

Research Paper

مقاله پژوهشی

Performance Evaluation of a Microbial Desalination Cell Using Bio-Cathode for the Treatment of Saline Water

ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور

Raof Rabiee¹ and Seyed Morteza Zamir^{2*}

رئوف ربیعه^۱ و سیدمرتضی ضمیر^{۲*}

1- M.Sc., Biochemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

2- Associate Professor, Biochemical Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*Corresponding Author, Email: zamir@modares.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: zamir@modares.ac.ir

Received: 25/07/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴

Revised: 10/11/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

Accepted: 30/11/2024

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Microbial Desalination Cells (MDCs) represent a novel and sustainable technology that uses the metabolic activities of microorganisms for electricity generation, wastewater treatment, and seawater desalination. This technology provides a promising solution to the growing global water scarcity issue through an environmentally friendly process. In this study, the performance of a MDC with two types of bio-cathodes, activated sludge and microalgal *Chlorella vulgaris*, was evaluated for the desalination of saline water. The highest desalination efficiency in the MDC with an aerobic sludge cathode was 75%, with a maximum salt removal rate of 0.72 g.L⁻¹.h⁻¹. In contrast, the MDC with an algal cathode achieved a desalination efficiency of 61%, with a maximum salt removal rate of 0.41 g.L⁻¹.h⁻¹. Furthermore, the maximum power densities of 456 and 841 mW.m⁻² were obtained for the MDC with *Chlorella vulgaris* and activated sludge, respectively. The presence of a diverse and metabolically active microbial community within the activated sludge could significantly enhance the electron uptake capacity in the cathode chamber due to the higher ability to regenerate the final electron acceptor reaction.

پیل‌های نمک‌زدایی میکروبی یک فناوری جدید و پایدار هستند که از فعالیتهای متابولیکی ریزاندامگان‌ها برای تولید الکتریسیته، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا استفاده می‌کنند. این فناوری راه‌حلی امیدوارکننده برای رسیدگی به مسئله رو به رشد کمبود آب جهانی از طریق فرآیندی سازگار با محیط‌زیست ارائه می‌دهد. در این مطالعه، عملکرد یک پیل نمک‌زدایی میکروبی با دو کاتد زیستی، شامل لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس که برای نمک‌زدایی آب شور مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین بازده نمک‌زدایی در پیل با کاتد لجن هوازی به میزان ۷۵٪ و با حداکثر نرخ حذف نمک ۰/۷۲ گرم در لیتر در ساعت به‌دست آمد. در حالی که در پیل با کاتد جلبکی، بازده نمک‌زدایی ۶۱٪ و حداکثر نرخ حذف نمک ۰/۴۱ گرم در لیتر در ساعت ثبت شد. علاوه بر این، حداکثر چگالی توان برای پیل با ریزجلبک کلرلا ولگاریس و لجن هوازی به ترتیب برابر با ۴۵۶ و ۸۴۱ میلی وات بر مترمربع بود. حضور جامعه میکروبی متنوع و فعال متابولیکی در لجن هوازی که قابلیت احیای واکنش نهایی دریافت الکترون را دارند در اتاقک کاتد و روی سطح الکتروود آن می‌توانند ظرفیت دریافت الکترون را در اتاقک کاتد به‌طور قابل توجهی افزایش دهند.

Keywords: Current density, Microbial desalination cell, Bio-cathode, *Chlorella vulgaris*, Desalination

کلمات کلیدی: چگالی جریان، پیل نمک‌زدای میکروبی، کاتد زیستی، کلرلا ولگاریس، نمک‌زدایی.

آند و کاتد مهاجرت می‌کنند تا تعادل بار الکتریکی خالص پیل نمک‌زدای میکروبی را حفظ کنند. این سازوکار، پیل نمک‌زدای میکروبی را قادر می‌سازد تا هم‌زمان با تولید جریان الکتریکی، آب شور را بدون هیچ منبع انرژی خارجی نمک‌زدایی کند (Al-Mamun et al., 2018).

پذیرنده نهایی الکترون در اتاقک کاتدی در پیل‌های نمک‌زدایی میکروبی، نقش کلیدی در عملکرد و کارایی پیل دارد. غلظت و نوع پذیرنده الکترون، عملکرد کاتالیزوری، ساختار الکتروود و توانایی کاتالیزوری آن، عملکرد کاتد را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. معمولاً کاتدهایی که در پیل نمک‌زدای میکروبی استفاده می‌شوند، موادی مانند فری‌سیانید یا کاتد هوا با کاتالیزورهای پلاتین و غیره هستند (Saeed et al., 2015). با این‌حال، مشکل این کاتدها، استفاده از مواد شیمیایی به‌عنوان کاتولیت و یا کاتالیزور است که برای حفظ یک شرایط عملیاتی پایدار، نیازمند جایگزینی مستمر است. هم‌چنین پلاتین برای کاربرد در مقیاس وسیع بسیار گران است. برای حل این مسائل، می‌توان از یک کاتد زیستی استفاده کرد. الکتروود موجود در محفظه کاتدی، از جامعه میکروبی موجود در سطح آن یا در کاتولیت استفاده می‌کند تا واکنش‌های احیای کاتد را کاتالیز کند (Sadeq et al., 2023). در این مورد، ریزاندامگان‌ها به‌عنوان کاتالیزورهای زیستی، در نقش واسطه برای احیای اکسندرها عمل می‌کنند. استفاده از کاتد زیستی به‌عنوان کاتالیزور در پیل نمک‌زدای میکروبی به‌علت خود بازسازی و پایداری به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌است (Sadeq et al., 2023). به‌طور مثال، Ebrahimi et al. (2018) با جایگزینی کاتولیت‌های سمی با فاضلاب هوازی به‌عنوان کاتد زیستی، چگالی توان $32/6$ وات بر مترمکعب و درصد نمک‌زدایی $78/1$ ٪ را به‌دست آوردند که به‌میزان قابل‌توجهی نسبت به کاتدهای بافری بیشتر بود. هم‌چنین Zamanpour et al. (2017) عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی جلبکی که آند آن با پساب صنایع لبنیات خوراکی شده است را بررسی کردند. در محفظه کاتد، از ریزجلبک کلرلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*) با یک محیط کشت مصنوعی استفاده شد. در این مطالعه سرعت حذف نمک $0/341$ گرم بر لیتر بر روز بود که $1/5$ برابر بیشتر از پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد هوا بود.

ریزجلبک کلرلا ولگاریس و لجن هوازی هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارند که در پیل‌های نمک‌زدای میکروبی نقش مهمی ایفا می‌کنند. کلرلا ولگاریس، یک جلبک سبز تک‌سلولی است که قادر به فتوسنتز است و در کاتد پیل‌های میکروبی

تقاضای جهانی برای دسترسی به آب شیرین هر روز در حال افزایش است. در نقاطی که عرضه از تقاضا پیشی بگیرد، نابرابری‌های اجتماعی و اقتصادی موجود را تشدید می‌کند (Eke et al., 2020). ایران نیز به‌عنوان کشوری که با خشکسالی‌های پیایی و طولانی دست به‌گریبان است، از این قاعده مستثنا نیست. به‌نظر می‌رسد نمک‌زدایی از آب دریا برای تامین بخشی از نیاز به آب شیرین ضروری است و به‌صورت پایدار می‌تواند کمبود آب را در مناطق خشک جبران کند. به‌همین دلیل فناوری‌های نمک‌زدایی از آب دریا بسیار رواج یافته‌است (Eke et al., 2020; Ahmed et al., 2021). فناوری‌های رایج نمک‌زدایی آب، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کنند که نگران‌کننده است، زیرا این انرژی از مصرف سوخت‌های فسیلی حاصل شده‌است که خود پیامدهای محیط‌زیستی خاصی را به‌همراه دارد (Ahmed et al., 2021). نمک‌زدایی آب دریا به‌کمک انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها به‌عنوان یک منبع قابل اعتماد برای تولید آب در مناطقی با منابع آب شیرین محدود قابل استفاده هستند، بلکه ردپای کربن فرآیند نمک‌زدایی را کاهش می‌دهد و آن را دوست‌دار محیط‌زیست می‌کند (Ahmed et al., 2021).

در سال‌های اخیر سامانه‌های الکتروشیمیایی زیستی^۱ به‌عنوان یک فناوری مبتنی بر تصفیه فاضلاب، برای تولید پساب تصفیه شده و انرژی سبز بسیار مورد توجه بوده‌اند. پیل نمک‌زدای میکروبی (MDC)^۲، یک نوع سامانه الکتروشیمیایی زیستی است که در آن از مواد آلی به‌عنوان منبع انرژی برای نمک‌زدایی آب استفاده می‌شود. این نوع سامانه نمک‌زدایی، با استفاده از گرادیان پتانسیل الکتریکی که توسط باکتری‌های فعال الکتریکی^۳ ایجاد می‌شود، باعث انتقال یون‌های موجود در آب از طریق غشاهای تبادل یونی و در نتیجه نمک‌زدایی از آن می‌شود (Al-Mamun et al., 2018). پیل‌های نمک‌زدای میکروبی به‌طور کلی از سه اتاقک آندی، نمک‌زدای میانی و کاتدی تشکیل شده‌است. این سه اتاقک با یک غشای تبادل آنیونی^۴ و یک غشای تبادل کاتیونی^۵ از هم جدا می‌شوند. در اتاقک آند، باکتری‌های فعال الکتریکی با تخریب زیستی ترکیبات آلی، الکترون و پروتون تولید می‌کنند. الکترون‌ها به‌وسیله یک مدار خارجی به الکتروود کاتد منتقل می‌شوند و سپس برای احیای گیرنده‌های الکترونی در اتاقک کاتد استفاده می‌شوند. هم‌زمان با انتقال الکترون، یون‌های آنیون و کاتیون در اتاقک نمک‌زدایی با عبور از سطح مقطع غشاهای تبادل آنیونی و کاتیونی، به‌ترتیب به داخل محفظه‌های

آنیونی (Mega, Czech Republic) و اتاقل‌های نمک‌زدا و کاتد توسط غشای تبادل کاتیونی (Mega, Czech Republic) از هم جدا شدند. برای آب‌بندی کلیه اتاقل‌ها از واشرهای پلی‌وینیل کلراید استفاده شد. در پیل‌های ساخته‌شده در این پژوهش در هر دو اتاقل آند و کاتد از نمک کربنی به‌عنوان الکترولیت با سطح مقطع ۱۶ سانتی‌متر مربع عاری از کاتالیست (AvCarb® G475A, USA) به‌دلیل داشتن تخلخل بالا برای تشکیل مناسب و موثر بیوفیلم بر روی سطح آن و انتقال خوب الکترون استفاده شد. دو الکترولیت توسط سیم تیتانیومی برای جمع‌آوری جریان متصل شدند.

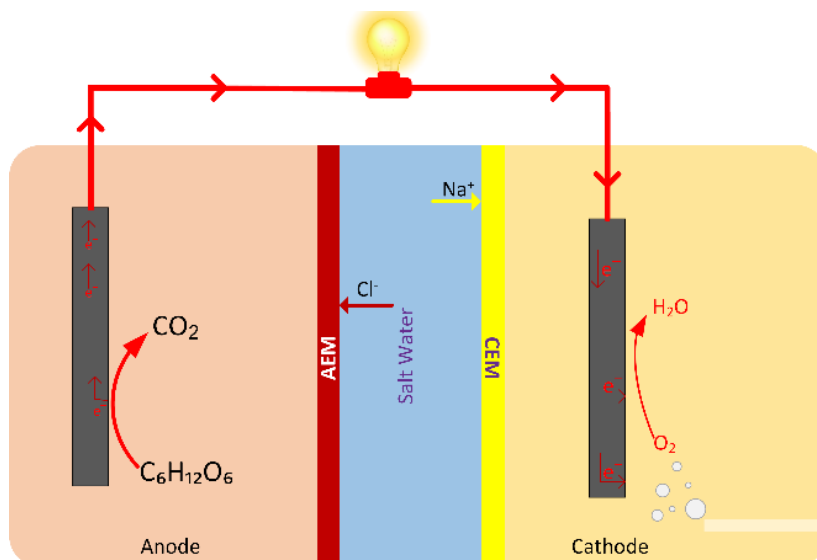
در اتاقل آندی از مخلوط حاصل از نمونه لجن هاضم بی‌هوازی و لجن برگشتی از ته‌نشینی ثانویه واحد شماره ۶ تصفیه‌خانه فاضلاب تهران با درصد جامدات خشک برابر با ۹ درصد به‌عنوان مایه تلقیح استفاده شد. محیط کشت در اتاقل آند نیز حاوی ترکیبات زیر بود (در یک لیتر): KH_2PO_4 ۴/۴ گرم، K_2HPO_4 ۴/۳ گرم، NH_4Cl ۱/۵ گرم، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ۰/۰۵ گرم، CaCl_2 ۰/۱ گرم، KCl ۰/۱ گرم، ۱ میلی‌لیتر ویتامین و یک میلی‌لیتر محلول عناصر کم‌مقدار (Rabiee et al., 2022).

در این تحقیق از الکترولیت‌های متفاوت برای استفاده در اتاقل کاتد استفاده شد. در پیل MDC#1، کاتد جلبکی شامل ریزجلبک کلرلا ولگاریس با غلظت تلقیحی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که در محیط کشت سترون شده با ترکیب غلظتی تعیین‌شده توسط کوکبیان و همکاران (Kokabian et al., 2015) قرار داشت. اتاقل کاتدی MDC#2 حاوی لجن هوازی با محیط کشت مشابه اتاقل آندی بود. در اتاقل نمک‌زدایی از آب شور با میزان ۳۵ گرم بر لیتر NaCl در کلیه آزمایش‌ها استفاده شد.

می‌تواند اکسیژن تولید کند. این اکسیژن به فرآیندهای الکتروشیمیایی در کاتد کمک کرده و باعث بهبود تولید ولتاژ و افزایش کارایی در حذف نمک از فاضلاب می‌شود. همچنین، کلرلا ولگاریس توانایی جذب دی‌اکسید کربن و تبدیل آن به ترکیبات مفید را دارد که این ویژگی آن را برای استفاده در فرآیندهای تصفیه و تولید انرژی بسیار مناسب می‌سازد (Kokabian et al., 2015). از سوی دیگر، لجن هوازی که شامل باکتری‌ها و ریزاندامگان‌های متنوع است که می‌توانند مسیرهای متابولیکی مختلفی را در پیش گیرند تا واکنش نهایی احیای اکسیژن را پیش ببرند (Ebrahimi et al., 2018). استفاده از لجن هوازی در این پیل‌ها همچنین به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود تجزیه مواد آلی کمک می‌کند. در مجموع، استفاده از این دو عامل (ریزجلبک‌ها و لجن هوازی) باعث افزایش بازده سیستم نمک‌زدایی می‌شود و از آن برای تصفیه فاضلاب و تولید برق به‌طور همزمان استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر کاتدهای زیستی مختلف با استفاده از لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس به‌عنوان کاتد زیستی بر عملکرد یک MDC در تصفیه آب شور است.

۲- مواد و روش‌ها

پیل نمک‌زدای میکروبی ساخته شده در این پژوهش دارای سه اتاقل آند، کاتد و نمک‌زدا از جنس پلکسی گلس بود (شکل ۱). سطح مقطع هر سه اتاقل یکسان و برابر با 8×8 سانتی‌متر مربع با ضخامت ۳، ۳ و ۱ سانتی‌متر به‌ترتیب برای اتاقل‌های آند، کاتد و نمک‌زدا بود. اتاقل‌های آند و نمک‌زدا توسط غشای تبادل



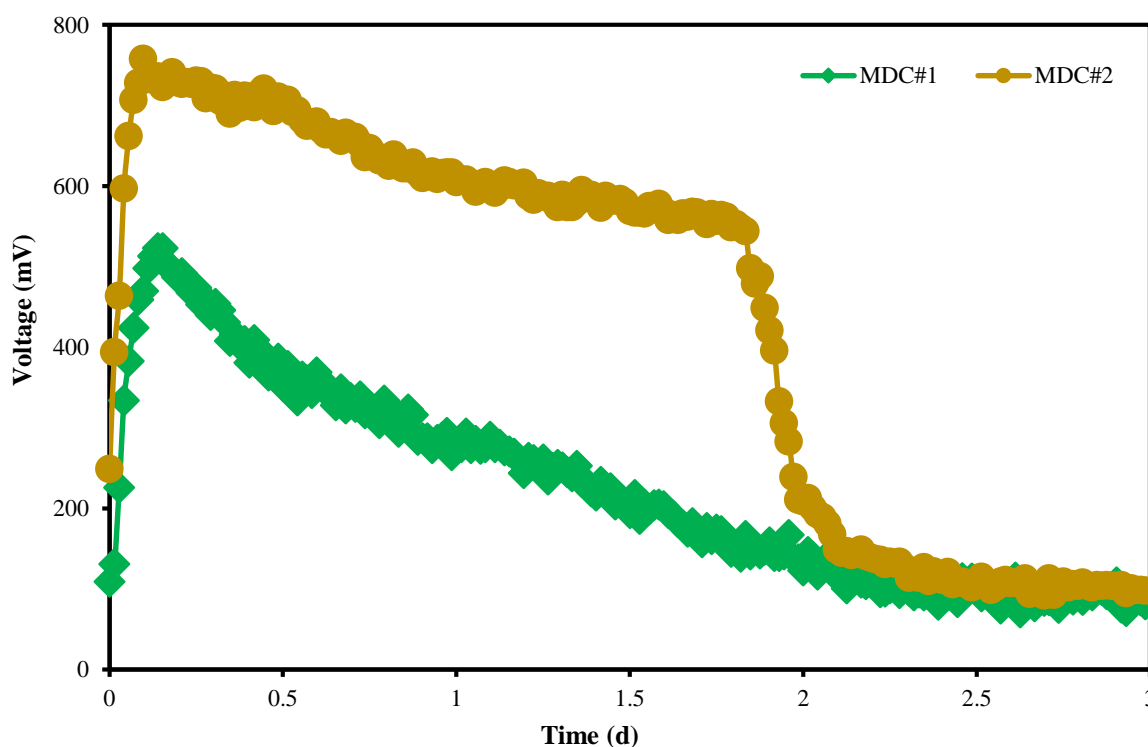
شکل ۱- شماتیکی از سامانه پیل نمک‌زدای میکروبی مورد استفاده در این پژوهش

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میزان تولید الکتربسیسته در کاتدهای مختلف

برای سنجش جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی تولیدی در هر چرخه، عملکرد پیل‌ها با مقاومت ثابت ۵۰۰ اهم در حالت مدار بسته (CCV) هر ۲۰ دقیقه یکبار ارزیابی شد. هر دو پیل در شرایط مدار باز به مدت ۱۲ روز بدون تولید جریان برای سنجش ولتاژ مدار باز (OCV) استفاده شدند. مطابق شکل ۱ در یک چرخه ۷۲ ساعته (۳ روزه) حداکثر OCV برای کاتد جلبیکی (MDC#1) و کاتد زیستی (MDC#2) به ترتیب برابر با ۷۴۹ و ۸۷۶ میلی‌ولت بود و حداکثر CCV به ترتیب ۵۲۳ و ۷۵۸ میلی‌ولت به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است و با توجه به تغییرات ولتاژ خروجی پیل، به دلیل تعویض الکترولیت‌ها ولتاژ به‌طور قابل توجهی به بیشترین سطح خود در ابتدای چرخه افزایش می‌یافت. سپس در پایان هر چرخه، به دلیل کاهش غلظت نمک در اتاقک میانی، ولتاژ به‌طور قابل توجهی به پایین‌ترین سطح خود یعنی ۹۳ و ۹۶ میلی‌ولت به ترتیب برای MDC#1 و MDC#2 می‌رسید. (Kokabian et al., 2015) نتایج مشابهی از عملکرد کاتد زیستی گزارش کرده‌اند، به طوری که حداکثر میزان ولتاژ تولیدی در حالت مدار بسته توسط پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد میکروجلبیک کلرلا و لگاریس برابر با ۱۳۸ میلی‌ولت بود که به‌طور قابل توجهی از نتایج این مطالعه کمتر است.

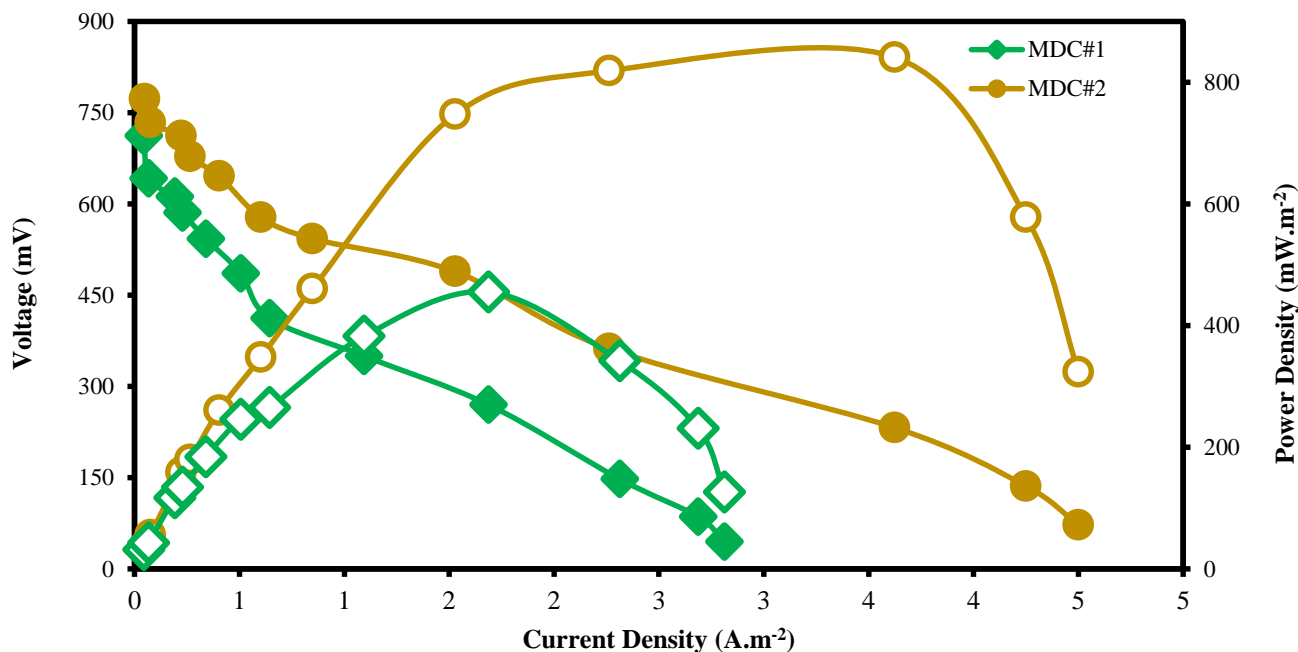
تغییرات هدایت الکتریکی^۶ (EC) محلول آب شور به‌عنوان معیاری از تغییر غلظت نمک هر ۲۴ ساعت در اتاقک میانی نمک‌زدا به‌وسیله دستگاه EC سنچ (Testo 252, Germany) اندازه‌گیری شد (Rabiee et al., 2022). تغییرات غلظت مواد آلی برحسب میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی^۷ (COD) از طریق اندازه‌گیری غلظت گلوکز در اتاقک آند با استفاده از کیت رنگ‌سنجی گلوکز اکسیداز (پارس آزمون، ایران) صورت‌گرفت (Rabiee et al., 2022). تغییرات pH هر ۲۴ ساعت در اتاقک‌های کاتد و آند به وسیله دستگاه pH سنچ (pH220L, istek, South Korea) اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌ها در دمای 27 ± 2 درجه سلسیوس انجام شدند. بدین‌منظور، همه پیل‌ها داخل یک انکوباتور ساخته‌شده در آزمایشگاه قرار داده شده بودند. همه پیل‌ها ابتدا در حالت ناپیوسته خوراک‌دهی شده چرخه‌ای، به مدت ۳۰ روز برای دستیابی به ولتاژ پایدار راه‌اندازی شد. الکترولیت‌ها در هر پیل به‌طور کامل هر ۷۲ ساعت به‌دلیل تجمع ترکیبات حدواسط تولیدشده و نوسان قابل توجه pH در کاتد و آند تعویض می‌شدند. ولتاژ در یک مقاومت خارجی ثابت (R_e) هر ۲۰ دقیقه توسط یک دیتالاگر ثبت می‌شد. چگالی جریان و توان نرمال شده به‌ازای سطح الکترود آند ($A.m^{-2}$) با استفاده از قانون اهم $I = V/R_e$ و $P = V \times I$ محاسبه شدند. برای هر پیل و پس از رسیدن به یک ولتاژ پایدار، منحنی‌های قطبش^۸ با تغییر مقاومت خارجی از ۵۰۰۰ به ۵ اهم به‌دست آمدند.



شکل ۲- نمودار ولتاژ خروجی پیل در طول زمان برای کاتد جلبیکی و فاضلاب

MDC#1 و MDC#2 به ترتیب ۴۵۶ و ۸۴۱ میلی‌وات بر مترمربع بود. حضور جامعه میکروبی متنوع و فعال متابولیکی که قابلیت احیای واکنش نهایی دریافت الکترون را دارند در اتاقک کاتد و روی سطح الکتروود آن می‌توانند ظرفیت دریافت الکترون را در اتاقک کاتد به‌طور قابل توجهی افزایش دهند، که این میزان توان و ولتاژ بالاتر به‌دست آمده در MDC#2 را توجیه می‌کند (Kokabian et al., 2015).

کاهش تدریجی جریان تولیدی به مرور زمان، عمدتاً به دلیل کاهش تدریجی غلظت نمک در اتاقک میانی و به‌تبع آن افزایش مقاومت درونی مربوط می‌شود. علاوه بر آن، نوسان pH در اتاقک‌های کاتد و آنود و کاهش منبع کربن در اتاقک‌ها باعث کاهش فعالیت باکتری‌ها شده که منجر به کاهش تولید جریان می‌شود (Ebrahimi et al., 2018). منحنی‌های قطبش و چگالی توان در شکل ۳ نشان‌دهنده حد اکثر چگالی توان برای

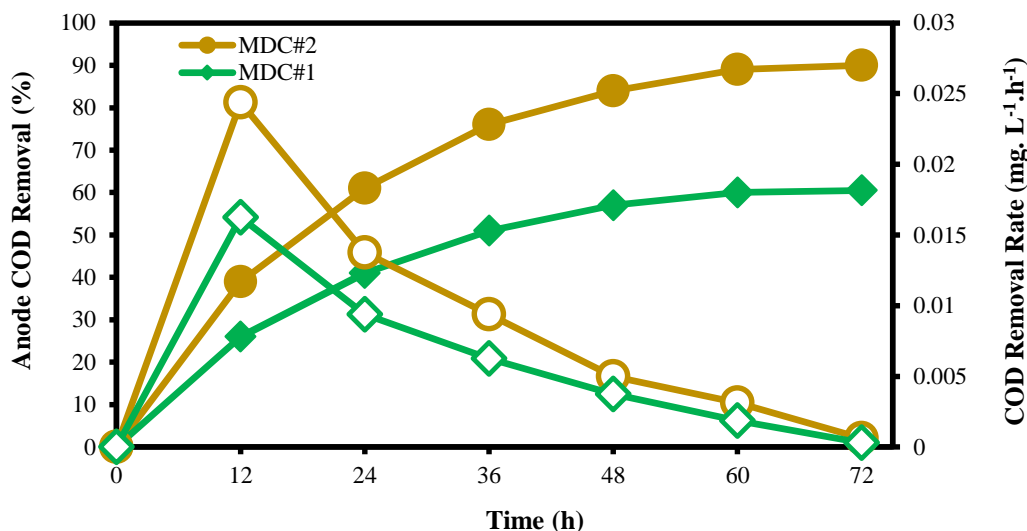


شکل ۳- نمودار چگالی توان (توخالی) و قطبش (توپر) برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد جلبکی و فاضلاب

ریزاندامگان‌ها و در نتیجه منجر به افزایش تجزیه زیستی بار آلی در محفظه آنود می‌شود (Ebrahimi et al., 2018). میزان نرخ حذف بار آلی در ساعت‌های اولیه چرخه، برای MDC#1 و MDC#2 به ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۲۴ گرم برلیتر بر ساعت بود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان‌دهنده شده است، میزان نرخ حذف بار آلی با گذشت زمان کاهش می‌یابد تا این‌که به حداقل مقدار خود یعنی نزدیک به صفر در هر دو پیل می‌رسد. این اتفاق عمدتاً به دلیل مصرف گلوکز و آزادسازی پروتون توسط ریزاندامگان به‌مرور زمان در هر چرخه، محیط محفظه آنود اسیدی شده و باعث کاهش فعالیت ریزاندامگان‌های حاضر در آنود شده و بازده حذف بار آلی را کاهش می‌دهد (Zamanpour et al., 2017). بالا بودن حذف بار آلی توسط سامانه پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد لجن‌هوازی در مطالعه دیگری نیز تأیید شده است، به‌طوری‌که در آن مطالعه درصد حذف بار آلی تا ۸۰ درصد گزارش شده است (Ebrahimi et al., 2018).

۳-۲- مقایسه و بررسی میزان حذف COD

در شکل ۴، میزان حذف و نرخ حذف بار آلی در طول زمان در یک چرخه ناپیوسته، نشان‌دهنده شده است. میانگین حذف بار آلی در MDC#1 و MDC#2 برابر با ۶۰/۹ و ۹۰/۱ درصد بود. بالاتر بودن میزان حذف بار آلی در MDC#2 نسبت به پیل با کاتد جلبکی (MDC#1)، به دلیل استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر و متنوع مانند اکسیژن و فاضلاب در محفظه کاتدی است که باعث می‌شوند الکترون‌های دریافت‌شده از الکتروود کاتد بلافاصله تخلیه شده و نیروی محرکه قابل توجهی برای دریافت الکترون‌ها از آنود در حالت مدار بسته ایجاد شود (Pandit et al., 2011). استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر مانند اکسیژن و فاضلاب در محفظه کاتدی، حذف COD را در آنود تسهیل می‌کند. ریزاندامگان می‌توانند الکترون‌های دریافت‌شده از الکتروود کاتد را بلافاصله تخلیه کرده و نیروی محرکه قابل توجهی برای دریافت الکترون‌ها از آنود در حالت مدار بسته ایجاد کنند (Pandit et al., 2011). بنابراین، این نیروی محرکه باعث فعالیت بیشتر

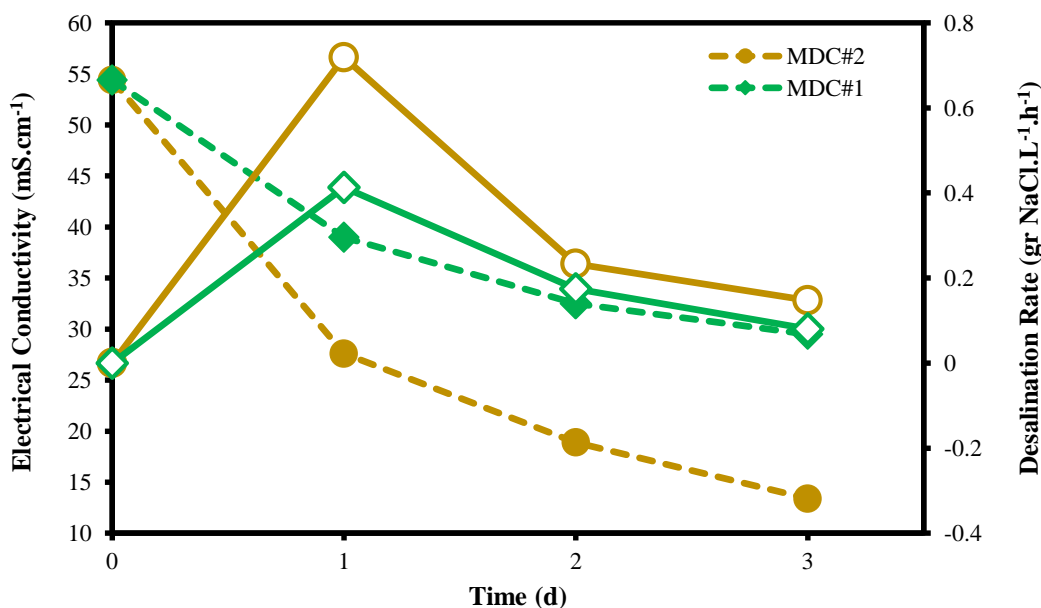


شکل ۴- نمودار تغییرات غلظت نمک (توپر) و نرخ نمک‌زدایی (توخالی) در محفظه میانی برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی

۳-۳- بررسی بازده نمک‌زدایی و تغییرات pH

شکل ۵، تغییرات غلظت محلول آب شور در هر دو پیل با کاتد زیستی میکروجلبک و لجن هوازی را نشان می‌دهد. حداکثر بازده نمک‌زدایی در MDC#2 و MDC#1 برابر با ۶۱ و ۷۵ درصد است. رسانایی الکتریکی آب شور در ابتدای چرخه برابر با ۵۴/۴ میلی زیمنس بر سانتی‌متر بوده است که در یک چرخه ناپیوسته میزان هدایت الکتریکی به طور پیوسته کاهش یافته و در انتهای چرخه به ۲۹/۵ و ۱۳/۴ میلی زیمنس بر سانتی‌متر رسیده است. حداکثر میزان نرخ نمک‌زدایی در پیل با کاتد لجن هوازی برابر با ۰/۷۲ گرم نمک بر لیتر بر ساعت به‌دست آمد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در ابتدای چرخه

میزان نرخ نمک‌زدایی حداکثر میزان خود است که این امر به دلیل فعالیت بیشتر ریزاندمگان فعال الکتریکی در ابتدای چرخه و حذف بیشتر بار آلی و در نتیجه تولید الکترون به دلیل تغییر الکترولیت در محفظه آند و افزایش تولید جریان در ابتدای چرخه است. اما به‌مرور زمان نرخ نمک‌زدایی روند کاهشی داشته و در انتهای چرخه به حداقل مقدار خود رسیده است. این امر می‌تواند به دلایلی هم‌چون کاهش ولتاژ خروجی و در نتیجه کاهش انتقال یون‌های نمک به‌ازای جریان تولیدی در محفظه آند، نوسان pH در دو محفظه آند و کاتد و سپس تغییر جهت گرادیان انتقال جرم از دو محفظه آند و کاتد به‌سمت محفظه نمک‌زدایی و افزایش مقاومت درونی سامانه ناشی از کاهش غلظت نمک در محفظه میانی نمک‌زدا است (Jafary et al., 2020).



شکل ۵- نمودار تغییرات غلظت نمک (توپر) و نرخ نمک‌زدایی (توخالی) در محفظه میانی برای پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران برای انجام این پژوهش (گرت شماره ۴۰۳۵۹۲۰) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Bio-electrochemical Systems
- 2- Microbial Desalination Cell
- 3- Electroactive Bacteria
- 4- Anion Exchange Membrane
- 5- Cation Exchange Membrane
- 6- Electrical conductivity (EC)
- 7- Chemical Oxygen Demand (COD)
- 8- Polarization curve

۷- مراجع

- Ahmed, F.E., Khalil, A., and Hilal, N., (2021), "Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends", *Desalination*, 517, 115183, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>.
- Al-Mamun, A., Ahmad, W., Baawain, M.S., Khadem, M., and Dhar, B.R., (2018), "A review of microbial desalination cell technology: Configurations, optimization and applications.", *Journal of Cleaner Production*, 183, 458-480, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.054>.
- Ebrahimi, A., Najafpour, G.D., and Kebria, D.Y., (2018), "Performance of microbial desalination cell for salt removal and energy generation using different catholyte solutions", *Desalination*, 432, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.002>.
- Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., and Sodiq, A., (2020), "The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity", *Desalination*, 495, 114633, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
- Jafary, T., Al-Mamun, A., Alhimali, H., Baawain, M.S., Rahman, S., Tarpeh, W.A., Dhar, B.R., and Kim, B.H., (2020), "Novel two-chamber tubular microbial desalination cell for bioelectricity production, wastewater treatment and desalination with a focus on self-generated pH control", *Desalination*, 481, 114358, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114358>.
- Kokabian, B., and Gude, V.G., (2015), "Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells", *Chemical Engineering Journal*, 262, 958-965, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.048>.
- Pandit, S., Sengupta, A., Kale, S., and Das, D., (2011), "Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane", *Bioresource Technology*, 102, 2736-2744, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.038>.

تغییرات pH در محفظه‌های آند و کاتد برای هر دو پیل با کاتدهای زیستی در جدول ۱ نمایش داده شده است. pH اولیه محلول‌های آند و کاتد در هر دو پیل به ترتیب برابر با ۷/۴ و ۷/۵ بود. در انتهای یک چرخه ناپیوسته، میزان pH در محفظه آند MDC#1 به ۵/۹ و در محفظه کاتد به ۸/۳ رسید و در محفظه آند به ۴/۹ و در محفظه کاتد به ۹/۲ رسید. نوسان شدیدتر pH در آند MDC#2 نسبت به MDC#1 به دلیل بالاتر بودن حذف بار آلی آن و در نتیجه آزادسازی بیشتر یون‌های پروتون است (Jafary et al., 2020). علاوه بر این به دلیل استفاده از ریزاندامگان در کاتد و کاتالیزکردن واکنش احیای اکسیژن، یون‌های هیدروکسیل بیشتری به محیط آزاد شده است که باعث افزایش میزان pH در MDC#2 نسبت به MDC#1 شده است (Jafary et al., 2020).

جدول ۱- تغییرات pH در محفظه‌های آند و کاتد در دو پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد جلبکی (MDC#1) و لجن هوازی (MDC#2).

پیل نمک‌زدا	زمان اندازه‌گیری	pH (آند)	pH (کاتد)
MDC#1	ابتدای عملیات	۷/۵	۷/۴
	انتهای عملیات	۵/۹	۸/۳
MDC#2	ابتدای عملیات	۷/۵	۷/۴
	انتهای عملیات	۵/۱	۹/۲

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه عملکرد MDC را با استفاده از دو نوع کاتد شامل لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس در شرایط مشابه بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که MDCهایی که از لجن هوازی به عنوان کاتد زیستی استفاده می‌کنند، چگالی توان و راندمان نمک‌زدایی به طور قابل توجهی بالاتری را نشان دادند که به ترتیب برابر با ۸۴۱ میلی‌وات بر مترمربع و ۷۵ درصد بودند. این یافته‌ها بر توانایی کاتالیزوری کاتدهای زیستی تاکید می‌کند، که نشان‌دهنده پتانسیل امیدوارکننده آن‌ها در افزایش تولید برق و راندمان نمک‌زدایی در MDC است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که ظرفیت حذف بار آلی در پیل با لجن هوازی و ریزجلبک کلرلا ولگاریس به ترتیب برابر با ۹۰/۱ و ۶۰/۹ درصد است. دلیل نتایج بهتر کاتد با لجن هوازی استفاده از گیرنده‌های الکترون موثر و متنوع مانند اکسیژن و ریزاندامگان‌های مختلف در محفظه کاتدی است.

- Rabiee, R., Zamir, S.M., and Sedighi, M., (2022), "Degradation of phenol in the bio-cathode of a microbial desalination cell with power generation and salt removal", *Bioelectrochemistry*, 148, 108258, <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108258>.
- Sadeq, A.M., and Ismail, Z.Z., (2023), "Sustainable application of tubular photosynthesis microbial desalination cell for simultaneous desalination of seawater for potable water supply associated with sewage treatment and energy recovery", *Science of The Total Environment*, 875, 162630, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162630>.
- Saeed, H.M., Hussein, G.A., Yousef, S., Saif, J., Al-Asheh, S., Fara, A.A., Azzam, S., Khawaga, R. and Aidan, A., (2015), "Microbial desalination cell technology: A review and a case study", *Desalination*, 359, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.024>.
- Zamanpour, M.K., Kariminia, H.R., and Vosoughi, M., (2017), "Electricity generation, desalination and microalgae cultivation in a biocathode-microbial desalination cell", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 843-848, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.045>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.