون‌گیرنده بستگی دارد (۳۰ و ۲۹). Liang و همکاران از نانولوله کربن، گرافیت انعطاف‌پذیر و کربن فعال به‌عنوان ماده‌ی آندی MFC استفاده کردند و مقاومت‌های داخلی ۲۶۳، ۳۰۱ و ۳۸۱ اهم به دست آوردند (۳۱). Kim و همکاران دریافته‌اند که نوع غشا می‌تواند بر حداکثر چگالی توان تأثیر بگذارد و مقاومت داخلی در MFC های مکعب هوا (۹۱-۸۴ اهم) کمتر از MFC های بطری آبی (۱۲۷۲-۱۲۳۰ اهم) است (۳۲).

استفاده از اتاق‌های نمک‌زدایی باریک‌تر می‌تواند باعث کاهش مقاومت داخلی و بهبود حذف یون شود (۳۳). مشخص شد که بازده نمک‌زدایی، تابعی از تولید جریان است و نمک‌زدایی سریع‌تر در جریان بالاتر به دست می‌آید. با این‌حال، با افزایش زمان به دلیل کاهش یون‌های فعال در اتاق میانی TDR کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش تدریجی هدایت الکتریکی در محلول آنولیت برای میکروارگانیزم‌ها مضر است و فعالیت‌های میکروبی را مختل می‌کند (۳۴). عملکرد  $O_2$ -MDC در تولید بیوالکتریسیته مشابه سایر سیستم‌های قبلی MDC با الکترون‌گیرنده‌های هوا یا فری سیانید است؛ در مطالعه‌ی Luo و همکاران که از فری سیانید استفاده شد، MDC حدود ۶۶٪ از نمک را در ۴۰۰ ساعت راهبری حذف کرد و در طولانی‌مدت، چگالی جریان و میزان نمک‌زدایی به ترتیب ۴۷٪ و ۲۷٪ بود (۳۴). در مطالعه Seveda و همکاران که بافر فسفات به‌عنوان کاتولیت و آب دریا واقعی به‌عنوان محلول میانی بود، حداکثر نمک‌زدایی ۱۹/۹٪ حاصل شد که از پژوهش حاضر کمتر است (۲۹). هنگامی که ازن در MDC استفاده شد، میانگین نمک‌زدایی بهبود قابل‌توجهی یافت (از ۵۵/۸٪ به حدود ۷۴٪) که دلیل چنین

## Investigation of Modified Microbial Desalination Cell performance in Sweetening of saltwater

A. Gholizadeh (PhD)\*<sup>1</sup>, A.A. Neshat (PhD)<sup>1</sup>, F. Pakravan (BSc)<sup>2</sup>, M. Miri (PhD)<sup>3</sup>,  
M. Taghavi (PhD)<sup>4</sup>, A. Nikoonahad (PhD)<sup>5</sup>

1.Esfarayan Faculty of Medical Sciences, Esfarayen, I.R.Iran

2.Tehran University of Medical Sciences, Tehran, I.R.Iran

3.Department of Environmental Health Engineering, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, I.R.Iran

4.Department of Environmental Health Engineering, Gonabad University of Medical Sciences, Gonabad, I.R.Iran

5.Department of Environmental Health Engineering, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, I.R.Iran

---

J Babol Univ Med Sci; 20(11); Nov 2018; PP: 49-57

Received: Apr 16<sup>th</sup> 2018, Revised: Aug 7<sup>th</sup> 2018, Accepted: Sep 4<sup>th</sup> 2018.

### ABSTRACT

**BACKGROUND AND OBJECTIVE:** Lack of enough fresh water is a global challenge. Water sweetening can be done using thermal or membrane systems that each of them requires significant energy. Microbial desalination cell (MDC) is a new technology which can desalinate water, generate electricity, and simultaneously purify wastewaters in a reactor. However, low current generation and deionization are from main challenges of this process. This study aimed to improve the MDCs efficacy.

**METHODS:** In this experimental study, a modified three-cell MDC consisted of anode, cathode, and middle chambers, was designed in order to water desalination (20 g/L NaCl). Here, the cathode solution was diffused via ozone (O<sub>3</sub>-MDC) and the middle saline solution was pretreated into an ultrasonic bath. Subsequently, the results achieved in O<sub>3</sub>-MDC in terms of water desalination and current generation were compared against those of another reactor operated under oxygen diffusion (O<sub>2</sub>-MDC), and without ultrasonic pretreatment (control). Biofilm formation on anode surface and dominant bacteria in the O<sub>3</sub>-MDC reactor were studied using Scanning Electron Microscopy (SEM), and 16S rRNA gene sequencing, respectively.

**FINDINGS:** Saltwater pre-treatment caused to increase the electrical conductivity from 28.1 ms/cm to 35.5 ms/cm; and then current generation from 191 to 131 mV after 24 hr operation. O<sub>2</sub>-MDC and O<sub>3</sub>-MDC were able to remove 74% and 55.58% of NaCl from water, respectively. Proteobacteria, firmicutes and acidobacteria were dominant microbial communities in the anode biofilm based on 16S rRNA sequencing.

**CONCLUSION:** Based on the results of this study, modified MDC with ozone and ultrasound waves could be an appropriate option for desalinating salt water.

**KEY WORDS:** *Microbial Desalination Cell, Microbial Fuel Cell, Bioelectric Energy Sources, Saltwater.*

---

Please cite this article as follows:

Gholizadeh A, Neshat AA, Pakravan F, Miri M, Taghavi M, Nikoonahad A. Investigation of Modified Microbial Desalination Cell performance in Sweetening of Saltwater. J Babol Univ Med Sci. 2018;20(11):49-57.

---

\* Corresponding Author: A. Gholizadeh (PhD)

Address: Deputy of Education, Faculty of Medical Sciences, Esfarayen, I.R.Iran

Tel: +98 58 31550622

E-mail: gholizadeh\_eng@yahoo.com

## References

1. Carmalin Sophia A, Bhalambaal VM, Lima EC, Thirunavoukkarasu M. Microbial desalination cell technology: Contribution to sustainable waste water treatment process, current status and future applications. *J Environ Chem Eng.* 2016;4(3):3468-78.
2. Gholizadeh A, Mokhtari M, Naimi N, Shiravand B, Ehrampoush MH, Miri M, et al. Assessment of corrosion and scaling potential in groundwater resources; a case study of Yazd-Ardakan Plain, Iran. *Groundwat Sustain Dev.* 2017;5:59-65.
3. Malakotian M, Asadipour A, Jamshidi Moghaddam Y. Effect of Iron Oxide Nanoparticles for the Removal of Coliform Bacteria from Contaminated Water. *J Babol Uni Med Sci.* 2017;19(4):60-6. [In Persian]
4. An Z, Zhang H, Wen Q, Chen Z, Du M. Desalination combined with copper (II) removal in a novel microbial desalination cell. *Desalination.* 2014;346:115-21.
5. Subramani A, Jacangelo JG. Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. *Water Res.* 2015;75:164-87.
6. Burn S, Hoang M, Zarzo D, Olewniak F, Campos E, Bolto B, et al. Desalination techniques - A review of the opportunities for desalination in agriculture. *Desalination.* 2015;364:2-16.
7. Fallahzadeh RA, Miri M, Taghavi M, Gholizadeh A, Anbarani R, Hosseini-Bandegharai A, et al. Spatial variation and probabilistic risk assessment of exposure to fluoride in drinking water. *Food Chem Toxicol.* 2018;113:314-21.
8. Mathuriya AS. Novel microbial fuel cell design to operate with different wastewaters simultaneously. *J Environ Sci.* 2016;42:105-11.
9. Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.* 2005;23(6):291-8.
10. Gholizadeh A, Salmani MH, Ebrahimi AA, Hosseini SS, Ehrampoush MH, Miri M, et al. Improved power density and Cr/Pb removal using ozone in a microbial desalination cell. *Environ Chem Lett.* 2018; 16(4):1477-85.
11. Tao HC, Lei T, Shi G, Sun XN, Wei XY, Zhang LJ, et al. Removal of heavy metals from fly ash leachate using combined bioelectrochemical systems and electrolysis. *J Hazard Mater.* 2014;264:1-7.
12. Brastad KS, He Z. Water softening using microbial desalination cell technology. *Desalination.* 2013;309:32-7.
13. Gholizadeh A, Ebrahimi AA, Salmani MH, Ehrampoush MH. Ozone-cathode microbial desalination cell; An innovative option to bioelectricity generation and water desalination. *Chemosphere.* 2017;188:470-7.
14. Al-Mamun A, Ahmad W, Baawain MS, Khadem M, Dhar BR. A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications. *J Clean Prod.* 2018;183:458-80.
15. Kokabian B, Gude VG. Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells. *Chem Eng J* 2015;262:958-65.
16. Kalleary S, Mohammed Abbas F, Ganesan A, Meenatchisundaram S, Srinivasan B, Packirisamy ASB, et al. Biodegradation and bioelectricity generation by Microbial Desalination Cell. *Int Biodeterior Biodegradation.* 2014;92:20-5.
17. Cao X, Huang X, Liang P, Xiao K, Zhou Y, Zhang X, et al. A new method for water desalination using microbial desalination cells. *Environ sci technol.* 2009;43(18):7148-52.

18. Ping Q, Abu-Reesh IM, He Z. Boron removal from saline water by a microbial desalination cell integrated with donnan dialysis. *Desalination*. 2015;376:55-61.
19. Jyoti KK, Pandit AB. Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochem Eng J*. 2004;18(1):9-19.
20. [No Author]. Standard methods for the examination of water and wastewater. USA: Am Pub Health Associat; 2005.
21. Liu G, Zhou Y, Luo H, Cheng X, Zhang R, Teng W. A comparative evaluation of different types of microbial electrolysis desalination cells for malic acid production. *Bioresour Technol*. 2015;198:87-93.
22. Zhi W, Ge Z, He Z, Zhang H. Methods for understanding microbial community structures and functions in microbial fuel cells: a review. *Bioresour Technol*. 2014;171:461-8.
23. Omastová M, Mičušík M, Fedorko P, Pionteck J, Kovářová J, Chehimi MM. The synergy of ultrasonic treatment and organic modifiers for tuning the surface chemistry and conductivity of multiwalled carbon nanotubes. *Surf Interface Anal*. 2014;46(10-11):940-4.
24. Matouq MA-D, Al-Anber ZA. The application of high frequency ultrasound waves to remove ammonia from simulated industrial wastewater. *Ultrason Sonochem*. 2007;14(3):393-7.
25. Mohammadi AR, Mehrdadi N, Bidhendi GN, Torabian A. Excess sludge reduction using ultrasonic waves in biological wastewater treatment. *Desalination*. 2011;275(1-3):67-73.
26. Rodríguez A, Rosal R, Perdigón-Melón J, Mezcua M, Agüera A, Hernando M, et al. Ozone-based technologies in water and wastewater treatment. In: *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin: Springer, Heidelberg; 2008. p. 127-75.
27. Luo H, Xu P, Roane TM, Jenkins PE, Ren Z. Microbial desalination cells for improved performance in wastewater treatment, electricity production, and desalination. *Bioresour Technol*. 2012;105:60-6.
28. Sevda S, Yuan H, He Z, Abu-Reesh IM. Microbial desalination cells as a versatile technology: functions, optimization and prospective. *Desalination*. 2015;371:9-17.
29. Sevda S, Abu-Reesh IM, Yuan H, He Z. Bioelectricity generation from treatment of petroleum refinery wastewater with simultaneous seawater desalination in microbial desalination cells. *Energy Convers Manage*. 2017;141:101-7.
30. Heijne AT, Liu F, Weijden Rvd, Weijma J, Buisman CJ, Hamelers HV. Copper recovery combined with electricity production in a microbial fuel cell. *Environ Sci Technol*. 2010;44(11):4376-81.
31. Liang P, Fan MZ, Cao XX, Huang X, Peng YM, Wang S, et al. Electricity generation by the microbial fuel cells using carbon nanotube as the anode. *Huan Jing Ke Xue*. 2008;29(8):2356-60.
32. Kim JR, Cheng S, Oh SE, Logan BE. Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. *Environ Sci Technol*. 2007;41(3):1004-9.
33. Kim Y, Logan BE. Microbial desalination cells for energy production and desalination. *Desalination*. 2013;308:122-30.
34. Luo H, Xu P, Ren Z. Long-term performance and characterization of microbial desalination cells in treating domestic wastewater. *Bioresour Technol*. 2012;120:187-93.
35. Zhang Y, Angelidaki I. A new method for in situ nitrate removal from groundwater using submerged microbial desalination–denitrification cell (SMDDC). *Water Res*. 2013;47(5):1827-36.
36. Zhang H, Wen Q, An Z, Chen Z, Nan J. Analysis of long-term performance and microbial community structure in bio-cathode microbial desalination cells. *Environ Sci Pollut Res*. 2016;23(6):5931-40.



37. Gao C, Wang A, Wu WM, Yin Y, Zhao YG. Enrichment of anodic biofilm inoculated with anaerobic or aerobic sludge in single chambered air-cathode microbial fuel cells. *Bioresour Technol.* 2014;167:124-32.
38. Lu L, Xing D, Ren N. Pyrosequencing reveals highly diverse microbial communities in microbial electrolysis cells involved in enhanced H<sub>2</sub> production from waste activated sludge. *Water Res.* 2012;46(7):2425-34.
39. Ludwig W, Schleifer KH, Whitman WB. Revised road map to the phylum Firmicutes. *Bergey's Manual® of Systematic Bacteriology.* New York:Springer; 2009. p. 1-13.
40. Karluvalı A, Köroğlu EO, Manav N, Çetinkaya AY, Özkaya B. Electricity generation from organic fraction of municipal solid wastes in tubular microbial fuel cell. *Sep Purif Technol.* 2015;156(Part 2):502-11.