Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 15, No. 4, 2025, p. 605-617

Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell

Sh. Shokri [1], V. Rostampour [1*], K. Mollazade [2], S. Amiri [3], A. Fathoolahi Qharachapogh [4]

1- Department of Mechanical Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
3- Department of Food Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
4- Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: v.rostampour@urmia.ac.ir)

Received: 01 January 2025
Revised: 19 January 2025
Accepted: 27 January 2025
Available Online: 27 July 2025

How to cite this article:
Shokri, Sh., Rostampour, V., Mollazade, K., Amiri, S., & Fathoolahi Qharachapogh, A. (2025). Investigating the Effect of Sodium Acetate Substrate Concentration and Oxygenation Rate on System Voltage and Pollution Removal in a Plant Microbial Fuel Cell. *Journal of Agricultural Machinery, 15*(4), 605-617. https://doi.org/10.22067/jam.2025.91299.1326

Introduction

The increasing global population has intensified the demand for sustainable energy solutions. Meeting this need requires leveraging renewable energy sources that also address pollution management and reduce greenhouse gas emissions. Plant microbial fuel cells (PMFCs) have gained attention as innovative systems that produce electricity by decomposing organic matter in their anodic chambers, providing a dual benefit of clean energy generation and environmental remediation. These systems align closely with global sustainable development goals and represent a novel approach to energy production from organic materials.

Materials and Methods

This research focused on a plant microbial fuel cell system designed to contribute to sustainable development objectives. The system employed Cyperus plant and Shewanella oneidensis microorganisms to decompose organic substrates, including carbohydrates secreted by plant roots or other external sources, within the anodic chamber. Voltage output was measured using a voltage sensor connected to an Arduino UNO board, with data collected at two-hour intervals. The experiment investigated the effects of two parameters: oxygenation rate in the cathodic chamber and sodium acetate concentration in the anodic chamber, on the system performance.

Results and Discussion

The results revealed significant effects of both oxygenation and sodium acetate concentrations on the voltage output of the PMFC system. Increasing the oxygenation rate from 0 to 1 liter per minute enhanced the voltage output from 103 mV to 185 mV. Similarly, increasing sodium acetate concentration from 0 to 10 g L^{-1} raised the voltage from 103 mV to 170 mV. Furthermore, pollution removal efficiency was evaluated using chemical and biological oxygen demand (COD and BOD) measurements. At the highest levels of sodium acetate concentration (20 g L^{-1}) and oxygenation rate (3 L min^{-1}), the pollution removal rate reached 90%. These findings underscore the capability of PMFCs to combine energy production with effective environmental cleanup.

Conclusion

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2025.91299.1326

The microbial-plant fuel cell system demonstrates considerable potential as a dual-purpose solution for renewable energy generation and pollution removal. Its high efficiency in utilizing microorganisms and plants for these tasks suggests that it could play a critical role in sustainable development. Future research should focus on addressing the system's limitations and enhancing its scalability and reliability to support broader applications in renewable energy and environmental remediation.

Keywords: Cyperus plant, Plant microbial fuel cell, Phytoremediation, Pollution removal, Renewable energy, Shewanella oneidensis

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ٤، زمستان ١٤٠٤، ص ٦١٧-٦٠٥

بررسی اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن‌دهی بر ولتاژ سیستم و رفع آلایندگی در پیل سوختی میکروبی-گیاهی

شهریار شکری[۱]، وحید رستم‌پور[۱*]، کاوه ملازاده[۲]، صابر امیری[۳]، ایوب فتح‌الهی قره‌چپوق[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت جهان، نیاز صنعت به تامین انرژی و یافتن راهکارهای تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر و همچنین توجه به ماهیت منابع انرژی تجدیدپذیر اعم از مدیریت آلایندگی و کاهش گازهای گلخانه‌ای از اهمیت فراوانی برخوردار است. سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی همانند پیل سوختی میکروبی با تجزیه مواد آلی موجود در محفظه آندی توانایی تولید انرژی الکتریسیته از مواد آلی را دارا می‌باشد. سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی مورد تحقیق در این پژوهش، سیستمی نوپا است که می‌تواند در راستای محقق نمودن اهداف توسعه پایدار به‌کار گرفته شود. این سیستم به کمک ریزسازواره‌های موجود در محفظه آندی، مواد کربوهیدراتی، که به‌وسیله ریشه گیاه و یا مواد آلی دیگر در محیط کشت گیاه قرار می‌گیرند، را تجزیه کرده و تولید انرژی الکتریسیته می‌نماید. در این پژوهش پیل‌های سوختی میکروبی-گیاهی با به‌کارگیری گیاه سیپروس و همچنین ریزسازواره‌های شوانیلا آنودینس طراحی و راه‌اندازی شد و تاثیرات دو پارامتر میزان اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی و میزان تلقیح سوبسترای استات سدیم به محفظه آندی بر ولتاژ خروجی پیل مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. همچنین میزان رفع آلایندگی بستر نیم پیل آندی به کمک اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی گزارش گردید. در بهینه‌ترین حالت این پارامترها، ولتاژ ۲۹۰mV و میزان رفع آلایندگی ۹۰ درصد به ثبت رسید.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، باکتری شوانیلا آنودینس، گیاه‌پالایی، گیاه سیپروس

مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون مبحث انرژی و همچنین توجه به تاثیرات مخرب منابع انرژی فسیلی بر محیط‌زیست و سلامت انسان، تحقیق در زمینه ارائه منابع انرژی تجدیدپذیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Doosti & Asakereh, 2025). سازمان ملل متحد به‌منظور تحقق اهداف توسعه پایدار طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، هفده هدف را اولویت‌بندی کرده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نبود فقر، پایان دادن به گرسنگی، ارتقای سطح کیفی زندگی، آموزش با کیفیت، برابری، آب سالم و بهداشتی، تامین انرژی پاک در دسترس و مسایل زیست‌محیطی اشاره نمود. بنابراین، سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی از طریق تامین انرژی پاک، مدیریت پساب‌ها و حفظ بهداشت محیط و همچنین کاهش آلایندگی آب به توسعه پایدار کمک می‌نماید (Mishra *et al.*, 2024).

پیل‌های سوختی میکروبی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که توانایی تولید انرژی الکتریکی پاک و تجدیدپذیر دارا می‌باشد. به دلیل توانایی این سیستم در تجزیه مواد آلی آلوده‌کننده محیط‌زیست، این سیستم سازگاری خوبی با محیط‌زیست دارد. سیستم پیل سوختی از ترکیب مستقیم سوخت و عامل اکسیدکننده بدون ایجاد آلودگی، انرژی الکتریسیته را تولید می‌کند. در طول دو دهه

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳- گروه صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴- گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: v.rostampour@urmia.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2025.91299.1326

گذشته، فناوری سلول سوختی میکروبی به دلیل تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی به سرعت رشد کرده است. استفاده از این فناوری به دلیل استفاده از منابع ارزان و در دسترس برای تامین سوخت خود و همچنین تولید انرژی و سوخت با ارزشی همانند گاز هیدروژن و نیز قابلیت به‌کارگیری به‌منظور تصفیه فاضلاب‌ها و رفع آلایندگی‌های آب، توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی دارد (Logan, 2009).

گیاه‌پالایی یا رفع آلایندگی به کمک گیاهان روشی مرسوم در رفع آلایندگی محیط و بستر کشت گیاه می‌باشد. در این روش از توانایی گیاهان مختلف برای رفع و تثبیت آلایندگی در محیط استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال گیاهان خانواده غلات توانایی گرفتن نیتروژن از هوا و تثبیت آن در خاک را دارند. گیاهان خانواده نخل مرداب با توجه به رزوم گیاهی خود توانایی تولید آنزیم‌هایی برای شکسته شدن پیوندهای شیمیایی مواد آلی و همچنین تثبیت این مواد در اندام خود را دارا می‌باشند. به‌کارگیری گیاهان خانواده سیپروس به‌منظور رفع آلایندگی، برای اولین بار در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی توسط تیمیرس و همکاران (Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2013) انجام گرفت. هدف از به‌کارگیری گیاه سیپروس توسط تمیرس و همکاران تامین مواد هیدروکربنی باکتری‌ها در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی بود که بعداً با تحقیقات محققان توانایی این گیاهان در رفع آلایندگی به اثبات رسید (Yadav, Srivastava, Yadav, & Kumar, 2024).

پیل سوختی میکروبی-گیاهی نوع خاصی از پیل‌های سوختی می‌باشد که از توانایی ریزسازواره‌ها[1] در تجزیه موادآلی هیدروکربنی و همچنین از گیاه به‌عنوان منبع تأمین‌کننده مواد آلی مورد استفاده این ریزسازواره‌ها، برای تولید انرژی الکتریسیته بهره می‌گیرد. در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی، گیاه به‌عنوان منبع تولیدکننده سوخت مورد استفاده ریزسازواره‌ها به‌کار گرفته می‌شود و با توجه به این‌که رشد و رویش گیاه را می‌توان منبع تجدیدپذیر در نظر گرفت انتظار می‌رود پیل سوختی میکروبی-گیاهی در آینده نزدیک به‌عنوان منبع تجدیدپذیر انرژی الکتریسیته نقش مهمی را ایفا کند (Helder *et al.*, 2013).

باکتری شوانیلا آنودینس[2] به‌عنوان یک میکروارگانیسم الکتروژن، نقش مهمی در تولید الکتریسیته در پیل‌های سوختی میکروبی ایفا می‌کند. این باکتری قادر است الکترون‌ها را از طریق پروتئین‌های فعال الکتروشیمیایی مانند سیتوکروم‌های موجود بر روی غشای خارجی خود، مستقیماً به الکترود منتقل کند. در پژوهش‌های تولید الکتریسیته به کمک پیل‌های سوختی میکروبی از باکتری شوانیلا آنودینس گرم منفی به‌عنوان یکی از باکتری‌های تجزیه‌کننده مواد آلی و تولیدکننده الکترون استفاده کردند؛ مزیت‌های استفاده از باکتری شوانیلا آنودینس طبق گزارش‌های محققان (Helder *et al.*, 2013; Timmers *et al.*, 2013) خاکزی بودن این سویه و همچنین خطر انسانی کمتر عنوان شده است. لوگان (Logan, 2008) و همچنین تمیرس و همکاران (Timmers *et al.*, 2013) از باکتری شوانیلا به‌عنوان ریزسازواره فعال در سیستم پیل سوختی میکروبی استفاده کردند.

گیاه سیپروس[3]، به‌ویژه گونه‌های آبزی آن، به دلیل تولنایی در رشد در محیط‌های غرقابی و تولید زیست‌توده بالا، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در پیل‌های سوختی میکروبی-گیاهی محسوب می‌شود. این گیاهان از گونه باریک برگ‌ها در دسته گیاهان فتوسنتزی C4 می‌باشد که می‌توانند با ریشه‌های خود اکسیژن را به ناحیه ریزوسفری منتقل کرده و شرایط مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های الکتروژن فراهم کنند. این میکروارگانیسم‌ها قادرند مواد آلی ترشح‌شده توسط ریشه‌ها را اکسید کرده و الکترون‌های حاصل را به الکترود آند منتقل کنند که در نهایت منجر به تولید الکتریسیته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از گیاهان آبزی در سیستم‌های ترکیبی تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی می‌تواند راندمان تصفیه پساب و تولید برق را افزایش دهد (Helder *et al.*, 2013). آقابابایی و همکاران (Aghababaie, Farhadian, Jeihanipour, & Biria, 2015) بر روی عوامل تاثیرگذار بر انرژی پیل سوختی میکروبی-گیاهی تحقیق کردند و اندازه الکترودها، غلظت مواد کربوهیدراتی، نوع باکتری مورد استفاده و ساختار پیل سوختی میکروبی را از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر پیل سوختی میکروبی-گیاهی گزارش دادند.

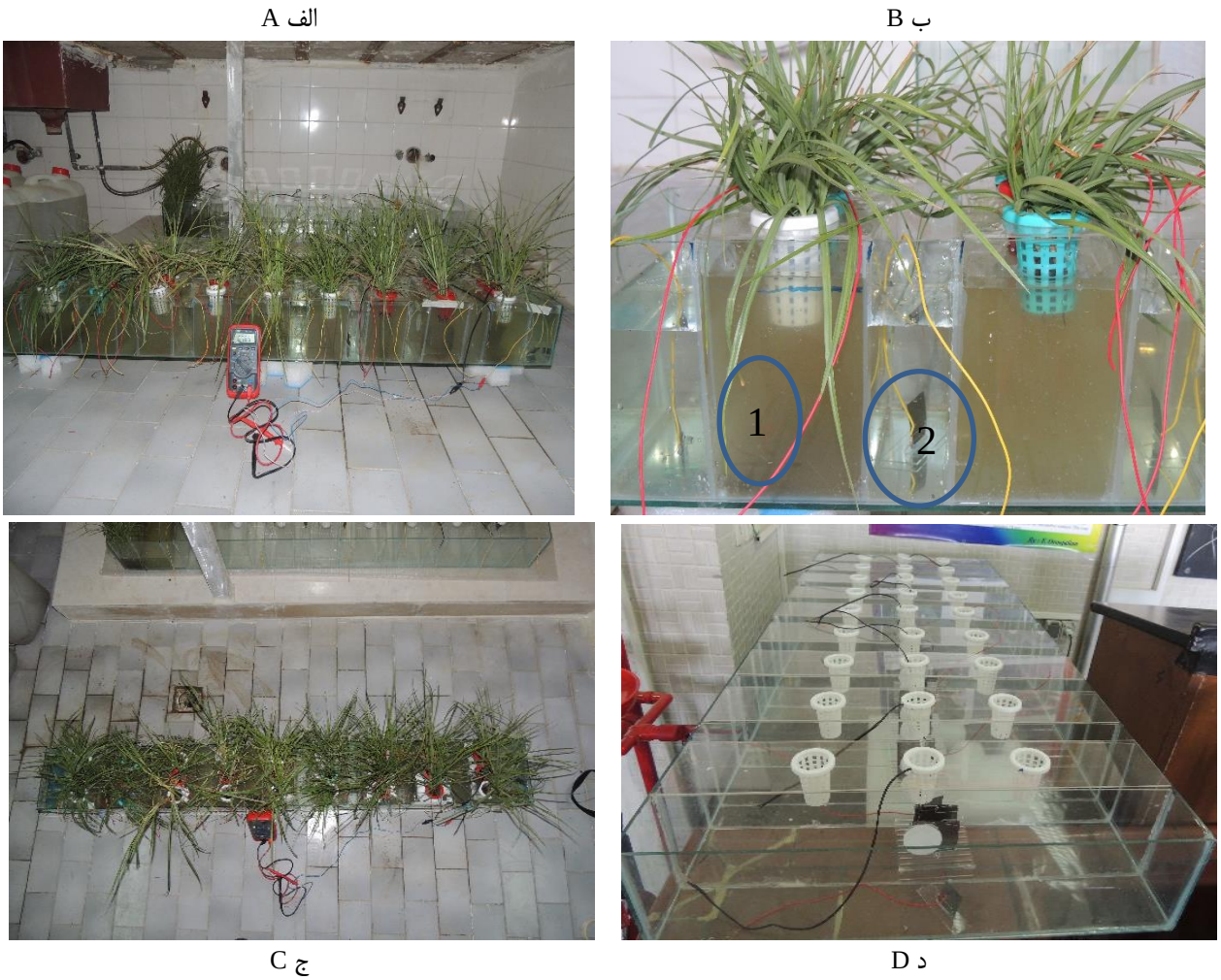
در این پژوهش یک سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی دومحفظه‌ای با به‌کارگیری گیاه سیپروس و باکتری شوانیلا آنودینس راه‌اندازی شد. هدف از انجام این پژوهش سنجش تاثیر عوامل موثر بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی شامل اثر غلظت سوبسترا استات سدیم و میزان اکسیژن‌دهی و همچنین بررسی تاثیر این عوامل بر توانایی سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی در رفع آلایندگی محیط کشت گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پیل سوختی میکروبی-گیاهی مورد استفاده به‌صورت دو محفظه‌ای (دو محفظه‌ی مجزای آندی و کاتدی) با الکترود گرافیت ۹۹ درصد خلوص با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌مترمربع تهیه‌شده از شرکت نانو بازار ایران ساخته شد. این دو محفظه با حجم‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر، از جنس شیشه به‌صورت کامل آب‌بندی شده و فقط به‌وسیله غشای

1- Micro organism
2- Shewanella oneidensis
3- Cyperus

تبادل یونی با هم در ارتباط بودند (شکل ۱). همچنین از غشای تبادل پروتونی[1] ۰/۲ µm ساخت کشور فرانسه، شرکت مبرانس فیلتر استفاده گردید.



شکل ۱- پیل سوختی میکروبی-گیاهی راه‌اندازی‌شده: الف- تعداد ۹ تیمار بارگذاری‌شده، ب(۱)- نیم پیل آندی، ب(۲) نیم پیل کاتدی، ج- تصویر پیل کامل، د- پیل سوختی میکروبی گیاهی قبل از راه‌اندازی

Fig. 1. Plant microbial fuel cell startup: A- 9 loaded treatments, B(1)- Anodic half-cell, B(2)- Cathodic half-cell, C- Image of the complete cell, and D- Plant microbial fuel cell before startup

به‌منظور بررسی اثرات دو متغیر اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی و استات سدیم تزریقی به محفظه آندی، پیل سوختی میکروبی-گیاهی ساخته‌شده مطابق جدول ۱ در نه تیمار بارگذاری شد. عدد مربوط به تیمار که عدد دو رقمی است بیان‌کننده سطح استات و اکسیژن هر تیمار می‌باشد به‌صورتی‌که عدد یکان مربوط به سطح اکسیژن و عدد دهگان مربوط به سطح استات می‌باشد، به‌عنوان مثال تیمار ۱۱ گویای کمترین سطح اکسیژن و کمترین سطح استات است و همچنین تیمار ۲۳ گویای بیشترین سطح اکسیژن $3\ L\ min^{-1}$ و سطح استات $10\ g\ L^{-1}$ به منظور تنظیم سطح‌های مختلف اکسیژن‌دهی پمپ دمنده اکسیژن دارای کلید تنظیم‌کننده توان پمپاژ سه‌حالته بود که در حالت کم، اکسیژن پمپاژی $1\ L\ min^{-1}$ و در بیشترین توان اکسیژن دمیده‌شده برابر $3\ L\ min^{-1}$ بود همچنین سطح‌های استات با غلظت‌های $10\ g\ L^{-1}$ و ۲۰ از قبل آماده شد و به نیم پیل آندی اضافه گردید.

1- Polytetrafluoroethylene

سطح اکسیژن و استات سدیم با توجه به یافته‌های لوگان (Logan, 2009) انتخاب گردید. لوگان گزارش داده بود با توجه به نسبت حجمی محفظه کاتد به آند که در این تحقیق ۱ به ۳ است میزان اکسیژن می‌تواند از ۱ تا ۳ لیتر در نظرگرفته شود با توجه به اهداف این تحقیق که بررسی اثر اکسیژن بر توان پیل سوختی میکروبی-گیاهی می‌باشد. سطح پایین‌تر اکسیژن صفر و سطح بالاتر اکسیژن $3\ L\ min^{-1}$ در نظر گرفته شد. سطح استات سدیم هم با توجه به مول‌های آزادسازی الکترون توسط لوگان انتخاب شد. لوگان گزارش داد به‌ازای هر مول هیدروکربن ۱۲ تا ۲۴ مول الکترون آزاد می‌شود از این‌رو میزان استات سه سطح $0\ g\ L^{-1}$، ۱۰ و ۲۰ در نظر گرفته شد (Logan, 2009).

جدول ۱- تیمارها و میزان اکسیژن‌دهی و استات سدیم اعمالی در هرکدام از تیمارها

Table 1- Treatments and amount of oxygenation and sodium acetate application in each treatment

تیمار Treatment	11	12	13	21	22	23	31	32	33
استات Acetate ($g\ L^{-1}$)	0	10	20	0	10	20	0	10	**20**
اکسیژن Oxygen ($L\ min^{-1}$)	0	0	0	1	1	1	3	3	**3**

گیاه سیپروس، که گیاه مردابی می‌باشد، از دریاچه زریبار واقع در شهر مریوان، استان کردستان تهیه گردید و به محل آزمایشگاه بیوتکنولوژی گروه صنایع غذایی دانشگاه ارومیه انتقال داده شد. این گیاه چون در محیط خاکی و مردابی رشد کرده بود؛ برای استفاده در سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی به روش شستشوی بیولوژیکی استریل شد تا از آلوده کردن محیط آندی با ریزسازوره‌های متنوع جلوگیری به‌عمل آید. روش‌های شستشو مرحله‌ای، مورد استفاده شامل آب مقطر، آب ژاول ۵ درصد، اتانول ۷۰ درصد و همچنین استفاده از اشعه ماورابنفش به مدت ۲۰ دقیقه بود. در هر تیمار تعداد ۱۰ بوته گیاه سیپروس با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در هر آزمایش قرار داده شد (Fedosenko-Becker, 2019).

برای اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی، یک پمپ هوادهی آکواریومی با توان $3L\ min^{-1}$ ساخت کشور چین مدل AP-320 در خارج از سیستم به‌وسیله شلنگ هوادهی به محفظه کاتدی وصل گردید. برای تامین میزان اکسیژن متفاوت و سنجش تاثیر اکسیژن بر خروجی سیستم، از سه سطح متفاوت بدون اکسیژن، اکسیژن $1L\ min^{-1}$ و همچنین اکسیژن $3L\ min^{-1}$ استفاده شد (Aghababaie *et al.*, 2015).

در محفظه کاتدی از محلول بافر فسفات $10g.L^{-1}$ به‌عنوان انتقال‌دهنده نهایی الکترون به اکسیژن استفاده گردید. برای بررسی اثر متغیرهای اکسیژن‌دهی و میزان غلظت استات سدیم بر خروجی ولتاژ پیل‌ها، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی مورد استفاده قرار گرفت و تحلیل یافته‌ها به کمک نرم‌افزار SPSS انجام شد (Feng *et al.*, 2024).

آزمایش‌ها در شرایط کاملاً استریل انجام شد. به‌منظور آماده‌سازی محیط کشت باکتری از دستگاه اتوکلاو با فشار ۱۰ bar به مدت min ۲۰ و دمای ۱۲۰°C استفاده شد. محیط کشت ترپیک سول براث[1] (TSB) برای کشت باکتری از شرکت مرک المان تهیه شد و با غلظت $30g\ L^{-1}$ استریل شد. برای ثبت مقدار ولتاژ خروجی سیستم، از یک ماژول لندازه‌گیری جریان ولتاژ مدل NIA219 همراه یک برد آردوینو جهت ارسال داده‌ها به رایانه استفاده گردید (شکل ۲). داده‌گیری به‌صورت هر دو ساعت یک بار در طول شبانه‌روز و به مدت۲۳ روز انجام گرفت. به‌منظور تحلیل داده‌های آزمایش میانگین ثبت‌شده برای هر روز استفاده گردید زیرا میزان اختلاف پتانسیل در طول شبانه‌روز مقداری ثابت بود.

به‌منظور سنجش میزان غلظت اکسیژن، از دستگاه سنجش اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)[2] و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)[3] مدل WTW استفاده شد. میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی محتوای نیم پیل آندی در شروع آزمایش و نیز با فاصله زمانی هر پنج روز یک بار اندازه‌گیری شد.

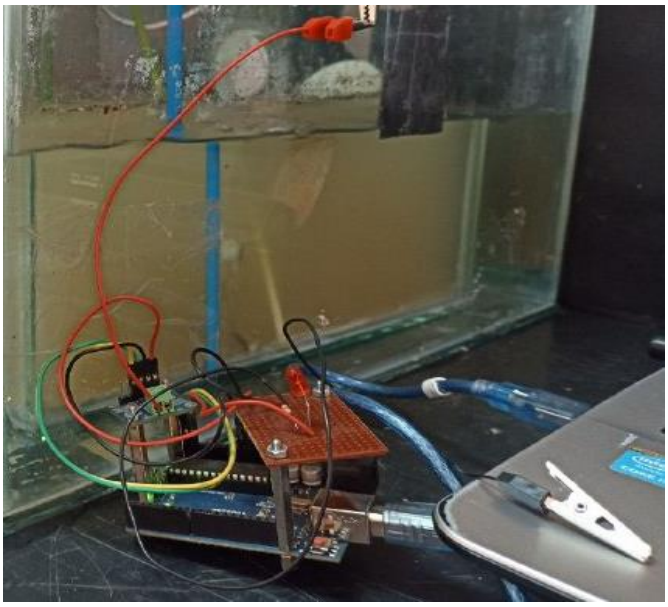
روش اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی با استفاده از دستگاه‌های CODسنج و BODسنج:

برای اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی شیمیایی مقدار مشخصی از نمونه محتویات آندی (۱۰ میلی‌لیتر) لندازه‌گیری شده و در یک لوله واکنش COD قرار گرفت. محلول دی‌کرومات پتاسیم به‌عنوان ماده اکسیدکننده و اسید سولفوریک غلیظ (به‌همراه کاتالیزور نقره) اضافه شد. لوله در دستگاه COD هاضم قرار گرفته و نمونه در دمای ۱۵۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. پس از خنک شدن، نمونه را در دستگاه CODسنج قرار داده و مقدار COD اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی نمونه محتویات آند در یک بطری BODسنج قرار گرفت (معمولاً ۳۰۰ mL). نمونه با

1- Tryptic Soy Broth
2- Chemical Oxygen Demand
3- Biochemical Oxygen Demand

اکسیژن‌دهی اشباع شد تا اکسیژن محلول در نمونه به حداکثر مقدار خود برسد. مقدار اکسیژن محلول اولیه با استفاده از سنسور اکسیژن محلول اندازه‌گیری شد سپس بطری به مدت ۵ روز در دمای استاندارد (۲۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط تاریکی قرار داده شد و پس از ۵ روز، مجدداً مقدار اکسیژن محلول اندازه‌گیری شد. اختلاف بین اکسیژن اولیه و نهایی پس از ۵ روز، مقدار اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی را مشخص می‌کند.



شکل ۲- ماژول اندازه‌گیری ولتاژ و بورد آردونیو مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی

Fig. 2. Voltage measurement module and Arduino board used to measure voltage of the plant microbial fuel cell

رابطه (۱) بازده پیل سوختی میکروبی-گیاهی در رفع آلایندگی با توجه به متغیرها اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی را بیان می‌کند.

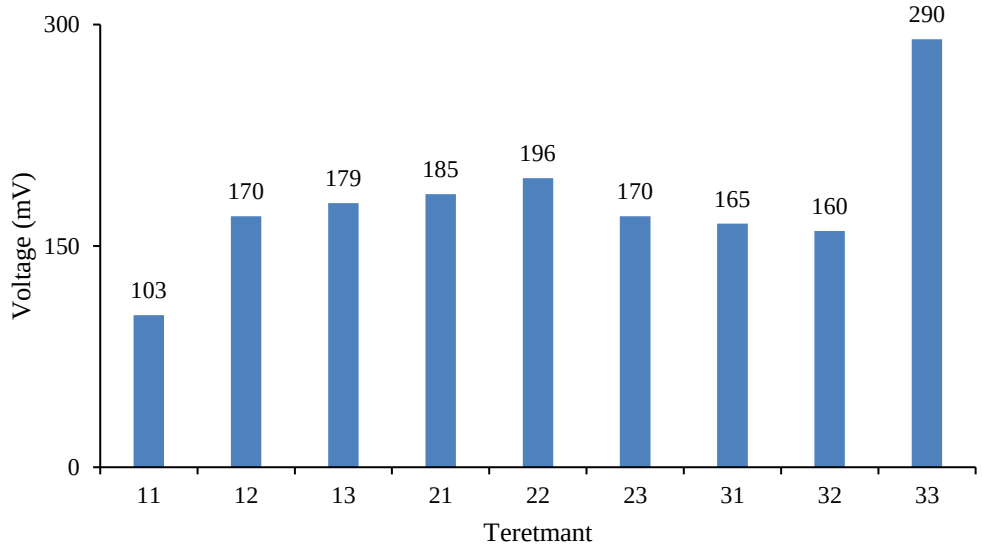
$$\text{بازده رفع آلایندگی} = \frac{\text{مقدار نهایی اکسیژن‌خواهی} - \text{مقدار اولیه اکسیژن‌خواهی}}{\text{مقدار اولیه اکسیژن‌خواهی}} \quad (۱)$$

نتایج و بحث

شکل ۳ بیشینه اختلاف پتانسیل ثبت‌شده در ۹ تیمار در مدت زمان انجام آزمایش را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۳ بیشترین ولتاژ پیل مربوط به تیمار ۳۳ با بیشترین سطح اکسیژن ۳ $L\ min^{-1}$ و استات ۲۰ $g\ L^{-1}$ می‌باشد، این امر به‌دلیل وجود مواد آلی بیشتر در پیل سوختی میکروبی است که موجب فعالیت بیشتر باکتری‌های الکتروژن شده و در پی این مهم، الکترون بیشتری آزاد می‌گردد. بنابراین، به موجب آزادسازی الکترون بیشتر در هر تیمار، اختلاف پتانسیل افزایش پیدا می‌کند همچنین با توجه به اکسیژن بیشتر در محفظه کاتدی پذیرنده نهایی الکترون مورد نیاز فراهم بوده و جریان الکترون و تولید انرژی الکتریکی بهتر صورت می‌گیرد. یافته‌های تحقیق منطبق بر گزارش تمیرس و همکاران (Timmers *et al.*, 2013) می‌باشد؛ تمیرس نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده است به نحوی که در باتلاق‌ها و مرداب‌ها، به دلیل حجم بالای مواد آلی موجود در بستر این مکان‌ها، می‌توان انرژی الکتریسیته قابل‌توجهی برابر $mW\ m^{-2}$ ۲±۱۰ تولید نمود.

با توجه به شکل ۳، مقدار بیشینه نسبی در دو تیمار ۲۲ و ۳۳ مشاهده گردید. چنان‌که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌گردد، این دو تیمار به‌ترتیب مربوط به سطح اکسیژن ۱ $L\ min^{-1}$ و استات ۱۰ $g\ L^{-1}$ و همچنین سطح اکسیژن ۳ $L\ min^{-1}$ و استات ۲۰ $g\ L^{-1}$ می‌باشد. در تحلیل این مهم می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش مواد آلی در محفظه آندی میزان الکترون آزادشده زیاد می‌شود و به همان نسبتی که الکترون آزاد می‌گردد باید پذیرنده نهایی الکترون، که در اینجا اکسیژن می‌باشد، به محفظه کاتدی تزریق شود که این امر سبب شار الکترون در مدار شده و مقاومت درونی سیستم کاهش پیدا می‌کند. مشابه این نتایج را دی‌لورنزو و همکاران (Di Lorenzo, Thomson, Schneider, Cameron, & Ieropoulos, 2014) گزارش کرده‌اند که در آن محفظه آندی ایزوله، که امکان تبادل آنیون-کاتیون تنها از طریق غشای تبادل‌کننده آنیون-کاتیون برقرار است، بوده و اگر چنان‌چه نشت اکسیژن به محفظه آندی صورت بگیرد، ولتاژ پیل سوختی کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به شکل ۴، در حالت بدون اعمال استات سدیم، افزایش سطح اکسیژن از صفر به ۱ L min^{-1}، ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی را از ۱۰۳mV به ۱۸۵ mV افزایش داده است. اما با افزایش اکسیژن از سطح ۱ L min^{-1} به ۳ L min^{-1}، ولتاژ پیل از ۱۸۵به ۱۶۵ mV کاهش داشته است. دلیل این امر را می‌توان به نشت اکسیژن به محفظه آندی نسبت داد. این یافته‌ها منطبق بر یافته‌های دی لرنزو و همکاران می‌باشد (Di Lorenzo *et al.*, 2014). در سطح اکسیژن صفر، افزایش سطح استات از ۰ به ۱۰ g L^{-1}، ولتاژ پیل را از ۱۰۳ به ۱۷۰ mV افزایش داد. همچنین در سطح اکسیژن ۱ L min^{-1}، با افزایش سطح استات از ۱۰ به ۲۰g L^{-1}، ولتاژ پیل از ۱۸۵به ۱۹۶ mV افزایش یافته است. این مهم با توجه به فراوانی مواد مورد مصرف ریزمغذی‌ها، که متقابلاً تجزیه مواد آلی را نتیجه می‌دهد، قابل‌استنتاج می‌باشد. به بیان دیگر، با افزایش مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها، عمل تجزیه این مواد و آزادسازی الکترون افزایش می‌یابد. این یافته‌ها مطابق نتایج گزارش‌شده توسط کاسماز و اکزاچیوگلو (Kacmaz & Eczacioglu, 2024) می‌باشد که در آن گزارش شده است که مواد آلی و هیدروکربنی‌ای که توسط باکتری‌ها تجزیه می‌شود منبع اصلی تولید الکترون می‌باشد و هر اندازه مقدار مواد آلی در دسترس باکتری بیشتر باشد، میزان الکترون تولیدی بیشتر است. در مورد مدت زمان تولید ولتاژ پیل مربوط به هر تیمار، میزان ولتاژ در طول مدت ۲۳ روز اندازه‌گیری شد و حداکثر ولتاژ به ثبت‌رسیده در روز ۱۰ تا ۱۶ در مدت زمان اندازه گیری تیمارها به ثبت رسید بعد از روز شانزدهم روند ثابت ولتاژ با نوسانات ۱۰ تا ۲۰میلی‌ولت در طول اندازه‌گیری مشاهده شد.



شکل ۳- بیشینه ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی به ثبت‌رسیده در طول ۲۳ روز

Fig. 3. Maximum voltage of the plant microbial fuel cell recorded during 23 days

می‌توان دلیل ثابت بودن و نوسانات مشاهده‌شده را وجود گیاه در سیستم عنوان کرد که با توجه به فتوسنتز گیاهی مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها از طریق ریشه گیاه در اختیار باکتری قرار داده شد و در هنگام کاهش عمل فتوسنتز در طول شبانه‌روز نوسانات تجزیه مواد آلی به‌وسیله باکتری‌ها قابل‌استنتاج است مشابه نتایج ذکرشده در تحقیقات هلدر و همکاران (Helder *et al.*, 2013) و تیمرس و همکاران (Timmers *et al.*, 2012) گزارش شده است، هلدر عنوان کرد فتوسنتز گیاهی در طول روز بیشتر از شب است (Kacmaz & Eczacioglu, 2024).

در تحلیل جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) داده‌های ثبت‌شده از ۹ پیل بارگذاری‌شده میزان غلظت سوبسترا استات سدیم و اکسیژن تزریقی به نیم پیل کاتدی تاثیر معنادار بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی در سطح ۱درصد داشت به گونه‌ای که با افزایش استات سدیم و اکسیژن میزان ولتاژ پیل افزایش پیدا می‌کند و همچنین اثرات متقابل نیز معنا دار می‌باشد.

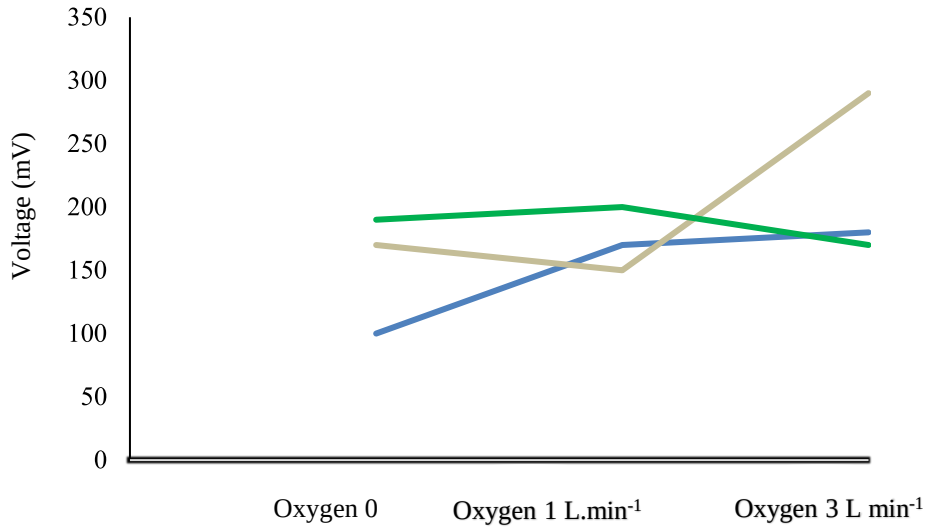
با توجه به شکل ۵، افزایشی بودن نمودار آبی رنگ، که مربوط به تیمارهای بدون تزریق استات سدیم می‌باشد در ابتدا که اکسیژنی به محفظه کاتدی وارد نشده است در پایین‌ترین اختلاف پتانسیل خروجی می‌باشد سپس با پمپاژ اکسیژن به محفظه کاتدی اختلاف پتانسیل به‌صورت قابل‌توجهی افزایش پیدا می‌کند که این امر تاییدکننده تاثیر

اکسیژن‌دهی بر خروجی سیستم می‌باشد زیرا اکسیژن به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون باعث شـار الکترون از محفظه آندی به محفظه کاتدی می‌شود. ذکر این نکته که میزان ابتدایی تولید انرژی در اکسیژن صفر به تجزیه هیدروکربن‌هایی که از ریزوم‌های گیاه و اندام ریشـــه آن در اختیار باکتری‌ها قرارمی‌گیرد برمی‌گردد، حائز اهمیت می‌باشـــد (Di Lorenzo *et al.*, 2014).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس داده‌های ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی و بررسی سطح معنا داری در سطح ۱ و ۵ درصد

Table 2- Results of analysis of variance Voltage data at the 1% level

Source	Variable	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig
Oxegen	Voltage	10914.296	2	5457.148	3.603	0.048
	Current	114.000	2	57/000	3.819	0.041
Acetate	Voltage	15743.185	2	7871.593	5.198	0.017
	Current	164.667	2	82/333	5.516	0.014
Oxegen*Acetate	Voltage	26042.593	4	6510.648	4.299	0.013
	Current	249.333	4	62.333	176.4	0.014
Error	Voltage	27259.333	18	1514.407		
	Current	268.667	18	14.296		
Total	Voltage	889427.000	26			
	Current	8948.000	26			



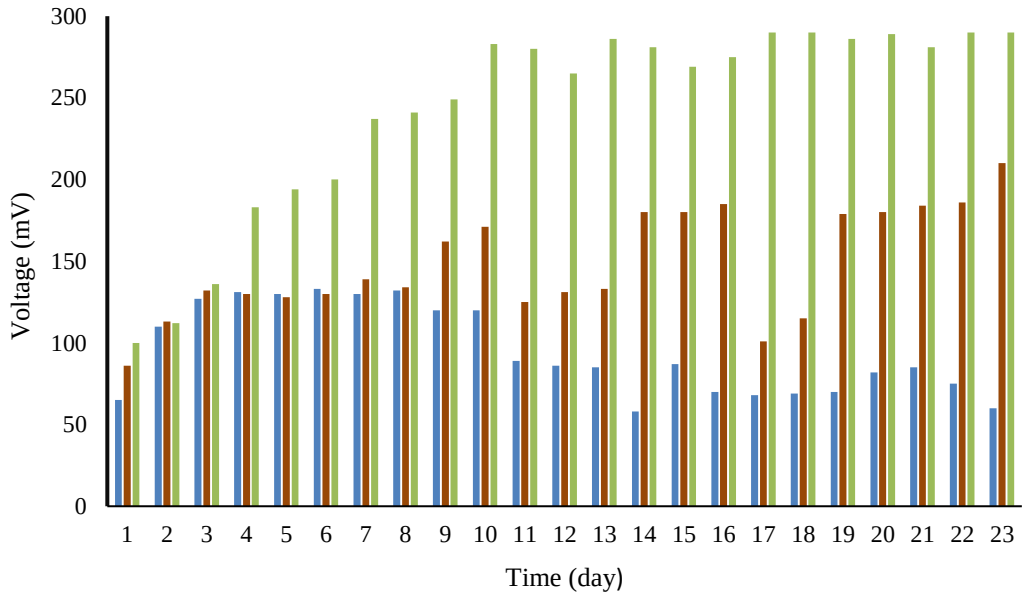
شکل ٤- اثرات متقابل دو متغیر غلظت استات سدیم و اکسیژن بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی-گیاهی (● بدون استات، ● استات ۱۰ گرم بر لیتر، ● استات ۲۰ گرم بر لیتر)

Fig. 4. Mutual effects of sodium acetate and Oxygen concentration variables on plant microbial fuel cell voltage (●without acetate, ●acetate 10 g L^{-1}, and ●acetate 20 g L^{-1})

نمودار سبز رنگ مربوط به استات ۱۰ g L^{-1} می‌باشد. این نمودار با اختلاف مشهودی که با نمودار آبی رنگ (بدون تزریق استات سدیم) دارد بیان‌کننده تاثیر سـوبسـترای تزریق‌شـده در ابتدای راه‌اندازی پیل سـوختی میکروبی-گیاهی می‌باشـد. در ابتدای راه‌اندازی پیل سـوختی میکروبی-گیاهی به علت شـک و تغییر شـرایطی که برای گیاه به‌وجود آمده بود، میزان فتوســنتز و همچنین آزادســازی مواد هیدروکربنی از طریق ریزوم‌های ریشـــه گیاه کم می‌باشـــد و این جواب‌گوی نیاز باکتری‌ها برای تولید انرژی زیاد نمی‌باشـد. اسـتات سـدیم در این‌جا به‌عنوان جبران‌کننده مواد هیدروکربنی عمل کرده و می‌توان میزان تاثیر آن را در مقایسـه دو نمودار آبی رنگ و سـبز رنگ مشـاهده کرد. علت نزولی بودن نمودار سـبز رنگ در سـطح اکسـیژن ۳ L min^{-1} را می‌توان این‌گونه تفســیر کرد که نبود تعادل بین میزان اکســیژن

تزریق‌شده و همچنین تجزیه مواد هیدروکربنی توسط باکتری‌ها باعث کاهش بازده پیل‌ها می‌شـود. به بیان دیگر هر الکترون که از محفظه آندی در اثر تجزیه مواد هیدروکربنی آزاد می‌شـود باید به یک پذیرنده نهایی در محفظه کاتدی برسـد و آن را احیا کند چنان‌چه میزان تزریق و تعادل بین این دو به‌هم بخورد، بازده سـیسـتم و تولید نهایی انرژی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به بازده بالای باکتری شـوانیلا انودینس در حالت بی‌هوازی نسـبت به حالت هوازی می‌توان نشـت اکسـیژن بیشـتر بـه محفظـه آنـدی را نیز بر این کـاهش موثر دانسـت (Golzarian, Ghiasvand, Shokri, Bahreini, & Kazemi, 2024).

نمودار خاکسـتری مربوط به اسـتات $20\ g\ L^{-1}$ می‌باشـد که در آن بیشـترین میزان مواد آلی در اختیار باکتری‌ها قرار گرفته اسـت. در این حالت، میزان ولتاژ پیل سوختی در سطح اکسیژن ۰ تا $1L\ min^{-1}$، روند ثابتی را طی کرده اسـت. این امر به دلیل نبود تعادل بین الکترون تولیدی و اکسیژن پذیرنده آن می‌باشد. زمانی‌که سطح اکسیژن تزریقی بالا می‌رود، میزان شـار و اختلاف پتانسـیل هم افزایش پیدا می‌کنند و نمودار سـیر صـعودی بودن به خود می‌گیرد. نکته قابل‌توجه در اینجا روند صـعودی بودن نمودار مذکور می‌باشـد که با توجه به سـطح دو برابری مواد آلی تزریق‌شـده و همچنین تعادل بین میزان اکسـیژن تزریقی و الکترون تولیدشـده برقرار می‌شـود. به بیان دیگر هر مول الکترون که در نتیجه تجزیه مواد آلی تولید می‌شـود به پذیرنده نهایی الکترون که اکسـیژن می‌باشـد می‌رسـد و واکنش اکسـایش و کاهش اسـتکیومتری رخ می‌دهد که این امر سـبب شـار الکترونی می‌شـود و می‌توان نتیجه گرفت که تولید الکترون و مصـرف آن توسـط اکسـیژن بهینه شـده اسـت که در نتیجه این امر میزان تولید انرژی افزایش پیدا می‌کند. این داده‌ها در بازه زمانی دو هفته‌ای بعد از بارگذاری گلدان‌ها ثبت شده‌اند و چون در این مدت سطح مواد آلی بیشتر از میزان مصرف باکتری‌ها بوده است روند رو به رشد تولید انرژی افزایش داشته است و پیش‌بینی می‌شود همانند دو نمودار قبل، بعد از گذشت مدت زمانی که مواد آلی مصـرف شـود این نمودار نیز سـیر نزولی گرفته و با گذشـت زمان به دو نمودار قبل نزدیک شود.



شکل ۵– نمودار ولتاژ مربوط به سه تیمار با بیشترین مقدار استات (● اکسیژن صفر، ● اکسیژن ۱ لیتر بر دقیقه، ● اکسیژن ۳ لیتر بر دقیقه)

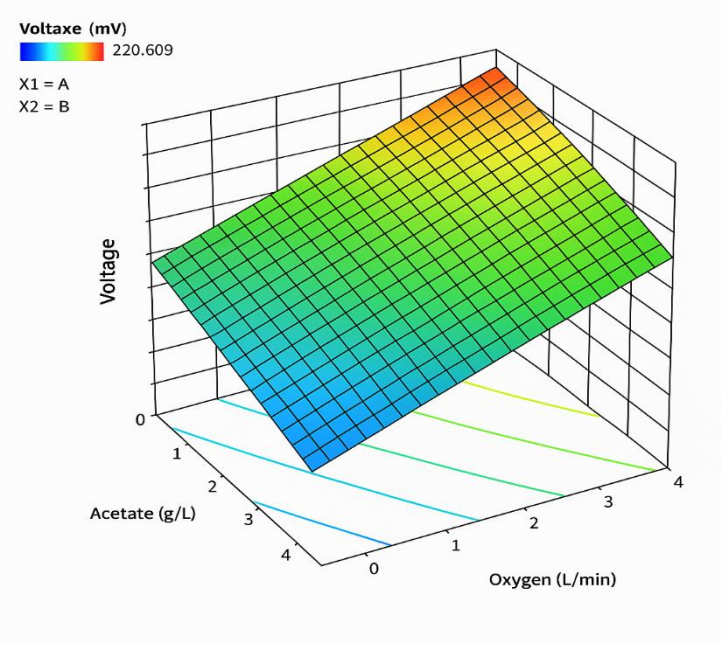
Fig. 5. The voltage diagram related to the three treatments with the highest amount of acetate (●without oxygen, ●oxygen 1 L min^{-1}, and ●oxygen 3 L min^{-1})

در شکل ۵ مقادیر ولتاژ مربوط به سه تیمار ۱۳، ۲۳ و ۳۳ در مدت زمان ۱ تا ۲۳ روز ثبت ولتاژ پیل، گزارش شده است. با توجه به مقدار ولتاژ در روز اول سـه تیمار ولتاژ نزدیک و برابر به هم ثبت کرده‌اند. با گذشت زمان اکسیژن تزریقی به نیم پیل کاتدی تاثیر معنادار بر میزان ولتاژ پیل را نشـان می‌دهد. دی‌لورنزو و همکاران (Di Lorenzo *et al.*, 2014) اکسیژن را به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون در سیستم پیل سوختی میکروبی استفاده کردند و اکسیژن را عامل تاثیرگذار بر میزان تولید انرژی پیل سـوختی میکروبی دو محفظه‌ای گزارش کردند. اکسـیژن مورد اسـتفاده در این تحقیق از طریق پمپاژ هوای محیط به نیم پیل کاتدی تامین گردید این امر با توجه به هزینه کمتر منبع تامین‌کننده اکسیژن نسبت به کپسول خالص اکسیژن هزینه راه‌اندازی پیل سـوختی میکروبی را کاهش می‌دهد اما با توجه به ۲۱ درصـد

اکسیژن موجود در هوا انتظار می‌رود اکسیژن خالص توان پیل سوختی میکروبی–گیاهی را بیشتر کند.

نمودار سبز رنگ با بیشترین سطح ولتاژ مربوط به سطح استات ۲۰ $g\ L^{-1}$ و اکسیژن ۳ $L\ min^{-1}$ می‌باشد و نمودار آبی رنگ مربوط به تیمار با سطح استات ۲۰ $g\ L^{-1}$ و سطح اکسیژن صفر را نشان می‌دهد. در دسترس بودن بیشتر مواد آلی مورد مصرف ریزمغزی‌ها باعث افزایش عمل تجزیه و متقابلا افزایش آزادسازی الکترون توسط باکتری‌ها می‌شود. طبق یافته‌های گلزاریان و همکاران در طی تجزیه هر مول مواد آلی در سیستم پیل سوختی میکروبی–گیاهی ۸ مول الکترون آزاد می‌شود. از این یافته نتیجه می‌شود که هر اندازه مواد آلی بیشتر در دسترس باکتری‌ها قرار گیرد، میزان الکترون بیشتر و متقابلا انرژی الکتریسیته بیشتر تولید می‌شود (Golzarian *et al.*, 2024).

در شکل ۶ نمودار سه‌بعدی تاثیر اکسیژن‌دهی به محفظه کاتدی و تزریق استات سدیم به نیم پیل کاتدی بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی میکروبی–گیاهی آورده شده است. از این نمودار استنتاج می‌شود که با افزایش هر دو متغیر اکسیژن‌دهی و غلظت اعمالی استات سدیم، ولتاژ پیل افزایش می‌یابد. در شکل ۶ میانگین ولتاژ هر تیمار گزارش شده است



شکل ٦– نمودار سه‌بعدی تاثیر اکسیژن‌دهی و غلظت اعمالی استات سدیم بر ولتاژ پیل سوختی میکروبی–گیاهی (در این نمودار، میانگین ولتاژ هر تیمار گزارش شده است)

Fig. 6. Three-dimensional diagram of the effect of Oxygenation and applied concentration of sodium acetate on the voltage of the plant microbial fuel cell (In this diagram, the average voltage of each treatment is reported)

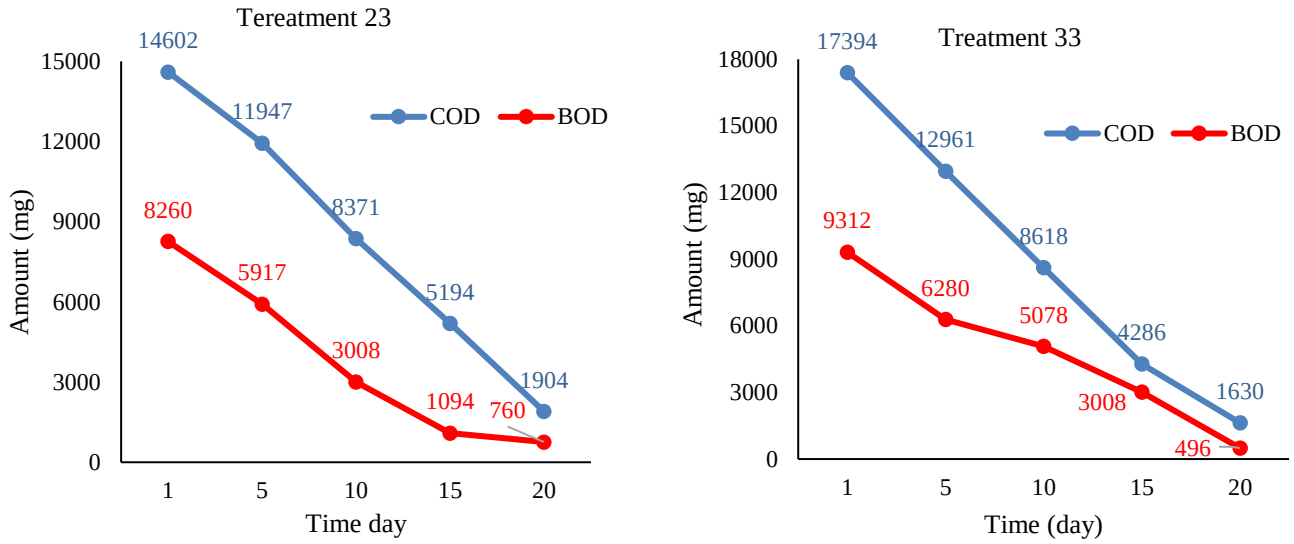
نتایج رفع آلایندگی بر اساس اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD):

با توجه به سنجش میزان اکسیژن‌خواهی محلول داخل محفظه آند می‌توان میزان آلایندگی مواد هیدروکربنی موجود در نیم پیل آندی را اندازه‌گیری کرد. از این‌رو هر اندازه میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی و بیولوژیکی محلولی بالا باشد، مقدار آلایندگی آن زیاد بوده است و در صورت رهاسازی در محیط موجب آلایندگی زیستی می‌گردد در شکل ۷ میزان اکسیژن‌خواهی برای محلول نیم پیل آندی مربوط به دو تیمار با بیشترین سطح استات سدیم (تیمارهای ۲۳ و ۳۳) گزارش شده است.

با توجه به نمودارهای تغییرات اکسیژن‌خواهی در هر دو تیمار، کاهش مواد آلی استنتاج می‌شود. از این‌رو می‌توان عنوان داشت سیستم پیل سوختی میکروبی–گیاهی قابلیت کاهش مواد آلی و در نتیجه رفع آلایندگی از بستر رشد گیاه خود را دارا می‌باشد. کاهش آلایندگی به سبب فعالیت میکروارگانیسم شوانیلا انودینس و همچنین گیاپالایی و تولیایی گیاه سیپروس در تثبیت آلایندگی در لندام خود می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱) بازده رفع آلایندگی بر اساس اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) برای تیمار ۲۳ برابر ۸۶ درصد و برای تیمار ۳۳ برابر ۹۰ درصد بوده است. رفع آلایندگی بر اساس اکسیژن‌خواهی

بیولوژیکی (BOD) برای تیمار ۲۳ برابر ۹۰ درصـــد و برای تیمار ۳۳ برابر ۹۸ درصـد به‌دســت آمد. این دو تیمار بیشـترین رفع الایندگی را ثبت نموده‌اند.



شکل ۷- نمودار میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) مربوط به دو تیمار با بیشترین سطح استات سدیم (۲۳،۳۳)

Fig. 7. Chemical oxygen demand (COD) and biological Oxygen demand (BOD) graphs related to two treatments with the highest levels of sodium acetate (treatments no. 23 and 33)

نتیجه‌گیری

باتوجه به آزمایش‌های انجام‌گرفته می‌توان نتیجه گرفت که میزان مواد آلی موجود در محیط آنـدی پیـل ســوختی میکروبی-گیـاهی به‌صورت مستقیم بر تولید انرژی از این نوع پیل‌ها تاثیرگذار می‌باشد. اما نکات قابل‌توجه در این مورد نوع مواد آلی باید متناســب با باکتری مورد اسـتفاده، انتخاب شـود. زیرا باکتری‌هایی موجود می‌باشـند که توانایی تجزیه مواد آلی با زنجیره بلند هیدروکربنی و یا ترکیبات قوی‌تر را دارا نمی‌باشـند. لذا، باید مواد ســاده‌تری که قابلیت تجزیه آسان‌تری به‌وسیله آنزیم‌های این باکتری‌ها را دارا می‌باشند به‌عنوان منبع اضـافه مواد آلی مورد اسـتفاده قرار گیرد. در سـیسـتم‌های پیل سـوختی میکروبی-گیاهی که گیاه به‌تنهایی به‌عنوان منبع تامین‌کننده مواد آلی مورد نیاز باکتری‌ها اسـتفاده می‌شـود؛ به دلیل محدود بودن تولید مواد به‌وســیله ریشــه گیاه در طول شــب/ روز و کاهش عمل فتوســنتز گیاهی، ولتاژ خروجی پیل نوســان زیادی خواهد داشــت. از این‌رو مواد سوبسترای همچون نشاسته، استات سدیم به نیم پیل آندی به‌منظور جبران کمبود مواد مورد نیاز باکتری‌ها اضافه می‌شود.

اکسـیژن به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون در این سـیسـتم نقش مهمی را دارا می‌باشد و به‌صورت مستقیم بر انرژی الکتریکی تولیدی تاثیرگذار می‌باشـد. واکنش احیای اکسـیژن در نیم پیل کاتدی یکی از چالش‌های محدودکننده انرژی پیل‌های ســوختی میکروبی گیاهی می‌باشد. اگر الکترون تولیدی در محفظه آندی باقی بماند و پذیرنده‌ای برای تکمیل شـدن چرخه اکسـایش و کاهش وجود نداشـته باشـد؛ نیم پیل آندی دچار مسـمومیت شـده و پیل توانایی تولید انرژی را نخواهد داشـــت. در این تحقیق به‌منظور کاهش هزینه‌ها و همچنین توجیه کارآمدی پیل سـوختی میکروبی-گیاهی از هوا به‌عنوان منبع اکسـیژن اسـتفاده گردید. در صـورتی‌که اگر از اکسـیژن خالص اسـتفاده می‌شـد، می‌توان انتظار داشت که به نتایج بهتری در این زمینه دست یافت.

با توجه به آزمایش‌های اندازه‌گیری اکســیژن‌خواهی بیولوژیکی و شیمیایی، سیستم پیل سوختی میکروبی-گیاهی توانایی خوبی در رفع آلایندگی در آب‌های آلوده را از خود نشـــان داد به‌طوری‌که در این پژوهش میزان بازده سیستم در رفع آلایندگی ۹۰ درصد به‌دست آمد. این توانایی به دلیل وجود هم‌زمان باکتری تجزیه‌کننده مواد آلی و همچنین بهره‌گیری از گیاه سیپروس می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

شهریار شکری: نگارش مقاله، جمع‌آوری داده، انجام آزمایشات
وحید رستم پور: نظارت و اجرا، ویرایش متن، مشاور فنی
کاوه ملازاده: مشـــاوره فنی، تحلیل آماری، طراحی ســـخت افزاری، برنامه نویسی
صابر امیری: طراحی آزمایشات، انجام آزمایشات، مشاور فنی
ایوب فتح الهی قره چپوق: ویرایش متن و مشاوره

References

1. Aghababaie, M., Farhadian, M., Jeihanipour, A., & Biria, D. (2015). Effective factors on the performance of microbial fuel cells in wastewater treatment–a review. *Environmental Technology Reviews*, *4*(1), 71-89 https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1077896
2. Di Lorenzo, M., Thomson, A. R., Schneider, K., Cameron, P. J., & Ieropoulos, I. (2014). A small-scale air-cathode microbial fuel cell for on-line monitoring of water quality. *Biosensors and Bioelectronics*, *62*, 182-188 https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.06.050
3. Doosti, B., & Asakereh, A. (2025). Feasibility and Site Selection for Wind-Powered Road Lighting in Kermanshah Province. *Journal of Agricultural Machinery*, *15*(4). (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2025.91098.1319
4. Fedosenko-Becker, T. N. (2019). *Surface Modification of Bipolar Plates for Fuel Cells by Plasma Treatment* (Doctoral dissertation). Universität Duisburg-Essen.
5. Feng, M., Meng, L., Zhang, Z., Zheng, Q., Wang, R., Yang, C., & Guo, W. (2024). Hierarchical modulation of extracellular electron transfer processes in microbial fuel cell anodes for enhanced power output through improved Geobacter adhesion. *Electrochimica Acta*, *487*, 144165 https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144165
6. Golzarian, M., Ghiasvand, M., Shokri, S., Bahreini, M., & Kazemi, F. (2024). Performance evaluation of a dual-chamber plant microbial fuel cell developed for electricity generation and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(7), 5947-5954. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05415-5
7. Helder, M., Strik, D. P., Timmers, R. A., Raes, S. M., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Resilience of roof-top plant-microbial fuel cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 1-7 https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.011
8. Kacmaz, G. K., & Eczacioglu, N. (2024). The mechanism of bioelectricity generation from organic wastes: Soil/plant microbial fuel cells. *Environmental Technology Reviews*, *13*(1), 76-95 https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2283814
9. Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons
10. Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, *7*(5), 375. https://doi.org/10.1038/nrmicro2113
11. Mishra, M., Desul, S., Santos, C. A. G., Mishra, S. K., Kamal, A. H. M., Goswami, S., & Baral, K. (2024). A bibliometric analysis of sustainable development goals (SDGs): a review of progress, challenges, and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, *26*(5), 11101-11143. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03225-w
12. Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., & Buisman, C. J. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 60-67 https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.002
13. Yadav, V. S., Srivastava, M. P., Yadav, R. K., & Kumar, N. (2024). Phytoremediation potential of plants for heavy metal contaminated soil. *Library Progress International*, *44*(3), 5400-5406.