



Investigating the relationship between artificial lagoon and microbial fuel cell to increase the removal of pollutants and electricity generation

Hoda Kahrizi¹, Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh^{✉2}

1. Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran, kahrizi.hoda@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran, sehashemi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: Jan. 26, 2022

Received: May. 4, 2022

Accepted: May. 10, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:

Constructed wetlands,
Electricity generation,
Microbial fuel cell,
Wastewater treatment .

ABSTRACT

Recently, there has been significant research into Microbial Fuel Cell (MFC) technology due to its potential for simultaneous bioenergy generation and wastewater treatment. The fundamental physical processes within CW and MFC are highly complementary, and combining them offers a number of tantalising possibilities for greatly improving wastewater treatment methods. Recent findings have demonstrated a number of beneficial symbiotic interactions that improve overall system performance within an integrated CW-MFC system. Notably, CW operation is enhanced by improvements in the electrochemically active bacteria population at the electrode surfaces, consequently boosting wastewater treatment efficiency. Similarly, the MFC can utilise the natural redox gradient present within CW to assist bioelectricity generation. In this review article, the performance of integrated CW-MFC systems was discussed in comparison with both standalone MFC and CW systems based on criteria that the review identified as significant. The review shows that the combination of CW and MFC increases wastewater treatment efficiency by phytoremediation, MFC power generation is enhanced by the action of the wetland plants, and wetland greenhouse gas emissions are reduced due to the dominance of electrogenic bacteria. Consequently, a CW-MFC can achieve higher efficiency for contaminant removal and bioelectricity generation compared to standalone CWs and MFCs. However, in view of the physical size and operational life span of wastewater treatment systems required for domestic or metropolitan applications, the CW-MFCs presented within the literature are small and have only been studied over short periods of time. Large-scale controlled trials and long-term studies are urgently needed to provide more definitive evidence that can enable CW-MFC technology to advance to the point of successful implementation.

Cite this article: Kahrizi, H., & Hashemi Garmdareh, S. E. (2022) Investigating the relationship between artificial lagoon and microbial fuel cell to increase the removal of pollutants and electricity generation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 897-916.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.337345.669183>



بررسی ارتباط میان تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی برای افزایش حذف آلاینده‌ها و تولید برق

هدی کهریزی^۱، سید ابراهیم هاشمی گرمدره^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران، kahrizi.hoda@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران، sehashemi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	اخیرا سلول‌های سوختی میکروبی به دلیل امکان تولید برق و تصفیه پساب به طور همزمان، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. فرایندهای فیزیکی در سلول‌های سوختی میکروبی و تالاب‌های مصنوعی مکمل یکدیگر می‌باشند. بنابراین ادغام آن‌ها موجب بهبود عملکرد سامانه‌ها در تصفیه پساب می‌شود. یافته‌های اخیر نشان می‌دهد استفاده از سامانه سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی موجب بهبود عملکرد سامانه می‌شود. در تالاب مصنوعی با افزایش جمعیت باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی در سطوح الکتروکود عملکرد سامانه افزایش می‌یابد و در نتیجه راندمان تصفیه پساب را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. سلول‌های سوختی میکروبی نیز می‌توانند از گرادیان اکسایش-کاهش طبیعی در تالاب مصنوعی به منظور تولید برق استفاده کنند. هدف از این پژوهش مقایسه سامانه ادغام شده سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با سامانه‌های سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی است. این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام سلول سوختی میکروبی با تالاب مصنوعی موجب افزایش راندمان تصفیه پساب بوسیله گیاه پالایی، تولید بیشتر برق بوسیله فعالیت گیاهان تالابی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بوسیله باکتری‌های الکتروژنی می‌شود. راندمان حذف پساب و تولید برق در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی به ترتیب حدود ۸ درصد و ۱۵ درصد بیشتر است. با این حال، با توجه به اندازه و طول عمر سامانه‌های تصفیه پساب، سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بررسی شده در مطالعات در مقیاس کوچک هستند و تنها در دوره‌های زمانی کوتاه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اجرای آزمایش‌هایی با مقیاس بزرگتر و طولانی مدت جهت اثبات موثر بودن سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی ضروری می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱	
واژه‌های کلیدی: تالاب مصنوعی، سلول سوختی میکروبی، تصفیه پساب، تولید برق.	

استناد: کهریزی، هدی؛ و هاشمی گرمدره، س.ا (۱۴۰۱). بررسی ارتباط میان تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی برای افزایش حذف آلاینده‌ها و تولید برق. مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۴)، ۸۹۷-۹۱۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.337345.669183>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

افزایش مصرف آب و انرژی به عنوان یک چالش مهم در قرن ۲۱ مطرح است بنابراین بکارگیری روش‌های کم هزینه جهت تصفیه پساب و بازیافت انرژی ضروری می‌باشد.

فناوری تالاب‌های مصنوعی از فرایندهای طبیعی جهت تصفیه آلاینده‌ها استفاده می‌کنند که از نظر زیست محیطی ایمن بوده و هزینه ساخت، بهره‌برداری و اجرای کمتری درمقایسه با روش‌های متداول تصفیه پساب دارند (Li et al., 2014). سامانه‌های تالاب مصنوعی برای تصفیه انواع مختلف پساب شامل پساب شهری (Schemitt et al., 2015)، خروجی معادن (Sheridan et al., 2018)، شیرابه‌ها (Mulamoottil et al., 2018) مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهمترین معایب فناوری تالاب مصنوعی راندمان کم آن در حذف نیترژن است. راندمان حذف نیترژن در تالاب مصنوعی ۴۰-۵۰ درصد با غلظت اولیه ۲-۰/۶ گرم بر مترمربع بر روز است (Li et al., 2014; Liu et al., 2019). راه حل‌های مختلفی برای حل این مشکل ارائه شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از ۱. بکارگیری منبع اضافه کردن اکسیژن به منظور تکمیل فرایند اکسیداسیون و نیتریفیکاسیون که با توجه به هزینه بالای آن پایدار نمی‌باشد. ۲. اضافه کردن مواد آلی به عنوان دهنده الکترون برای حذف نیترژن که مهمترین عیب آن افزایش هزینه، تشکیل زیست توده، افزایش COD، کدورت و کاهش اکسیژن محلول می‌باشد (Wu et al., 2017). سایر روش‌ها مانند استفاده از بیوجار در قسمت هوازی تالاب مصنوعی (Feng et al., 2020)، اکسیژن‌رسانی شیمیایی با پراکسید هیدروژن (Dinakar et al., 2020)، افزودن آهن دو ظرفیتی (Zhang et al., 2019)، هوادهی متناوب با استفاده و بدون استفاده از بیوجار (Li et al., 2019)، اصلاح نسبت کربن به نیترژن (Wang et al., 2020)، استفاده از سنگ معدن منگنز (Yang et al., 2019) به منظور افزایش حذف نیترژن در سامانه می‌باشد. علیرغم افزایش راندمان حذف نیترژن، روش‌های مورد اشاره دارای محدودیت‌هایی از قبیل افزایش هزینه و اثرات مخرب زیست‌محیطی را نیز به همراه دارند. بنابراین استفاده از روشی با هزینه کم، عدم آسیب به محیط زیست و دارا بودن راندمان بالا برای حذف نیترژن ضروری می‌باشد.

یک روش عملی برای افزایش حذف نیترژن در تالاب مصنوعی، ادغام این سامانه با سایر فرایندهای بیولوژیکی می‌باشد (Liu et al., 2015; Srivastava et al., 2018). یکی از بهترین گزینه‌ها برای ادغام، سلول سوختی میکروبی می‌باشد که یک فناوری بیوالکتروشیمیایی موثر برای حذف همزمان آلاینده‌ها و تولید برق است. از نظر صرفه‌جویی در هزینه‌های هوادهی و دفع لجن و خروجی‌های سامانه مانند نیرو، نسبت به فناوری‌های تصفیه متداول مانند لجن فعال یا مخزن سپتیک مزایای متعددی را دارا می‌باشد (Ramirez-Vargas et al., 2019).

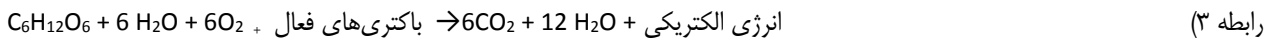
در سال‌های اخیر ادغام سلول سوختی میکروبی با دیگر فرایندهای تصفیه مانند بیوراکتورهای غشایی، هاضم‌های بی‌هوازی، سامانه‌های هوازی، فناوری‌های جذب، یا تالاب‌ها با هدف بهبود حذف آلاینده‌ها و تولید بیوالکتریک مورد توجه قرار گرفته است (Srivastava et al., 2018; Xu et al., 2019; Cao et al., 2016; al., 2016). از میان فناوری‌های گفته شده، سامانه‌های جذب قابلیت بهتری برای حذف طیف‌های مختلفی از آلاینده‌هایی که از طریق سلول سوختی میکروبی حذف نمی‌شوند را دارند (Bolton and Randall., 2019). دلیل عمده آن فرآیند فیزیکی شیمیایی درون جاذب‌ها است که به حذف آلودگی و فرآیند بیوالکتروشیمیایی در سلول سوختی میکروبی کمک می‌کند. بنابراین ادغام سلول سوختی میکروبی با فرایندهای جذب موجب افزایش کیفیت حذف پساب و بهبود تولید برق می‌شود (Tee et al., 2016). تالاب مصنوعی شرایط فیزیکی شیمیایی را فراهم می‌کند که برای سلول سوختی میکروبی موثر است و سلول سوختی میکروبی موجب بهبود شرایط الکروشیمیایی می‌شود که برای حذف آلاینده در تالاب مصنوعی موثر است. ادغام سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی فرصتی را برای افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها نسبت به سامانه‌های مجزا فراهم می‌کند. علیرغم پتانسیل کم تالاب‌های مصنوعی در حذف نیترژن، این سامانه به دلیل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مرتبط با هم پتانسیل بالایی در حذف مواد آلی دارد (Sanjrani et al., 2020). سلول‌های سوختی میکروبی همچنین دارای راندمان تصفیه بالایی هستند که ناشی از مکانیسم‌های بیوالکتروشیمیایی مختلف مانند تجزیه آلاینده از طریق واکنش‌های اکسایش-کاهش در محفظه‌های آند و کاتد، جذب آلاینده‌ها بر روی بیوفیلم‌های فعال در الکتروود و در نتیجه تولید برق است (Wu et al., 2018; Wu et al., 2020; Ebrahimi et al., 2017). ادغام سلول‌های سوختی میکروبی و تالاب‌های مصنوعی موجب می‌شود فرایندهای کلیدی هر دو سامانه کارآمدتر بوده و موجب افزایش راندمان حذف انواع مختلف آلاینده‌ها مانند رنگ (Oon et al., 2020; Oon et al., 2018; Rathour et al., 2019; Li et al., 2016; Fang et al., 2016; Fang et al., 2018; Fang et al., 2013; al., 2017; Fang et al., 2013)، آنتی‌بیوتیک‌ها (Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2019; Li et al., 2019; Li et al., 2018; Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2016; al., 2016)، روغن (Yang et al., 2016)، نیتروبنزن (Di et al., 2020)، بروم (Turker et al., 2017)، روی (Wang et al., 2020)، سرب (Zhao et al., 2020) و کروم (Mu et al., 2020) در مقایسه با سامانه‌های مجزا می‌شود.

سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی عمودی از چهار بخش تشکیل شده است: بخش بی‌هوازی (آند)، فیلتر میانی (جداکننده)، بخش هوازی (کاتد) و بخش گیاهی.

فرمول‌های شیمیایی آند (در صورتی که گلوکز به عنوان سوبسترا باشد) و کاتد به ترتیب به صورت معادلات ۱ و ۲ آمده است. معادله ۳ معادله



کلی سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌باشد. سایر واکنش‌ها در محفظه کاتد و آند وابسته به دهنده/گیرنده الکترون می‌باشد.



ناحیه‌های بی‌هوازی و هوازی در سلول‌های سوختی میکروبی شیب پتانسیل اکسایش-کاهش را برای انتقال الکترون و پروتون از منطقه آند به کاتد بوجود می‌آورند که برای سلول سوختی میکروبی مورد نیاز می‌باشد. در آند باکتری‌های فعال الکترون را از طریق تجزیه مواد آلی بوجود آورده و آن‌ها را از طریق مدار خارجی به گیرنده الکترونی در کاتد منتقل کرده و جریان برق تولید می‌شود. چرخه الکتروشیمیایی با انتقال پروتون از طریق جریان داخل راکتور تکمیل می‌شود (Wang et al., 2019). مکانیسم انتقال الکترون یکی از تاثیرگذارترین اجزا تولید برق در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی است. انتقال می‌تواند از طریق تماس مستقیم بین باکتری‌های الکترواکتیو و سطح الکتروود (از طریق بیوفیلم یا نانوسیم) یا به طور غیرمستقیم از طریق یک واسطه الکترونی انجام شود (Logan., 2009). از آنجایی که بیشتر واسطه‌ها گران بوده و برای میکروارگانیزم‌ها سمی هستند، انتقال مستقیم الکترون معمولاً اولین و بهترین گزینه در نظر گرفته می‌شود (Cao et al., 2019). با این حال، انتقال مستقیم الکترون به دلیل حساسیت فعالیت‌های کاتالیزوری میکروارگانیزم‌ها به تغییرات محیطی مانند pH، DO، دما و مواد شیمیایی دارای محدودیت است (Cao et al., 2017; Kumar et al., 2016; Kumar et al., 2017; al., 2019). بنابراین پژوهش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی شرایط سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی و جمعیت میکروبی انجام شده است (Wang et al., 2020; Yan et al., 2018; Wang et al., 2016; Zhao et al., 2020). در طی سال‌های گذشته پژوهش‌های مختلفی با هدف افزایش چگالی تولید برق و راندمان حذف آلاینده انجام شده است (Dai et al., 2020; Liu et al., 2019; Yang et al., 2019; Xu et al., 2018; Corbella et al., 2018; Srivastava et al., 2020; Wang et al., 2017; Wang et al., 2016; Liu et al., 2020; Corbella and Puigagut, 2018; et al., 2019). نقش گیاه (Liu et al., 2013; Yang et al., 2021, Oodally et al., 2019; Zhao et al., 2018; Hussain and Ismail, 2020)، عملکرد جمعیت باکتریایی (Yang et al., 2020) و نوع سوبسترا (Lu et al., 2015; Xu et al., 2020; Li et al., 2020; Wang et al., 2020) نیز به عنوان نمونه پژوهش انجام شده توسط Srivastava et al. (2020) پیرامون سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی نشان داد راندمان حذف این سامانه ۹۹/۵ درصد، راندمان حذف نیترژن ۹۰ درصد و راندمان حذف آمونوم ۹۴/۴ درصد بدست آمد. (Rathour et al. (2019) به مقایسه سامانه تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد راندمان حذف COD در تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی به ترتیب ۶۲/۷ درصد و ۷۰ درصد بدست آمد و راندمان حذف رنگ نیز به ترتیب ۷۳/۲ درصد و ۸۲/۲ درصد بوده است. همچنین Li et al. (2019) به بررسی راندمان حذف COD و مقدار برق تولید شده در سامانه سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد راندمان حذف COD در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی ۸۸/۵ درصد، چگالی توان ۲۸/۶ میلی‌وات بر مترمربع و مقدار ولتاژ ۵۳۰ میلی‌ولت بود. (Oon et al. (2019) به بررسی راندمان حذف رنگ از سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با استفاده از گیاه لوئی پرداختند. نتایج نشان داد راندمان حذف COD ۷۷ درصد، راندمان حذف رنگ ۹۶ درصد، حداکثر چگالی توان ۱/۵۸ میلی‌وات بر مترمربع و مقدار ولتاژ تولید شده ۲۱۵ میلی‌ولت بدست آمد. مقاله مروری Ji et al. (2021) به تجزیه و تحلیل سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداخته است و موضوعات تحقیقات کلیدی را در این زمینه ارائه نموده است. هدف از سایر مقالات مروری کمک به پژوهشگران در درک معیارهای اصلی طراحی این فناوری است (Xu et al., 2016; Guadarrama-Perez et al., 2019; Doherty et al., 2015). با این حال، مزایا و معایب سامانه ترکیبی (سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی) نسبت به سامانه‌های منفرد (تالاب مصنوعی یا سلول سوختی میکروبی) تا به حال در یک مقاله مروری بیان نشده است. این مقاله مروری به بررسی پژوهش‌های منتشر شده در این زمینه می‌پردازد تا یک ارزیابی و مقایسه جامع بین سلول سوختی میکروبی، تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی از نظر حذف آلاینده‌ها، تولید انرژی و پایداری ارائه دهد.

۲. مقایسه عملکرد تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی با سامانه‌های سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی

تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی زمانی که به صورت مجزا بکار می‌روند دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. فناوری سلول سوختی میکروبی دارای راندمان تصفیه زیاد است اما توان تولید برق کم و هزینه‌بر بودن از معایب این فناوری می‌باشد. در مقایسه در تالاب مصنوعی بهره‌برداری آسان و هزینه اولیه و بهره‌برداری کم از مزایای این فناوری می‌باشد اما راندمان حذف نیترژن در آن بسیار کم است. ادغام تالاب مصنوعی با سلول سوختی میکروبی به عنوان یک سامانه هیبریدی می‌تواند برخی از محدودیت‌های هر دو سامانه را کاهش داده و ویژگی‌های مثبت آن‌ها را افزایش دهد.

وجود شیب طبیعی اکسایش-کاهش در تالاب مصنوعی (از قسمت هوازی تا قسمت بی‌هوازی) شرایط بهینه مورد نیاز برای عملکرد موفقیت آمیز سلول سوختی میکروبی را فراهم می‌کند (Rathour et al., 2019). با افزایش عمق در ستون تالاب، یک محیط بی‌هوازی به ویژه در لایه

عمیق‌تر بوجود می‌آید. انتقال پروتون از ناحیه بی‌هوازی به ناحیه هوازی موجب ایجاد گرادیان بار در ستون تالاب مصنوعی شده که نتیجه آن انتقال الکترون و تولید انرژی می‌باشد (Treesubstantorn et al., 2019). گرادیان اکسایش-کاهش عمودی طبیعی را می‌توان با قرار دادن یک الکتروند آند در ناحیه بی‌هوازی (لایه پایین) و یک الکتروند کاتد در یک منطقه هوازی (لایه سطحی) مورد بهره‌برداری قرار داد (Zhao et al., 2013). علاوه بر این، اکسیژن موجود در لایه سطحی تالاب‌ها برای واکنش‌های کاتدی در سلول سوختی میکروبی موثر است. شرایط هوازی در لایه سطحی تالاب از طریق نفوذ اکسیژن از هوای مجاور یا آزاد شدن اکسیژن از فرآیندهای بیولوژیکی گیاه فراهم می‌شود. فرایند ادغام همچنین می‌تواند با در اختیار گذاشتن کربن اضافه به باکتری‌ها موجب افزایش تولید برق در سلول سوختی میکروبی شود (Xie et al., 2018). این بهبود عملکرد به دلیل روابط مستقیم بین گیاهان و باکتری‌ها در سیستم یکپارچه می‌باشد. گیاهان مواد مغذی را جذب کرده و از طریق فرآیند فتوسنتز اکسیژن را آزاد می‌کنند که موجب تولید سلولز می‌شوند، سلولز تولید شده در سلول‌های گیاه جمع شده و برای رشد آن‌ها مصرف می‌شود. کربن‌های آلی محلول تولید شده توسط گیاهان از طریق ریشه به خاک اطراف منتقل شده و جوامع میکروبی موجود در خاک از این ترکیبات به عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند.

یکی از فواید مهم ادغام سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی افزایش راندمان حذف نیترژن در تالاب‌های مصنوعی است. حذف نیترژن در سلول سوختی میکروبی توسط فرآیندهای بیوالکتروشیمیایی انجام می‌شود (Ucar et al., 2017). بیوکاتد در سلول سوختی میکروبی از نیتريت و نیترات به عنوان گیرنده الکترون استفاده می‌کند (Kelly and He, 2014; Clauwaert et al., 2007; Virdis et al., 2010; Virdis et al., 2008; Puig et al., 2011) که به طور مستقیم موجب افزایش راندمان حذف نیترژن می‌شود (Wang et al., 2016). مطالعات بر روی حذف نیترژن در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی امکان حذف نیترژن را زمانی که نیترات به عنوان گیرنده الکترون در واکنش‌های کاهشی کاتد شرکت می‌کند نشان داد (Wang et al., 2017; Logan, 2008; Gonzalez et al., 2021; Ge et al., 2020). فرایند استفاده از نیترات به عنوان گیرنده الکترون در معادله ۴ آمده است (Oon et al., 2018).

با این حال، زمانی که نیترات تنها پذیرنده الکترون باشد حداکثر پتانسیل سلول به دلیل پتانسیل کم اکسایش-کاهش نیترات کاهش می‌یابد (Ucar et al., 2017) ($ENO_3 = 0.7 V$).



بنابراین راندمان حذف آلاینده‌ها در سلول سوختی میکروبی وابسته به عملکرد باکتری‌های الکترواکتیو و پتانسیل واکنش‌های اکسایش-کاهش است. سلول سوختی میکروبی برای حفظ تراکم باکتری و کارایی تصفیه نیاز به منابع غذایی مداوم باکتریایی دارد (Ebrahimi et al., 2016). پژوهش‌های مختلفی به مقایسه سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی به صورت مجزا و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی به صورت ادغام شده پرداخته‌اند. برای مقایسه دو فرض کلیدی در نظر گرفته شد، اول اینکه اگر مدار خارجی بین آند و کاتد در یک سامانه سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی قطع شود (مدار باز) سامانه به عنوان یک تالاب مصنوعی مستقل عمل می‌کند. دوم اینکه اگر گیاهی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی وجود نداشته باشد سامانه به عنوان سلول سوختی میکروبی با مدار خارجی عمل می‌کند (Oon et al., 2020). در این بخش ضمن بررسی تمامی مطالعات انجام شده در این زمینه، عملکردهای کلیدی سیستم‌های مستقل و یکپارچه مقایسه شده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از این مقایسه‌ها را بر اساس یافته‌های اخیر ارائه می‌دهد.

مطابق جدول (۱) سیستم ادغام شده عملکرد بهتری در حذف آلاینده‌ها و تولید برق داشته است. به طور کلی، وجود لایه‌های کربنی آندی و کاتدی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی موجب ایجاد یک سطح بزرگ و بسیار متخلخل شده که به رشد باکتری‌های نیتروژنیک و الکتروژنیک کمک می‌کند. بنابراین ادغام تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی روش موثری برای غلبه بر معایب تالاب مصنوعی در حذف نیترژن و همچنین تولید مقدار بیشتر انرژی است.

به طور کلی، مزیت اصلی سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با سلول سوختی میکروبی مجزا، هزینه نسبتاً کم، سهولت اجرا و پایداری بالای سیستم است، در حالی که معایب اصلی شامل مقاومت داخلی بالا و خروجی انرژی بسیار کم می‌باشد (Xu et al., 2019). دلیل کم بودن مقدار چگالی توان تولید شده در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی کم بودن راندمان کلمبیک یا زیاد بودن مقاومت داخلی به دلیل حجم زیاد مورد نیاز تالاب مصنوعی است (Xu et al., 2016).

حذف مواد مغذی

در تالاب‌های مصنوعی معمولی وجود لایه‌های هوازی (بالاترین لایه)، بدون اکسیژن (لایه میانی) و بی‌هوازی (لایه پایین) شرایط طبیعی را برای حذف نیترژن فراهم می‌کند. نیترژن از طریق دو مرحله اصلی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون حذف می‌شود. یک گیرنده الکترون (به عنوان مثال اکسیژن) برای تبدیل آمونیوم به نیتريت و نیترات با استفاده از باکتری‌های هوازی مورد نیاز است، در حالی که یک دهنده الکترون (به عنوان مثال کربن) برای تبدیل نیترات به گاز نیترژن با استفاده از میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مورد نیاز است (Paredes et al., 2007). حذف نیترژن در تالاب‌های مصنوعی وابسته به وجود و تعادل میان دهندگان الکترون (COD و آمونیوم) و پذیرندگان الکترون (اکسیژن، نیترات) است. پساب ورودی به سامانه همواره دارای مقدار زیادی دهنده الکترون (COD و آمونیوم) است درحالی‌که مقدار پذیرنده الکترون (اکسیژن، نیترات) کمتر است. در صورتی

که مقدار COD کافی باشد توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و آمونیوم می‌تواند به نیترات و نیتريت تبدیل شود. اما مقدار اکسیژن تولید شده توسط فتوسنتز در تالاب مصنوعی برای اکسیداسیون COD و فرایند نیتریفیکاسیون کافی نیست بنابراین همواره مقداری از نیتروژن به شکل نیترات باقی‌مانده و حذف کل نیتروژن در سیستم کاهش می‌یابد. علیرغم پتانسیل تالاب مصنوعی در حذف مقدار زیادی از COD، تنها ۴۰ درصد و ۷۵ درصد از نیتروژن به ترتیب در تالاب‌های مصنوعی افقی و عمودی حذف می‌شوند (Srivastava et al., 2020; Corbella et al., 2015).

جدول ۱. مقایسه عملکرد تالاب مصنوعی، سلول سوختی میکروبی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در شرایط مشابه

منبع	ولتاژ (میلی‌ولت) مقاومت داخلی (اهم)	حداکثر چگالی توان تولیدی	حذف آلاینده (درصد)	حذف COD (درصد)	فرایند
Srivastava et al, 2015	۰	۰	-	۶۳/۸	CW ^۱
	-	(mW/m ³) ۳۲۰/۸	-	۸۶	CW-MFC ^۲
Yang et al, 2016	ولتاژ=۰	۰	۴۸	۷۳	CW
	ولتاژ=۴۰۰	(mW/m ³) ۳۰۴۴	۵۹	۷۵	MFC ^۳
Wang et al, 2016	ولتاژ=۴۳۰	(mW/m ³) ۳۸۶۸	۵۷	۷۳	CW-MFC
	ولتاژ=۸۷	(mW/m ²) ۴/۱۸	نیترات=۸۰/۷	۴۴/۵	CW-MFC
Xi et al, 2018	ولتاژ=۲۵۰	(mW/m ²) ۰/۵۹	نیتروبنزن=۸۱/۵	۷۶	CW
	مقاومت=۴۵۰	(mW/m ²) ۱/۵۳	نیتروبنزن=۸۳/۵	۷۹	CW-MFC
Araneda et al, 2018	۰	۰	نیتروژن=۶۱/۵	۹۰	CW
	-	(mW/m ³) ۷۲۰	نیترات=۹۹/۵	۹۱/۷	CW-MFC
Xu et al, 2018	ولتاژ=۲۶۶	۰	نیتروژن=۹۳/۶	۷۵/۷	CW
	مقاومت درونی=۳۷۳	(mW/m ²) ۳۷۱۴	نیتروژن=۹۵/۱	۸۲/۳	CW-MFC
			آمونیوم=۷۷/۸		

CW = تالاب مصنوعی، MFC = سلول سوختی میکروبی، CW-MFC = سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی

مطابق داده‌های جدول (۱) اکثر پژوهشگران گزارش کردند که در سامانه‌های ادغام شده راندمان حذف نیتروژن افزایش یافت (Liu et al, 2019; Li et al, 2019; Hartl et al, 2019; Srivastava et al, 2020; Liu et al, 2019). بهبود حذف نیتروژن در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با تالاب مصنوعی مجزا به صورت گرافیکی در شکل (۱) نشان داده شده است. ادغام تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی موجب افزایش ۱۲/۲ درصدی حذف مواد مغذی می‌شود. همچنین مطابق نتایج در سامانه ادغام شده راندمان فرایندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون افزایش یافته است (Xu et al., 2016) که دلیل آن فراوانی باکتری‌های نیتریفیک کننده در ناحیه کاتدی سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی و همچنین افزایش جامعه باکتری‌های دنیتریفیک کننده و اکسیدکننده آمونیوم در ناحیه آند می‌باشد (Wei et al., 2015; Wang et al., 2020). فرآیند آناموکس^۴ یک مسیر جایگزین برای حذف نیتروژن در تالاب مصنوعی می‌باشد که در آن آمونیاک به صورت اتوتروف به نیتروژن اکسید می‌شود و نیترات به عنوان گیرنده الکترون در شرایط بی‌هوازی استفاده می‌شود (Lee et al., 2009).

افزایش حذف نیتروژن در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با تالاب مصنوعی مجزا به عوامل مختلفی بستگی دارد. مهم‌ترین عامل تاثیرگذار افزایش جمعیت باکتریایی و افزایش باکتری الکتروژنیک می‌باشد که موجب افزایش اکسیداسیون آمونیوم در شرایط بی‌هوازی، مقدار نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌شود (Li et al., 2019; Gonzalez et al., 2021; Xu et al., 2018). سطح ناهموار و رسانایی بالای مواد الکتروژن در آند و کاتد باعث افزایش باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک، باکتری‌های اکسیدکننده نیتريت و باکتری‌های آناموکس در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌شود (Xu et al., 2018; Du et al., 2014). علاوه بر این، فرایندهای اصلی حذف نیتروژن در تالاب مصنوعی شامل اکسیداسیون آمونیاک، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، جذب و جذب گیاهی می‌باشد (Lee et al., 2009; Vymazal, 2007). در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی، علاوه بر فرایندهای فوق، نیتروژن را می‌توان با مشارکت نیترات در واکنش احیای کاتدی نیز حذف کرد (Wu et al, 2015). مطابق یافته‌های (Srivastava et al, 2020)، الکتروژن آند در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌تواند به عنوان گیرنده الکترون برای اکسیداسیون آمونیوم تحت شرایط بی‌هوازی عمل کند. این فرضیه اولین بار توسط (Qu et al, 2014) ارائه

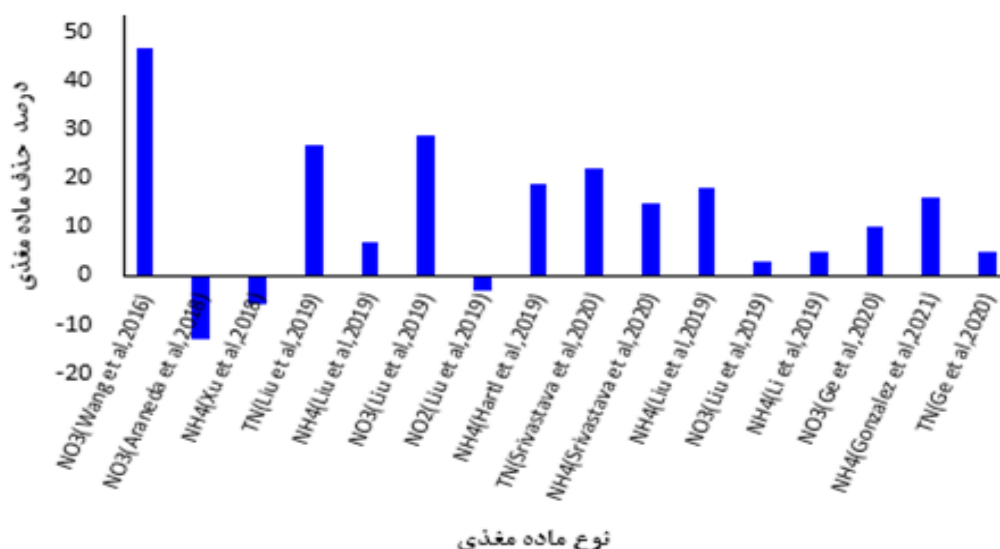
¹ Constructed Wetland

² Constructed Wetland-Microbial Fuel Cells

^۳ Microbial Fuel Cell

⁴ Anammox

شد و پژوهش‌های متعددی در ادامه انجام شد (Vilajeliu-Pons et al., 2018; Hassan et al., 2018). با این وجود، نیاز به تجزیه و تحلیل میکروبی بیشتر برای بدست آوردن اطلاعات دقیق در مورد گونه‌های باکتریایی غالب برای فرآیند اکسیداسیون بی‌هوازی آمونیوم می‌باشد.



شکل ۱. راندمان حذف مواد مغذی در پژوهش‌های مختلف

حذف نیتروژن در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با استفاده از الکترون‌ها و باکتری‌ها در سطح الکتروتود افزایش می‌یابد (Li et al., 2018; Xu et al., 2019). این نظریه اولین بار توسط Wang et al. (2016) بیان شد. نتایج آن‌ها افزایش ۱۸/۹ درصدی حذف COD و ۴۹/۹ درصدی حذف نیترات را به دلیل تکثیر باکتری‌های Betaproteo موثر در فرایندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با تالاب مصنوعی نشان داد. مقدار مواد مغذی و آلی حذف شده در پژوهش‌های مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق نتایج پژوهش‌ها، فناوری سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی موجب افزایش عملکرد حذف مواد مغذی می‌شود. اگرچه افزایش حذف وابسته به طراحی و ساخت سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی و ویژگی‌های پساب مورد استفاده است.

جدول ۲. حداکثر مواد مغذی حذف شده در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در پژوهش‌های مختلف

منبع	حذف فسفر (درصد)	حذف نیترات (درصد)	حذف آمونیوم (درصد)	حذف نیتروژن (درصد)	حذف COD (درصد)	غلظت اولیه (mg/l) COD
Gonzalez et al., 2015	-	-	۹۸	-	۸۷/۴	۲۵۰
Wen et al., 2020	-	-	۹۶/۸	-	۸۶/۴	۲۲۲
Li et al., 2020	-	-	۵۳	-	۹۰	۱۰۰۰
Gi et al., 2020	۹۱/۲	۷۰/۱	-	-	۷۱/۹	۲۱۷
Gi et al., 2020	-	۶۵	-	-	۶۶/۵	۳۱۹
Tang et al., 2019	-	-	۹۷/۳	-	۹۱/۷	۵۰۰
Tamta et al., 2020	-	۸۶/۹	۹۰/۴	-	۹۸/۵	۱۰۰۰
Srivastava et al., 2020	-	-	۹۴/۴	۹۰	۹۹/۵	۸۴۰
Wang et al., 2020	-	۵۲/۲	-	۸۲/۴	۹۷/۷	۵۲۳
Teoh et al., 2020	-	۴۴	۹۶	-	۹۹	۶۸۳
Wang et al., 2020	-	-	۹۷/۸	۸۴	۹۸	۵۲۳
Rathour et al., 2019	-	۶۰/۶	-	-	۷۰	۱۵۸۰
Wang et al., 2019	۶۳/۹	-	۵۹/۵	۵۰/۵	۶۴/۱	۲۰۰
Liu et al., 2019	-	۴۹	۷۷/۵	-	۷۹/۶	۷۰۸

مطابق جدول (۲) به طور متوسط ۷۹/۳ درصد نیتروژن، ۸۰/۴ درصد آمونیوم، ۶۴/۶ درصد نیترات و ۷۷/۵ درصد فسفر در سلول‌های سوختی

میکروبی-تالاب مصنوعی حذف شد که بیشتر از تالاب مصنوعی مجزا است (Srivastava et al., 2020). راندمان حذف کمتر نیترات در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با سایر مواد مغذی به دلیل مصرف الکترون برای تولید انرژی است. نتیجه اینکه الکترون‌های کمتری برای احیای نیترات باقی مانده و در نتیجه حذف نیترات کمتر می‌شود (Araneda et al., 2018). در میان سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بیشترین مقدار راندمان حذف نیتروژن (۹۹ درصد)، آمونیم (۹۹ درصد) و فسفر (۹۶/۲ درصد) توسط Wu et al. (2015) در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با جریان افقی که با پساب صنعتی با غلظت اولیه ۲۲۸ میلی‌گرم بر لیتر COD تغذیه می‌شود بدست آمد. حداکثر حذف نیترات در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با جریان عمودی توسط Tao et al. (2020) بدست آمد. به طور کلی، هر دو سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با جریان افقی و عمودی از نظر حذف مواد مغذی کارآمد هستند اما عملکرد حذف آلاینده‌ها به شدت به طراحی سیستم بستگی دارد.

مقادیر مختلفی از راندمان حذف فسفر از ۲۹ درصد (Hartl et al., 2019) تا ۹۶ درصد (Wu et al., 2014) در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است (جدول ۲). اما جدول (۱) نتایج متناقضی را در مورد کاهش یا افزایش حذف فسفر در سامانه ادغام شده در مقایسه با تالاب مصنوعی مجزا نشان می‌دهد. ترکیبات حاوی فسفر را می‌توان با فرآیندهای بیولوژیکی یا فیزیکیوشیمیایی تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی حذف کرد. فرآیند بیولوژیکی شامل تثبیت توسط میکروارگانیسم‌ها و جذب توسط گیاهان است، در حالی که فرآیندهای فیزیکیوشیمیایی شامل جذب و رسوب توسط بستر یا فیلتر است. مطابق نتایج پژوهش‌ها، حذف فسفر در فرآیندهای فیزیکیوشیمیایی بیشتر از فرآیندهای بیولوژیکی است (Ge et al., 2020; Araneda et al., 2018). به عنوان مثال، مطابق نتایج پژوهش Wang et al. (2019) راندمان حذف فسفر در فرآیندهای فیزیکیوشیمیایی ۳۶/۲-۸۷/۵ درصد است در حالیکه در فرآیندهای بیولوژیکی این مقدار ۱/۳-۲۶/۴ درصد است. به منظور بررسی تاثیر سلول سوختی میکروبی در حذف فسفر پژوهشگران به مقایسه عملکرد تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند، نتایج نشان داد سامانه ادغام شده موجب کاهش راندمان حذف فسفر شد (Wang et al., 2019; Araneda et al., 2018). به عنوان مثال، Liu et al. (2019) بیان کردند راندمان حذف فسفر در تالاب مصنوعی مجزا ۳۵/۳ درصد بیشتر از سامانه ادغام شده بود. یکی از محدودیت‌های این مطالعات عدم توضیح دلایل کاهش حذف فسفر در سامانه ادغام شده و عدم بررسی عوامل محدود کننده حذف فسفر در فرآیندهای بیولوژیکی یا فیزیکیوشیمیایی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بود. بنابراین، نیاز به بررسی حذف فسفر در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی و تمرکز بر پارامترهای عملیاتی مؤثر بر حذف موفقیت آمیز فسفر در سیستم های سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مانند نوع گیاه، محیط فیلتراسیون و جامعه باکتریایی فعال می‌باشد.

علاوه بر مواد مغذی، مقایسه بین تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی نشان داده است که بازده حذف COD در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بیشتر از تالاب مصنوعی مجزا است، در اکثر مطالعات تحقیقاتی در محدوده ۷۵ تا ۹۹/۵ درصد است (Yang et al., 2020; Srivastava et al., 2020; Xie et al., 2018; al., 2016). مطابق داده‌های جدول (۱)، سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی ادغام شده موجب افزایش ۲۲ درصدی راندمان حذف COD نسبت به تالاب مصنوعی مجزا می‌شود. دلیل این پدیده حضور الکتروود یا مواد رسانای الکتریکی در ستون تالاب مصنوعی است. مواد الکتریکی رسانا به عنوان گیرنده موقت الکترون اکسیداسیون بی‌هوازی آلاینده‌ها را تسریع می‌بخشند. علاوه بر این، تنوع بیشتر جامعه باکتریایی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بر حذف COD تأثیر مثبت دارد. همچنین استفاده از دانه‌های کربن فعال به عنوان آند موجب استخراج مقدار بیشتری الکترون از تجزیه مواد آلی می‌شود (Sonawane et al., 2017). همچنین چسبندگی باکتری بر سطح آند موجب افزایش حذف COD می‌شود (Gonzalez et al., 2021).

راندمان حذف COD در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی وابسته به عوامل مختلفی مانند غلظت اولیه COD، زمان ماند هیدرولیکی، غلظت اولیه DO، ویژگی‌های پساب و جمعیت میکروبی است (Fitch, 2014; Vymazal, 2019). غلظت اولیه COD، سوپسترای مورد نیاز برای رشد و فعالیت باکتری‌ها را فراهم کرده و نقش مهمی را در عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی ایفا می‌کند. اما غلظت‌های بسیار زیاد COD اثر منفی بر تولید برق، راندمان حذف COD و عملکرد سیستم دارد. زیرا در غلظت‌های بالای COD افزایش رشد باکتری‌های متانوزن رخ می‌دهد که موجب کاهش راندمان کولمبیک سیستم می‌شود (Wang et al., 2016; Zhao et al., 2013; Wang et al., 2019; Song et al., 2017). علاوه بر این، با افزایش غلظت اولیه COD غلظت ماده آلی وارد شده به منطقه آندی بیشتر از ظرفیت تجزیه باکتریایی آند می‌باشد، بنابراین مواد تجزیه نشده به ناحیه کاتدی حرکت کرده و تخریب هوازی اکسیژن کمتری را برای واکنش کاتدی باقی می‌گذارد (Wang et al., 2019; Villaseñor et al., 2013; Liu et al., 2014). Liu et al. (2014) به بررسی اثر غلظت ۵۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر COD بر عملکرد سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد در غلظت‌های ۲۵۰-۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف COD ۹۵ درصد و حداکثر چگالی توان ۴۴/۶ میلی‌وات بر مترمربع بود و در غلظت‌های بیشتر از ۱۰۰۰-۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف COD و چگالی توان کاهش یافت. اگرچه مطابق نتایج جدول (۲) راندمان حذف COD در غلظت‌های کم و زیاد، زیاد است. به عنوان مثال، Tamta et al. (۲۰۲۰) راندمان حذف COD را در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی و در غلظت اولیه ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۹۸/۵ درصد گزارش کردند در حالیکه Wang et al. (2019) راندمان حذف COD را در غلظت اولیه ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را ۹۶/۲ درصد گزارش کردند.

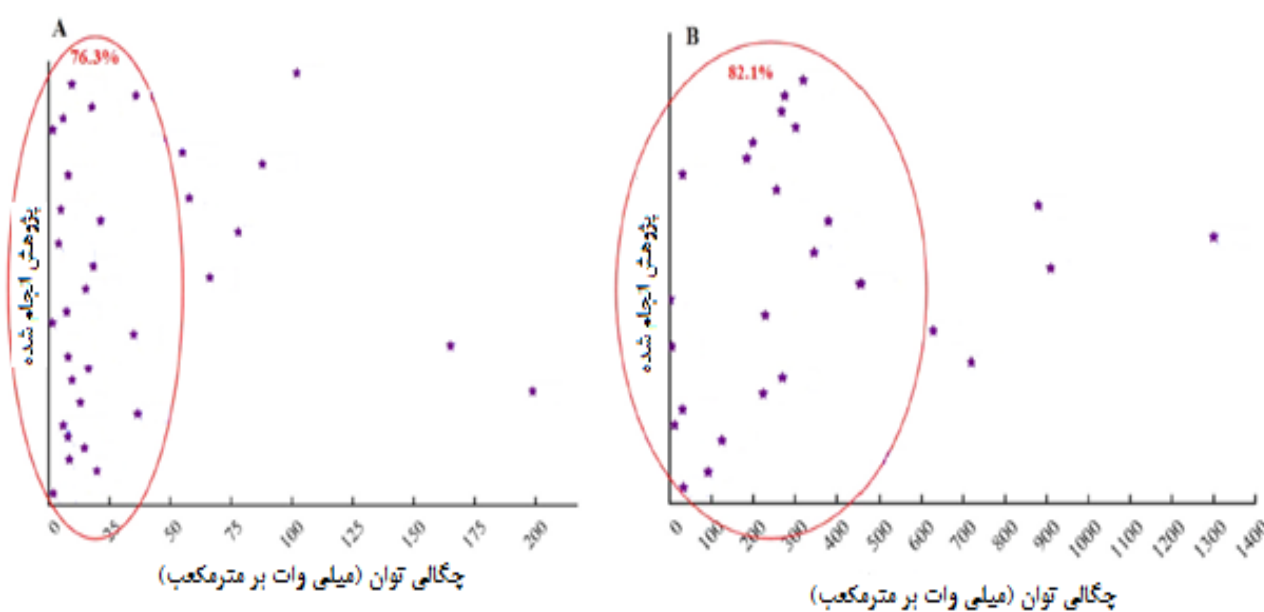
علاوه بر غلظت اولیه COD، راندمان حذف COD به پارامترهای دیگری مانند pH (Wang et al., 2016)، نسبت کربن به نیتروژن (Wang

Oon et al., 2018; Wang et al., 2019; Xu et al., 2019; Xu et al., 2017), غلظت اولیه مواد مغذی (et al., 2009; Wang et al. 2019), و گونه‌های شیمیایی (Wang et al., 2020; Li et al., 2020; Wei et al., 2015) است. این اثر عمدتاً به دلیل حساسیت جامعه باکتریایی به تغییرات شرایط محیطی و شیمیایی بستگی دارد. زمان ماند هیدرولیکی عامل موثر دیگری در حذف COD در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی است (Li et al., 2019; Li et al., 2018; Wang et al., 2019; Li et al., 2020; Zhang et al., 2020). مطابق نتایج (Wang et al. (2019) زمان ماند هیدرولیکی مؤثرترین عنصر طراحی است که مستقیماً بر حذف نیترژن، COD، فسفر و آمونیاک اثر می‌گذارد. تأثیر زیاد تغییرات زمان ماند هیدرولیکی بر عملکرد سامانه به دلیل ارتباط میان زمان ماند هیدرولیکی و DO در سامانه است. اگرچه زمان ماند هیدرولیکی طولانی موجب تخریب کامل آلاینده‌ها می‌شود، اما تشدید شرایط بی‌هوازی در سامانه بر فعالیت‌های باکتریایی تأثیر منفی می‌گذارد (Li et al., 2019; Wang et al., 2019). نتایج حاصل از پژوهش Fang et al. (2015) نشان داد حداکثر راندمان حذف COD و تولید برق در زمان ماند هیدرولیکی ۳ روز اتفاق می‌افتد و پس از آن با افزایش بیشتر زمان ماند هیدرولیکی این مقدار کاهش می‌یابد.

به طور کلی، مزیت سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با سلول سوختی میکروبی افزایش کارایی تصفیه و افزایش پتانسیل سامانه برای تصفیه پساب است. با این حال، راندمان حذف مواد آلی و ترکیبات نیترژن در مطالعات مختلف سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی متفاوت است و عملکرد تصفیه به طور کلی به ساختار، طراحی، شرایط عملیاتی، گونه‌های بیولوژیکی و شیمیایی درگیر در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بستگی دارد. همچنین لازم به ذکر است که بین حذف آلاینده‌ها و تولید برق در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی رابطه مستقیم وجود دارد به طوری که با افزایش حذف COD چگالی توان افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل رابطه مستقیم بین تولید جریان، تنفس میکروبی و غلظت سوبسترا در این سامانه‌ها می‌باشد (Srivastava et al., 2020; Xu et al., 2017). اکسیداسیون مواد آلی موجب تولید الکترون شده و الکترون‌های تولید شده از طریق مدار خارجی به سمت پذیرنده‌های الکترونی منتقل شده و تولید جریان برق می‌کنند. از این رو، هرگونه تغییر در غلظت مواد آلی به طور مستقیم بر تولید برق در این سیستم‌ها تأثیر می‌گذارد.

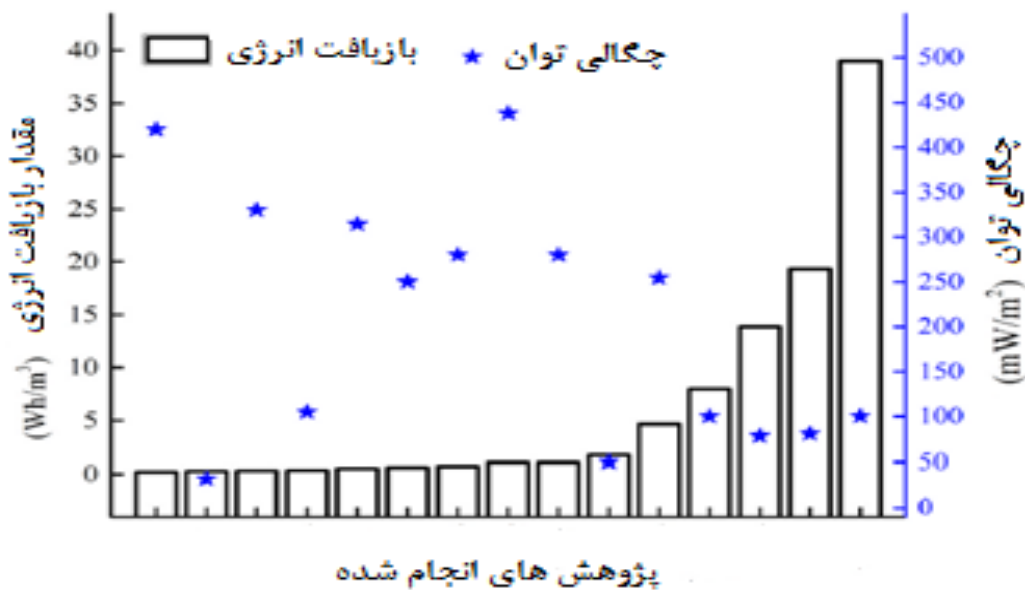
تولید برق

انرژی الکتریکی تولید شده در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مزیت سیستم ادغام شده در مقایسه با تالاب مصنوعی می‌باشد. بازده انرژی در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی معمولاً با چگالی توان (وات بر مترمکعب) بر اساس سطح الکتروود یا حجم آند بیان می‌شود. بر اساس داده‌های نشان داده‌شده در شکل (۲)، در ۷۶ درصد از پژوهش‌های سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی، حداکثر توان تولید انرژی کمتر از ۵۰ میلی‌وات بر متر مربع (۵۰۰ میلی‌وات بر متر مکعب) بوده است که کمتر از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر است (Hartl et al., 2019). به عنوان مثال، پنل‌های خورشیدی تجاری موجود که به طور معمول برای تولید برق متصل به شبکه مستقر می‌شوند، ظرفیتی در حدود ۱۹۳ وات بر متر مربع دارند که توان خروجی بسیار بالاتری از سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی است.



شکل ۲. حداکثر چگالی توان در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در پژوهش‌های مختلف

تلاش‌های متعددی برای افزایش عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با تغییر ساختار و طراحی سامانه (Corbella et al., 2015; Wang et al., 2015; Doherty et al., 2015; Doherty et al., 2015; Wang et al., 2017; Srivastava et al., 2015)، محیط تصفیه (Wang et al., 2017; Srivastava et al., 2015; Fang et al., 2013; Zhao et al., 2013; Wang et al., 2019; Villasenor et al., 2017; Srivastava et al., 2015)، پارامترهای عملیاتی (et al., 2017; Srivastava et al., 2015)، نوع گیاه (et al., 2013; Liu et al., 2014; Oon et al., 2017; Yang et al., 2020; Treesubsuntorn et al., 2019; Oon et al., 2017) و هوادهی خارجی (Treesubsuntorn et al., 2019; Oon et al., 2017; Yang et al., 2020) انجام شده است. مطابق نتایج مطالعات منتشر شده پیرامون سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی، بیشترین چگالی توان توسط Xu et al. (2018) گزارش شده است. مطابق نتایج، بیشترین چگالی توان (۳۷۱۴ میلی‌وات بر متر مربع)، بر اساس سطح آند ۲۵۴ سانتی‌متر مربع در یک جریان بالارونده عمودی سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی کاشته شده با گیاه نی و تغذیه شده توسط فاضلاب مصنوعی تحت شرایط پیوسته با زمان ماند هیدرولیکی ۳ روز بود. نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف در شکل (۳) آمده است. ضعف اصلی این پژوهش عدم توضیح کافی برای افزایش تولید برق است. در نتیجه باید تحقیقات بیشتر برای بررسی حداکثر پتانسیل بازیافت انرژی در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی انجام شود.



شکل ۳. بازیافت انرژی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در پژوهش‌های مختلف.

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، انرژی موجود از سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بر اساس اندازه سلول یا الکتروود بیان شده است که منجر به درک نادرست تولید انرژی واقعی موجود از پساب در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌شود. علاوه بر این، مقدار انرژی در پساب در صنایع به طور معمول برحسب وات-ساعت بیان می‌شود. انرژی تولید شده در واحدهای وات-ساعت محققان و اپراتورها را قادر می‌سازد تا انرژی واقعی موجود (بازیابی انرژی) از پساب را در مقایسه با سایر منابع تولید برق مانند انرژی خورشیدی یا بادی درک کنند. بنابراین نویسندگان می‌توانند بازیابی انرژی نرمال شده در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی را برای گزارش داده‌های خود بیان کنند. همانگونه که در معادلات (۵) و (۶) نشان داده شده است، مقدار بازیابی انرژی نرمال شده بر اساس مقدار پساب تصفیه شده یا مقدار حذف مواد آلی محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه (۵)} \quad \text{مقدار انرژی نرمال شده حاصل از تصفیه پساب} = \frac{\text{توان (W)}}{\left(\frac{m^3}{h}\right) \text{ پساب مقدار جریان}} \quad \left(\frac{Wh}{m^3}\right)$$

$$\text{رابطه (۶)} \quad \text{مقدار انرژی نرمال شده حاصل از حذف مواد آلی} = \frac{\text{توان (W)}}{\left(\frac{m^3}{h}\right) \text{ پساب مقدار جریان}} \quad \left(\frac{Wh}{kg \text{ COD}}\right)$$

مطالعات اندکی درباره بازیابی انرژی نرمال شده در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی انجام شده است (Oon et al., 2018; Xu et al., 2014; Ge et al., 2014; Teoh et al., 2020; Das et al., 2019; et al., 2016). از این رو، داده‌های گزارش شده در مطالعات مختلف سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی برای تعیین محدوده مقدار پساب تصفیه شده و مواد آلی حذف شده می‌باشد. نتایج مقدار پساب تصفیه شده و چگالی توان تولیدی در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق نتایج، سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی معمولاً دارای مقدار انرژی نرمال شده حاصل از تصفیه پساب کمتر از 10 Wh/m^3 هستند و در این میان استثناء‌های معدودی وجود دارد که مقادیر بازیابی انرژی بالاتری دارند. علاوه بر این،

تغییرات داده‌های مقدار انرژی نرمال شده حاصل از تصفیه پساب هیچ رابطه مستقیمی با چگالی توان یا اندازه سلول ندارد. به عنوان مثال، مقدار انرژی نرمال شده حاصل از تصفیه پساب بالاتر از 39 Wh/m^3 از سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی با چگالی توان نسبتاً کم 78 mW/m^2 بر اساس مساحت آند 100 سانتی متر مربع به دست آمد (Turker and Yakar, 2017). دلیل این پدیده وابسته بودن چگالی توان به اندازه سلول است و با افزایش سطح چگالی توان کاهش می‌یابد، در حالی که بازیابی انرژی نرمال شده بیشتر به راندمان کولمبیک و مقدار بارگذاری مواد آلی در سلول وابسته است (Xu et al., 2016). تجزیه و تحلیل داده‌های انرژی نرمال شده حاصل از حذف مواد آلی نشان داد که اکثر سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی دارای انرژی نرمال شده COD کمتر از 5 Wh/kg هستند (Oon et al., 2018; Corbella et al., 2016; Xie et al., 2018; Tang et al., 2019; Oon et al., 2015; Wang et al., 2019). تنها تعداد معدودی دارای انرژی نرمال شده COD بیشتر از 22 Wh/kg (Wang et al., 2017) و $58/3 \text{ Wh/kg}$ (Liu et al., 2014) و 150 Wh/kg (Yang et al., 2016) هستند. همچنین لازم به ذکر است که اکثر مطالعات سلول سوختی میکروبی دارای انرژی نرمال شده حاصل از تصفیه پساب و انرژی نرمال شده حاصل از حذف مواد آلی بیشتر از 300 و 200 Wh/kg COD هستند که به طور قابل توجهی بالاتر از میانگین انرژی نرمال شده در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی است (Ge et al., 2014). با این حال، به دلیل عدم ارائه مناسب داده‌های انرژی در مطالعات قبلی، بالاترین بازیابی انرژی از سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی هنوز مشخص نیست. افزایش انرژی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مستلزم دانستن اصول حاکم بر تولید توان در سامانه بیوالکتروشیمیایی است. میدان‌های الکتریکی و شارهای یونی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی نتیجه عدم تعادل بار تولید شده توسط باکتری‌های الکترواکتیو و واکنش‌های آندی/کاتدی هستند. حداکثر مقدار پتانسیل‌های آند و کاتد را می‌توان بر اساس واکنش اکسیداسیون/کاهش که به ترتیب در محفظه آند/کاتد انجام می‌شود محاسبه کرد (Logan et al., 2006). به عنوان مثال، هنگامی که اکسیژن گیرنده اصلی الکترون در محفظه کاتد است، پتانسیل کاهش کاتد $0/805$ ولت می‌باشد. همچنین، پتانسیل آندی واکنش اکسیداسیون استات $0/296$ ولت است که منجر به تولید $1/1$ ولت انرژی الکتریکی می‌شود (Logan et al., 2006). در عمل، پتانسیل آند مقدار پیش‌بینی شده را تعیین می‌کند در حالی که پتانسیل کاتد معمولاً کمتر از مقدار نظری است که دو دلیل عمده دارد. اولاً تلفات کل سامانه موجب کاهش ولتاژ خروجی نسبت به مقدار تئوری می‌شود. این تلفات شامل تلفات کاهش اکسیداسیون، تلفات داخلی/اهمی (الکترودها، الکترولیت‌ها و اتصالات)، انتقال جرم و تلفات انتشار است. ثانیاً، دسترسی محدود اکسیژن به عنوان گیرنده الکترون در ناحیه کاتد، پتانسیل واکنش کاهش را محدود می‌کند (Corbella et al., 2015; Liu et al., 2017).

کم بودن واکنش کاهش در محفظه کاتد یک مسئله جدی در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی بوده است که تا حدی در سلول‌های سوختی میکروبی با استفاده از گیرنده‌های الکترونی شیمیایی مانند پرمنگنات پتاسیم یا فریسیانید^۱ یا استفاده از کاتد هوا با کاتالیزور پلاتین حل شده است (Logan et al., 2006). اگرچه این روش‌ها به دلیل سمی بودن مواد شیمیایی یا هزینه بالای کاتالیزورها در سامانه‌هایی با مقیاس بزرگتر مانند سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی قابل اجرا نیستند. اخیراً استفاده از کاتدهای زیستی/زیست کاتالیزورها که در آن از باکتری به جای کاتالیزور معدنی استفاده می‌شود مورد توجه محققان قرار گرفته است (Lefebvre et al., 2008). کاتدهای زیستی از آنیون‌هایی مانند نیترات، سولفات، دی اکسید کربن، آهن یا منگنز به عنوان گیرنده‌های الکترونی استفاده می‌کنند. در میان پذیرندگان الکترونی گفته شده نیترات به دلیل دارا بودن بیشترین پتانسیل اکسایش-کاهش از اهمیت بیشتری برخوردار است. وجود محیط هوازی/بی‌هوازی در لایه بالایی تالاب مصنوعی فرصتی را برای استفاده از نیترات به عنوان گیرنده الکترون فراهم می‌کند. از این رو، ادغام سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی موجب حذف همزمان کربن در لایه آند و نیتروژن در لایه کاتد می‌شود.

راندمان کولمبیک پایین یکی دیگر از معایب سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با سلول سوختی میکروبی است که از حجم نسبتاً بزرگ این سامانه‌ها ناشی می‌شود. راندمان کولمبیک یک ویژگی بیوالکتروشیمیایی سلول سوختی میکروبی است که کارایی انتقال الکترون‌ها در سامانه را برای تکمیل واکنش‌های الکتروشیمیایی نشان می‌دهد و با ادغام جریان (حاصل از تجزیه سوبسترا) اندازه‌گیری شده در طول زمان نسبت به حداکثر جریان تئوری محاسبه می‌شود. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که حداکثر راندمان کولمبیک در سلول سوختی میکروبی 95 درصد (Bond et al., 2006) بود درحالی‌که حداکثر راندمان کولمبیک در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی تنها $16/4$ درصد بود (Xie et al., 2018). راندمان کولمبیک کمتر در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی عمدتاً به این دلیل است که کل سامانه به حذف COD کمک می‌کند در حالی که حجم کمی از سامانه توسط الکترون آند اشغال می‌شود که مانع از تجمع بالای باکتری‌های خارجی الکترون روی الکترون می‌شود (Wang et al., 2015; Doherty et al., 2017). علاوه بر این، حجم زیاد راکتور در مقایسه با ناحیه آند در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی، محیط بزرگی را برای متانوژن‌های هیدروژنوتروف^۲ فراهم می‌کند که در نتیجه آن بخشی از سوبسترا به جای الکترون به متان تبدیل شده و موجب کاهش راندمان

¹ Ferricyanide² Hydrogenotrophic methanogens



کولمبیک و تولید برق می‌شود (Wang et al., 2016; Liu et al., 2014). یکی دیگر از دلایل مهم پایین بودن راندمان کلمبیک در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی الکترون‌های تولید شده توسط باکتری‌های اگزوالکتروژنیک است که به دلیل غلظت نسبتاً بالای گیرنده‌های الکترونی مانند نیتريت، نیترات و اکسیژن به طور قابل توجهی تخلیه می‌شوند (Wang et al., 2016; Wang et al., 2017). بنابراین الکترون‌های تولید شده توسط باکتری‌های اگزوالکتروژنیک نه تنها برای تولید انرژی زیستی بلکه در فرآیندهای دیگری مانند دنیتریفیکاسیون نیز استفاده می‌شوند. در مجموع انتظار می‌رود ولتاژ خروجی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی کمتر از سلول سوختی میکروبی مجزا باشد که عمدتاً به دلیل حجم بیشتر راکتور است (مطابق جدول ۱).

حذف آلاینده‌ها

ادغام سلول سوختی میکروبی و تالاب مصنوعی یک فناوری پیشرفته تصفیه آلاینده می‌باشد که می‌تواند عملکرد تصفیه را در طیف وسیعی از آلاینده‌ها در جریان‌های پساب افزایش دهد (Rathour et al., 2019; Xie et al., 2018). مقایسه حذف آلاینده‌ها در تالاب مصنوعی، سلول سوختی میکروبی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی نشان داد راندمان حذف در سامانه ادغام شده بیشتر از سایر سیستم‌ها بود. به عنوان مثال، Xie et al. (2018) به مقایسه حذف پساب حاوی نیتروبنزن در سامانه‌های سلول سوختی میکروبی و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج افزایش حذف نیتروبنزن در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی را به دلیل جذب و تجمع نیتروبنزن در ریزوسفر گیاهان نشان داد. نتایج همچنین نشان داد چگالی توان در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی ۲/۵ برابر تالاب مصنوعی مجزا بود. همچنین Fang et al. (2016) به مقایسه سامانه‌های تالاب مصنوعی مجزا و سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد در سامانه ادغام شده سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی راندمان حذف COD و متیل نارنجی به ترتیب ۹/۷ درصد و ۱۶/۱ درصد بیشتر از تالاب مصنوعی مجزا بود. همچنین مقدار چگالی توان ۰/۶۸۸ وات بر مترمکعب بود. با قرار دادن کاتد در لایه میانی و سطح هیچ تغییری در حذف متیلن نارنجی و COD مشاهده نشد. این نشان می‌دهد که کاتد در سطح و لایه میانی سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی هیچ سهمی در حذف COD و متیلن نارنجی ندارند در حالیکه لایه آند بیشترین سهم را داشته است.

تا به امروز، انواع و غلظت‌های مختلف آلاینده‌ها در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است تا تأثیر نوع و غلظت آلاینده‌ها بر تولید برق و راندمان تصفیه را بررسی کنند. جدول (۳) خلاصه‌ای از پژوهش‌های مختلف درباره ویژگی‌ها و عملکرد سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در حذف پساب حاوی آلاینده‌های رنگ و آلاینده‌های دارویی را نشان می‌دهد.

پساب‌های حاوی رنگ رایج‌ترین پساب صنعتی مورد بررسی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی می‌باشند. در پژوهشی، حذف اسید قرمز در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در غلظت اولیه ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف اسید قرمز، ۹۶ درصد و راندمان حذف COD، ۷۶ درصد بود. با افزایش غلظت اولیه اسید رنگ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف COD کاهش یافت و به ۴۱ درصد رسید اما تغییرات راندمان حذف رنگ اندک و ۹۱ درصد بود (Oon et al., 2018; Oon et al., 2020) که به دلیل کاهش رشد باکتریایی در غلظت‌های بالای آلاینده بود.

پساب‌های دارویی دومین دسته رایج فاضلاب صنعتی هستند که در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته اند (Li et al., 2020). نتایج پژوهش‌های مختلف پیرامون پساب‌های دارویی در جدول (۳) آمده است. اگرچه تحقیقات گسترده‌ای در مورد حذف آنتی‌بیوتیک از طریق سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی انجام شده است، اما هیچ مطالعه واحدی وجود ندارد که عملکرد تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی مجزا را در شرایط مشابه مقایسه کند. همچنین تعداد محدودی از مطالعات پیرامون سایر آلاینده‌ها مانند نیتروبنزن، کروم، روی و سرب انجام شده است (جزئیات در جدول ۳ نشان داده شده است).

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که غلظت‌های بالای آلاینده اثر نامطلوبی بر رشد و فعالیت باکتری‌ها داشته و بنابراین عملکرد سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Wang et al. (2020) به بررسی اثر غلظت‌های بالای روی در سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد که حداکثر راندمان حذف روی ۹۸ درصد و چگالی توان تولیدی $3/67 \text{ mW/m}^3$ بود و با افزایش غلظت روی راندمان حذف و توان تولیدی کاهش یافت. لازم به ذکر است که تعداد زیادی از پساب‌ها مانند صنایع شیمیایی، صنایع کاغذسازی، صنایع غذایی، آفت‌کش‌ها، شیرابه‌ها، مواد معدنی، اسیدی و قلیایی، پساب‌های حاوی فنل، جیوه و سیانید تاکنون در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بررسی نشده است. بنابراین واکنش سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی به انواع و غلظت‌های مختلف آلاینده‌ها می‌تواند متفاوت باشد.

جدول ۳. ویژگی ها و عملکرد سلول های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی برای تصفیه پساب حاوی یک آلاینده خاص

منبع	حداکثر راندمان حذف آلاینده (درصد)	حداکثر چگالی جریان راندمان کلمبیک (درصد)	مقاومت حداکثر ولتاژ حداکثر چگالی توان (میلی ولت) (میلی ولت)	خارجی (اهم)	نوع جریان، زمان ماند هیدرولیکی (روز)	نوع گیاه	نوع سامانه، مواد پرکننده، جنس آند، جنس کاتد، جداکننده، فاصله الکترودها	نوع پساب		
Oon et al., 2020; Oon et al., 2018	۷۷ COD رنگ ۹۶	۱/۳۸	۱/۵۸	۲۱۵	۱۰۰۰	پیوسته، ۱	سديم بنزن: ۱۰۷ سديم استات: ۲۰۵ آمونیم نیترات: ۱۷۶	Typha latifolia	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن، الکترودها پوشش گرافیتی، فاصله الکترودها ۴۴ سانتی متر	رنگ
Wen et al., 2020	COD: ۷۰, NO3: ۶۱, TDS: ۹۱, BOD: ۹۴	۲۳۵ (mA/m ²)	۱۹۹	-	۱۰۰۰	ناپیوسته، ۳	۱۵۸۰ COD: BOD: ۷۰۵ نیترات ۱۹۳ سولفات ۸۶۷	Fimbristulis dichotoma	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن، الکترودها صفحات استیل، جداکننده پشم شیشه، فاصله الکترودها ۳۰ سانتی متر	رنگ
Wen et al., 2020	آمونیم کلرید ۹۰	-	۱۲۵	۴۶۴	۱۰۰۰	پیوسته، ۱	گلوکز ۲۰۰، آمونیم کلرید ۲۵	Canna indica	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن، الکترودها کربن فعال، فاصله الکترودها ۱۷/۵ سانتی متر	Pharmaceutical
Li et al., 2019; Li et al., 2018	COD: ۹۸, NH4: ۶۴	۴۹/۳	۱۸/۴	۵۱۱	۱۰۰۰	پیوسته، ۲/۵-۰/۶۷	گلوکز ۲۰۰-۴۰۰، آمونیم کلرید ۲۵	Ipomoea aquatica, Acorus calamus, Oenanthe javanica	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن و گرافیت، الکترودها پوشش کربن، فاصله الکترودها ۱۹ سانتی متر	Pharmaceutical
Di et al., 2020	۹۵/۱ COD نیتروبنزن ۹۳/۹	-	۶۲/۸	۵۹۰	۱۰۰۰	پیوسته، ۳	گلوکز ۱۰۰-۵۰۰، آمونیم کلرید ۳۱۰، نیتروبنزن ۲۰۰	Typha orientalis	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن و ماسه، الکترودها کربن فعال و پوشش گرافیتی، جداکننده: فایبرگلس فاصله الکترودها ۱۷ سانتی متر	نیتروبنزن
Xu et al., 2018	۸۲/۳ COD نیتروژن ۸۲/۵ فسفر ۹۵/۱ آمونیم ۷۷/۸	۱۶/۶	۳۷۱۴	۲۶۶	۱۰۰۰	پیوسته، ۳	ساکاروز ۵۳/۵، آمونیم سولفید ۳۷/۷	Phragmites australis	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن، لجن فعال، کربن فعال، الکترودها کربن فعال فاصله الکترودها ۱۷/۵ سانتی متر	آب رودخانه آلوده
Wang et al., 2020	۷۹/۸ COD نیتروژن ۶۸/۹ فسفر ۷۵/۷ آمونیم ۸۰/۴ روی ۹۸/۶	۱۶/۵	۲/۶۷	۲۴۴	۱۰۰۰	پیوسته، ۳	کارخانه آبکاری طلا	Iris croceis	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده لجن فعال و بیوجار، الکترودها کربن فعال فاصله الکترودها ۲۲/۵ سانتی متر	آلودگی روی
Zhao et al., 2020	۸۵/۴ COD نیتروژن ۷۶/۷ فسفر ۸۹/۲ آمونیم ۷۸/۳ سرب ۸۴/۹	۳۷/۲	۷/۴۳	۳۴۳	۱۰۰۰	پیوسته، ۳	سرب: ۵	Iris tectorum	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده شن و ماسه، الکترودها کربن فعال فاصله الکترودها ۲۰ سانتی متر	آلودگی سرب
Mu et al., 2020	۸۹/۲ COD کروم ۹۳	-	۴۴۱	۵۵۸/۱	۱۰۰۰	پیوسته، ۳	کروم: ۶۰	بدون گیاه	سلول سوختی میکروبی- تالاب مصنوعی عمودی، مواد پرکننده ماسه، الکترودها کربن فعال فاصله الکترودها ۱۰ سانتی متر	آلودگی کروم

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مقالات منتشر شده پیرامون سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی، تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی و پارمترهای راندمان تصفیه، تولید انرژی، حذف آلاینده‌های خاص به صورت مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. به طور کلی، راندمان حذف آلاینده و تولید برق در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با تالاب مصنوعی مجزا بالاتر می‌باشد. ادغام تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی، راندمان تصفیه پساب را با گیاه‌پالایی حدود ۱۵ درصد افزایش می‌دهد، تولید برق را با اثرات گیاهی افزایش داده و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای تالاب را به دلیل غالب بودن باکتری‌های الکتروژنی کاهش می‌دهد. به طور کلی، حذف COD در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی در مقایسه با تالاب مصنوعی مجزا بیشتر است، زیرا لایه آندی و الکترودها، در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی به افزایش کارایی حذف COD از طریق تخریب الکتروژنی کمک می‌کنند. همچنین موجب حذف نیتروژن بیشتر در مقایسه با تالاب مصنوعی می‌شود. راندمان حذف آلاینده‌ها به طراحی و ساخت سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی بستگی دارد و ساخت راکتورهای با مقیاس کوچک و آزمایشگاهی امکان پیش‌بینی فرایندهای بلند مدت را فراهم نمی‌آورد (Xu et al., 2019). بنابراین کارآزمایی‌های کنترل‌شده در مقیاس بزرگ و مطالعات طولانی‌مدت برای ارائه شواهد قطعی‌تر مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این، تحقیقات بیشتری برای درک بهتر اثر هم‌افزایی بین تالاب مصنوعی و سلول سوختی میکروبی برای تصفیه انواع مختلف پساب تحت پارامترهای مختلف عملیاتی و طراحی مورد نیاز است.

علیرغم پتانسیل بالای سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی برای حذف مواد آلی از پساب و تولید برق، جدی‌ترین نقص سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی توان خروجی کم آن‌ها در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی یا انرژی باد است. اگرچه مقدار انرژی تولید شده از یک سامانه محدود است، اما در پژوهش‌های مختلف ادعاهایی وجود دارد که می‌توان از پتانسیل‌های نهفته در سامانه جهت افزایش تولید برق استفاده کرد (Liang et al., 2018). علاوه بر این، طبق پیشنهاد (Xu et al., 2018) می‌توان با استفاده از خازن انرژی‌های از دست رفته را حفظ و برداشت انرژی را از سامانه بهبود بخشید.

یکی از مزایای اصلی سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی این است که کربن خنثی هستند و انرژی می‌تواند توسط مواد سلولزی تولید شود (Goswami et al., 2018). اگرچه سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی منبع عملی تولید برق برای استفاده خارجی نیستند اما کاربردهای مهمی برای مقدار کم انرژی تولید شده در یک سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی وجود دارد. یکی از کاربردهای شناخته شده انرژی سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی استفاده از آن‌ها برای تامین انرژی سنسورهای از راه دور و سنجش آلاینده‌ها است (Xu et al., 2017; Gajda et al., 2018). این فناوری با بکارگیری فناوری‌های الکتروشیمیایی میکروبی و تالاب مصنوعی به صورت تجاری در برخی از نقاط جهان در دسترس قرار گرفته است. میکروارگانیزم‌ها حسگرهای بسیار دقیق و حساسی نسبت به تغییرات محیطی اطرافشان هستند و سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی یکی از معدود فناوری‌هایی هستند که می‌توانند این پاسخ‌های میکروبی را ضبط کرده و سیگنال‌های الکتریکی تولید کنند. اخیراً، Xu et al. (2021) به توسعه حسگرهای زیستی در سلول سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی پرداختند و اثرات زمان ماند هیدرولیکی، عملکرد و مواد آندی را بر روی سیگنال‌های زیستی تولید شده بررسی کردند. با این حال، بررسی‌های بیشتر پیرامون تأثیر سایر پارامترهای تأثیرگذار بر سیگنال‌های زیستی مانند فلزات سنگین، سطح موثر راکتور و نوع گیاه مورد نیاز می‌باشد. در نتیجه، پتانسیل‌های بالایی برای استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی-تالاب مصنوعی برای حذف آلاینده‌های فلزی، حذف میکرو آلاینده‌های نوظهور و بازیابی فلزات وجود دارد، در حالی که این کاربردها تاکنون بررسی نشده‌اند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Araneda, I. Tapia, N. Lizama Allende, K. Vargas, I. (2018). Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment. *Water* 10, 940.
- Benvenuti, T. Hamerski, F. Giacobbo, A. Bernardes, A.M. Zoppas-Ferreira, J. Rodrigues, M. A. (2018). Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: a real-scale study. *J. Environ. Chem. Eng.* 6, 5706–5711.
- Bolton, C.R. Randall, D.G. (2019). Development of an integrated wetland microbial fuel cell and sand filtration system for greywater treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 7, 103249.
- Cao, Y. Mu, H. Liu, W. Zhang, R. Guo, J. Xian, M. Liu, H. (2019). Electricigens in the anode of microbial fuel cells: pure cultures versus mixed communities, *Microb. Cell Fact.* 18, 39.
- Clauwaert, P. Rabaey, K. Aelterman, P. de Schampelaire, L. Pham, T.H. Boeckx, P. Boon, N. Verstraete, W. (2007). Biological denitrification in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.* 41, 3354–3360.
- Corbella, C. Garfi, M. Puigagut, J. (2016). Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Sci. Total Environ.* 563–564, 448–455.
- Corbella, C. Guivernau, M. Vinas, M. Puigagut, J. (2015). Operational, design and microbial aspects related to power production with microbial fuel cells implemented in constructed wetlands. *Water Res.* 84, 232–242.
- Corbella, C. Puigagut, J. (2018). Improving domestic wastewater treatment efficiency with constructed wetland microbial

- fuel cells: influence of anode material and external resistance. *Sci. Total Environ.* 631–632, 1406–1414.
- Dai, Y.-X. Li, M.-X. Li, P. Guo, W. Qi, X. Zhang, Y. Kong, Q. (2020). Constructed wetland-microbial fuel cells enhanced with zero-valent iron for wastewater treatment and power generation. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 153, 105048.
- Das, B. Thakur, S. Chaithanya, M.S. Biswas, P. (2019). Batch investigation of constructed wetland microbial fuel cell with reverse osmosis (RO) concentrate and wastewater mix as substrate. *Biomass Bioenergy*, 122, 231–237.
- Di, L. Li, Y. Nie, L. Wang, S. Kong, F. (2020). Influence of plant radial oxygen loss in constructed wetland combined with microbial fuel cell on nitrobenzene removal from aqueous solution. *J. Hazard. Mater.* 394, 122542.
- Dinakar, M. Tao, W. Daley, D. (2020). Using hydrogen peroxide to supplement oxygen for nitrogen removal in constructed wetlands. *J. Environ. Chem. Eng.* 8, 104517.
- Doherty, L. Zhao, X. Zhao, Y. Hu, Y. Hao, X. Xu, L. Liu, R. (2015). A review of a recently emerged technology: constructed wetland-microbial fuel cells. *Water Res.* 85, 38–45.
- Doherty, L. Zhao, X. Zhao, Y. Wang, W. (2015). Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chem. Eng. J.* 266, 74–81.
- Doherty, L. Zhao, X. Zhao, Y. Wang, W. (2015). The effects of electrode spacing and flow direction on the performance of microbial fuel cell-constructed wetland. *Ecol. Eng.* 79, 8–14.
- Du, Y. Feng, Y. Dong, Y. Qu, Y. Liu, J. Zhou, X. Ren, N. (2014). Coupling interaction of cathodic reduction and microbial metabolism in aerobic biocathode of microbial fuel cell. *RSC Adv*, 4, 34350–34355.
- Ebrahimi, A. Najafpour, G. Kebria, D. (2016). Effect of batch vs. continuous mode of operation on microbial desalination cell performance treating municipal wastewater, Iran. *J. Hydrog. Fuel Cell* 3, 281–290.
- Ebrahimi, A. Yousefi Kebria, D. Najafpour Darzi, G. (2017). Enhancing biodegradation and energy generation via roughened surface graphite electrode in microbial desalination cell. *Water Sci. Technol.* 76, 1206–1214.
- Fang, Z. Cao, X. Li, X. Wang, H. Li, X. (2017). Electrode and azo dye decolorization performance in microbial-fuel-cell-coupled constructed wetlands with different electrode size during long-term wastewater treatment. *Bioresour. Technol.* 238, 450–460.
- Fang, Z. Cao, X. Li, X. Wang, H. Li, X. (2018). Biorefractory wastewater degradation in the cathode of constructed wetland-microbial fuel cell and the study of the electrode performance. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 129, 1–9.
- Fang, Z. Cheng, S. Cao, X. Wang, H. Li, X. (2017). Effects of electrode gap and wastewater condition on the performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland. *Environ. Technol.* 38, 1051–1060.
- Fang, Z. Cheng, S. Wang, H. Cao, X. Li, X. (2017). Feasibility study of simultaneous azo dye decolorization and bioelectricity generation by microbial fuel cell-coupled constructed wetland: substrate effects. *RSC Adv*, 7, 16542–16552.
- Fang, Z. Song, H. Yu, R. Li, X. (2019). A microbial fuel cell-coupled constructed wetland promotes degradation of azo dye decolorization products. *Ecol. Eng.* 94, 455–463.
- Fang, Z. Song, H.L. Cang, N. Li, X.N. (2013). Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresour. Technol.* 144, 165–171.
- Fang, Z. Song, H.-l. Cang, N. Li, X.-n. (2015). Electricity production from Azo dye wastewater using a microbial fuel cell coupled constructed wetland operating under different operating conditions. *Biosens. Bioelectron.* 68, 135–141.
- Feng, L. Wang, R. Jia, L. Wu, H. (2020). Can biochar application improve nitrogen removal in constructed wetlands for treating anaerobically-digested swine wastewater? *Chem. Eng. J.* 379, 122-273.
- Fitch, M.W. (2014). Constructed wetlands, in: S. Ahuja (Ed.), *Comprehensive Water Quality and Purification*. Elsevier, *Waltham*, 268–295.
- Gajda, I. Greenman, J. Ieropoulos, I.A. (2018). Recent advancements in real-world microbial fuel cell applications. *Curr. Opin. Electrochem.* 11, 78–83.
- Ge, X. Cao, X. Song, X. Wang, Y. Si, Z. Zhao, Y. Wang, W. Tesfahunegn, A.A. (2020). Bioenergy generation and simultaneous nitrate and phosphorus removal in a pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.* 296, 122350.
- Ge, Z. Li, J. Xiao, L. Tong, Y. He, Z. (2014). Recovery of electrical energy in microbial fuel cells: brief review. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 1, 137–141.
- Gonzalez, T. Puigagut, J. Vidal, G. (2010). Organic matter removal and nitrogen transformation by a constructed wetland-microbial fuel cell system with simultaneous bioelectricity generation, *Sci. Total Environ.* 753, 142075.
- Goswami, R. Mishra, V.K. (2018). A review of design, operational conditions and applications of microbial fuel cells. *Biofuels*, 9, 203–220.
- Guadarrama-Pérez, O. Gutiérrez-Macías, T. García-Sánchez, L. Guadarrama-Pérez, V.H. Estrada-Arriaga, E.B. (2019). Recent advances in constructed wetland-microbial fuel cells for simultaneous bioelectricity production and wastewater treatment: a review, *Int. J. Energy Res.* 43, 5106–5127.



- Gupta, S. Nayak, A. Roy, C. Yadav, A.K. (2021). An algal assisted constructed wetland-microbial fuel cell integrated with sand filter for efficient wastewater treatment and electricity production. *Chemosphere*, 263, 128-132.
- Hartl, M. Bedoya-Rios, D.F. Fernandez-Gatell, M. Rousseau, D.P.L. Du Laing, G. Garfi, M. Puigagut, J. (2019). Contaminants removal and bacterial activity enhancement along the flow path of constructed wetland microbial fuel cells, *Sci. Total Environ*, 652, 1195-1208.
- Hassan, H. Wei, H. Qiu, M. Su, Y. Jaafry, S.W.H. Zhan, L. Xie, B. (2018). Power generation and pollutants removal from landfill leachate in microbial fuel cell: variation and influence of anodic microbiomes. *Bioresour. Technol*, 247, 434-442.
- Hussain, T.A. Ismail, Z.Z. (2020). Effect of petroleum refinery wastewater on plant growth in integrated microbial fuel cell-constructed wetlands systems. *Iraqi J. Agric. Sci*, 51.
- Ji, B. Zhao, Y. Vymazal, J. Mander, U. Lust, R. Tang, C. (2021). Mapping the field of constructed wetland-microbial fuel cell: a review and bibliometric analysis. *Chemosphere*, 262, 128366.
- Kelly, P.T. He, Z. (2014). Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review. *Bioresour. Technol*, 153, 351-360.
- Kumar, A. Hsu, L.H.-H. Kavanagh, P. Barrière, F. Lens, P.N. Lapinonnière, L. Schröder, U. Jiang, X. Leech, D. (2017). The ins and outs of microorganism-electrode electron transfer reactions. *Nat. Rev. Chem*, 1, 1-13.
- Kumar, R. Singh, L. Zularisam, A. (2016). Exoelectrogens: recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 56, 1322-1336.
- Lee, C.g. Fletcher, T.D. Sun, G. (2009). Nitrogen removal in constructed wetland systems, *Eng. Life Sci*, 9, 11-22.
- Lefebvre, O. Al-Mamun, A. Ng, H.Y. (2008). A microbial fuel cell equipped with a biocathode for organic removal and denitrification. *Water Sci. Technol*, 58, 881-885.
- Li, F. Lu, L. Zheng, X. Ngo, H.H. Liang, S. Guo, W. Zhang, X. (2014). enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-feeding. *Bioresour. Technol*, 169, 395-402.
- Li, H. Cai, Y. Yang, Y.L. Song, H.L. Gu, Z. Yang, X.L. Zhang, S. (2020). Accumulation of sulfonamide resistance genes and bacterial community function prediction in microbial fuel cell-constructed wetland treating pharmaceutical wastewater. *Chemosphere*, 248, 126014.
- Li, H. Song, H.L. Yang, X.L. Zhang, S. Yang, Y.L. Zhang, L.M. Xu, H. Wang, Y.W. (2018). A continuous flow MFC-CW coupled with a biofilm electrode reactor to simultaneously attenuate sulfamethoxazole and its corresponding resistance genes, *Sci. Total Environ*, 637-638, 295-305.
- Li, H. Xu, H. Song, H.L. Lu, Y. Yang, X.L. (2020). Antibiotic resistance genes, bacterial communities, and functions in constructed wetland-microbial fuel cells: responses to the co-stresses of antibiotics and zinc. *Environ. Pollut*, 265, 115084.
- Li, H. Xu, H. Yang, Y.L. Yang, X.L. Wu, Y. Zhang, S. Song, H.L. (2019). Effects of graphite and Mn ore media on electro-active bacteria enrichment and fate of antibiotic and corresponding resistance gene in up flow microbial fuel cell constructed wetland. *Water Res*, 165, 114988.
- Li, H. Zhang, S. Yang, X.L. Yang, Y.L. Xu, H. Li, X.N. Song, H.L. (2019). Enhanced degradation of bisphenol A and ibuprofen by an up-flow microbial fuel cell-coupled constructed wetland and analysis of bacterial community structure. *Chemosphere*, 217, 599-608.
- Li, J. Hu, Z. Li, F. Fan, J. Zhang, J. Li, F. Hu, H. (2019). Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: intermittent aeration and tidal flow. *Chemosphere*, 223, 366-374.
- Li, T. Fang, Z. Yu, R. Cao, X. Song, X. Li, H. (2016). The performance of the microbial fuel cell-coupled constructed wetland system and the influence of the anode bacterial community. *Environ. Technol*, 37, 1683-1692.
- Liang, P. Duan, R. Jiang, Y. Zhang, X. Qiu, X. Huang, Y. (2018). One-year operation of 1000-L modularized microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Water Res*, 141, 1-8.
- Liu, F. Sun, L. Wan, J. Shen, L. Yu, Y. Hu, L. Zhou, Y. (2020). Performance of different macrophytes in the decontamination of and electricity generation from swine wastewater via an integrated constructed wetland-microbial fuel cell process. *J. Environ. Sci*, 89, 252-263.
- Liu, F. Sun, L. Wan, J. Tang, A. Deng, M. Wu, R. (2019). Organic matter and ammonia removal by a novel integrated process of constructed wetland and microbial fuel cells. *RSC Adv.*, 9, 5384-5393.
- Liu, Q. Zhou, B. Zhang, S. Xu, D. Pan, R. Xia, S. (2019). Embedding microbial fuel cells into the vertical flow constructed wetland enhanced denitrogenation and water purification. *Pol. J. Environ. Stud.*, 28, 1799-1804.
- Liu, R. Zhao, Y. Doherty, L. Hu, Y. Hao, X. (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chem. Eng. J.*, 279, 220-230.
- Liu, S. Feng, X. Li, X. (2017). Bioelectrochemical approach for control of methane emission from wetlands. *Bioresour.*

Technol., 241, 812–820.

- Liu, S. Song, H. Li, X. Yang, F. (2013). Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *Int. J. Photoenergy*, 1–10.
- Liu, T. Xu, S. Lu, S. Qin, P. Bi, B. Ding, H. Liu, Y. Guo, X. Liu, X. (2019). A review on removal of organophosphorus pesticides in constructed wetland: performance, mechanism and influencing factors. *Sci. Total Environ.*, 651, 2247–2268.
- Logan, B.E. (2008). *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons.
- Logan, B.E. (2020). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat. Rev. Microbiol.*, 7, 375.
- Logan, B.E. Hamelers, B. Rozendal, R. Schroder, U. Keller, J. Freguia, S. Aelterman, P. Verstraete, W. Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 5181–5192.
- Lu, L. Xing, D. Ren, Z.J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 195, 115–121.
- Ma, Y. Zhai, Y. Zheng, X. He, S. Zhao, M. (2019). Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: effects of influent flow ratio distribution. *J. Clean. Prod.*, 225, 350–358.
- Mu, C. Wang, L. Wang, L. (2020). Performance of lab-scale microbial fuel cell coupled with unplanted constructed wetland for hexavalent chromium removal and electricity production. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 27, 25140–25148.
- Mulamoottil, G. (2018). *Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates*, Routledge. *Biochar, Ecol. Eng.*, 111, 1–10.
- Oodally, A. Gulamhussein, M. Randall, D.G. (2019). Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. *J. Water Process Eng.*, 32, 100930.
- Oon, Y.L. Ong, S.A. Ho, L.N. Wong, Y.S. Dahalan, F.A. Oon, Y.S. Lehl, H.K. Thung, W. E. Nordin, N. (2018). Up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for azo dye, saline, nitrate remediation and bioelectricity generation: from waste to energy approach, *Bioresour. Technol.*, 266, 97–108.
- Oon, Y.L. Ong, S.A. Ho, L.N. Wong, Y.S. Dahalan, F.A. Oon, Y.S. Lehl, H.K. Thung, W. E. Nordin, N. (2017). Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresour. Technol.*, 224, 265–275.
- Oon, Y.L. Ong, S.A. Ho, L.N. Wong, Y.S. Dahalan, F.A. Oon, Y.S. Teoh, T.P. Lehl, H. K. Thung, W.E. (2020). Constructed wetland-microbial fuel cell for azo dyes degradation and energy recovery: influence of molecular structure, kinetics, mechanisms and degradation pathways. *Sci. Total Environ.* 720, 137370.
- Oon, Y.L. Ong, S.A. Ho, L.N. Wong, Y.S. Oon, Y.S. Lehl, H.K. Thung, W.E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresour. Technol.*, 186, 270–275.
- Oon, Y.L. Ong, S.A. Wong, Y.S. Dahalan, F.A. Oon, Y.S. Teoh, T.P. Lehl, H.K. Ho, L. N. Thung, W.E. (2020). Constructed wetland–microbial fuel cell for azo dyes degradation and energy recovery: influence of molecular structure, kinetics, mechanisms and degradation pathways. *Sci. Total Environ.*, 720, 137370.
- Paredes, D. Kuschik, P. Mbvette, T. Stange, F. Müller, R. K'oser, H. (2007). New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment—a review. *Eng. Life Sci.*, 7, 13–25.
- Puig, S. Serra, M. Vilar-Sanz, A. Cabre, M. Baneras, L. Colprim, J. Balaguer, M.D. (2011). Autotrophic nitrite removal in the cathode of microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.*, 102, 4462–4467.
- Ramirez-Vargas, C.A. Arias, C.A. Carvalho, P. Zhang, L. Esteve-Nunez, A. Brix, H. (2019). Electroactive biofilm-based constructed wetland (EABB-CW): a mesocosm-scale test of an innovative setup for wastewater treatment. *Sci. Total Environ.*, 659, 796–806.
- Rathour, R. Patel, D. Shaikh, S. Desai, C. (2019). Eco-electrogenic treatment of dyestuff wastewater using constructed wetland-microbial fuel cell system with an evaluation of electrode-enriched microbial community structures, *Bioresour. Technol.*, 285, 121349.
- Saeed, T. Khan, T. (2019). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7, 103042.
- Sanjrani, M. Zhou, B. Zhao, H. Zheng, Y. Wang, Y. Xia, S. (2020). Treatment of wastewater with constructed wetlands systems and plants used in this technology-a review. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 18, 107–127.
- Schmitt, N. Wanko, A. Laurent, J. Bois, P. Molle, P. Mos' e, R. (2015). Constructed wetlands treating stormwater from separate sewer networks in a residential Strasbourg urban catchment area: micropollutant removal and fate. *J. Environ. Chem. Eng.*, 3, 2816–2824.
- Sheridan, C. Akcil, A. Kappelmeyer, U. Moodley, I. (2018). A review on the use of constructed wetlands for the treatment of acid mine drainage. *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*, 249–262.
- Sonawane, J.M. Yadav, A. Ghosh, P.C. Adeloju, S.B. (2017). Recent advances in the development and utilization of



- modern anode materials for high performance microbial fuel cells. *Biosens. Bioelectron.*, 90, 558–576.
- Song, H. Zhang, S. Long, X. Yang, X. Li, H. Xiang, W. (2017). Optimization of bioelectricity generation in constructed wetland-coupled microbial fuel cell systems. *Water*, 9, 185.
- Srivastava, P. Abbassi, R. Garaniya, V. Lewis, T. Yadav, A.K. (2020). Performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland coupled with a microbial fuel cell for treating wastewater. *J. Water Process Eng*, 33, 100994.
- Srivastava, P. Dwivedi, S. Kumar, N. Abbassi, R. Garaniya, V. Yadav, A.K. (2017). Performance assessment of aeration and radial oxygen loss assisted cathode based integrated constructed wetland-microbial fuel cell systems. *Bioresour. Technol.*, 244, 1178–1182.
- Srivastava, P. Yadav, A.K. Abbassi, R. Garaniya, V. Lewis, T. (2018). Denitrification in a low carbon environment of a constructed wetland incorporating a microbial electrolysis cell. *J. Environ. Chem. Eng*, 6, 5602–5607.
- Srivastava, P. Yadav, A.K. Garaniya, V. Lewis, T. Abbassi, R. Khan, S.J. (2020). Electrode dependent anaerobic ammonium oxidation in microbial fuel cell integrated hybrid constructed wetlands: a new process. *Sci. Total Environ.*, 698, 134248.
- Srivastava, P. Yadav, A.K. Mishra, B.K. (2015). The effects of microbial fuel cell integration into constructed wetland on the performance of constructed wetland. *Bioresour. Technol.*, 195, 223–230.
- Tamta, P. Rani, N. Yadav, A.K. (2020). Enhanced wastewater treatment and electricity generation using stacked constructed wetland-microbial fuel cells. *Environ. Chem. Lett.*, 18, 871–879.
- Tang, C. Zhao, Y. Kang, C. Yang, Y. Morgan, D. Xu, L. (2019). Towards concurrent pollutants removal and high energy harvesting in a pilot-scale CW-MFC: insight into the cathode conditions and electrodes connection. *Chem. Eng. J.*, 373, 150–160.
- Tee, P.F. Abdullah, M.O. Tan, I.A. Mohamed Amin, M.A. Nolasco-Hipolito, C. Bujang, K. (2016). Performance evaluation of a hybrid system for efficient palm oil mill effluent treatment via an air-cathode, tubular upflow microbial fuel cell coupled with a granular activated carbon adsorption. *Bioresour. Technol.*, 216, 478–485.
- Teoh, T.P. Ong, S.-A. Ho, L.-N. Wong, Y.-S. Oon, Y.-L. Oon, Y.-S. Tan, S.-M. Thung, W.- E. (2020). Up-flow constructed wetland-microbial fuel cell: influence of floating plant, aeration and circuit connection on wastewater treatment performance and bioelectricity generation. *J. Water Process Eng*, 36, 101371.
- Treesubuntorn, C. Chaiworn, W. Surareungchai, W. Thiravetyan, P. (2019). Increasing of electricity production from *Echinodosus cordifolius*-microbial fuel cell by inoculating *Bacillus thuringiensis*. *Sci. Total Environ.*, 686, 538–545.
- Türker, O.C. Yakar, A. (2017). A hybrid constructed wetland combined with microbial fuel cell for boron (B) removal and bioelectric production. *Ecol. Eng.*, 102, 411–421.
- Ucar, D. Zhang, Y. Angelidaki, I. (2017). An overview of electron acceptors in microbial fuel cells, *Front. Microbiol.*, 8, 643.
- Vilajeliu-Pons, A. Koch, C. Balaguer, M.D. Colprim, J. Harnisch, F. Puig, S. (2018). Microbial electricity driven anoxic ammonium removal. *Water Res.*, 130, 168–175.
- Villasenor, J. Capilla, P. Rodrigo, M.A. Canizares, P. F.J. Fernandez, Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland-microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Res.*, 47, 6731–6738.
- Virdis, B. Rabaey, K. Yuan, Z. Keller, J. (2008). Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal. *Water Res.*, 42, 3013–3024.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, 380, 48–65.
- Vymazal, J. (2019). Constructed wetlands for wastewater treatment, in: B. Fath (Ed.). *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier, Oxford, 14–21.
- Wang, G. Guo, Y. Cai, J. Wen, H. Mao, Z. Zhang, H. Wang, X. Ma, L. Zhu, M. (2019). Electricity production and the analysis of the anode microbial community in a constructed wetland-microbial fuel cell. *RSC Adv*, 9, 21460–21472.
- Wang, J. Hou, J. Xia, L. Jia, Z. He, X. Li, D. Zhou, Y. (2020). The combined effect of dissolved oxygen and COD/N on nitrogen removal and the corresponding mechanisms in intermittent aeration constructed wetlands. *Biochem. Eng. J.*, 153, 107400.
- Wang, J. Song, X. Wang, Y. Abayneh, B. Ding, Y. Yan, D. Bai, J. (2016). Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 221, 697–702.
- Wang, J. Song, X. Wang, Y. Bai, J. Bai, H. Yan, D. Cao, Y. Li, Y. Yu, Z. Dong, G. (2017). Bioelectricity generation, contaminant removal and bacterial community distribution as affected by substrate material size and aquatic macrophyte in constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 245, 372–378.
- Wang, J. Song, X. Wang, Y. Bai, J. Li, M. Dong, G. Lin, F. Lv, Y. Yan, D. (2017). Bioenergy generation and rhizodegradation as affected by microbial community distribution in a coupled constructed wetland-microbial fuel cell system associated with three macrophytes. *Sci. Total Environ.*, 607, 53–62.

- Wang, L. Pang, Q. Peng, F. Zhang, A. Zhou, Y. Lian, J. Zhang, Y. Yang, F. Zhu, Y. Ding, C. Zhu, X. Li, Y. Cui, Y. (2020). Response characteristics of nitrifying bacteria and archaea community involved in nitrogen removal and bioelectricity generation in integrated tidal flow constructed wetland-microbial fuel cell. *Front. Microbiol.*, 11, 1385.
- Wang, L. Zhou, Y. Peng, F. Zhang, A. Pang, Q. Lian, J. Zhang, Y. Yang, F. Zhu, Y. Ding, C. (2020). Intensified nitrogen removal in the tidal flow constructed wetland-microbial fuel cell: insight into evaluation of denitrifying genes. *J. Clean. Prod.*, 264, 121580.
- Wang, X. Song, J. Wang, Y. Zhao, Z. Wang, B. Yan, D. (2017). Effects of electrode material and substrate concentration on the bioenergy output and wastewater treatment in air-cathode microbial fuel cell integrating with constructed wetland. *Ecol. Eng.*, 99, 191–198.
- Wang, X. Tian, Y. Liu, H. Zhao, X. Wu, Q. Effects of influent COD/TN ratio on nitrogen removal in integrated constructed wetland-microbial fuel cell systems. *Bioresour. Technol.*, 271, 492–495.
- Wang, X. Tian, Y. Liu, H. Zhao, X. Peng, S. (2019). Optimizing the performance of organics and nutrient removal in constructed wetland-microbial fuel cell systems. *Sci. Total Environ.*, 653, 860–871.
- Wang, X. Tian, Y. Liu, H. Zhao, X. Peng, S. (2019). The influence of incorporating microbial fuel cells on greenhouse gas emissions from constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, 656, 270–279.
- Wei, M. Rakoczy, J. Vogt, C. Harnisch, F. Schumann, R. Richnow, H.H. (2015). Enhancement and monitoring of pollutant removal in a constructed wetland by microbial electrochemical technology. *Bioresour. Technol.*, 196, 490–499.
- Wen, H. Zhu, H. Xu, Y. Yan, B. Shutes, B. Banuelos, G. Wang, X. (2020). Removal of sulfamethoxazole and tetracycline in constructed wetlands integrated with microbial fuel cells influenced by influent and operational conditions. *Environ. Pollut.*, 115988.
- Wen, H. Zhu, H. Yan, B. Shutes, B. Yu, X. Cheng, R. Chen, X. Wang, X. (2020). Constructed wetlands integrated with microbial fuel cells for COD and nitrogen removal affected by plant and circuit operation mode, *Environ. Sci. Pollut. Res.*
- Wu, D. Yang, L. Gan, L. Chen, Q. Li, L. Chen, X. Wang, X. Guo, L. Miao, A. (2015). Potential of novel wastewater treatment system featuring microbial fuel cell to generate electricity and remove pollutants. *Ecol. Eng.*, 84, 624–631.
- Wu, Q. Jiao, S. Ma, M. Peng, S. (2020). Microbial fuel cell system: a promising technology for pollutant removal and environmental remediation, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 27, 6749–6764.
- Wu, Y. Jing, X. Gao, C. Huang, Q. Cai, P. (2018). Recent advances in microbial electrochemical system for soil bioremediation. *Chemosphere*, 211, 156–163.
- Wu, Y. Li, Y. Ontiveros-Valencia, A. Ordaz-Diaz, L. Liu, J. Zhou, C. Rittmann, B.E. (2017). Enhancing denitrification using a novel in situ membrane biofilm reactor (isMBfR). *Water Res.*, 119, 234–241.
- Xie, T. Jing, Z. Hu, J. Yuan, P. Liu, Y. Cao, S. (2018). Degradation of nitrobenzene-containing wastewater by a microbial-fuel-cell-coupled constructed wetland. *Ecol. Eng.*, 112, 65–71.
- Xu, F. Cao, F.-q. Kong, Q. Zhou, L.-l Yuan, Q. Zhu, Y.-j. Wang, Q. Du, Y.-d. Wang, Z.-d. (2018). Electricity production and evolution of microbial community in the constructed wetland-microbial fuel cell. *Chem. Eng. J.*, 339, 479–486.
- Xu, F. Ouyang, D.L. Rene, E.R. Ng, H.Y. Guo, L.L. Zhu, Y.J. Zhou, L.L. Yuan, Q. Miao, M. S. Wang, Q. Kong, Q. (2019). Electricity production enhancement in a constructed wetland-microbial fuel cell system for treating saline wastewater. *Bioresour. Technol.*, 288, 121462.
- Xu, F. Zhu, Y.-j. Wang, Y.-q. Chen, H.-y. Zhang, Y.-l. Hao, D. Qi, X.-y. Wang, B. Wang, Q. Zhao, C.-c. (2020). Coupling iron pretreatment with a constructed wetland-microbial fuel cell to improve wastewater purification and bioelectricity generation. *J. Clean. Prod.*, 276, 123301.
- Xu, L. Yu, W. Graham, N. Zhao, Y. (2021). Revisiting the bioelectrochemical system based biosensor for organic sensing and the prospect on constructed wetland-microbial fuel cell. *Chemosphere*, 264, 128532.
- Xu, L. Zhao, Y. Doherty, L. Hu, Y. Hao, X. (2016). Promoting the bio-cathode formation of a constructed wetland-microbial fuel cell by using powder activated carbon modified alum sludge in anode chamber. *Sci. Rep.*, 6, 26514.
- Xu, L. Zhao, Y. Doherty, Y. Hu, L. Hao, X. (2016). The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 46, 60–91.
- Xu, L. Zhao, Y. Fan, C. Fan, Z. Zhao, F. (2017). First study to explore the feasibility of applying microbial fuel cells into constructed wetlands for COD monitoring. *Bioresour. Technol.*, 243, 846–854.
- Xu, L. Zhao, Y. Tang, C. Doherty, L. (2018). Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell. *J. Environ. Manag.*, 207, 116–123.
- Yan, D. Song, X. Weng, B. Yu, Z. Bi, W. Wang, J. (2018). Bioelectricity generation from air-cathode microbial fuel cell connected to constructed wetland. *Water Sci. Technol.*, 78, 1990–1996.
- Yang, Q. Wu, Z. Liu, L. Zhang, F. Liang, S. (2016). Treatment of oil wastewater and electricity generation by integrating constructed wetland with microbial fuel cell. *Materials*, 9, 885.



- Yang, Y. Lin, E. Sun, S. Chen, H. Chow, A.T. (2019). Direct electricity production from subaqueous wetland sediments and banana peels using membrane-less microbial fuel cells. *Ind. Crop. Prod.*, 128, 70–79.
- Yang, Y. Liu, J. Zhang, N. Xie, H. Zhang, J. Hu, Z. Wang, Q. (2019). Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 170, 446–452.
- Yang, Y. Zhao, Y. Tang, C. Liu, R. Chen, T. (2021). Dual role of macrophytes in constructed wetland-microbial fuel cells using pyrrhotite as cathode material: a comparative assessment. *Chemosphere*, 263, 128354.
- Yang, Y. Zhao, Y. Tang, C. Mao, Y. Shen, C. (2019). Significance of water level in affecting cathode potential in electro-wetland. *Bioresour. Technol.*, 285, 121345.
- Yang, Y. Zhao, Y. Tang, C. Xu, L. Morgan, D. Liu, R. (2020). Role of macrophyte species in constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioenergy generation. *Chem. Eng. J.*, 392, 123708.
- Zhang, K. Wu, X. Luo, H. Li, X. Chen, W. Chen, J. Mo, Y. Wang, W. (2020). CH₄ control and associated microbial process from constructed wetland (CW) by microbial fuel cells (MFC). *J. Environ. Manag.*, 260, 110071.
- Zhang, S. Song, H.L. Yang, X.L. Huang, S. Dai, Z.Q. Li, H. Zhang, Y.Y. (2017). Dynamics of antibiotic resistance genes in microbial fuel cell-coupled constructed wetlands treating antibiotic-polluted water. *Chemosphere*, 178, 548–555.
- Zhang, S. Song, H.L. Yang, X.L. Li, H. Wang, Y.W. (2018). A system composed of a biofilm electrode reactor and a microbial fuel cell-constructed wetland exhibited efficient sulfamethoxazole removal but induced sul genes. *Bioresour. Technol.*, 256, 224–231.
- Zhang, S. Song, H.-L. Yang, X.-L. Yang, Y.-L. Yang, K.-Y. Wang, X.-Y. (2016). Fate of tetracycline and sulfamethoxazole and their corresponding resistance genes in microbial fuel cell coupled constructed wetlands. *RSC Adv*, 6, 95999–96005.
- Zhang, S. Yang, X.L. Li, H. Song, H.L. Wang, R.C. Dai, Z.Q. (2017). Degradation of sulfamethoxazole in bioelectrochemical system with power supplied by constructed wetland-coupled microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.*, 244, 345–352.
- Zhang, Y. Liu, X. Fu, C. Li, X. Yan, B. Shi, T. (2019). Effect of Fe (+2) addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemosphere*, 220, 259–265.
- Zhao, C. Shang, D. Zou, Y. Du, Y. Wang, Q. Xu, F. Ren, L. Kong, Q. (2020). Changes in electricity production and microbial community evolution in constructed wetland-microbial fuel cell exposed to wastewater containing Pb (II). *Sci. Total Environ.*, 732, 139127.
- Zhao, Y. Collum, S. Phelan, M. Goodbody, T. Doherty, Y. Hu, L. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: batch and continuous flow trials. *Chem. Eng. J.*, 229, 364–370.
- Zhou, Y. Xu, D. Xiao, E. Xu, D. Xu, P. Zhang, X. Zhou, Q. He, F. Wu, Z. (2018). Relationship between electrogenic performance and physiological change of four wetland plants in constructed wetland-microbial fuel cells during non-growing seasons. *J. Environ. Sci.*, 70, 54–62.