

Received: 2022/9/19

Accepted: 2023/2/17

How to cite:

Danaee S, Kazemi A, Shahzadeh Fazeli A, Naghoosi H. The alternative of water desalination in areas with water crisis and energy production from wastewater using a microalgal desalination cell. *EBNESINA* 2023;25(1):45-56. DOI: 10.22034/25.1.45

1. Lecturer, Biotechnology Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

2. Msc of Microbial Biotechnology, Faculty of Biological Science and Technology, University of Science and Culture, Tehran, Iran

3. Assistant professor, Faculty of Biological Science and Technology, University of Science and Culture, Tehran, Iran

4. Assistant professor, Infectious diseases research center, Aja University of Medical Sciences, Tehran, Iran

✉ Corresponding Author:

Hamed Naghoosi

Address: Infectious diseases research center, Aja University of Medical Sciences, West Fatemi Av., Etemadzadeh Av., Tehran, Iran

Tel: +98 (21) 88028350

E-mail: Naghoosi@ut.ac.ir

Original Article

The alternative of water desalination in areas with water crisis and energy production from wastewater using a microalgal desalination cell

Soroosh Danaee¹, Azin Kazemi², Abolhasan Shahzadeh Fazeli³, Hamed Naghoosi⁴✉

Abstract

Background and aims: The supply of fresh water from salt water is mainly done through expensive and energy-intensive technologies. A presentable alternative is to integrate the processes of wastewater treatment, desalination of saline water, and renewable energy production through microalgal desalination cell. The aim of this research was to investigate the potential of this technology to treat synthetic wastewater, removal rate of interfering ions from a model saline water, and the rate of electricity generation.

Methods: Four different mixed culture samples was taken to be used in the anode to find the best mixed culture with regard to the growth rate and adaptation to the new conditions. The performance of two types of cylindrical batteries, air cathode and biocathode containing a microalga of *Scenedesmus obliquus*, were compared based on the operational parameters and desalination.

Results: The initial results showed that the best growth coefficient was for the anaerobic sludge sample ($0.15d^{-1}$). After starting the batteries and comparing the results, the maximum steady voltage and the electric power density of the battery with biocathode was measured as 283mv and $64mWm^{-2}$, respectively. Based on the desalination data, the maximum percentage of salt removal was %44.

Conclusion: The present research showed that this kind of cell has a suitable efficiency for desalination of saline water and it has the conditions for further studies to increase the scale and use in areas with water crisis.

Keywords: Microalgae, Salinity, Fresh Water

EBNESINA - IRIAF Health Administration

(Vol. 25, No. 1, Serial 82 Spring 2023)



Copyright© 2023. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms. Downloaded from: <http://www.ebnesina.ajau.ac.ir>

راهکار شیرین‌سازی آب در مناطق دارای بحران آب و تولید انرژی از پساب با استفاده از یک پیل نمک‌زدای ریزجلبکی

سروش دانایی^۱، آذین کاظمی^۲، سیدابوالحسن شاهزاده فاضلی^۳، حامد ناقوسی^۴

چکیده

زمینه و اهداف: تأمین آب شیرین از آب‌های شور عمدتاً از طریق تکنولوژی‌های هزینه‌بر و انرژی‌بر صورت می‌گیرد. یکی از راهکارهای قابل ارائه، تلفیق تصفیه پساب، شیرین‌سازی آب شور و تولید انرژی تجدیدپذیر از طریق پیل نمک‌زدای ریزجلبکی است. هدف از این پژوهش بررسی قابلیت تصفیه پساب سنتزی، میزان حذف یون‌های مزاحم از یک آب شور مدل، و میزان تولید الکتریسیته به طور همزمان با استفاده از این فناوری بود.

روش بررسی: چهار نمونه مختلف از کشت‌های مخلوط جهت به کارگیری در آند انجام شد تا بهترین کشت مخلوط از نظر سرعت رشد و تطابق با شرایط محیط کشت جدید، تعیین شود. سپس، عملکرد دو نوع پیل استوانه‌ای شکل هواکاتد و زیست کاتد حاوی ریزجلبک *سندسموس البیکوس* در پارامترهای عملیاتی و نمک‌زدایی مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج اولیه مشخص نمود که بهترین ضریب رشد مربوط به نمونه لجن بی‌هوازی بود (۰/۱۵ بر روز). همچنین پس از راه‌اندازی پیل‌ها و مقایسه نتایج، بیشینه ولتاژ در حالت پایا و چگالی توان الکتریکی متعلق به پیل با زیست کاتد بود که به ترتیب ۲۸۳ میلی‌ولت و ۶۴ میلی‌وات بر متر مربع اندازه‌گیری شد. بر اساس داده‌های نمک‌زدایی، بیشینه درصد حذف نمک، ۴۴٪ به دست آمد.

نتیجه‌گیری: پژوهش حاضر نشان داد که این نوع پیل، از بازدهی مناسبی برای نمک‌زدایی از آب شور برخوردار است و شرایط مطالعات بعدی جهت افزایش مقیاس و استفاده در مناطق دارای بحران آب را دارد.

کلمات کلیدی: ریزجلبک، شوری، آب شیرین

(سال بیست و پنجم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲، مسلسل ۸۲)
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

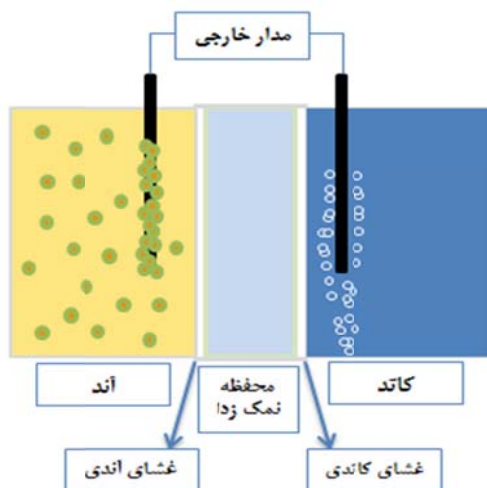
فصلنامه علمی پژوهشی ابن‌سینا / اداره بهداشت، امداد و درمان نهجا
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۸

۱. مربی، پژوهشکده زیست فناوری، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران
۲. کارشناسی ارشد زیست فناوری میکروبی، دانشکده علوم پایه و فناوری‌های نوین زیستی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده علوم پایه و فناوری‌های نوین زیستی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
۴. استادیار، مرکز تحقیقات بیماری‌های عفونی دانشگاه علوم پزشکی آجا، تهران، ایران

نویسنده مسئول: حامد ناقوسی

آدرس: مرکز تحقیقات بیماری‌های عفونی، دانشگاه علوم پزشکی آجا، خیابان فاطمی غربی، خیابان شهید اعتمادزاده، تهران، ایران
تلفن: ۸۸۰۲۸۳۵۰ (۲۱) ۹۸+
ایمیل: Naghoosi@ut.ac.ir

مقدمه



شکل ۱- نمایی از یک پیل سوختی زیستی نمک‌زدا

از میکروارگانیزم به عنوان کاتالیست درون آند موجب می‌گردد که پیل سوختی زیستی نمک‌زدا به دست آید. حضور میکروارگانیزم این امکان را فراهم می‌نماید تا از ترکیبات آلی درون الکترولیت استفاده گردد و الکترون‌های آزاد شده در اثر تجزیه زیستی این ترکیبات، از طریق مدار خارجی برقرار شده مابین آند و کاتد، به کاتد منتقل می‌گردد. به طور همزمان، یون‌های مثبت و منفی درون محفظه نمک‌زدا به کاتد و آند منتقل می‌گردند و آب شیرین حاصل می‌گردد [۲]. شکل ۱ نمایی از یک پیل سوختی زیستی نمک‌زدا را نشان می‌دهد.

استفاده از پیل سوختی نمک‌زدا هزینه فرآیند نمک‌زدایی را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین، این پیل قادر انجام همزمان چندین فرآیند تولید الکتریسیته، تصفیه آلاینده‌های زیستی (از طریق تصفیه پساب) و نمک‌زدایی از آب شور (نظیر آب دریا) است [۳]. روش عمده تصفیه زیستی در پیل‌های سوختی از طریق به کارگیری سوبسترای آلوده در آند است که علاوه بر تأمین انرژی و کربن جهت رشد میکروارگانیزم‌ها، آلاینده‌های آلی و معدنی موجود را در دسترس میکروپها قرار می‌دهند تا تصفیه گردند. از بدو شروع بررسی پیل‌های سوختی میکروبی، سوبسترهای مختلفی حاصل از مواد آلی موجود در فاضلاب، از پساب لبنی [۴] و ملاس [۵] گرفته تا پساب آبجوسازی [۶] و پساب خانگی [۷، ۸]، به عنوان سوخت در پیل‌های میکروبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از میان آنها می‌توان به

کاهش دسترسی به منابع آب شیرین و با کیفیت، بخصوص طی خشکسالی‌های اخیر در کشور موجب افزایش نیاز به این مایه حیات گردیده است. دسترسی به آب جهت مصارف روزانه و آب شرب در برخی مناطق کشور بسیار دشوار است. روستاهایی که از نعمت آب لوله‌کشی محروم هستند، یگان‌های عملیاتی خارج از شهر و دور از دسترس، پاسگاه‌های مرزی و... نیازمند آبرسانی مستمر هستند. اما بسیاری از این مناطق به منابعی از آب دسترسی دارند که به علت شوری زیاد از چرخه مصرف خارج شده است. به منظور تولید آب قابل مصرف از این منابع، ابتدا باید آلاینده‌های موجود در آنها شناسایی و حذف گردند. یکی از منابع تولید آب مورد نیاز، استفاده از آب‌های لب شور، شور و آب دریا است که حاوی نمک و املاح معدنی هستند و برای استفاده نیازمند شیرین‌سازی هستند. حذف یون‌های مزاحم از آب‌های غیرمتمعارف در فرآیندهای رایج شیرین‌سازی آب (گرمایی و غشایی) نیازمند صرف انرژی و هزینه بسیار زیاد در این فرآیندها است. به همین منظور، همواره نیاز به یک فرآیند مقرون به صرفه و عملی کردن فناوری‌های جایگزین ضروری است [۱]. توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر نظیر پیل سوختی می‌تواند به ارائه راهکار اقتصادی برای شیرین‌سازی آب‌های شور کمک نماید.

استفاده از نوع توسعه یافته فناوری پیل سوختی، که پیل سوختی نمک‌زدا است می‌تواند مشکل تأمین آب شیرین بویژه در مناطق دورافتاده و تا حدی تولید انرژی الکتریکی را نیز حل نماید. در نظر بگیرید که اجزای یک پیل سوختی معمول شامل محفظه‌های کاتد و آند، الکترودهای کاتد و آند و یک غشای جدا کننده باشد. این پیل، توسط واکنش‌های اکسایشی و کاهش‌ی که به ترتیب در محفظه‌های آند و کاتد آنها اتفاق می‌افتد، انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. اما در پیل سوختی نمک‌زدا، با افزودن یک غشای تبادل یون دیگر، یک محفظه جدید حاوی آب شور میان آند و کاتد قرار می‌گیرد که مسئولیت شیرین‌سازی آب را بر عهده دارد. استفاده

فاضلاب، حذف یون‌های مزاحم از آب شور و میزان تولید الکتریسیته بود تا در نهایت بتواند راهکاری جدید بویژه برای مناطق دورافتاده و محروم ارائه نماید.

روش بررسی

در ابتدا از چندین کشت مخلوط نمونه‌برداری شد تا بهترین نوع آن برای ادامه آزمایشات درون آند استفاده گردد. سپس دو مجموعه آزمایش با پیل نمک‌زدای با کاتد زیستی و غیرزیستی انجام شد تا عملکرد آنها با هم مقایسه گردد.

تعیین کشت مخلوط مناسب

به منظور تعیین نمونه باکتریایی نهایی مورد استفاده در پیل سوختی میکروبی که در فرایند تولید الکترون و در نهایت تولید جریان الکتریکی مورد استفاده قرار بگیرد، بررسی سرعت و میزان رشد بر روی چهار نمونه انجام گرفت. نمونه‌های مورد استفاده شامل موارد زیر بودند:

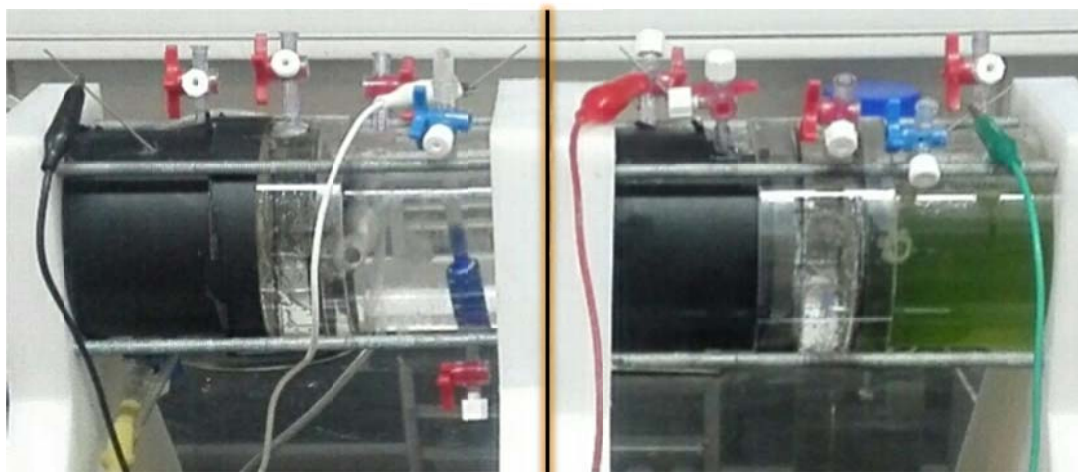
- ۱- رسوبات بی‌هوازی کف یک تالاب از اطراف ماسال واقع در استان گیلان
- ۲- رسوبات بی‌هوازی کف خلیج فارس در عمق ۱/۵ متری
- ۳- لجن فعال مخزن بی‌هوازی کارخانه فرآوری گوشت
- ۴- رسوب بی‌هوازی کف استخر آبیاری کشاورزی در عمق ۳ متری

تمامی نمونه‌های ذکر شده، درون ظرف تمیز نمونه برداری شد و در شرایط بی‌هوازی به آزمایشگاه منتقل گردید. این نمونه‌ها سپس به محیط کشت مغذی منتقل و با تزریق گاز آرگون بی‌هوازی شد. سپس نمونه‌های اولیه موجود در کشت مغذی بی‌هوازی، طی یک فرآیند یک ماهه با پساب سنتزی سازگاری داده شدند تا در نهایت به جای محیط کشت اولیه، از پساب سنتزی برای رشد نمونه‌ها استفاده گردد. ترکیبات پساب سنتزی در جدول ۱ آمده است (به همراه ۰/۰۵ میلی‌لیتر ویتامین ب-کمپلکس) [۱۱]:

فاضلاب‌های شهری خانگی، فاضلاب کاغذسازی، فاضلاب کارخانجات فرآوری نشاسته و فاضلاب‌های صنعتی اشاره نمود [۲]. لو و همکاران از فاضلاب ناشی از تولید نشاسته توانستند به حداکثر دانسیته توان ۲۳۹/۴ میلی‌وات بر متر مکعب دست یابند [۹]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ موفق به حذف ۸۲٪ سولفید از فاضلاب در کنار تولید توان به میزان ۱۰۵۱ میلی‌وات بر متر مربع گردیدند [۱۰]. به طور کلی، توان تولیدی و میزان حذف آلودگی در مطالعات مختلف با توجه به تفاوت در شرایط آزمایشی (ترکیب و غلظت اولیه سوبسترا و شرایط عملیاتی پیل) متفاوت است.

در پژوهش حاضر، پتانسیل استفاده از چندین منبع کشت مخلوط در آند بررسی می‌گردد. به علاوه، به منظور جلوگیری از صرف انرژی و تحمیل هزینه اضافی به این نوع سیستم، امکان به کارگیری ریزجلیک در کاتد زیستی و اثر آن بر روی پارامترهای عملکردی پیل، با هواکاتد مقایسه می‌گردد. ریزجلیک‌ها، کارخانه‌های سلولی وابسته به نور هستند که ضمن انجام عمل فتوسنتز، ترکیبات ارزشمندی تولید می‌نمایند. تاکنون مطالعات اندکی پیرامون سنجش پتانسیل به کارگیری گونه‌های مختلف ریزجلیک در پیل سوختی صورت گرفته است. در این پژوهش از ریزجلیک سندسموس^۱ که بزرگترین جنس از راسته کلروفیسه^۲ است، استفاده گردید. سندسموس، سنوبیوم^۳ ۴-۸ و گاهی ۱۶ تایی دارد که از پهلوی کنار هم قرار گرفته و توسط نوار موسیلاژی به هم متصل شده است. دیواره سلولی سندسموس چندلایه است که دیواره داخلی دارای سلولز است و داخل ماتریکس همی سلولز محاط شده است. کلروپلاست در این نوع ریزجلیک کل حفره سلول بالغ را اشغال می‌کند و دارای یک پیرنوید^۴ است. این ویژگی‌ها سندسموس را نسبت به سایر جلیک‌ها منحصر به فرد کرده است. هدف این پژوهش، بررسی پتانسیل فناوری پیل سوختی نمک‌زدا در تصفیه

1. Scenedesmus
2. Chlorophyceae
3. Coenobium
4. Pyrenoid



شکل ۲- ساختار پیل زیست کاتد (راست) و هواکاتد (چپ)

هیدروکسید سدیم قرار داده شدند. سپس ۱۰ دقیقه در آب مقطر و در انتها یک ساعت در محلول اسیدی هیدروکلریدریک اسید قرار داده شدند.

درون محفظه آند، پساب سنتزی همراه با کشت مخلوط لجن فعال تزریق گردید و محیط داخلی محفظه به کمک گاز آرگون بی‌هوازی گردید. همچنین، الکتروکربنی درون این محفظه قرار گرفت. ۷۰٪ حجم محیط کشت آند هر ۴۸ ساعت یکبار تخلیه شد و محیط کشت جدید به همراه باکتری تزریق گردید. به علاوه، برای اطمینان از بی‌هوازی ماندن فضای محفظه آند، هر ۲۴ ساعت به مدت ۱۰ دقیقه گاز آرگون به محفظه تزریق شد.

در مدار خارجی از مجموعه‌ای از مقاومت‌ها استفاده گردید به طوری که تا پیش از روز دوازدهم مقاومت خارجی ۱۰۰ اهم، پس از آن مقاومت‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ اهم به کار گرفته شد تا سیستم به حالت پایا برسد [۱۲].

برای سنجش تأثیر استفاده از ریزجلبک در پارامترهای عملکردی پیل (چگالی توان و چگالی جریان [۱۳])، بخش اول آزمایشات پیل نمک‌زدا با کاتد هوا انجام گرفت (هواکاتد). برای این منظور از بافر فسفات درون کاتد استفاده گردید. اجزا

با توجه به تجربه‌ای که از پیش کشت اولیه نمونه‌های منتقل شده به آزمایشگاه به دست آمد، به منظور بهینه‌سازی میزان رشد کشت‌های مخلوط، درصد تلقیح به ۲۰٪ افزایش یافت. با توجه به اینکه نتایج اولیه کشت‌های مخلوط از برتری نسبی نمونه لجن بی‌هوازی حکایت داشت، از این نمونه برای ادامه آزمایشات استفاده گردید. برای تعیین ضریب رشد نمونه‌ها، سنجش کدورت در فواصل زمانی منظم و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت. معادله ضریب رشد در فاز لگاریتمی که در آن μ ضریب رشد ویژه، OD چگالی نوری و t زمان است، به شرح زیر است:

$$\mu(d^{-1}) = \frac{OD_2 - OD_1}{t_2 - t_1}$$

آماده‌سازی پیل

در ساختمان پیل، از یک محفظه کاتد، یک محفظه آند و یک محفظه نمک‌زدا، همگی از جنس پلکسی‌گلس شفاف به شکل استوانه با قطر داخلی ۸ سانتی‌متر، به ترتیب به احجام کاری ۲۴۰، ۲۴۰ و ۱۲۰ میلی‌لیتر استفاده گردید. سایر اجزای اصلی پیل شامل دو الکتروکربنی (ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر)، یک غشای آنیونی (ساخت شرکت دانش‌نوین) و یک غشای کاتیونی (ساخت پژوهشگاه پلیمر) بودند. شکل ۲ نمایی از پیل سوختی نمک‌زدا را نشان می‌دهد. به منظور پیش تیمار غشاءها و الکترودهای کربنی، تمامی آنها یک ساعت در محلول قلیایی

جدول ۱- ترکیبات پساب سنتزی

ماده	مقدار ماده (g/l)	ماده	مقدار ماده (g/l)
KH ₂ PO ₄	۰/۶۸	MgSO ₄ .7H ₂ O	۰/۱
KCl	۰/۷۴	NH ₄ Cl	۰/۲۸
NaCl	۰/۵۸	K ₂ HPO ₄	۰/۸۷
CaCl ₂ .2H ₂ O	۰/۱	Glucose	۱

شیمیایی (COD) با استفاده از روش ۵۲۲۰ استاندارد متد انجام شد [۱۱].

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور تحلیل داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از آزمون‌های پارامتری، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون اندرسون-دارلینگ در فاصله اطمینان ۹۵٪ مورد سنجش قرار گرفت. به منظور مقایسه آماری داده‌ها، از آزمون‌های آماری توکی و تی تست استفاده گردید. همچنین اثر فاکتور نوع هوادهی (هواکاتد یا زیست کاتد) بر درصد حذف با استفاده از آزمون آنالیز واریانس یک طرفه در فاصله اطمینان ۹۵٪ سنجیده شد. کلیه آزمون‌های آماری انجام شده در نرم افزار مینی تب نسخه ۱۴ اجرا گردیدند.

یافته‌ها

نتایج کشت مخلوط

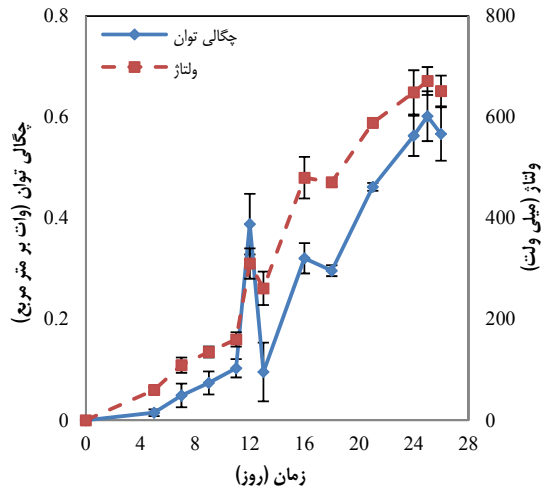
همانطور که پیشتر نیز بیان گردید، در این پژوهش، چهار نمونه به عنوان کشت مخلوط به منظور استفاده در پیل میکروبی مورد بررسی قرار گرفت. سرعت رشد کشت‌های مخلوط به منظور تعیین توان تطابق آنها با پساب مورد استفاده در این پژوهش، بررسی شد. نمودار ۱ تغییرات چگالی نوری کشت‌های مخلوط مختلف را نشان می‌دهد. بر این اساس، نمونه لجن بی‌هوازی حاصل از پساب کارخانه صنایع غذایی و رسوبات بی‌هوازی کف تالاب، ضریب رشد بهتری را نشان دادند. این نمونه زودتر از مابقی کشت‌های مخلوط در چهارمین روز پس از تلقیح به حداکثر میزان رشد رسید و کدورتی مناسبی را ایجاد کرد. با توجه به نتایج آزمون توکی با فاصله اطمینان ۹۵٪ که هم پوشانی نسبی بازه میانگین ضرایب نمونه‌های لجن بی‌هوازی و تالاب را بیان می‌نمود، آزمون T با فاصله اطمینان ۹۵٪ انجام گرفت که بازه اختلاف ضرایب رشد لجن و رسوبات بی‌هوازی تالاب را در محدوده ۰/۵۸ و ۰/۳۳- نشان داد. بر این اساس، مقدار میانگین نرخ رشد ویژه برای نمونه‌های

تشکیل دهنده بافر فسفات که در پیل‌های کنترل استفاده گردید، شامل ۸/۵ گرم پتاسیم‌دی‌هیدروژن فسفات، ۲۱/۷۵ گرم دی‌پتاسیم‌هیدروژن فسفات، ۱۷/۰۴ گرم سدیم‌هیدروژن فسفات ۲ آبه، و ۱/۷ گرم آمونیوم کلرید (با pH تقریبی ۷) بود [۱۴]. همچنین، با استفاده از یک پمپ هوا به طور متناوب درون محفظه کاتد، هوا تزریق گردید. در این حالت، بافر فسفات موجود در محفظه کاتدی نیز هر ۴۸ یکبار تعویض می‌شد. در بخش دوم آزمایشات، از ریزجلبک سندسموس ابلیکوس^۱ (تهیه شده از مخزن تصفیه فاضلاب [۱۵]) به همراه محیط کشت BBM^۲ در محفظه کاتد استفاده شد (زیست کاتد). این محفظه در معرض لامپ فلوروسنت با شدت نوری ۳۰۰۰ لوکس و دمای محیط قرار گرفت. در انتها میزان زیست توده تولیدی در هر محفظه از طریق توزین وزن خشک ۳۵ میلی‌لیتر نمونه مورد سنجش قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری مقدار زیست توده خشک، نمونه‌های به دست آمده با دو بار تکرار (۳۵ میلی‌لیتر) ابتدا فیلتر شده و سپس در آون خشک‌کن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و سپس توزین شد.

تمامی پیل‌ها به گونه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند که هر پیل طی ۳۰ روز بدون حضور محفظه نمک‌زدا و تنها با آند، کاتد و غشای کاتدی کار کردند تا بیوفیلم میکروبی تشکیل گردد و ولتاژ به محدوده پایدار خود برسد؛ پس از آن محفظه نمک‌زدا افزوده گردید و به مدت ۲۵ روز نمک‌زدایی انجام گرفت. پس از ثبات تقریبی ولتاژ در پیل‌ها، محلول NaCl با غلظت ۲۵ گرم بر لیتر (معادل غلظت متوسط آب دریا) به محفظه میانی اضافه شد و پیل با شرایط قبلی به کار ادامه داد. تزریق آب نمک تازه هر ۴ الی ۵ روز یکبار صورت می‌گرفت. در طول این مدت، هدایت الکتریکی آب نمک با استفاده از هدایت‌سنج الکتریکی (EC متر مدل قلمی TDS-039) اندازه‌گیری شد. همچنین اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز

1. *Scenedesmus obliquus*

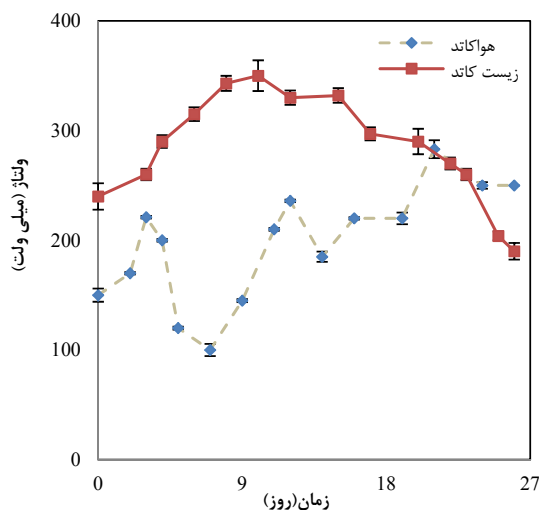
2. Bold's Basal Medium



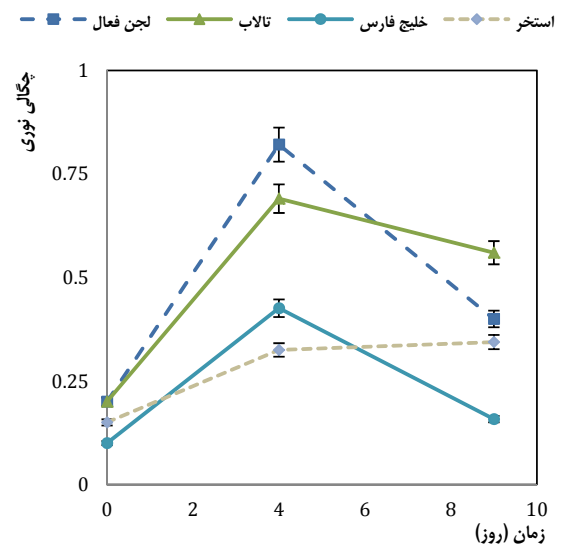
نمودار ۲- چگالی توان و ولتاژ در پیل زیست کاتد در حالت ناپایا

اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز شیمیایی قبل و بعد از استفاده در پیل بیانگر متوسط حذف ۴۳٪ بود به طوری که در ابتدا ۲۱۰۰-۲۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و در انتها ۱۳۲۰-۱۲۶۰ میلی‌گرم در لیتر COD در آند اندازه‌گیری شد. متوسط میزان ولتاژ پایا در پیل هواکاتد و زیست کاتد به ترتیب ۲۰۰ و ۲۸۳ میلی‌ولت است.

بعد از ۳۰ الی ۴۰ روز از زمان شروع به کار، پیل‌ها از حالت نرمال خود خارج شده و به سمت کاهش راندمان کاری پیش رفتند. در روزهای پایانی کار پیل که دیگر تزریق محیط تازه بی‌اثر است، افت شدید ولتاژ مشاهده گردید (در نمودار نشان داده نشده است). سنجش زیست توده ریزجلبک نیز افزایش



نمودار ۳- تغییرات ولتاژ با زمان درون پیل زیست کاتد و هوا کاتد در حالت پایا



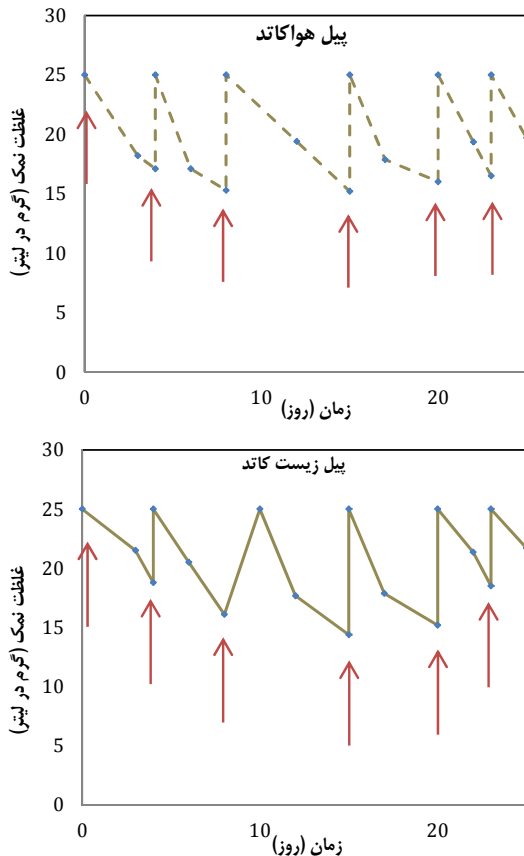
نمودار ۱- مقایسه چگالی نوری کشت‌های مخلوط

لجن بی‌هوازی، خلیج فارس، تالاب و استخر آبیاری به ترتیب ۰/۱۵۵، ۰/۰۸۱، ۰/۱۲۲ و ۰/۰۴۳ بر روز به دست آمد.

نتایج به دست آمده از پارامترهای پیل

ولتاژ در حالت ناپایا: نمودار ۲ تغییرات چگالی توان و ولتاژ را در روزهای مختلف درون پیل حاوی ریزجلبک نشان می‌دهد. تغییرات ولتاژ و توان تولیدی تا پیش از روز دوازدهم که مقاومت خارجی ۱۰۰ اهم در سیستم به کار رفته است، دارای افزایش تدریجی و کُند است. اما پس از جا‌بگزینی مقاومت خارجی قبلی با مقاومت ۳۰۰ اهم، افزایش این پارامترها سرعت می‌گیرد. همچنین در این پژوهش ولتاژ حداکثری تا میزان ۶۷۱ میلی‌ولت نیز اندازه‌گیری شد.

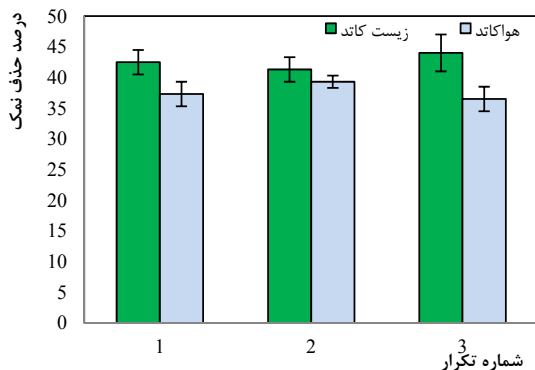
ولتاژ در حالت پایا: زمانی که بیوفیلم و اکسیژن به‌اندازه کافی در سیستم تولید شد، تا مدتی میزان ولتاژ در سیستم حول مقدار پایدار پیل نوسان می‌نماید. نمودار ۳ تغییرات ولتاژ را در طول حالت پایای پیل نشان می‌دهد. در حالت پایای پیل در فاصله روزهای خوراکدهی به پیل‌ها، افزایش چشمگیری در میزان ولتاژ دیده شد (در نمودار نمایش داده نشده است). پس از گذشت مدتی از زمان خوراکدهی، به دلیل نامساعد شدن شرایط محیطی برای باکتری‌های آند، مجدداً ولتاژ افت پیدا می‌کرد.



نمودار ۳- تغییرات غلظت نمک در محفظه نمک‌زدای دو پیل هواکاتد و زیست کاتد

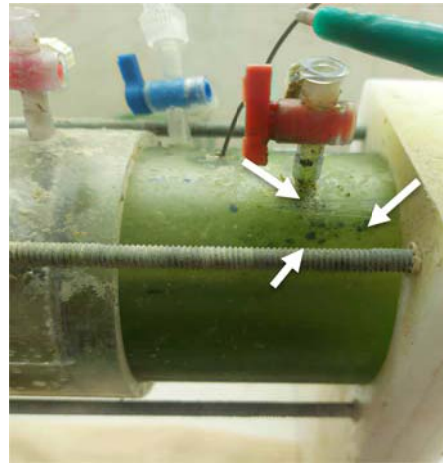
عملکرد پیل هواکاتد و زیست کاتد است.

از دیدگاه فنی، از آنجا که بخش اندکی از هوا را اکسیژن تشکیل می‌دهد (۲۱٪)، سیستم پیل سوختی نیازمند تداوم تزریق هوا از طریق پمپ است. در مقابل، حضور ریزجلیک درون کاتد پیل زیستی یک مزیت است زیرا ریزجلیک با تولید اکسیژن خالص موجب می‌گردد تا بازده واقعی فرآیند به دست آید. مقایسه مقادیر میانگین تکرارهای هواکاتد و زیست کاتد در



نمودار ۴- مقایسه درصد حذف نمک در سه تکرار پیل‌های زیست کاتد و هواکاتد

۳۸٪ را از ابتدا به انتهای فرآیند نشان می‌دهد به طوری که از ۰/۰۲۹ گرم به ۰/۰۴ گرم افزایش داشته است.



شکل ۳- رسوبات ریزجلیک درون زیست کاتد

شکل ۳ نشان دهنده رسوب ریزجلیک‌ها بر دیواره‌ها و کف پیل است که در طول زمان به وجود آمده است و یکی از عوامل کاهش ولتاژ در پیل‌های زیستی حاوی ریزجلیک است.

نمک‌زدایی در پیل‌ها

پس از تزریق محلول نمکی به محفظه میانی، به دلیل وجود میدان الکتریکی، یون‌ها شروع به مهاجرت نموده و از غلظت نمک به مرور زمان کم می‌شود. نمودار ۴ تغییر نمودار غلظت نمک درون محفظه نمک‌زدا در هر دو پیل را نشان می‌دهد. با توجه به تعویض مداوم محلول آب نمک و تزریق مجدد محلول تازه (فلش‌ها)، پیل‌ها به طور مستمر به حذف یون‌ها پرداختند که نتیجه آن، حذف حداکثر ۴۴٪ نمک در پیل زیست کاتد، و حداکثر ۳۹٪ در پیل هواکاتد بوده است. با اینحال پیل حاوی ریزجلیک نوسانات بیشتری در درصد حذف نشان داد.

مقایسه پیل زیست کاتد و هواکاتد

نمودار ۵ نتایج بازدهی زیست کاتد و هواکاتد را نشان می‌دهد که بر اساس آن، حداکثر حذف نمک در پیل زیست کاتد ۴۴٪، و حداکثر حذف نمک در پیل هواکاتد ۳۹٪ بوده است. اثر استفاده از دو نوع کاتد بر درصد حذف در فاصله اطمینان ۹۵٪ معنادار گردید که بیانگر تفاوت مشخص میان

آزمون T بیانگر اختلاف معنادار درصد حذف نمک این دو پیل در فاصله اطمینان ۹۵٪ است.

بحث و نتیجه گیری

در بررسی سرعت رشد کشت‌های مخلوط مشخص گردید که نمونه لجن بی‌هوایی به دلیل شرایط رشد بی‌هوایی که به طور مداوم در تماس با مواد مغذی بودند، ضریب رشد بیشتری را نشان داد. همچنین در کشت لجن بی‌هوایی به وضوح بوی نامطبوع استشمام می‌شد که به دلیل تجمع گازهایی نظیر H_2S در محیط آنها ناشی از فعالیت باکتری‌ها است [۱۶].

افت ناگهانی ولتاژ پس از جایگزینی مقاومت خارجی ۱۰۰ اهم با مقاومت ۳۰۰ اهم، که در سیستم مشاهده شد در پژوهش‌های پیشین نیز دیده شده است [۱۷]. به طور کلی، تغییرات ولتاژ سه مرحله اصلی دارد. این مراحل شامل افزایش تدریجی، رسیدن به یک قله افزایشی و پایدار شدن ولتاژ در آن نقطه و در نهایت افت شدید ولتاژ است. در ابتدا تغییرات ولتاژ روند افزایش بسیار تدریجی از خود نشان می‌دهد. در این زمان پیل در فاز تأخیری قرار دارد. در این فاز، باکتری‌ها باید بر روی سطح الکتروود تشکیل بیوفیلم دهند تا به آسانی الکترون‌های حاصل از تجزیه ترکیبات آلی موجود در آند را به محفظه کاتد انتقال دهند [۱۸]. الکترون پس از انتقال از مدار خارجی به کاتد می‌رسد که در آنجا می‌بایست با اکسیژن کافی به عنوان پذیرنده الکترون واکنش دهد [۱۹]. حضور ریزجلبک در کاتد موجب تولید اکسیژن تا بیش از ۳۰ میلی‌گرم در لیتر که فراتر از اشباع آب است می‌گردد [۲۰]. این میزان از اکسیژن که مورد نیاز برای پذیرش الکترون است، در مقایسه با هزینه و انرژی مصرفی در سیستم هوادهی با پمپ بسیار مقرون به صرفه‌تر و کارا تر است.

مشاهدات نشان داد که فاز تأخیر در پیل‌های زیستی حاوی ریزجلبک در کاتد نسبت به پیل‌های شیمیایی، زمان کمتری را به خود اختصاص داد. زیرا حضور ریزجلبک و فرایند فتوسنتز به گونه‌ای که موجب انتشار حباب‌های بسیار ریز اکسیژن همراه

با غلظت بالای آن در محیط (۲۹-۲۰ میلی‌گرم در لیتر) گردید کمک کرد تا عملکرد سیستم تسریع شود [۲۱]. در مقابل، اما با توجه به اینکه حجم زیادی از هوا را گازهای غیر از اکسیژن تشکیل می‌دهند (۷۹٪ نیتروژن و...)، تزریق هوا به کمک پمپ در کاتد شیمیایی تنها تا غلظت ۸/۷۵ میلی‌گرم در لیتر می‌تواند اکسیژن را بالا ببرد [۲۲]. به علاوه، کارکرد مداوم پمپ موجب افزایش دمای فضای داخلی و هوای خروجی می‌گردد که متعاقب آن، افزایش دمای کاتد را به همراه دارد. از آنجا که حلالیت گاز با دما رابطه معکوس دارد، در حالت پایا مقداری از توان جذب اکسیژن درون محیط کشت کاسته می‌گردد و کاهش بازدهی را به دنبال دارد.

ولتاژ در حالت پایا زمانی به دست می‌آید که بیوفیلم روی آند و اکسیژن در کاتد به اندازه کافی در سیستم تولید شده است. در این مدت ولتاژ در سیستم در بازه مشخصی نوسان می‌نماید. اما در حالت پایا، به دلیل نامساعد شدن شرایط محیطی برای باکتری‌های آند پس از گذشت مدتی از زمان خوراکدهی، مجدداً ولتاژ افت می‌کند. این پدیده احتمالاً در اثر کمبود مواد مغذی و رسیدن به نقطه پیک جمعیت باکتری‌ها است که نتیجه آن، ازدیاد مواد سمی و گازهای مضر است. در نتیجه وقوع این پدیده، افت ولتاژ پیل دیده شد. آنچه در فاز پایانی پیل مشاهده گردید، کاهش راندمان مداوم حتی با تعویض مداوم محیط آند بود که عامل اصلی این پدیده، تشکیل بیوفیلم ضخیم روی آند و رسوب‌گذاری روی غشاها و کاتد که به ترتیب موجب ممانعت از نفوذ مواد مغذی و الکترون به لایه‌های درونی بیوفیلم در آند و اکسیژن در کاتد می‌شود. همچنین تشکیل رسوبات در کاتد که عامل افزایش مقاومت داخلی و مقاومت انتقال بار است عامل کاهش تولید توان در پیل است [۲۳].

مقایسه سرعت کاهش غلظت نمک در پیل زیست کاتد پژوهش حاضر (متوسط ۲/۲۵ گرم در لیتر در روز) نسبت به گزارشات این نوع پیل، بیانگر نرخ به میزان قابل توجهی است (در مقایسه با ۰/۱ گرم در لیتر در روز [۸] و ۰/۳۴۱ گرم در روز [۴]). دلیل این اختلاف به چندین تفاوت برمی‌گردد. اول اینکه،

جدول ۲- مقایسه چندین پیل زیستی نمک‌زدا زیست کاتدی

کاتد	آند	کاتولیت زیستی	آنولیت	ولتاژ (mv)	چگالی توان (mWm ⁻²)	درصد حذف نمک	منبع
میله گرافیت	میله گرافیت	<i>S. obliquus</i>	جدایه نفتی	۶۵۴	۳/۳۶	۵۵/۳٪	[۲۶]
صفحه کربن پوشیده‌شده با فولاد ضدزنگ	صفحه کربن پوشیده‌شده با فولاد ضدزنگ	<i>C. vulgaris</i>	لجن‌فعال بی‌هوازی	۱۶۷	۱۷/۴۳	≈۲۷٪	[۲۷]
گرافیت	گرافیت	<i>N. salina</i>	باکتری شکمبه	۱۰۰	۳۵/۷۳	۱۰۰٪	[۲۸]
گرافیت	گرافیت	<i>N. salina</i>	باکتری شکمبه	۲۷۵	۵۱	۴۶٪	[۲۹]

MDC جریان پیوسته گزارش شده است. به نظر می‌رسد که استفاده از مقاومت خارجی ۱ اهم تأثیر نامطلوب بسیاری بر روی عملکرد سیستم MDC در بازدهی نمک‌زدایی داشته به گونه‌ای که نتوانسته به بیش از ۲۲٪ حذف برسد.

در تحقیقی دیگر افزودن سدیم بی کربنات برای بخش کاتد و اثر آن بروی فرایند و عملکرد سیستم در نمک‌زدایی مورد تحقیق قرار گرفت که در طی آن آنولیت فاضلاب سنتزی حاوی گلوکز بوده و لجن هوازنی به آن تلقیح شد [۲۸]. اضافه کردن این ماده در هوا کاتد علاوه بر تحریک رشد باعث افزایش فشار اسمزی برای انتقال بیشتر آب به بخش نمک‌زدایی می‌شود. نتیجه افزون این ماده بسیار چشمگیر بوده به گونه‌ای که میزان چگالی توان الکتریکی ۷/۵ برابر و میزان نمک‌زدایی ۴۰٪ افزایش را نشان داده است. در تحقیق دیگر صورت گرفته عملکرد هوا کاتد در دوره تاریکی و روشنایی مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۹]. برای این منظور از یک محیط کشت حاوی استات و سویه خالص از ژئوباکتر سولفوردروسنس^۴ بهره‌گیری شد و نتایج گزارش شده نشانگر این امر بود که تنها ۵۱٪ از اکسیژن تولیدی توسط جلبک در دوره تاریکی کاهش یافته بود. پس از یک دوره نمک‌زدایی ۳۱ ساعته و در غلظت اولیه ۴/۳ میلی‌گرم بر لیتر، ۷۷٪ نمک‌زدایی به دست آمد که این امر رابطه مستقیم با نسبت حجمی ۱۰:۱:۱۰ دارد.

برای پژوهش حاضر، بیشینه ولتاژ پایا، چگالی توان الکتریکی و بیشینه درصد حذف نمک متعلق به پیل با زیست کاتد بود که به ترتیب برابر ۲۸۳ میلی‌ولت، ۶۴ میلی‌وات بر متر مربع و ۴۴٪ به دست آمد. علی‌رغم نمک‌زدایی قابل رقابت، میزان ولتاژ تولیدی و چگالی توان به دست آمده در پژوهش حاضر به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از گزارشات است که

حداکثر تولید اکسیژن کلرلا ولگاریس (۲۵ میلی‌گرم در لیتر) و ریزجلیک سندسموس ابلیکوس (۲۹ میلی‌گرم در لیتر) است [۲۴]. همچنین هر دو پژوهش مذکور از بافرهای غلیظ با EC بالا استفاده کرده‌اند که تبادل یون میان محفظه‌ها را کند می‌نماید [۴، ۸]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۵ به بررسی تولید توان و نمک‌زدایی از سیستم MDC^۲ با کاتولیت شیمیایی و زیستی پرداختند و دریافتند اگرچه چگالی توان به دست آمده از سیستم شیمیایی بیشتر بود اما چگالی توان به دست آمده از سیستم زیستی پایدارتر بود [۲۵]. این اثر را می‌توان در مقایسه روند تغییرات ولتاژ دو پیل نیز مشاهده نمود که ولتاژ پیل زیست کاتد نوسان کمتری نسبت به پیل هواکاتد دارد.

در جدول ۲ مقایسه پارامترهای اساسی چند نمونه از پژوهش‌های پیشین با انواعی از الکتروود و الکتروولت‌های مختلف دیده می‌شود. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ نرخ نمک‌زدایی در سیستم MDC را مورد تحقیق قرار دادند که در بخش آند فاضلاب پتروشیمی و در بخش کاتد سندسموس ابوندانس^۳ مورد استفاده قرار گرفت [۲۶]. نتایج بهتری با استفاده از هواکاتد و بالاترین غلظت نمک گزارش شده است که در آن بیشینه ولتاژ تولیدی و میزان نمک‌زدایی به ترتیب ۶۵۴ میلی‌ولت و ۵۵٪ به دست آمده است. در سال ۲۰۱۸، کوکبیان و همکاران سه نوع سیستم MDC را که شامل جریان مداوم، جریان نیمه پیوسته و یک راکتور زیستی نوری مورد تحقیق قرار دادند که در قسمت کاتد حاوی کلرا ولگاریس بود [۲۷]. در این گزارش اگرچه جریان نیمه پیوسته بالاترین میزان چگالی توان الکتریکی ۷۵۳/۷۵ میلی‌وات بر متر مربع بوده است اما بیشینه توده زیستی جلبک تولیدی ۷ میلی‌گرم در لیتر در

1. Electrical conductivity
2. Microbial Desalination Cell
3. *Scenedesmus abundans*

4. *Geobacter sulfurreducens*

جدول ۳- پارامترهای پساب اولیه و آنولیت نهایی

نوع آنالیز	واحد	پساب اولیه	آنولیت نهایی
pH	-	۴/۴۲±۰/۰۰۲	۵/۲۳±۰/۰۰۲
COD	میلی‌گرم بر لیتر	۲۰۵۲±۳۷۹۰	۱۰۶۲±۱۹۶۵
نیترژن کل	میلی‌گرم بر لیتر	۱۹۲±۱/۸۴	۱۰/۸±۰/۱
فسفات کل	میلی‌گرم بر لیتر	۱۲۶±۰/۸۱۶	۱۲۵±۱۰/۷۵

بدین وسیله از تمامی عزیزانی که در اجرای این پژوهش یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض در منافی در پژوهش حاضر وجود ندارد.

سهم نویسندگان

همه نویسندگان در ایده پردازی و انجام طرح، همچنین نگارش اولیه مقاله یا بازنگری آن سهیم بودند و همه با تأیید نهایی مقاله حاضر، مسئولیت دقت و صحت مطالب مندرج در آن را می‌پذیرند.

منابع مالی

این پژوهش تحت حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی آجا انجام شده است.

عملکرد بهتر این سیستم نسبت به پژوهش‌های پیشین را نشان می‌دهد. مهمترین عامل برتری این نتایج، راهبری بهتر پیل در طول آزمایشات، سطح مقطع آند و سطح مقطع کلی پیل است. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان به کمک این پیل یون‌های نمک درون آب شور را حذف نمود و از این روش به عنوان جایگزین روش‌های متداول نمک‌زدایی استفاده نمود. همچنین، تصفیه پساب درون آند و تولید انرژی در این سیستم موجب می‌گردد که یک فناوری ایده آل برای محیط‌های دارای بحران آب باشد.

براساس نتایج به دست آمده، در حالی که نیتروژن به صورت قابل توجهی کاهش داشته (۹۴٪)، مقدار حذف فسفات کم بوده است. دلیل این امر نزدیکی نسبت حذف ترکیبات به نسبت ردیفیلد (مقدار C:N:P برابر است با ۱:۱۶:۱۰۶) است. نتایج آنالیز جریان خروجی که در جدول ۳ ارائه شده است، نشان می‌دهد که ترکیب نهایی برای ورود و تصفیه در تصفیه خانه‌های فاضلاب متعارف مناسب است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با کد IR.AJAUMS.REC.1400.014 در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی آجا به تأیید رسیده است.

References

- Kokabian B, Ghimire U, Gude VG. Water deionization with renewable energy production in microalgae-microbial desalination process. *Renewable energy*. 2018;122:354-361. doi:10.1016/j.renene.2018.01.061
- Cheng S, Liu H, Logan BE. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry communications*. 2006;8(3):489-494. doi:10.1016/j.elecom.2006.01.010
- Cao X, Huang X, Liang P, Xiao K, Zhou Y, Zhang X, et al. A new method for water desalination using microbial desalination cells. *Environmental science & technology*. 2009;43(18):7148-7152. doi:10.1021/es901950j
- Zamanpour MK, Kariminia H-R, Vosoughi M. Electricity generation, desalination and microalgae cultivation in a biocathode-microbial desalination cell. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017;5(1):843-848. doi:10.1016/j.jece.2016.12.045
- Khoirunnisa N, Anwar S, Sudadi U, Santosa D. Effect of organic substrate type in electricity production from microbial fuel cell (MFC) inoculated by *Staphylococcus saprophyticus* ICBB 9554. Paper presented at: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021.
- Penteado ED, Fernandez-Marchante CM, Zaiat M, Cañizares P, Gonzalez ER, Rodrigo MA. Influence of sludge age on the performance of MFC treating winery wastewater. *Chemosphere*. 2016;151:163-170. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.01.030
- Inglesby AE, Beatty DA, Fisher AC. *Rhodospseudomonas palustris* purple bacteria fed *Arthrospira maxima* cyanobacteria: demonstration of application in microbial fuel cells. *Rsc advances*. 2012;2(11):4829-4838. doi:10.1039/C2RA20264F
- Kokabian B, Gude VG. Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells. *Chemical engineering journal*. 2015;262:958-965. doi:10.1016/j.cej.2014.10.048
- Luo H, Xu P, Roane TM, Jenkins PE, Ren Z. Microbial desalination cells for improved performance in wastewater treatment, electricity production, and desalination. *Bioresource technology*. 2012;105:60-66. doi:10.1016/j.biortech.2011.11.098

10. Zhang B-G, Zhou S-G, Zhao H-Z, Shi C-H, Kong L-C, Sun J-J, et al. Factors affecting the performance of microbial fuel cells for sulfide and vanadium (V) treatment. *Bioprocess and biosystems engineering*. 2010;33:187-194. doi:10.1007/s00449-009-0312-2
11. Yavari Z, Tashauoei H, Naddafi K, Izanloo H, Khazae M, Mahmoodian M. Electricity generation from synthetic wastewater treatment in microbial fuel cell. *Qom University of Medical Sciences Journal*. 2012;6(4):96-103. [Persian]
12. Gholizadeh A, Ebrahimi AA, Salmani MH, Ehrampoush MH. Ozone-cathode microbial desalination cell; an innovative option to bioelectricity generation and water desalination. *Chemosphere*. 2017;188:470-477. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.09.009
13. Rismani Yazdi H, Christy AD, Dehority BA, Morrison M, Yu Z, Tuovinen OH. Electricity generation from cellulose by rumen microorganisms in microbial fuel cells. *Biotechnology and bioengineering*. 2007;97(6):1398-1407. doi:10.1002/bit.21366
14. Strik DP, Terlouw H, Hamelers HV, Buisman CJ. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC). *Applied microbiology and biotechnology*. 2008;81:659-668. doi:10.1007/s00253-008-1679-8
15. Ghorbani R, Vince O. Phosphate and nitrate removal from municipal wastewater by algae *Scenedesmus obliquus* cultivation and production of algal biomass. *Journal of aquatic ecology*. 2016;5(4):33-39. [Persian]
16. Chen L, Neibling H. Anaerobic digestion basics. *University of Idaho extension*. 2014;6:1-6.
17. 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 conversion and management*. 2017;141:101-107. doi:10.1016/j.enconman.2016.05.050
18. Saeed HM, Hussein GA, Yousef S, Saif J, Al-Asheh S, Fara AA, et al. Microbial desalination cell technology: a review and a case study. *Desalination*. 2015;359:1-13. doi:10.1016/j.desal.2014.12.024
19. Powell EE, Mapiour ML, Evitts RW, Hill GA. Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell. *Bioresource technology*. 2009;100(1):269-274. doi:10.1016/j.biortech.2008.05.032
20. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*. 2007;25(3):294-306. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
21. Tu R, Jin W, Xi T, Yang Q, Han S-F, Abomohra AE-F. Effect of static magnetic field on the oxygen production of *Scenedesmus obliquus* cultivated in municipal wastewater. *Water research*. 2015;86:132-138. doi:10.1016/j.watres.2015.07.039
22. Mohammed T, Ahmed WH, Singh A. Evaluating the use of airlift pumps for bioreactor applications. Paper presented at: Proceedings of the 4th International Conference of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer 2017; Toronto, Canada.
23. Zhou M, He H, Jin T, Wang H. Power generation enhancement in novel microbial carbon capture cells with immobilized *Chlorella vulgaris*. *Journal of power sources*. 2012;214:216-219. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.04.043
24. Kazbar A, Cogne G, Urbain B, Marec H, Le-Gouic B, Tallec J, et al. Effect of dissolved oxygen concentration on microalgal culture in photobioreactors. *Algal research*. 2019;39:1-11. doi:10.1016/j.algal.2019.101432
25. Saba B, Christy AD. Comparison of biological catholyte to chemical catholyte in microbial desalination cells. Paper presented at: 2015 ASABE Annual International Meeting 2015.
26. Ashwaniy V, Perumalsamy M. Reduction of organic compounds in petro-chemical industry effluent and desalination using *Scenedesmus abundans* algal microbial desalination cell. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017;5(6):5961-5967. doi:10.1016/j.jece.2017.11.017
27. Kokabian B, Smith R, Brooks JP, Gude VG. Bioelectricity production in photosynthetic microbial desalination cells under different flow configurations. *Journal of industrial and engineering chemistry*. 2018;58:131-139. doi:10.1016/j.jiec.2017.09.017
28. Girme GM, Faze N, Bower T, Christy AD. Algae powered microbial desalination cells. Paper presented at: 2014 Montreal, Quebec Canada July 13–July 16, 2014; Canada
29. Saba B, Christy AD, Yu Z, Co AC, Park T. Simultaneous power generation and desalination of microbial desalination cells using *Nannochloropsis salina* (marine algae) versus potassium ferricyanide as catholytes. *Environmental engineering science*. 2017;34(3):185-196. doi:10.1089/ees.2016.0291