

Investigating the Performance of Microbial Fuel Cells in Wastewater Treatment Containing Azo Dyes Using Meta-Analysis

S. Parsayan^{1*}, S. Sadri Moghaddam^{2*}

1, 2- M.Sc. Student and Assistant Professor, Civil Engineering- Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* (Corresponding Author Email: sadrimoghaddam@kntu.ac.ir)

Received: 05-03-2024

Revised: 25-04-2024

Accepted: 08-05-2024

Available Online: 21-09-2024

بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب حاوی رنگ آزو با استفاده از متاآنالیز

سینا پارسایان^{۱*}، شبنم صدری مقدم^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست و استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

* (نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: sadrimoghaddam@kntu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

Abstract

Colored wastewater containing azo dyes is an important source of pollution and discharging it without treatment leads to severe problems. A microbial fuel cell is a new solution that treats wastewater and generates electricity simultaneously and is variable in terms of configuration and operating conditions. Meta-analysis is a statistical technique that combines the results of multiple scientific studies on a question. In this study, the configuration and operating conditions were investigated according to the volumetric treatment rate and normalized energy recovery based on operating volume and dye concentration changes. Factors such as the number of chambers, shape of the anode electrode, COD source, and hydraulic retention time were considered. The single-chamber mode showed better performance than the two-chamber mode due to the more available space of the electrolyte and the absence of the proton exchange membrane. Contrary to previous reports, smooth electrodes were superior to the brush mode. Glucose is a better COD source than acetate due to producing more electrons and hydrogen ions during substrate decomposition. Since the decomposition of 90% of the dye occurs in the first 24 hours, the hydraulic retention time in a state that is less than or equal to 24 hours, the process shows better performance. Also, the relation between the organic loading rate resulting from azo dye and the volumetric treatment rate was obtained, which includes the relationship between hydraulic retention time and changes in dye concentration. In the end, a framework for reporting information needed for a more detailed investigation of microbial fuel cells was presented.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Azo Dye, Normalized Energy Recovery, Volumetric Treatment Rate, Meta-Analysis.

چکیده

فاضلاب‌های رنگی که حاوی رنگ‌های آزو می‌باشند، منبع مهمی از آلودگی هستند و تخلیه آن‌ها بدون تصفیه، منجر به بروز مشکلات شدیدی می‌شود. پیل سوختی میکروبی راهکار جدیدی است که توانایی تصفیه فاضلاب و تولید الکتریسیته را به‌طور همزمان دارد و از نظر پیکربندی و شرایط عملیاتی، متغیر است. متاآنالیز تکنیکی آماری است که نتایج مطالعات علمی متعدد در مورد یک سوال را ترکیب می‌کند. در این مطالعه پیکربندی و شرایط بهره‌برداری مقالاتی که با استفاده از پیل سوختی میکروبی فاضلاب حاوی رنگ آزو را حذف کردند، طبق مقدار نرخ تصفیه حجمی و بازیابی انرژی نرمال شده بر اساس حجم عملیاتی و تغییرات غلظت رنگ، بررسی شد. عواملی مانند تعداد محفظه، شکل الکترود آند، نوع منبع (COD) و زمان ماند هیدرولیکی در نظر گرفته شد. حالت تک محفظه با توجه به فضای در دسترس بیشتر الکترولیت و عدم وجود غشاء تبادل پروتون، عملکرد بهتری نسبت به حالت دو محفظه از خود نشان داد. برخلاف گزارش‌های قبلی الکترودهای تخت نسبت به حالت برسی، برتری داشتند. گلوکز به دلیل تولید الکترون و یون‌های هیدروژن بیشتر در حین تجزیه سوبسترا، منبع (COD) بهتری نسبت به استات می‌باشد. از آنجایی که تجزیه ۹۰ درصد رنگ در ۲۴ ساعت ابتدایی رخ می‌دهد، زمان ماند هیدرولیکی در حالتی که کمتر یا مساوی ۲۴ ساعت باشد، فرآیند عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین، رابطه بین نرخ بارگذاری آلی حاصل از رنگ آزو و نرخ تصفیه حجمی بدست آمد که رابطه بین زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات غلظت رنگ را شامل می‌شود. در انتها چارچوبی برای گزارش اطلاعات مورد نیاز برای بررسی دقیق‌تر پیل‌های سوختی میکروبی ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی میکروبی، رنگ آزو، بازیابی انرژی نرمال شده، نرخ تصفیه حجمی، متاآنالیز.

اشکال اصلی کاهش رنگ آزو در شرایط بی‌هوازی، تولید آمین‌های آروماتیک است که تحت شرایط بی‌هوازی تجزیه نمی‌شود (Van der Zee و همکاران، ۲۰۰۱).

پیل‌های سوختی میکروبی (MFCs)، که مواد آلی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند، ارائه‌کننده یک سیستم زیست‌الکتروشیمیایی پایدار است. این سیستم از بخش‌های اصلی الکتروود آند، الکتروود کاتد، غشای تبادل پروتون (PEM) و مدار خارجی تشکیل شده است. این دستگاه می‌تواند تک محفظه یا دو محفظه باشد. علیرغم اینکه MFCها یک فناوری تصفیه بی‌هوازی هستند، مزیت بازیابی انرژی از جریان‌های مختلف فاضلاب (از جمله فاضلاب رقیق خانگی) را در دمای محیط و دمای پایین دارند. بنابراین آنها می‌توانند با سایر فرآیندهای متداول تصفیه فاضلاب شهری مانند لجن فعال (AS) که به دلیل انرژی بر بودن، هزینه بالا و تولید مقادیر زیادی لجن شناخته شده است، رقابت کنند (Feng و همکاران، ۲۰۱۴). راندمان فرآیند تصفیه فاضلاب در یک MFC، به عوامل مختلفی بستگی دارد که شامل پیکربندی راکتور، جنس الکتروود مورد استفاده، نوع سوبسترا، نرخ بارگذاری آلی (OLR)، جامعه میکروبی درگیر، پیش تصفیه بکار گرفته شده، و شرایط عملیاتی می‌شود (Tremouli و همکاران، ۲۰۱۷) و (Zeshan و Ullah، ۲۰۲۰).

مقایسه گزارش مقالات به دلیل عدم جمع‌آوری یکنواخت داده‌ها شامل سوبسترا مختلف، پیکربندی راکتور، تنوع در اطلاعات جمع‌آوری شده، روش‌های توصیف طراحی آزمایشی و ناسازگاری در معیارهای عملکرد گزارش شده، چالش برانگیز است (Patil و همکاران، ۲۰۱۵). تابه حال مقالات مروری در زمینه رنگ‌زدایی رنگ آزو با سیستم پیل سوختی میکروبی منتشر شده است؛ اما به دلایل ذکر شده کارایی کافی ندارند. با توجه به کاربرد گسترده رنگ آزو در صنایع مختلف و اثرات مضر آن بر محیط‌زیست و همچنین کارایی پیل سوختی میکروبی در حذف رنگ آزو و تولید همزمان الکتریسیته، نیاز به مطالعه‌ای به منظور تعیین مقدار و شرایط بهینه پارامترهای طراحی و عملیاتی وجود دارد (Solanki و همکاران، ۲۰۱۳) و (Yadav و همکاران، ۲۰۲۲).

بررسی‌های سیستماتیک و متاآنالیز، داده‌ها را از مطالعات متعدد انجام شده بر روی موضوعات تحقیقاتی، جمع‌آوری و ارزیابی کرده و در سال‌های اخیر در بخش‌های مختلف محبوبیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند (Ahn و Kang، ۲۰۱۸). متاآنالیز نشان‌دهنده اثر جمعی مطالعات موجود در مقالات مروری برای ارائه یک نتیجه کلی است و بدین ترتیب، ارزیابی عینی اطلاعات بر اساس داده‌های عددی است (Ishaq و همکاران، ۲۰۲۰). متاآنالیز رویکردهای آماری مهم و تأثیرگذاری را برای درک همبستگی‌های کمی و عددی بین متغیرها و شاخص‌های عملکرد MFC ارائه می‌دهد. با توجه به اهمیت ذکر شده تصفیه فاضلاب حاوی رنگ آزو و همچنین تعداد زیاد مقالات با بررسی همزمان راندمان رنگ‌زدایی رنگ آزو و تولید برق با دستگاه

تولید منسوجات به حجم زیادی از آب با کیفیت بالا نیاز دارد، بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که حجم فاضلاب تولید شده از این فرآیند نیز بسیار زیاد باشد. میانگین مصرف آب، ۱۵۰ لیتر به ازای هر کیلوگرم محصول نساجی می‌باشد. میانگین تولید الیاف نساجی به صورت جهانی ۴۰ میلیون تن است و می‌توان پیش‌بینی کرد که میزان فاضلاب تولیدی تقریباً ۶ میلیارد متر مکعب در سال باشد (Halepoto و همکاران، ۲۰۲۲). تخلیه فاضلاب نساجی بدون تصفیه منجر به آلودگی شدید محل تخلیه (عمدتاً رودخانه‌ها)، تشکیل توده‌های زیاد کف در سطح آب و یا تغییر شدید رنگ آب شده که منجر به انسداد نفوذ نور می‌شود. با توجه به اینکه فاضلاب نساجی به‌طور کلی در رودخانه‌ها و دریاها رها می‌شود، باید قبل از تخلیه به محیط آبی، برخی فرآیندهای تصفیه انجام شود. معمولاً تصفیه‌های فیزیکی و (بیوشیمیایی در کارخانه نساجی انجام می‌شود، در حالی که تصفیه بیولوژیکی (تجزیه هوازی، بی‌هوازی) یا در کارخانه نساجی یا در یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری انجام می‌شود (Halepoto و همکاران، ۲۰۲۲).

رنگ‌های آزو، رنگ‌های مصنوعی هستند و به‌طور طبیعی یافت نمی‌شوند. رنگ‌های آزو ۶۰ تا ۷۰ درصد رنگ‌های مورد استفاده در صنایع غذایی و نساجی را تشکیل می‌دهند (Benkhaya و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین به‌طور گسترده در صنایع چرم، کاغذ و چاپ استفاده می‌شوند. این رنگ‌ها ترکیبات مقاومی هستند که اغلب در فاضلاب‌های صنعتی بسیار کدر و رنگی تجمع می‌یابند. بسیاری از این ترکیبات نیز سمی یا سرطان‌زا هستند (Saratale و همکاران، ۲۰۱۱). طیف وسیعی از روش‌ها برای حذف رنگ از پساب‌های حاوی رنگ وجود دارد. پرکاربردترین فرآیند، انعقاد و لخته‌سازی است. در این روش به مقادیر قابل توجهی مواد شیمیایی نیاز دارند و مقادیر قابل توجهی لجن تولید می‌کنند که نیاز به جابجایی و دفع دارد. هر دو فرآیند اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)، مانند ازن زنی، UV/H_2O_2 ، فنتون و غیره) و روش‌های فیلتراسیون غشایی برای حذف رنگ کاملاً مؤثر هستند، اما انرژی و هزینه زیادی دارند. رنگ‌زدایی آنزیمی در حال حاضر به‌طور گسترده برای رنگ‌زدایی فاضلاب رنگ استفاده می‌شود. با این حال، این روش با مشکلات متعددی مانند هزینه بالا آنزیم، حفظ پایداری آنزیم و مهار محصولات مضر جانبی نیز مواجه است (Husain، ۲۰۱۰). از سوی دیگر، فرآیندهای بیولوژیکی یک جایگزین کم هزینه و کارآمد برای حذف همزمان رنگ و مواد آلی ارائه می‌کنند. با این حال، دستیابی به تخریب کامل تنها با استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی هوازی، دشوار است (Méndez-Paz و همکاران، ۲۰۰۵). تصفیه بی‌هوازی ممکن است جایگزین مناسبی برای تصفیه فاضلاب حاوی رنگ باشد، اما سرعت پایین فرآیند و هزینه اضافی برای اهداکننده الکترونیکی باید در نظر گرفته شود.

پیل سوختی میکروبی، مطالعه‌ای بر اساس متاآنالیز در این راستا انجام شد. از نتایج این مقاله می‌توان برای طراحی بهینه دستگاه آزمایشگاهی و راهنمایی برای تجاری‌سازی پیل سوختی میکروبی برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگ‌های آزو استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

۱- روش جستجو و معیارهای انتخاب مقالات

بررسی سیستماتیک و متاآنالیز مطابق با دستورالعمل‌های «موارد گزارش‌دهی ترجیحی برای بررسی‌های سیستمی و متاآنالیز PRISMA» انجام شد. مقالات منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ از پایگاه‌های اطلاعاتی Google Scholar و Science Direct مورد بررسی قرار گرفتند. مقالاتی که شامل کلیدواژه‌های «MFC یا microbial fuel cell» و «azo dye یا azo-dye یا azo/dye یا acid orange 7 یا congo red» انتخاب شدند. تعداد مقالات برگزیده با معیارهای ذکر شده ۴۳ مقاله می‌باشد. سپس، مقالاتی که اطلاعات کافی در خصوص طراحی سیستم (حجم محفظه آن‌ها و یا پارامترهای طراحی) و یا نتایج (مانند راندمان حذف رنگ یا چگالی توان) را بطور جامع گزارش نکردند، حذف شدند و در انتها ۱۴ مقاله باقی ماند. در این تحقیق، از ۱۴ مقاله انتخاب شده، پارامترهایی شامل تعداد محفظه (تک یا دو محفظه)، حجم کارکرد دستگاه، سطح و جنس آند و کاتد، دما و pH، مقدار غلظت COD ورودی و نوع منبع آن، زمان ماند هیدرولیکی و غلظت رنگ ورودی جمع‌آوری و گزارش گردید.

۲- معیارهای ارزیابی عملکرد MFC

عملکرد MFC به‌طور کلی توسط بازدهی حذف COD، چگالی توان و راندمان کولمبی ارزیابی می‌شود. در این تحقیق به دلیل هدف اصلی تصفیه رنگ آزو، راندمان دستگاه بر اساس رنگ زدایی در نظر گرفته شد. همچنین، چگالی توان و بازایی نرمال شده انرژی بر اساس حجم راکتور و رنگ زدایی آزو برای ارزیابی بازدهی تولید الکتریسیته استفاده شده است. شایان ذکر است که در بسیاری از مقالات مورد استفاده در این مطالعه، بازدهی حذف COD گزارش نشده است لذا از ارائه آن صرف نظر شد.

۱-۲- نرخ بارگذاری آلی

نرخ بارگذاری آلی (OLR) مطابق رابطه (۱) شامل اندازه‌گیری غلظت سوبسترای آلی ورودی به راکتور در روز است و بر حسب $(mg\ COD/lit/h)$ بیان می‌شود.

$$OLR = S_0 / (HRT) \quad (1)$$

S_0 غلظت رنگ آزو ورودی بر حسب (mg/lit) و HRT زمان ماند هیدرولیکی بر حسب ساعت است.

۲-۲- راندمان رنگ زدایی

راندمان رنگ زدایی برابر با اختلاف غلظت ورودی و خروجی رنگ

به‌ازای غلظت ورودی است که در رابطه (۲) نشان داده شده است. $Dye\ decolorization\ efficiency = (\Delta dye) / dye_{inf} \times 100$ (۲) اختلاف بین غلظت رنگ آزو ورودی و خروجی بر حسب (mg/lit) و dye_{inf} غلظت رنگ آزو ورودی بر حسب (mg/lit) است.

۳-۲- نرخ تصفیه حجمی

نرخ تصفیه حجمی (VTR^C) سرعتی است که در آن رنگ آزو از فاضلاب ورودی در ساعت حذف می‌شود و همچنین بر حسب $(mg\ COD/lit/h)$ بیان می‌شود. در این پارامتر همانطور که از رابطه (۳) نیز قابل استنتاج است، نرخ جریان، حجم راکتور، غلظت رنگ‌زا و استانداردهای تخلیه در نظر می‌شود.

$$VTR = (\Delta dye) / HRT \quad (3)$$

HRT زمان ماندن هیدرولیکی بر حسب ساعت است.

۴-۲- چگالی توان

چگالی توان (PD) پارامتری است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر اساس مساحت پیش‌بینی شده آند یا کاتد (m^2) یا حجم مایع آند (m^3) محاسبه می‌شود. در این مطالعه از حجم مایع آند استفاده شد و PD به‌صورت زیر محاسبه شد.

$$PD = P / V \quad (4)$$

P توان بر حسب میلی وات و V حجم فاضلاب بر حسب متر مکعب است. چگالی توان عواملی مانند زمان ماند هیدرولیکی یا COD حذف شده را در نظر نمی‌گیرد. درحقیقت، این پارامتر به‌طور کلی تولید انرژی سیستم را منعکس نمی‌کند و مقایسه را دشوار می‌سازد (Ge و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، باید از پارامترهای نرمال شده بر اساس حجم محفظه و مقدار رنگ‌زدایی استفاده کرد.

۵-۲- بازایی انرژی نرمال شده

بازایی انرژی نرمال شده (NER^V) به‌عنوان روشی قابل مقایسه برای ارزیابی بازایی انرژی الکتریکی از MFCهای مختلف ارائه می‌کند. NER را می‌توان به دو صورت NERV و NERCOD بیان کرد. پارامتر NERV بر حسب $(W\ h/lit)$ (رابطه ۵)، یک واحد پرکاربرد در تصفیه فاضلاب برای بحث در مورد مسائل انرژی است (Plappally, ۲۰۱۲). زمان ماند هیدرولیکی MFC و حجم فاضلاب تصفیه شده و توان تولیدی در این پارامتر در نظر گرفته می‌شود. پارامتر NER_{COD} بر حسب $(W\ h/gCOD)$ (رابطه ۶) است که حذف بخش آلی را در نظر می‌گیرد که به دلیل تنوع بالای مواد آلی در فاضلاب‌های مختلف یک پارامتر ضروری است (Ge و همکاران، ۲۰۱۴). در این مطالعه با توجه به تمرکز مقالات بر رنگ‌زدایی رنگ آزو و عدم گزارش میزان حذف COD در اکثر مقالات، به‌جای NER_{COD} ، NER_{dye} که بر اساس میزان حذف رنگ آزو می‌باشد، استفاده شد.

$$NER_V = (P \times HRT) / V \quad (5)$$

$$NER_{dye} = (P \times HRT) / (\Delta dye) \quad (6)$$

P توان بر حسب ولت و V حجم فاضلاب تصفیه شده (در زمان HRT) بر حسب لیتر است.

۲-۶- دسته‌بندی داده‌ها

در شکل (۱)، فرآیند انجام تحقیق شامل نحوه یافتن مقالات، معیارهای انتخاب مقاله مناسب، داده‌های استخراج شده از مقالات، پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های استخراج شده و اطلاعات محاسبه شده، ارائه شده است. همانطور که در نمودار نیز قابل مشاهده است، برای تسهیل در کاوش داده‌ها و تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده به صورت زیر دسته‌بندی شدند:

۱. پیکربندی پیل سوختی میکروبی: در این مقاله از تک محفظه یا دو محفظه استفاده شده است؛ زیرا این پیکربندی‌ها بیشترین کاربرد را دارند.

۲. شکل الکتروآند: انواع آند به دو دسته آند برسی و آند سطح

تخت تقسیم می‌شوند. تمام آندهای تخت بدون در نظر گرفتن جنس مورد استفاده (پارچه، ورق، نمک و یاف)، در گروه آند تخت گروه‌بندی شدند.

۳. نوع منبع COD: با توجه به تفاوت سرعت تجزیه بیولوژیکی بین دو گروه گلوکز و استات، منبع COD به دو گروه استات و گلوکز تقسیم شد.

زمان ماند هیدرولیکی: در داده‌های استخراج شده، زمان نگهداری هیدرولیکی ۹ تحقیق برابر یا کمتر از ۲۴ ساعت و همچنین ۱۴ تحقیق بیش از ۲۴ ساعت است؛ بنابراین زمان نگهداری هیدرولیکی ۲۴ ساعت به عنوان مبنای تفکیک داده‌ها انتخاب شد.



شکل ۱- فرآیند انجام تحقیق

نتایج

به اینکه برخی از مقالات شرایط طراحی مختلف را بررسی کرده بودند، ۲۳ مجموعه اطلاعاتی استخراج شد. در این جدول پارامترهای پیکربندی دستگاه (مانند تعداد محفظه و حجم آن)، شرایط عملیاتی (مانند دما و pH)، مشخصات

در جدول (۱) پارامترهای تأثیرگذار از ۱۴ مقاله گزارش شده و بر اساس سال انتشار مرتب شده‌اند. در این مطالعه با توجه

و NER_{dye} برای ارزیابی همزمان مقدار توان تولیدی به ازای رنگ آزو حذف شده استفاده شد. نمودار این سه پارامتر معیار، ترسیم و نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این فرآیند به دستیابی به یک دید کلی از اثربخشی هر جزء کمک می‌کند و انتخاب هوشمندانه‌ای را برای محققان فراهم می‌کند.

جریان ورودی (مانند غلظت رنگ آزو ورودی) و در جدول (۲) معیارهای ارزیابی فرآیند (مانند نرخ تصفیه حجمی) ارائه شده است. ارزیابی عملکرد سیستم MFC در دو دسته کارایی فرآیند (بازده تصفیه) و مقدار الکتریسیته تولید شده (بازده انرژی) قرار گرفته است. در این مطالعه از VTR برای ارزیابی عملکرد تصفیه، NER_v برای ارزیابی مقدار توان تولید شده

جدول ۱- اطلاعات استخراج شده از مقالات

شرایط پیکربندی فرآیند							
ردیف	سال	پیکربندی	حجم کل (lit)	جنس الکتروود آند	مساحت سطح الکتروود آند (cm ²)	جنس الکتروود کاتد	مساحت سطح الکتروود کاتد (cm ²)
۱	۲۰۰۹	تک محفظه	۰/۹	Porous carbon papers	۷۲	Porous carbon papers	۷۲
۲	۲۰۱۲	تک محفظه	۰/۴	Non-wet proofed porous carbon papers	۱۸	Wet proofed porous carbon papers	۱۸
		دو محفظه	۰/۸	Plain porous carbon paper	۱۸	Plain porous carbon paper	۱۸
۳	۲۰۱۳	تک محفظه	۰/۲۵۶	Graphite felt	۲۵	Carbon paper	۲۵
۴	۲۰۱۶	دو محفظه	۰/۸	Porous carbon papers	۱۸	Porous carbon papers	۱۸
		دو محفظه	۰/۸	Porous carbon papers	۱۸	Porous carbon papers	-
۵	۲۰۱۶	تک محفظه	۰/۲۵۶	Graphite felt	۶۰	Carbon paper	-
		تک محفظه	۰/۲۵۶	1.25C RF	۶۰	Carbon paper	-
		تک محفظه	۰/۲۵۶	2.5C HA	۶۰	Carbon paper	-
۶	۲۰۱۹	تک محفظه	۰/۴	Graphite fibre brush	۵۰	Carbon cloth	۵۰
		تک محفظه	۰/۴	Graphite fibre brush	۵۰	Carbon cloth	۵۰
۷	۲۰۱۹	دو محفظه	۰/۸	Plain porous carbon papers	۱۸	Plain porous carbon papers	۱۸
۸	۲۰۱۹	تک محفظه	۰/۱۸	Graphite block	۶/۴	Carbon cloth	۱۸
۹	۲۰۲۱	دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
		دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
		دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
۱۰	۲۰۲۱	تک محفظه	۰/۱	Carbon fiber brush	۱۲	Carbon fabric	۱۵
۱۱	۲۰۲۱	دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	TH-MFC	۱۶
		دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	AQS-MFC	۱۶
		دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	-	۱۶
۱۲	۲۰۲۲	دو محفظه	۰/۷	Carbon felt	۳۶	-	-
۱۳	۲۰۲۲	دو محفظه	۰/۸	Graphite rods	۲۱۳	Graphite rods	۲۱۳
۱۴	۲۰۲۲	تک محفظه	۰/۳۸	Carbon felt	۲۷	-	-

ادامه جدول ۱- اطلاعات استخراج شده از مقالات

پارامترهای اندازه‌گیری شده			شرایط بهره‌برداری								
مقدار رنگ حذف شده (mg/lit)	راندمان رنگزدایی (%)	راندمان حذف COD (%)	OLR (mg/lit h)	زمان ماند هیدرولیکی (h)	غلظت اولیه رنگ (mg/lit)	منبع COD	COD (mg/lit)	رژیم تغذیه	pH	دما (C°)	ردیف
۲۷۶	۹۲	۸۸	۶/۵	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۱
۲۸۹	۹۶	-	۲/۸	۱۰۷	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۲
۴۸۲	۹۶	-	۱۷/۲۴	۲۹	۵۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	
۲۷۰	۹۰	-	۹/۴	۳۲	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۳
۲۷۳	۹۱	-	۶/۲۵	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۴
۲۵۰	۸۳	-	۶/۲۶	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-		
۲۱۰	۷۰	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۵
۲۲۵	۷۵	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	-	
۲۵۸	۸۶	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	-	
۱۶۲	۸۱	۳۳	۵/۶	۳۶	۲۰۰	استات	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۶
۸۵	۸۵	-	۲/۸	۳۶	۱۰۰	استات	-	ناپیوسته	-	-	
۲۹۱	۹۷	-	۱۰	۳۰	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۷
۵۰۰	۱۰۰	-	۱۰/۴	۴۸	۵۰۰	گلوکز	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۸
۴۶	۹۳	۷۴	۲/۰۸	۲۴	۵۰	استات	۳۷۵	پیوسته	۷	۲۷	۹
۹۴	۹۴	۷۴	۴/۱۷	۲۴	۱۰۰	استات	۳۷۵	پیوسته	-	-	
۱۸۸	۹۴	۷۸	۸/۳	۲۴	۲۰۰	استات	۷۵۰	پیوسته	-	-	
۱۰۰	۱۰۰	-	۱۷/۴	۲۴	۱۰۰	استات	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۱۰
۱۸۵	۹۲	۷۷	۲/۷	۷۴	۲۰۰	استات	-	-	۷	۳۰	۱۱
۱۶۱	۸۰	۷۱	۲/۶۳	۷۶	۲۰۰	استات	-	-	-	-	
۴۲	۲۱	۱۸	۸/۲	۷۲	۲۰۰	استات	-	-	-	-	
۱۵۰	۱۰۰	-	۳/۳	۴۵	۱۵۰	-	-	ناپیوسته	۷/۲	۳۷	۱۲
-	۲۵	-	-	۵۰۰	۵۰	۸	۶/۲۵	-	-	-	۱۳
۲۴	۲۸	-	پیوسته	-	۲۵	۲۴	۱/۰۴	۷۰	۹۶	-	۱۴

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده در این مطالعه

منابع	پارامترهای محاسبه شده				ردیف
	NER dye (W h lit/g)	NER v (W h/lit)	VTR (mg/lit h)	چگالی توان (mW/m ²)	
(Sun و همکاران، ۲۰۰۹)	۰/۳۹۳	۰/۰۸۹۷	۵/۷۵	۲۳۴	۱
(Hou و همکاران، ۲۰۱۲)	۰/۲۱۵۸	۰/۱۵۶	۲/۷	۳۲۴	۲
(Sun و همکاران، ۲۰۱۳)	۰/۰۱۳۲۱	۰/۰۰۸	۱۶/۶۲	۱۲۲	
(Sun و همکاران، ۲۰۱۳)	۰/۰۱۵۷۳	۰/۰۱۶۶	۸/۴۴	۵۳/۱	۳
(Sun و همکاران، ۲۰۱۶)	۰/۰۰۲۸۵	۰/۰۰۱	۵/۶۹	۹	۴
	۰/۰۱	۰/۰۰۳۱	۵/۲	۲۹	
	۰/۰۸۸	۰/۰۷۲۴	۱۳/۱۳	۱۹۳	۵
(Huang و همکاران، ۲۰۱۷)	۰/۱۱۵	۰/۱۰۱۳	۱۴/۰۶	۲۷۰	
	۰/۱۱۹	۰/۱۲	۱۶/۱۳	۳۲۰	
(Dai و همکاران، ۲۰۲۰)	۰/۰۲۶۲۴	۰/۰۱۰۶	۴/۵	۲۳/۵	۶
	۰/۰۵۷۵	۰/۰۱۲۲۱	۲/۳۶	۲۷	
(Hou و همکاران، ۲۰۱۹)	۰/۰۳۹۵	۰/۰۱۴۴	۹/۷	۲۱۳	۷
(Ilamathi و همکاران، ۲۰۱۹)	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۱۰/۴۲	۲/۷	۸
	۰/۱۲۸۶	۰/۰۰۵۴	۱/۹۳	۱۲/۴	۹
(Oon و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۰۵۱۴	۰/۰۰۴۴	۳/۹۲	۱۰/۰۶	
	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۳۵	۷/۸۴	۸/۱	
(de Almeida و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۰۴۴۹	۰/۰۴۵	۴/۱۷	۱۵۶	۱۰
	۰/۱۱۲۷	۰/۰۴۲	۲/۵	۳۲	۱۱
(Khan و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۱۰۹۳	۰/۰۳۵	۲/۱۲	۲۶/۳	
	۰/۳۲۲۵	۰/۰۲۷	۰/۵۸۳	۲۱/۴	
(Raqba و همکاران، ۲۰۲۲)	۰/۲۴۱۹	۰/۰۵۲	۳/۳۳	۲۲۴	۱۲
(Ravinuthala و همکاران، ۲۰۲۲)	-	۰/۰۰۱۸	-	۸/۱۷	۱۳
(Tan و همکاران، ۲۰۲۲)	۰/۵۰۸۵	۰/۰۳۲	۰/۹۹۷	۱۳۷	۱۴

۱- بررسی اجمالی

• پیکربندی (MFC)

ب‌طور کلی در شکل (۲) پیکربندی MFC مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نمودار (۲-الف)، در مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفته، دو گروه تک محفظه و دو محفظه، توزیع نزدیکی دارند. نمودار (۲-ب) و نمودار (۲-ج) به ترتیب محدوده مقادیر VTR و NER_{dye} را برای هر گروه نشان می‌دهد که مشخص است حالت تک محفظه در هر دو حالت، بازدهی بالاتری دارد. در پیل‌های سوختی میکروبی، وجود فضای کافی برای الکترولیت و فاضلاب برای عملکرد بهینه، بسیار مهم است. وقتی فضای بیشتری وجود داشته باشد، میکروارگانیسم‌ها بهتر عمل می‌کنند و انتقال الکترون‌ها و پروتون‌ها سریع‌تر انجام می‌شود. به عبارت دیگر، فراهم کردن فضای کافی برای الکترولیت و فاضلاب امکان دسترسی بهتر به مواد

مغذی و اکسیژن، رشد میکروبی سالم‌تر و افزایش نرخ انتقال الکترون را فراهم می‌کند (Izadi و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، عدم وجود غشای جداکننده در حالت تک محفظه‌ای، مقاومت داخلی فرآیند را کاهش می‌دهد و منجر به چگالی توان بالاتر و در نتیجه بازیابی انرژی نرمال شده بالاتر می‌شود. بنابراین، طراحی و پیکربندی MFC ها نقش بسزایی در کارایی آنها دارد. MFC های تک محفظه در کاربردهای خاص مؤثر هستند و مزایایی مانند کاهش مقاومت داخلی را ارائه می‌دهند (Sato و همکاران، ۲۰۲۱). اگرچه MFC های تک محفظه چندین مزیت را ارائه می‌دهند، اما هنگام افزایش مقیاس و صنعتی شدن با چالش‌هایی مواجه می‌شوند. برخی از این چالش‌ها عبارتند از:

- عدم وجود سیستم هوادهی: MFC های تک محفظه نیازی به سیستم هوادهی ندارند که این مزیت در ابعاد کوچک آنهاست.

با این حال، این می‌تواند در هنگام افزایش مقیاس، یک چالش باشد؛ زیرا هوادمی برای حفظ کارایی بسیار مهم می‌شود (Tan و همکاران، ۲۰۲۰).

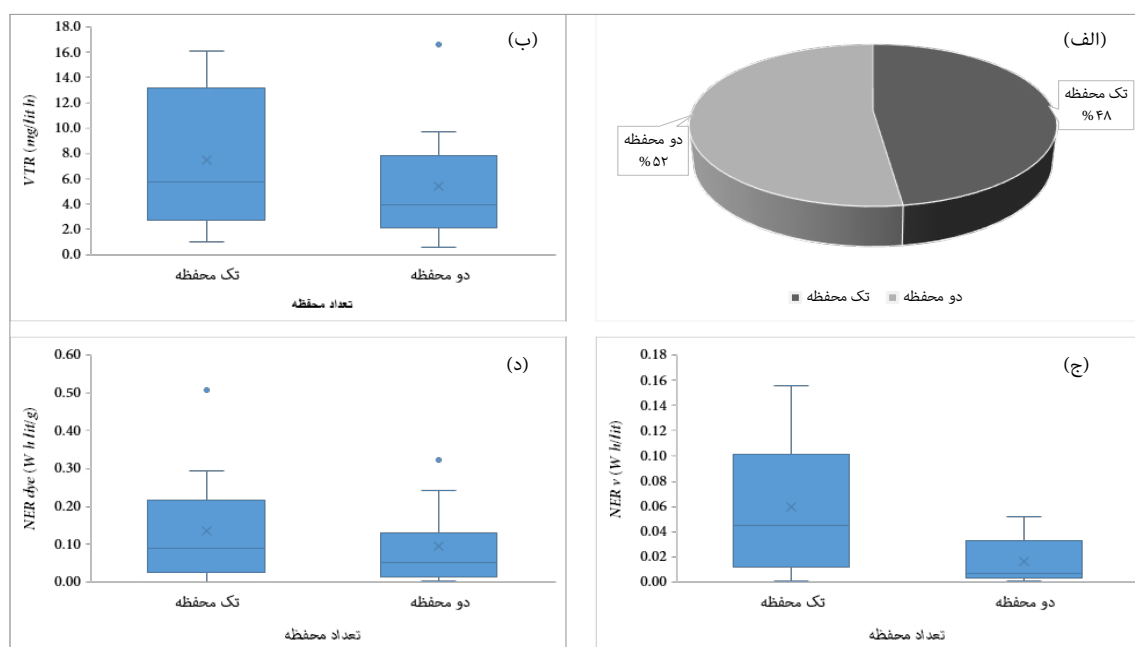
- میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی در محفظه آند: عدم وجود غشای جداکننده محفظه می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی در محفظه آند شود. این میکروارگانسیم‌ها ممکن است در یک محیط غنی از اکسیژن به مشکل برسند که منجر به کاهش عملکرد می‌شود (Saravanan و Karthikeyan، ۲۰۱۸).

در نتیجه، در حالی که MFC‌های تک محفظه از نظر طراحی و کاهش مقاومت داخلی مزایایی دارند، به دلیل فقدان سیستم هوادمی و مشکلات میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی، هنگام افزایش مقیاس و صنعتی شدن با چالش‌هایی مواجه می‌شوند.

علاوه بر این، حالت دو محفظه مزایایی را نسبت به پیکربندی تک محفظه ارائه می‌دهد که شامل بهبود عملکرد MFC با افزودن واسطه‌ها به کاتد، امکان کنترل pH در کاتد، و تزریق اکسیژن خالص به محفظه کاتد است که در نهایت بر عملکرد MFC تأثیر می‌گذارد (Flimban و همکاران، ۲۰۱۹). بطور کلی، در حالی که MFC تک

محفظه مزایایی مانند کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و توان خروجی بالاتر را ارائه می‌دهد، حالت دو محفظه انعطاف‌پذیری و کنترل بیشتری را بر روی محیط MFC فراهم می‌کند و در نهایت به بهبود مقیاس‌پذیری کمک می‌کند.

پارامتر NER_{dye} که بیانگر توان تولیدی به ازای رنگ حذف شده می‌باشد، در نمودار (د-۲) نشان داده شده است. مشخص است که حالت تک محفظه برتری نسبی دارد. بنابراین توصیه می‌شود در صورت امکان از حالت تک محفظه استفاده شود. قابل ذکر است فرآیند ساخت حالت تک محفظه به علت کاتد آن که قابلیت نفوذ هوا را دارد، پیچیده است. همانطور که ذکر شد، یکی از چالش‌های اساسی در مسیر صنعتی شدن این فرآیند، کاهش بازدهی آن در صورت افزایش حجم محفظه است. یکی از راهکارها برای مقابله با این چالش، اتصال سری یا موازی پیل‌های سوختی میکروبی در حجم عملیاتی کم، به یکدیگر است. بنابراین با توجه به هدف ما از استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی و روش مورد نظر برای مقیاس‌پذیری (اتصال پیل‌های سوختی کوچک به یکدیگر به صورت سری یا موازی یا افزایش حجم راکتورها)، می‌توان نوع پیکربندی را انتخاب کرد.



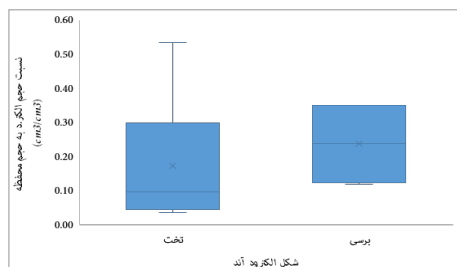
شکل ۲- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصد پیل سوختی تک محفظه (۱۱ مورد) و پیل سوختی دو محفظه (۱۲ مورد)، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه، (ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_v برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه، (د) نمودار جعبه محدوده مقدار NER_{dye} برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه

سیستم است که عموماً مقدار پایینی دارد، یعنی با وجود راندمان مناسب تصفیه، اما الکتریسیته متناسب با آن تولید و منتقل نمی‌شود. رابطه بین غلظت رنگ در جریان فاضلاب ورودی، راندمان رنگ‌زدایی و چگالی توان در پیل‌های سوختی میکروبی یکی از جنبه‌های مهم

راندمان کولمبی یکی از پارامترهای معیار مهم در مبحث MFC ها است که متأسفانه به دلیل گزارش نکردن مقدار آن در برخی از مقالات، در این تحقیق قابل ارائه نیست. این پارامتر جریان تولید شده به ازای تغییرات COD را بیان می‌کند و به‌نوعی بیانگر پتانسیل

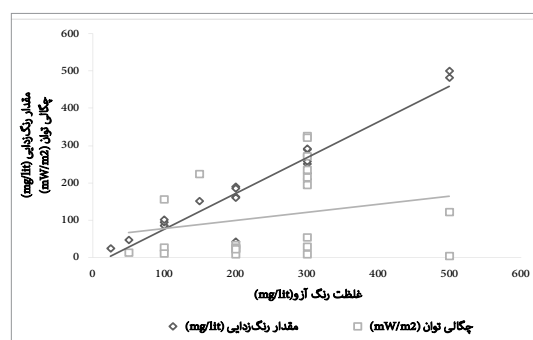
• شکل الکتروود آند

در نمودار (۴) تأثیر شکل الکتروود آند مورد بررسی قرار گرفته است. بطورکلی، الکترودهای بررسی می‌توانند به چگالی توان بالاتری نسبت به الکترودهای تخت در پیل‌های سوختی میکروبی دست یابند (Zafar و همکاران، ۲۰۲۲؛ Fonseca و همکاران، ۲۰۲۱). دلیل این ترجیح این است که هر چه الکتروود آند فضای بیشتری را در محفظه آند اشغال کند، سطح بیوفیلم بیشتری روی الکتروود قرار می‌گیرد و قابلیت تصفیه سیستم افزایش می‌یابد. با این حال، همانطور که در نمودار (۴-ب) و (۴-ج) نشان داده شده، بطور غافلگیرکننده‌ای الکترودهای تخت از نظر راندمان تصفیه و ظرفیت توان تولید، برتر از الکترودهای بررسی هستند. همانطور که در شکل (۵) نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروود آند به حجم محفظه آند برای دو حالت بررسی و تخت مشخص است، این پارامتر برای حالت بررسی برتری قابل توجهی ندارد؛ بنابراین نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروود بررسی به حجم محفظه آندی به درستی تنظیم نشده است.

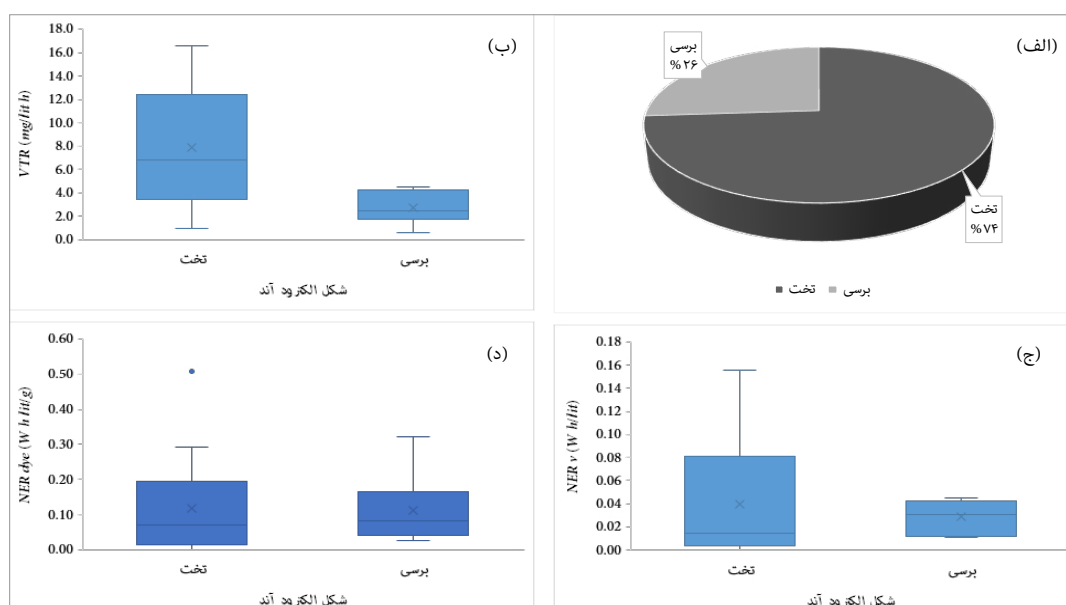


شکل ۵- نمودار جعبه‌ای نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروود آند به حجم محفظه آند برای تخت و بررسی

عملکرد MFC است که در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت رنگ ورودی، راندمان سیستم در حذف رنگ نسبتاً ثابت می‌ماند، در حالی که تولید چگالی توان به‌طور قابل توجهی افزایش نمی‌یابد. این نشان می‌دهد که MFC ها بدون توجه به غلظت رنگ، سطح ثابتی از راندمان حذف رنگ را حفظ می‌کنند، اما افزایش غلظت رنگ به‌طور متناسبی چگالی توان را افزایش نمی‌دهد (Oon و همکاران، ۲۰۲۱). این امر بر اهمیت توسعه استراتژی‌هایی برای بهبود چگالی توان و راندمان رنگ‌زدایی، به‌ویژه در غلظت‌های رنگ بالاتر، برای افزایش عملکرد MFC در تصفیه فاضلاب رنگی تأکید می‌کند. به‌عنوان مثال، یک مطالعه استفاده از پیش تصفیه فوتوکاتالیز TiO_2 را برای افزایش چگالی توان خروجی MFC‌های تغذیه شده با رنگ پیشنهاد کرده است (Su و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۳- مقدار رنگ‌زدایی و چگالی توان تولیدی در غلظت‌های متفاوت رنگ آزو

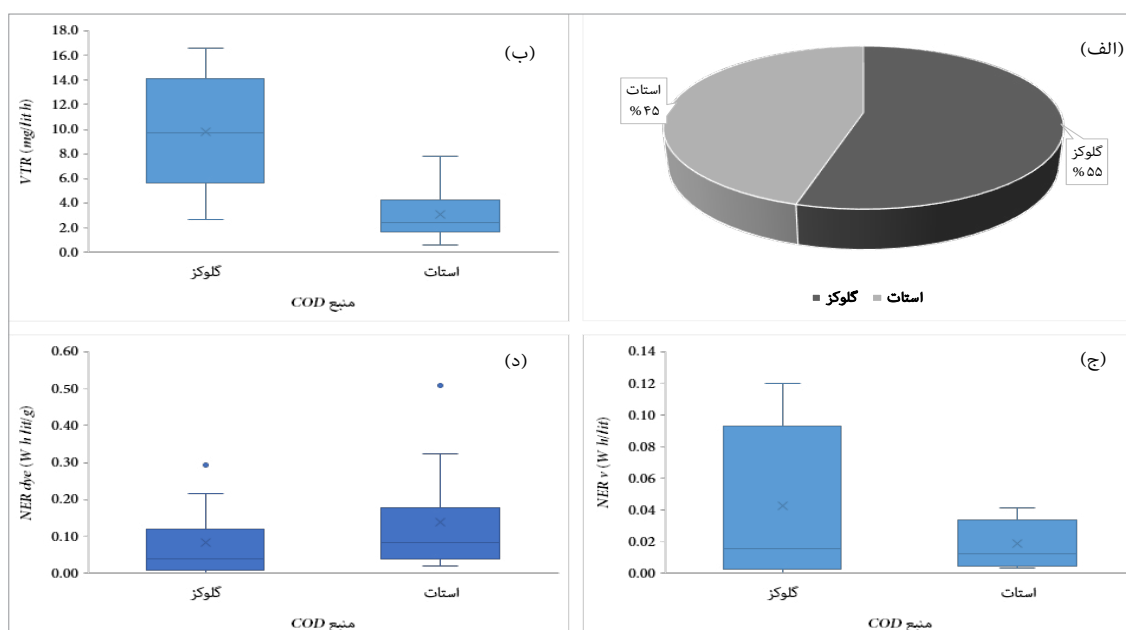


شکل ۴- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصدی الکتروود تخت (۱۷ مورد) و الکتروود بررسی (۶ مورد) آند، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای آند تخت و بررسی، (ج) نمودار جعبه‌ای از محدوده مقدار NER_v برای آند تخت و بررسی، (د) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_{dpc} برای آند تخت و بررسی

• منبع COD

نتایج این تحقیق مشابه با برخی مطالعات و در تناقض با برخی دیگر است. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که گلوکز از نظر بازده تصفیه و ظرفیت تولید برتر از استات است، اما این برتری قابل توجه نیست. همچنین تأثیر تجزیه سوبسترا بر تولید انرژی در MFCها و جامعه میکروبی را بررسی کردند و مشخص شده که میزان هیدرولیز و تخمیر گلوکز و استات مشابه است (Velasquez-Orta و همکاران، ۲۰۱۱). در حالی که برخی دیگر دریافته‌اند که استات بهترین بستر در بین سوبستراهای مختلف آزمایش شده است (Ullah و Zeshan، ۲۰۲۰) و (Mateo و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، انتخاب سوبسترا ممکن است به عوامل مختلفی مانند طراحی خاص (MFC)، شرایط عملیاتی و جامعه میکروبی بستگی داشته باشد و بایستی در این خصوص تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

همانطور که در نمودار (۶-الف) نشان داده شده است، در مقالات مورد بررسی در این تحقیق دو گروه گلوکز و استات به عنوان منبع COD توزیع نزدیکی دارند. از نمودار (۶-ب) و نمودار (۶-ج) می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از گلوکز نسبت به استات برای منبع COD، هم از نظر بازدهی تصفیه و هم از نظر ظرفیت توان تولیدی برتری دارد. یکی از پایه‌های اصلی عملکرد سیستم، میزان الکترون و هیدروژن تولید شده در حین تجزیه زیستی سوبسترا است. به طور کلی، تجزیه گلوکز در مقایسه با تجزیه استات، الکترون و یون‌های هیدروژن بیشتری تولید می‌کند. گلوکز یک مولکول بزرگتر و پیچیده‌تر در مقایسه با استات است و حاوی اتم‌های کربن بیشتری بوده که می‌تواند در طول متابولیسم اکسید شود (Sun و همکاران، ۲۰۲۰).

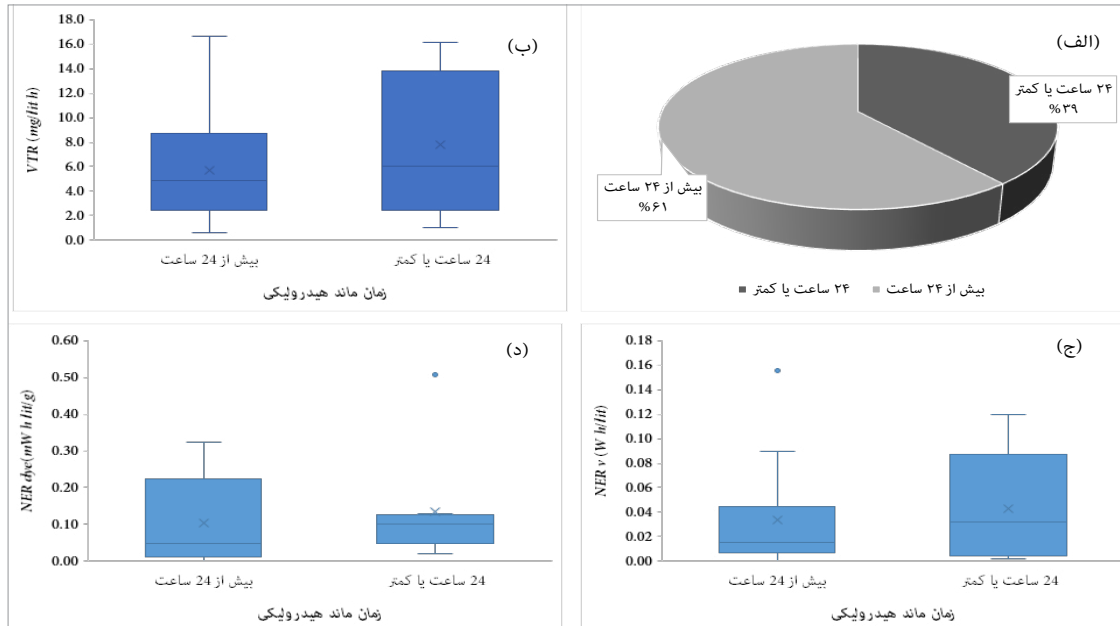


شکل ۶- الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصد گلوکز (۱۲ مورد) و استات (۱۰ مورد) به عنوان منبع COD، ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای گلوکز و استات، ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_e برای گلوکز و استات، د) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_{dye} برای گلوکز و استات

• زمان ماند هیدرولیکی

راندمان رنگ‌زدایی حدود ۹۰٪ در ۲۴ ساعت اول می‌باشد. در نتیجه زمان ماند هیدرولیکی بیش از ۲۴ ساعت، باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و کاهش راندمان سیستم می‌شود. باید توجه داشت که در پیل‌های سوختی میکروبی زمان ماند هیدرولیکی بر اساس مقدار ولتاژ تعیین می‌شود و زمانی که ولتاژ به مقدار کمینه تعیین شده توسط محقق (عموماً ۵ میلی ولت) می‌رسد، فاضلاب جدید جایگزین می‌شود. بنابراین واکنش کاهش اکسیژن که در محفظه کاتدی رخ می‌دهد و وابسته به کاتالیست استفاده شده در الکتروکاتد است، نقش بسیار مهمی در زمان ماند هیدرولیکی دارد (Yuan و همکاران، ۲۰۱۶).

همانطور که در نمودار (۷-الف) نشان داده شده، مطالعات با HRT کمتر یا مساوی ۲۴ ساعت و بیشتر از ۲۴ ساعت، توزیع نزدیکی دارند. از نمودار (۷-ب) و نمودار (۷-ج) می‌توان نتیجه گرفت که اگر زمان ماند هیدرولیکی برابر یا کمتر از ۲۴ ساعت باشد، عملکرد سیستم بهتر از زمانی است که بیش از ۲۴ ساعت باشد. از آنجایی که در این مقایسه از پارامترهایی استفاده شده که زمان ماند هیدرولیکی در مخرج آن می‌باشد، بنابراین افزایش زمان ماند هیدرولیکی موجب کاهش مقدار آن پارامتر می‌شود. همچنین با توجه به داده‌های ارائه شده به طور کلی

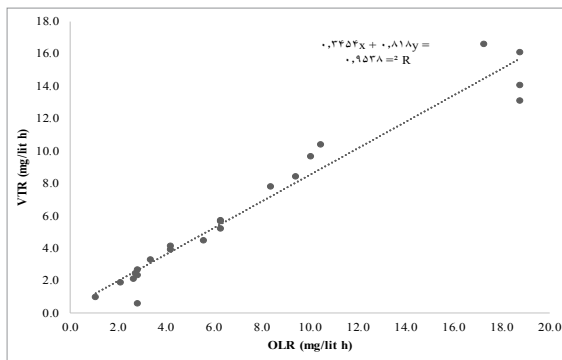


شکل ۷- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصدی یک دوره یک روز یا کمتر (۱۰ مورد) و یک دوره بیش از یک روز (۱۴ مورد) به عنوان زمان ماند هیدرولیک، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز به عنوان HRT، (ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NERV برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز، (د) نمودار جعبه محدوده مقدار NERdye برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز

$$VTR = 0.818 \times OLR + 0.3454 \quad (7)$$

$$(\Delta dye / HRT = 0.3454 + (0.818 \times dye_{inf} / HRT) \quad (8)$$

$$HRT = [\Delta dye - (0.818 \times dye_{inf})] / 0.3454 \quad (9)$$



شکل ۸- رابطه بین نرخ بارگذاری آلی و نرخ تصفیه حجمی

۳- چارچوب پیشنهادی برای مطالعات MFC

یکی از مشکلات اساسی در مسیر این پژوهش، عدم وجود اطلاعات کافی و مناسب بود. از آنجایی که پیل‌های سوختی میکروبی از لحاظ پیکربندی و ساختار، تفاوت زیادی با یکدیگر دارند، عدم وجود اطلاعات کافی، دسته‌بندی‌ها را با چالش مواجه می‌کند. یکپارچه‌سازی داده‌ها در راستای پردازش عمیق و دقیق‌تر اطلاعات توصیه می‌شود و برای نیل به این هدف، موارد موجود در جدول (۳) باید در مقالات گزارش شود.

۲- یافتن رابطه VTR و OLR

پارامتر VTR رابطه بین HRT و تغییرات غلظت رنگ را بیان می‌کند و می‌تواند برای طراحی سیستم تصفیه استفاده شود. می‌توان انتظار داشت که هر چه HRT طولانی‌تر باشد، VTR یک سیستم کمتر باشد. به این دلیل که فاضلاب برای مدت طولانی‌تری در راکتور حفظ می‌شود و بنابراین حجم کلی تصفیه شده در روز کاهش می‌یابد (Leicester و همکاران، ۲۰۲۰). زمان ماند هیدرولیکی کوتاه‌تر باعث می‌شود که فاضلاب زمان کافی برای متابولیسم آلاینده‌ها نداشته باشد و همچنین منجر به کاهش VTR می‌شود. چندین مطالعه با HRTهای کوتاه نیز VTRهای کم را گزارش کرده‌اند (Liang و همکاران، ۲۰۱۸). یک VTR بهینه باید وجود داشته باشد که بتوان از آن برای تعیین اندازه راکتور استفاده کرد. پس از رسم نمودار VTR به OLR که در شکل (۸) نمایش داده شده و تجزیه و تحلیل ترکیبی داده‌های آزمایشگاهی MFC، مشخص شد که همبستگی معنی‌داری بین OLR و VTR ($R^2 = 95.7\%$) وجود دارد. این بدان معنی است که به وسیله مقدار OLR مشخص، می‌توان VTR یک MFC را تخمین زد (معادله (۷)). بنابراین، اگر مقدار و نرخ غلظت رنگ آزو ($mg/lit h$) مشخص باشد، می‌توان از آن برای محاسبه قابل اعتماد نرخ تصفیه مورد انتظار در MFC استفاده کرد. با این کار می‌توان HRT (رابطه (۹) را محاسبه کرد.

جدول ۳- چارچوب پیشنهادی برای گزارش داده‌ها

۱. طراحی (MFC)	۲. پارامترهای بهره‌برداری	۳. پارامترهای اندازه‌گیری
<ul style="list-style-type: none"> • نوع پیل سوختی • حجم محفظه آند و کاتد • جنس الکترودها • ابعاد الکترودها • فاصله بین الکترودها • کاتالیست استفاده شده • نوع غشاء • ابعاد غشاء 	<ul style="list-style-type: none"> • دما و pH • نوع منبع COD • غلظت COD ورودی • غلظت آلاینده صنعتی ورودی • زمان ماند هیدرولیکی • مقاومت خارجی اعمال شده • حالت بهره‌برداری (پیوسته، دسته‌ای) • نوع و غلظت لجن جهت تلقیح 	<ul style="list-style-type: none"> • توان تولیدی • راندمان کاهش COD • راندمان حذف آلاینده مورد نظر • راندمان کولمبی

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده در صورتی که از پیل‌های سوختی میکروبی در حجم کمتر از یک لیتر استفاده می‌کنیم، بهتر است از پیل‌های تک محفظه بخاطر توان تولیدی بیشتر و بازده تصفیه بهتر استفاده کنیم؛ اما اگر انعطاف پذیری و کنترل بیشتر بر روی محیط MFC مدنظر باشد، بهتر است از حالت دو محفظه استفاده کرد. علیرغم نتایج بدست آمده در خصوص نوع مورفولوژی الکترودها، توصیه می‌شود از الکترودهای بررسی استفاده شود؛ قابل ذکر است که باید به نسبت حجم اشغال شده توسط الکترودها به حجم محفظه آند، توجه شود. گلوکز به عنوان منبع COD مناسب است و موجب پایداری بیشتر دستگاه می‌شود؛ هرچند باید در انتخاب سوپسترا به عواملی مانند طراحی MFC مورد نظر، شرایط عملیاتی و جامعه میکروبی توجه کرد. همچنین پیل‌های سوختی میکروبی در هنگام تصفیه فاضلاب حاوی رنگ آزو در مدت زمان ۲۴ ساعت، عمدتاً بازدهی رنگ‌زدایی بالاتر از ۹۰ درصد دارند و برای عدم اتلاف زمان و افزایش کارایی دستگاه بهتر است شرایط به گونه‌ای فراهم شود تا زمان ماند هیدرولیکی بیش از ۲۴ ساعت انتخاب نشود که برای دستیابی به این امر باید به پارامترهایی مانند کاتالیست مورد استفاده در الکترودها که نقش بسیار مهمی در فرآیند کاهش اکسیژن دارد توجه شود. مقدار نرخ تصفیه حجمی بر اساس نرخ بارگذاری آلی نیز با دقت مناسبی بدست آمد. در صورت گزارش‌دهی مناسب توسط محققان، به‌ویژه با رعایت چارچوب پیشنهادی، می‌توان بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر در راستای توسعه پیل‌های سوختی میکروبی انجام شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Advanced Oxidation Process
- 2-Microbial Fuel Cell
- 3-Proton Exchange Membrane

4-Activated Sludge

5-Organic Loading Rate

6-Volumetric Treatment Rate

7-Normalized Energy Recovery

منابع

- Ahn, E., & Kang, H. (2018). Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean journal of anesthesiology*, 71(2), 103-112. <https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103>
- Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020). Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>
- Dai, Q., Zhang, S., Liu, H., Huang, J., & Li, L. (2020). Sulfide-mediated azo dye degradation and microbial community analysis in a single-chamber air cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 131, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.107349>
- de Almeida, E. J. R., Halfeld, G. G., Reginatto, V., & de Andrade, A. R. (2021). Simultaneous energy generation, decolorization, and detoxification of the azo dye Procion Red MX-5B in a microbial fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106221. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106221>
- Feng, Y., He, W., Liu, J., Wang, X., Qu, Y., & Ren, N. (2014). A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Biore-source technology*, 156, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.104>

- [org/10.1007/s11157-009-9184-9](https://doi.org/10.1007/s11157-009-9184-9)
- Ilamathi, R., Sheela, A. M., & Gandhi, N. N. (2019). Comparative evaluation of *Pseudomonas* species in single chamber microbial fuel cell with manganese coated cathode for reactive azo dye removal. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 144, 104744. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104744>
- Ishaq, S., Sadiq, R., Farooq, S., Chhipi-Shrestha, G., & Hewage, K. (2020). Investigating the public health risks of low impact developments at residential, neighbourhood, and municipal levels. *Science of The Total Environment*, 744, 140778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140778>
- Izadi, P., Fontmorin, J.-M., Fernández, L. F., Cheng, S., Head, I., & Yu, E. H. (2019). High performing gas diffusion biocathode for microbial fuel cells using acidophilic iron oxidizing bacteria. *Frontiers in Energy Research*, 7, 93. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00093>
- Khan, M. D., Thimmappa, R., Anwer, A. H., Khan, N., Tabraiz, S., Li, D., Khan, M. Z., & Yu, E. H. (2021). Redox mediator as cathode modifier for enhanced degradation of azo dye in a sequential dual chamber microbial fuel cell-aerobic treatment process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(79), 39427-39437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.151>
- Leicester, D. D., Amezaga, J. M., Moore, A., & Heidrich, E. S. (2020). Optimising the hydraulic retention time in a pilot-scale microbial electrolysis cell to achieve high volumetric treatment rates Using concentrated domestic wastewater. *Molecules*, 25(12), 2945. <https://doi.org/10.3390/molecules25122945>
- Liang, P., Duan, R., Jiang, Y., Zhang, X., Qiu, Y., & Huang, X. (2018). One-year operation of 1000-L modularized microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Water research*, 141, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.066>
- Mateo, S., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Fernandez-Morales, F. J. (2018). Driving force behind electrochemical performance of microbial fuel cells fed with different substrates. *Chemosphere*, 207, 313-319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.100>
- Flimban, S. G., Ismail, I. M., Kim, T., & Oh, S.-E. (2019). Overview of recent advancements in the microbial fuel cell from fundamentals to applications: Design, major elements, and scalability. *Energies*, 12(17), 3390. <https://doi.org/10.3390/en12173390>
- Fonseca, E. U., Yang, W., Wang, X., Rossi, R., & Logan, B. E. (2021). Comparison of different chemical treatments of brush and flat carbon electrodes to improve performance of microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 342, 125932. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125932>
- Ge, Z., Li, J., Xiao, L., Tong, Y., & He, Z. (2014). Recovery of electrical energy in microbial fuel cells: brief review. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(2), 137-141. <https://doi.org/10.1021/ez4000324>
- Halepoto, H., Gong, T., & Memon, H. (2022). Current status and research trends of textile wastewater treatments-A bibliometric-based study [Original Research]. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1042256>
- Hou, B., Hu, Y., & Sun, J. (2012). Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled with different cathode types during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation. *Bioresource technology*, 111, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.017>
- Hou, B., Lu, J., Wang, H., Li, Y., Liu, P., Liu, Y., & Chen, J. (2019). Performance of microbial fuel cells based on the operational parameters of biocathode during simultaneous Congo red decolorization and electricity generation. *Bioelectrochemistry*, 128, 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.019>
- Huang, W., Chen, J., Hu, Y., Chen, J., Sun, J., & Zhang, L. (2017). Enhanced simultaneous decolorization of azo dye and electricity generation in microbial fuel cell (MFC) with redox mediator modified anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2349-2359. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.216>
- Husain, Q. (2010). Peroxidase mediated decolorization and remediation of wastewater containing industrial dyes: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 117-140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.001>

- Sato, C., Paucar, N. E., Chiu, S., Mahmud, M. Z., & Dudgeon, J. (2021). Single-chamber microbial fuel cell with multiple plates of bamboo charcoal anode: Performance evaluation. *Processes*, 9(12), 2194. <https://doi.org/10.3390/pr9122194>
- Solanki, K., Subramanian, S., & Basu, S. (2013). Microbial fuel cells for azo dye treatment with electricity generation: a review. *Bioresource technology*, 131, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.063>
- Su, L., Fan, X., Yin, T., Chen, H., Lin, X., Yuan, C., & Fu, D. (2015). Increasing power density and dye decolorization of an X-3B-fed microbial fuel cell via TiO₂ photocatalysis pretreatment. *Rsc Advances*, 5(102), 83906-83913. <https://doi.org/10.1039/C5RA16043J>
- Sun, J., Cai, B., Zhang, Y., Peng, Y., Chang, K., Ning, X., Liu, G., Yao, K., Wang, Y., & Yang, Z. (2016). Regulation of biocathode microbial fuel cell performance with respect to azo dye degradation and electricity generation via the selection of anodic inoculum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(9), 5141-5150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.114>
- Sun, J., Hu, Y.-y., Bi, Z., & Cao, Y.-q. (2009). Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 100(13), 3185-3192. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.002>
- Sun, J., Li, W., Li, Y., Hu, Y., & Zhang, Y. (2013). Redox mediator enhanced simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation in air-cathode microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 142, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.039>
- Sun, S., Ding, Y., Liu, M., Xian, M., & Zhao, G. (2020). Comparison of glucose, acetate and ethanol as carbon resource for production of poly (3-hydroxybutyrate) and other acetyl-CoA derivatives. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 833. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00833>
- Tan, S.-M., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Abidin, C. Z. A., Teoh, T.-P., & Yap, K.-L. (2022). Discerning the biodegradation of binary dyes in microbial fuel cell: Interactive effects of dyes, electron transport
- Méndez-Paz, D., Omil, F., & Lema, J. (2005). Anaerobic treatment of azo dye Acid Orange 7 under fed-batch and continuous conditions. *Water research*, 39(5), 771-778. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.022>
- Oon, Y.-S., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-L., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2021). Innovative baffled microbial fuel cells for azo dye degradation: Interactive mechanisms of electron transport and degradation pathway. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126366>
- Patil, S. A., Gildemyn, S., Pant, D., Zengler, K., Logan, B. E., & Rabaey, K. (2015). A logical data representation framework for electricity-driven bioproduction processes. *Biotechnology advances*, 33(6), 736-744. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.03.002>
- Plappally, A. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4818-4848. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.022>
- Raqba, R., Rafaqat, S., Ali, N., & Munis, M. F. H. (2022). Biodegradation of Reactive Red 195 azo dye and Chlorpyrifos organophosphate along with simultaneous bioelectricity generation through bacterial and fungal based biocathode in microbial fuel cell. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103177. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103177>
- Ravinuthala, S., Nair, A. V., Sharma, N., Lokesh, S., Madhusudhan, M., & Das, S. P. (2022). Co-substrates' influence on bioelectricity production in an azo dye-based microbial fuel cell. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101012. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101012>
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J.-S., & Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers*, 42(1), 138-157. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>
- Saravanan, N., & Karthikeyan, M. (2018). Study of single chamber and double chamber efficiency and losses of wastewater treatment. *Int Res J Eng Technol*, 5, 1225-1230. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229368429>

- Zafar, H., Ishaq, S., Peleato, N., & Roberts, D. (2022). Meta-analysis of operational performance and response metrics of microbial fuel cells (MFCs) fed with complex food waste. *Journal of Environmental Management*, 315, 115152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115152>
- behaviour, autocatalytic mechanism, and degradation pathways. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107739. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107739>
- Tan, S.-M., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Thung, W.-E., & Teoh, T.-P. (2020). The reaction of wastewater treatment and power generation of single chamber microbial fuel cell against substrate concentration and anode distributions. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 793-807. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00504-w>
- Tremouli, A., Martinos, M., & Lyberatos, G. (2017). The effects of salinity, pH and temperature on the performance of a microbial fuel cell. *Waste and biomass valorization*, 8, 2037-2043. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9712-0>
- Ullah, Z., & Zeshan, S. (2020). Effect of substrate type and concentration on the performance of a double chamber microbial fuel cell. *Water Science and Technology*, 81(7), 1336-1344. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.387>
- Van der Zee, F. P., Lettinga, G., & Field, J. A. (2001). Azo dye decolourisation by anaerobic granular sludge. *Chemosphere*, 44(5), 1169-1176. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00270-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00270-8)
- Velasquez-Orta, S. B., Yu, E., Katuri, K. P., Head, I. M., Curtis, T. P., & Scott, K. (2011). Evaluation of hydrolysis and fermentation rates in microbial fuel cells. *Applied microbiology and biotechnology*, 90, 789-798. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3126-5>
- Yadav, A., Kumar, P., Rawat, D., Garg, S., Mukherjee, P., Farooqi, F., Roy, A., Sundaram, S., Sharma, R. S., & Mishra, V. (2022). Microbial fuel cells for mineralization and decolorization of azo dyes: Recent advances in design and materials. *Science of The Total Environment*, 826, 154038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154038>
- Yuan, H., Hou, Y., Abu-Reesh, I. M., Chen, J., & He, Z. (2016). Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: a review. *Materials Horizons*, 3(5), 382-401. <https://doi.org/10.1039/C6MH00093B>