Journal of Farayandno – Vol. 18 – No. 82 (2023): 53-72

Review Article

A Review on the Removal of Heavy Metals from Wastewater by Microbial Fuel Cells

Somaye Sobhani [1], Morteza Esfandyari [2*]

[1] Master's student in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord

[2] Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord

Received: 24 Apr 2023 **Accepted:** 8 Aug 2023

Abstract

Heavy metals are extremely harmful environmental pollutants due to their toxicity, non-biodegradability and environmental accumulation that can affect people and the environment. Microbial fuel cells are a type of bioelectrochemical approach in which bacterial species remove organic pollutants and metal ions from synthetic and industrial wastewater and simultaneously generate electricity. Currently, the real applications of these devices in the world are limited due to the low level of production density. According to the investigations carried out in this article in recent years, microbial fuel cells have been used as one of the ways to remove heavy metals from industrial effluents, and 10 to 100% removal rates were achieved for metals such as gold, chromium, copper, lead, cadmium, mercury, zinc, arsenic and nickel. Also, the parameters affecting the amount of removal were evaluated in these studies, and the optimal conditions are in most cases in the range of neutral pH and in some cases in pH=2, at a temperature of 22 to 35 ^{0}C and an external resistance of 200 to 1000 ohms.

Keyword: Microbial Fuel Cell, Removal of Heavy Metals, Wastewater, Energy.

* M.Esfandyari@ub.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Sobhani, S., Esfandyari, M., "A Review on the Removal of Heavy Metals from Wastewater by Microbial Fuel Cells", Journal of Farayandno – Vol. 18 – No. 82, pp. 53-72, In Persian, (2023).

مقاله مروری

مروری بر حذف فلزات سنگین از پساب توسط پیل سوختی میکروبی

سمیه سبحانی [1]، مرتضی اسفندیاری [2*]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بجنورد

[2] دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بجنورد

دریافت: 1402/02/04 **پذیرش:** 1402/05/17

چکیده

فلزات سنگین به دلیل سمیت، زیست تخریب ناپذیری و تجمع زیست‌محیطی آلاینده‌های محیطی فوق‌العاده مضری هستند که می‌توانند بر افراد و محیط تأثیر بگذارند. پیل‌های سوختی میکروبی نوعی رویکرد بیوالکتروشیمیایی است که در آن گونه‌های باکتریایی، آلاینده‌های آلی و یون‌های فلزی را از فاضلاب مصنوعی و صنعتی حذف می‌کنند و به طور همزمان برق تولید می‌کنند. در حال حاضر کاربردهای واقعی این دستگاه‌ها در جهان به دلیل سطح پایین دانسیته تولیدی محدود هست. با بررسی‌های انجام شده در این مقاله در سال‌های اخیر از پیل سوختی میکروبی به عنوان یکی از راه‌های حذف فلزات سنگین از پساب صنایع مورد استفاده قرار گرفته‌است که میزان حذف 10 تا 100 درصدی برای فلزاتی مانند طلا، کروم، مس، سرب، کادمیوم، جیوه، روی، آرسنیک و نیکل دست یافتند. همچنین پارامترهای موثر بر میزان حذف در این بررسی‌ها مورد ارزیابی قرارگرفت که شرایط بهینه در اکثر موارد در محدوده pH خنثی و در بعضی موارد در pH= 2 ، در دمای 22 تا 35 درجه سانتی گراد و مقاومت خارجی 200 تا 1000 اهم می باشند.

کلمات کلیدی: پیل سوختی میکروبی، حذف فلزات سنگین، پساب ، انرژی.

* M.Esfandyari@ub.ac.ir

استناد به مقاله:

سبحانی، س.، اسفندیاری، م.، "مروری بر حذف فلزات سنگین از پساب توسط پیل سوختی میکروبی"، نشریه فرآیندنو، سال هجدهم، شماره 82، صص. 72-53، (تابستان1402).

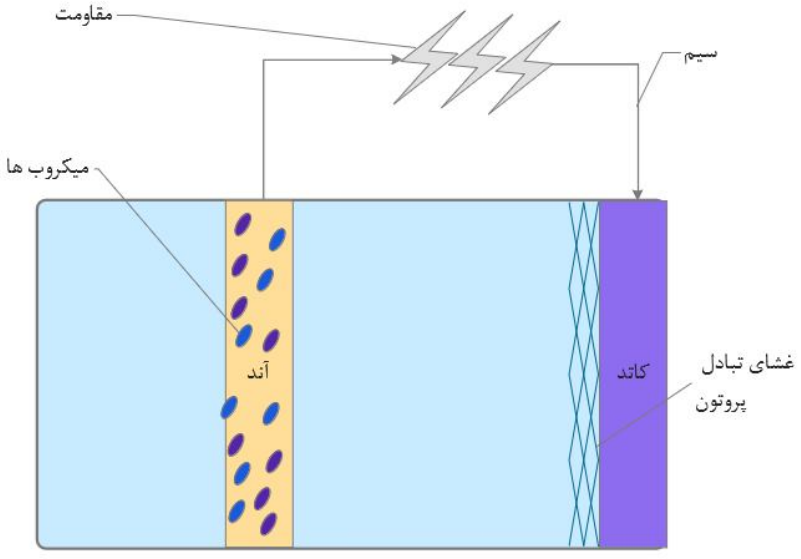
1- مقدمه

دو موضوع جهانی امروزه تهدیدات زیست‌محیطی مانند آلودگی آب و بحران انرژی است [1]. در سال‌های اخیر، شهرنشینی سریع در سراسر جهان مستلزم اکتشاف مستمر ذخایر سوخت فسیلی است. مسئله آشکاری که به دلیل افزایش استفاده از سوخت فسیلی روی می‌دهد، گرمایش جهانی به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای است، که جستجو منابع انرژی جایگزین با مقادیر کم کربن را ضروری می‌کند. در چند دهه اخیر ، سرمایه‌گذاری در منابع تجدیدپذیر به سمت تولید انرژی جایگزین سازگار با محیط زیست اولویت اصلی بوده است [2]. دانشمندان طی قرن‌ها فناوری‌های تبدیل انرژی از شکلی به شکل دیگر را آموخته‌اند. به‌عنوان‌مثال، تولید انرژی الکتریکی از اشکال مختلف انرژی مانند جزر و مد، باد، خورشیدی، آبی، حرارتی، شیمیایی و مکانیکی امکان‌پذیر است [3]. تصفیه فاضلاب قبل از استفاده مجدد در صنایع، کشاورزی و مصارف شرب از اهمیت بالایی برخوردار است. با این‌حال، وجود مواد آلی و شیمیایی سمی مانند نیتروژن، فسفر، فنل و فلزات سنگین[1] (به‌عنوان مثال جیوه و کادمیوم) در پساب صنعتی برای حاصلخیزی خاک و تولید محصول مضر است. بنابراین تصفیه پایدار فاضلاب مستلزم فهمیدن امکان‌سنجی فرآیند تصفیه، قبل از استفاده مجدد از آن در زمین‌های کشاورزی و سایر کاربردها است [2]. پیل سوختی میکروبی[2] یک فناوری جدید برای تولید برق و تصفیه فاضلاب به‌طور همزمان است [4]. برخلاف پیل‌های سوختی معمولی که معمولاً از فلزات گرانبها به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌کنند MFCها از موجودات زنده در شرایط ملایم یعنی دمای اتاق، فشار اتمسفر و pH خنثی استفاده می‌کنند. MFCها دارای مزایای عملیاتی و عملکردی نسبت به فناوری‌هایی هستند که در حال حاضر برای تولید انرژی از مواد آلی استفاده می‌شوند. درحالی‌که MFCهای در مقیاس کامل و بسیار موثر هنوز در دسترس نیستند، لذا این فناوری نویدبخش است [5]. در این سیستم میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان کاتالیزور زیستی عمل می‌کنند تا انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در ترکیبات آلی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل کنند.MFC دارای محفظه‌های بی‌هوازی و هوازی است که توسط غشاء جدا می‌شوند [4]. این فناوری را می‌توان ازلحاظ تولید انرژی از فاضلاب در شمار انرژی‌های تجدید پذیر و از سوی دیگر از نظر تصفیه آلاینده‌های مختلف، ازجمله روش‌های حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌حساب آورد [6]. MFCها از میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان کاتالیزور برای هدایت واکنش آندی و یا کاتدی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌کنند [3]. پاتر[3] اولین کسی بود که MFCها را در سال 1910 معرفی کرد و با استفاده از الکترودهای پلاتین موفق به تولید برق شد. در طول دهه 1980 رویکرد جدیدی ارائه شد که در آن شدت‌جریان الکتریکی خروجی با اضافه شدن واسطه‌های الکترونیکی به این سیستم افزایش یافت. این واسطه‌ها با افزایش سرعت انتقال الکترون، مقدار الکتریسیته خروجی را افزایش می‌دهند. رسوبات دریایی، رسوبات آب شیرین و لجن فعال همگی منابع غذایی غنی برای میکروارگانیسم‌های موجود در MFCها محسوب می‌شوند [7]. این کار توسط کوهن[4] ادامه پیدا کرد که سعی در تولید باتری‌های باکتریایی داشت. علاقه به MFCها با ظهور سفرهای فضایی سرنشین دار بیشتر شد، تا جایی که دامنه MFCها برای تبدیل زباله‌های زیستی به انرژی در فضاپیماها در دهه 1960 گسترش یافت [3]. اولین کاربرد عملی MFCها در محیط طبیعی ممکن است در سال 2006 اتفاق افتاده

[1] HMs
[2] Microbial fuel cell (MFC)
[3] Potter
[4] Cohen

باشد، زمانی که MFCهای دریایی برای اولین بار برای گزارش‌های آب‌وهوا مورداستفاده قرار گرفتند. این MFCها انرژی خود را از اکسیداسیون رسوبات آلی موجود در کف اقیانوس‌ها دریافت کردند [7]. بستر آلی از طریق فرآیند متابولیسم باکتری به شکل الکتریکی تبدیل می‌شود. الکترودهای آند و کاتد توسط یک غشای نفوذپذیر پروتون[5] در MFCها جدا می‌شوند. این همچنین به‌عنوان MFCهای دو محفظه شناخته می‌شود. در یک محفظه آند گونه‌های باکتریایی بستر آلی را اکسید کرده و الکترون‌ها و پروتون‌های تولید می‌کنند. پروتون‌ها می‌توانند مستقیماً از طریق PEM به کاتد منتقل شوند درحالی‌که الکترون‌ها از طریق یک مدار بیرونی حرکت می‌کنند تا در فرآیند کاهش در کاتد شرکت کنند [1]. سه‌راه ممکن توسط میکروارگانیسم‌ها برای انتقال الکترون‌ها به الکترود آند استفاده می‌شود ازجمله: (الف) تماس مستقیم (ب) سیم‌های پیلی/رسانا (ج) واسطه‌های ردوکس یا شاتل الکترونی [8].

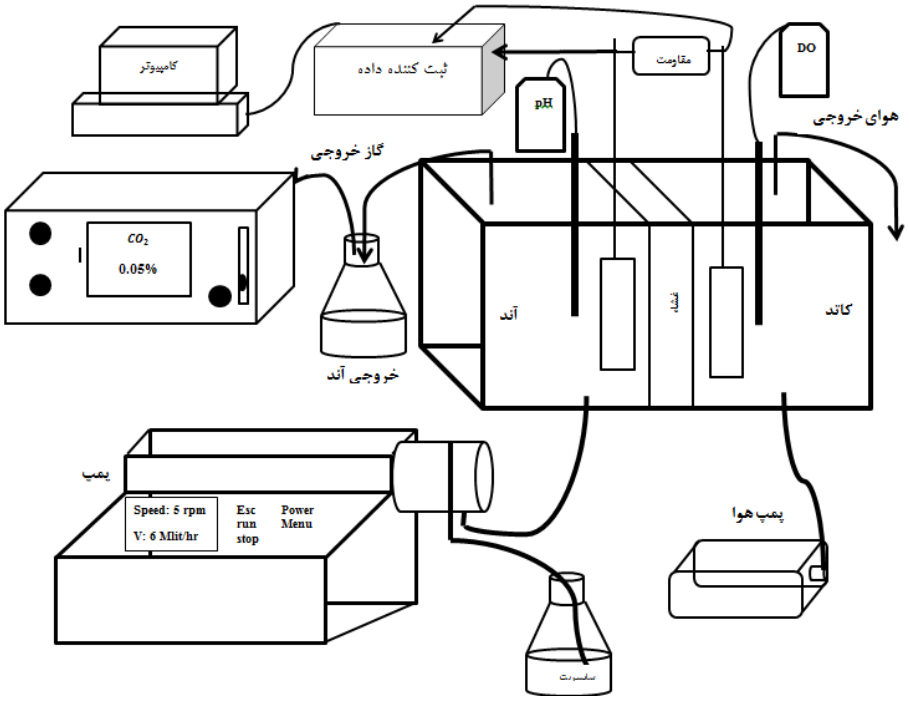
طراحی سلول یک جزء بسیار مهم در عملکرد موفقیت‌آمیز MFC است. اندازه، پیکربندی یا طراحی استاندارد واحدی برای راکتورهای MFC وجود ندارد. عملکرد MFC بر اساس پیکربندی راکتورها می‌تواند توسط عوامل مختلفی مانند حجم‌های مختلف، تأمین اکسیژن، مساحت غشاء و فاصله الکترود کنترل شود. اشکال مختلف راکتور مانند راکتورهای استوانه‌ای، مکعبی، نعل اسبی و H شکل پیشنهادشده است. راکتورهای MFC تک محفظه و دو محفظه معمولاً در اکثر پروژه‌های تحقیقاتی MFC موردمطالعه قرارگرفته‌اند [9]. هوادهی طبیعی کاتد برای استفاده از O_2 به‌عنوان گیرنده نهایی الکترون منجر به ساخت MFC با یک محفظه و مجموعه کاتد هوا می‌شود «شکل 1». در MFCهای تک محفظه‌ای کاتد مستقیماً به PEM متصل می‌شود و اجازه می‌دهد تا اکسیژن مستقیم به الکترود تأمین شود. عمدتاً این نوع پیکربندی شامل محفظه‌های آندی ساده بدون محفظه کاتدی مشخص و گاهی اوقات بدون هیچ‌گونه PEM است. الکترودهای کربنی به‌عنوان آند در MFC تک محفظه‌ای استفاده می‌شوند درحالی‌که کاتد بیشتر از الکترودهای کربنی متخلخل PEM یا پارچه کربنی است [9].



شکل 1- شماتیک پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای

[5] PEM

شکل 2 ساختار یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای که برای تولید انرژی همراه با تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود را نشان می دهد. پیل سوختی میکروبی شامل محفظه‌های آندی و کاتدی است که از طریق یک PEM جداشده‌اند [9]. محفظه آندی عموماً حاوی فاضلاب و محفظه کاتدی حاوی آب مقطر است. پل نمکی بین هر دو محفظه قرار داده‌شده تا به انتقال یون‌ها کمک کند [10]. PEM به عنوان واسطه‌ای برای انتقال پروتون‌ها از محفظه آند به محفظه کاتد عمل می‌کند. PEM همچنین به جلوگیری از انتشار یا تماس اکسیژن و سایر عوامل اکسیدکننده به آند کمک می‌کند. برخی از مشکلات مرتبط با پیل سوختی میکروبی دو محفظه عبارت‌اند از فاصله زیاد بین الکترودها که باعث مقاومت داخلی بیشتر می‌شود، استفاده از فرآیند دسته‌ای که نیاز به تعمیر و نگهداری منظم دارد و غنی‌سازی محیط توسط برخی مواد افزودنی برای تولید جریان بالا این شرایط برای تولید توان بهینه مانعی برای افزایش مقیاس MFCهای دو محفظه است[9].



شکل 2- ساختار پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای

۱- کاربردهای پیل سوختی میکروبی

تولید انرژی مهمترین کاربرد پیل سوختی میکروبی است. MFCها توانسته‌اند مقادیر زیادی از مواد آلی و آلاینده‌های محیطی را تجزیه کنند و در برخی موارد این تصفیه بیولوژیکی بسیار مهم‌تر از تولید برق است. MFCها در تصفیه فاضلابی که سطوح COD[6] بالایی دارند، در حذف فلزات سنگین و در سیستم‌های ترکیبی متشکل از MFCها و بیوراکتورهای غشایی استفاده می‌شود. MFCها کاربردهای دیگری نیز دارند: آنها در تولید بیوهیدروژن، داروسازی و

[6] Chemical Oxygen Demand

پزشکی، حسگرها و ... استفاده می‌شوند. پساب صنایع فرآوری گوشت و همچنین کارخانه‌های بازیافت کاغذ، صنایع شیمیایی و صنایع تولید کک با استفاده از MFCها تصفیه می‌شوند [7].

۲- اثرات فلزات سنگین در سلامتی انسان و محیط زیست

آلودگی محیطی ناشی از فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مسائل مهم در ماندگاری، سمیت و تجمع زیستی آن در نظر گرفته‌شده است [11]. فلزات سنگین به دلیل سمیت مزمن، زیست تخریب ناپذیری و تجمع زیست‌محیطی آلاینده‌های محیطی فوق‌العاده مضری هستند. فلزات سنگین عناصری با چگالی بیشتر و جرم اتمی بالاتر هستند که می‌توانند بر افراد و محیط تأثیر بگذارند، مانند کادمیوم، روی، جیوه، آرسنیک، نقره، کروم، مس، آهن و پلاتین. آلودگی آب با فلزات سنگین یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی است که گیاهان، حیوانات و انسان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فلزات سنگین حتی در غلظت‌های پایین نیز خطرناک هستند زیرا زیست‌تخریب‌پذیر نیستند [12]. آنها همچنین ممکن است وارد زنجیره‌های غذایی شوند که به‌طور بالقوه منجر به بزرگنمایی زیستی آنها در مصرف‌کنندگان می‌شود و می‌توانند به ترکیبات پایدار با خواص بیگانه تبدیل شوند [13]. مقادیر مجاز غلظت فلزات سنگین خروجی از فاضلاب‌های صنعتی در محیط‌های پذیرنده مختلف که توسط سازمان حفاظت محیط زیست تدوین‌شده است در جدول 1 ذکرشده است.

جدول 1- استاندارد خروجی فاضلاب [33]

فلزات سنگین	تخلیه به آب‌های سطحی ($mg.l^{-1}$)	تخلیه به چاه جاذب ($mg.l^{-1}$)	مصارف کشاورزی و آبیاری ($mg.l^{-1}$)
نقره	1	0/1	0/1
آلومینیوم	5	5	5
آرسنیک	0/1	0/1	0/1
کروم (6)	0/5	1	1
کروم (3)	2	2	2
مس	1	1	0/2
آهن	3	3	3
جیوه	ناچیز	ناچیز	ناچیز
نیکل	2	2	2
مولیبدن	0/01	0/01	0/01
سرب	1	1	1
روی	2	2	2
کادمیوم	0/1	0/1	0/05
کبالت	1	1	0/05

۳- روش‌های حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی

روش‌های مختلفی برای تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین وجود دارد، مانند استخراج با حلال[7]، فیلتراسیون[8]، تبادل یونی[9]، انعقاد[10]، ته‌نشینی[11]، اکسیداسیون[12] و جذب[13] [14]. با این‌حال بیشتراین روش‌ها، مانند رسوب شیمیایی و لخته‌سازی انعقادی، تنها در هنگام درمان با غلظت‌های بالای فلزات سنگین (به عنوان مثال، بزرگ‌تر از 1000 ppm) قابل اعتماد هستند و نیاز به استفاده از معرف‌های شیمیایی دارند. این روش‌ها نه تنها هزینه عملیات را افزایش می‌دهند بلکه پیچیدگی تصفیه فاضلاب را نیز افزایش می‌دهند، زیرا محصولات جانبی ثانویه در طول تصفیه تولید می‌شوند و نیاز به دفع بیشتری دارند [15]. این تکنیک‌ها دارای معایبی‌هستند مانند : هزینه بالا، راندمان حذف کم، بازسازی و مشکل آلودگی‌های ثانویه [14]. بنابراین یک روش مؤثر اما کم‌هزینه برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی غلظت متوسط تا کم فلزات ضروری است [15]. ازجمله این روش‌ها می‌توان به فناوری پیل سوختی میکروبی اشاره کرد.

۴- مکانیسم‌های حذف فلزات سنگین

اگرچه تعداد قابل‌توجهی از مطالعات ظرفیت MFCها برای حذف فلزات سنگین را بررسی کرده‌اند، هنوز اطلاعات کافی در مورد مکانیسم‌های دخیل درروند حذف آن‌ها وجود ندارد. در کاتدهای غیرزنده، کاهش و رسوب در سطح کاتد مکانیسم‌های حذف معمولاً موردبررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر کاهش کاتدی[14]، حذف فلزات سنگین در کاتدهای غیرزنده از طریق رسوب‌شیمیایی و کاهش الکتروشیمیایی نشان داده شد. در بیوکاتدها نشان داده شد که حذف فلزات سنگین از طریق تعدادی مکانیسم دیگر که شامل کاهش زیستی، تجمع زیستی، جذب زیستی و زیست کانی‌سازی می‌شود القا می‌شود [8].

۵- حذف فلزات سنگین توسط پیل سوختی میکروبی

استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی برای حذف یا بازیابی فلزات سنگین از جریان‌های فاضلاب و خاک در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرارگرفته است. این سیستم مبتنی بر میکروب‌های فعال الکتروشیمیایی در آند (به نام بیوآند) است تا نه‌تنها پتانسیل کاهشی برای حمایت از کاتد در احیای فلزات را فراهم کند، بلکه برای تصفیه فاضلاب با اکسید کردن مواد آلی نیز ایجاد می‌کند [15]. در جدول 2 خلاصه‌ای از مطالعات قبلی در مورد حذف فلزات مختلف با استفاده از فناوری‌های MFC را به همراه حداکثر حذف و اطلاعات مربوط به آزمایشات ارائه شده در مقالات می باشد.

[7] Solvent Extraction
[8] Filtration
[9] Ion Exchange
[10] Coagulation
[11] Sedimentation
[12] Oxidation
[13] Adsorption
[14] Cathodic Reduction

جدول 2. خلاصه کارهای انجام شده درمورد حذف فلزات سنگین با استفاده از MFC

ردیف	عنوان مقاله	فلز سنگین	نوع MFC	میزان حذف	آند و کاتد	غشاء	مزایا و معایب	مرجع
1	استفاده از سلول‌های سوختی میکروبی با انرژی شیره درخت نخل روغنی (OPTS) برای حذف فلز سمی از فاضلاب مصنوعی با تولید برق	سرب، کادمیوم، کروم، نیکل، جیوه	دو محفظه	سرب، کادمیوم، کروم ، نیکل و جیوه به ترتیب 75، 70/10، 75، 80، درصد و 60 درصد	میله گرافیتی	غشاء Nafion	• بیشترین حذف در pH=7 و در دمای 25 تا 30 درجه سانتی گراد • تولید انرژی کم • رسانایی کم الکترود • کاهش راندمان حذف بعد از 75 روز	[1]
2	یک بیوسنسور مبتنی بر پیل سوختی میکروبی دو محفظه برای نظارت بر مس و آرسنیک در فاضلاب شهری	مس و آرسنیک	دو محفظه MFC-B	کاهش غلظت فلزات سنگین به ترتیب با 0/989و R^2 = 0/982 برای مس و آرسنیک	نمد کربن در محفظه آند و برس فیبر کربن به عنوان الکترود کاتد	غشا Nafion	• بیشترین حذف در pH=7-8، در دمای 25 درجه سانتی گراد، مقاومت خارجی 1000 اهم و غلظت اولیه 300 میلی گرم در لیتر • حذف آرسنیک و سرب موجب کاهش تولید جریان خروجی و افت جریان در حسگر	[۱۱]
3	حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی با استفاده از پیل سوختی میکروبی	طلا	دو محفظه	98/86 درصد حذف طلا	برس کربنی	غشا Nafion	• بیشترین حذف در pH=2، در دمای اتاق ، غلظت اولیه مخمر 80 گرم در لیتر و غلظت اولیه طلا 250 میلی گرم در لیتر • بازیابی طلا به عنوان فلز گرانبها • افزایش حذف طلا در حضور فلز مس • کاهش پتانسیل مدار باز و منفی شدن آن بعد از 6 ساعت کارکرد	[14]
4	حذف و بازیافت روی از فاضلاب صنعتی با پیل سوختی میکروبی: بررسی تجربی و پیش‌بینی نظری	روی	راه اندازی نیمه سلولی (بدون بیوآند)	درصد حذف Zn^{2+} بیش از 96	نمدهای کربنی ساده	غشای تبادل آنیونی[15]	• بیشترین حذف در pH کمی بالاتر از 7، در دمای 3±22 درجه سانتی گراد و غلظت اولیه کمتراز 2 میلی مولار • امکان بازیافت روی • بازیابی کم در مقابل درصد حذف روی (پساب صنعتی 43	[15]

[15] AEM

	درصد و پساب مصنوعی 83 درصد بازیابی بعد از 22 ساعت کارکرد) • پتانسیل پایین تر کاتد باعث افزایش رسوب روی							
[16]	• بیشترین حذف در pH=6 و pH=6/5 به ترتیب برای آند و کاتد، در دمای 3±25 درجه سانتی گراد، مقاومت خارجی 200 اهم • استفاده از بیوکاتد باعث افزایش حذف و افزایش ده برابری چگالی توان • حذف بیشتر نیکل در مقایسه با کادمیوم • کاهش هزینه‌ها با استفاده از جایگزین کردن کاتالیزورهای شیمیایی گران قیمت با کاتالیزور میکروبی	غشای تبادل پروتون	برس گرافیتی	92 درصد نیکل و 87 درصد کادمیوم	دو محفظه	کادمیوم و نیکل	حذف کادمیوم و نیکل با تولید انرژی افزایش یافته با استفاده از پیل سوختی میکروبی بیوکاتد: فهم از خصوصیات مولکولی جوامع بیوفیلم	5
[17]	• بیشترین حذف در pH=7/1، در دمای 1±32 درجه سانتی گراد، مقاومت خارجی 200 اهم • افزایش غلظت فلزات کادمیوم و روی باعث افت ولتاژ خروجی • پتانسیل استاندارد پایین $\frac{Cd^{2+}}{Cd}$ و $\frac{Zn^{2+}}{Zn}$ تبدیل آنها را به فلز عنصری دشوار می‌کند	---	پارچه کربنی	راندمان حذف بالای کادمیوم 90 درصد و روی 97 درصد	تک محفظه کاتد هوا	کادمیوم و روی	اثربخشی پیل‌های سوختی میکروبی تک محفظه برای حذف کادمیوم و روی با تولید همزمان برق	6
[18]	• بیشترین حذف در pH=7، در دمای 0/5±25 درجه سانتی گراد، مقاومت خارجی 1000 اهم • MFC-F حذف بیشتر فلزات سنگین نسبت به MFC-T • MFC-F ولتاژ کمتر نسبت به MFC-T	غشای تبادل پروتون	پارچه کربنی	درصد کروم و مس برای MFC-F به ترتیب به 41/8% و 13/3%	دو محفظه	کروم و مس	سلول‌های سوختی میکروبی دو محفظه به عنوان حسگرهای زیستی برای تشخیص سمیت کروم و مس در فاضلاب: بررسی کاربرد، اثر محلول‌های مختلف کاتولیت، و ارزیابی چرخه زندگی	7

[19]	• بیشترین حذف در pH=6، در دمای 1±35 درجه سانتی گراد، مقاومت خارجی 1000 اهم • نبود غشا باعث کاهش هزینه و کاهش مقاومت داخلی و تسهیل انتقال پروتون • بازیابی مس • افزایش غلظت مس موجب کاهش راندمان حذف و کاهش چگالی توان	---	برس کربن به‌عنوان آند و پارچه کربنی به‌عنوان کاتد	راندمان حذف مس 98/3 درصد	تک محفظه	مس	حذف مس و تجزیه و تحلیل جامعه میکروبی در پیل سوختی میکروبی تک محفظه	8
[20]	• بیشترین حذف در pH= 6/45 و pH= 7 به ترتیب برای آند و کاتد، در دمای اتاق، مقاومت خارجی 1000 اهم • حذف الکترود GO-PANI-Ag نسبت به GO بیشتر است • پایداری شیمیایی آندها تا 35 روز • پارامترهای آند باید بهینه شوند چون مستقیما بر انتقال الکترون و رشد باکتری تاثیر می‌گذارد	غشای مبادله پروتون Nafion	دو الکترود آند GO و GO–PANI–Ag و الکترود کاتد میله گرافیتی	GO-PANI-Ag با حذف 78/10 درصد سرب و 80/25 درصد حذف کادمیوم	دو محفظه	سرب و کادمیوم	استفاده از الکترودهای اکسید گرافن-پلی آنیلین-نقره مبتنی بر زیست توده در سلول‌های سوختی میکروبی برای تقویت تولید انرژی و حذف فلزات سنگین	9
[21]	• بیشترین حذف در pH=2، در دمای اتاق، مقاومت خارجی 1000 اهم • مقاومت کم پارچه کربن، مقاومت بالای برس کربن و الکترودهای نمد کربن • افزایش غلظت اولیه کروم باعث افزایش چگالی توان • زباله سمی تولید نشد • با افزایش غلظت کروم زمان حذف افزایش می‌یابد	غشای تبادل پروتون	نمد کربن به عنوان الکترود آند. پارچه کربن، برس کربن، نمد کربن به عنوان الکترود کاتد	حذف 100 با استفاده از پارچه کربن	دو محفظه	کروم	کاهش همزمان کروم (VI) و تولید بیوالکتریک در یک پیل سوختی میکروبی دو محفظه	10
[22]	• بیشترین حذف در pH=2، در دمای 1±25 درجه سانتی گراد	غشای تبادل	آند برس کربن و کاتد پارچه کربنی	میزان حذف طلا 99/89 درصد	دو محفظه	طلا	مدل سازی بازیافت طلا از فاضلاب تتراکلروآورات با استفاده از پیل سوختی میکروبی	11

	• با افزایش غلظت اولیه طلا حداکثر چگالی توان و حداکثر چگالی جریان افزایش می‌یابد • با افزایش غلظت اولیه طلا ولتاژ مدار باز افزایشی پیدا نمی‌کند • مقاومت داخلی با افزایش طلا کاهش می‌یابد	کاتیونی [16]						

1-6- کادمیوم

کادمیوم فلزی نرم و سفید مایل به نقره‌ای است که از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی شبیه روی و جیوه است. کادمیوم در طبیعت در غلظت‌های کم یافت می‌شود. سنگ معدن کادمیوم به‌وفور یافت نمی‌شود. فعالیت‌های انسانی، مانند احتراق سوخت‌های فسیلی، و همچنین شیرآبه‌های تولیدشده از محل‌های دفن زباله، زمین‌های کشاورزی و زباله‌های معدنی، به‌ویژه از معادن روی و سرب، به آلودگی کادمیوم در محیط کمک می‌کنند. کادمیوم یک فلز انتقالی غیرضروری سمی است که برای سلامتی انسان و حیوانات خطر دارد. قرار گرفتن در معرض کادمیوم شغلی و محیطی ممکن است با انواع مختلف سرطان ازجمله سرطان سینه، ریه، پروستات و کلیه مرتبط باشد [23].

در بررسی که عاصم علی یعقوب[17] و همکاران در سال 2021 انجام دادند؛ در پیل سوختی میکروبی دو محفظه که از شیره درخت نخل روغنی[18] محلی به‌عنوان یک بستر آلی برای بهبود فعالیت‌های باکتریایی استفاده کردند و به میزان حذف 70/10 درصد برای کادمیوم دست یافتند. در این مطالعه از MFCهای دو محفظه‌ای به ارتفاع 10 سانتی‌متر استفاده شد. عرض محفظه آند 9/5 سانتی متر و عرض محفظه کاتد 9 سانتی‌متر بود. آب حوضچه محلی از دریاچه فاجار هاراپان[19]، دانشگاه ساینس مالزی برای حذف ناخالصی‌های جامد صاف شد و یون‌های فلزی مختلف (هرکدام 50 میلی‌گرم در لیتر) تکمیل شد. این آب حوض محلی با مکمل فلز به‌عنوان فاضلاب مصنوعی شناخته می‌شود. منبع تلقیح آماده‌شده (350 میلی‌لیتر) در محفظه آند با یک الکترود آند تکمیل شد درحالی‌که محفظه کاتد با آب‌لوله‌کشی (350 میلی‌لیتر) اضافه شد. غشای Nafon-17 برای جداسازی محفظه آند و کاتد و همچنین از میله گرافیتی به‌عنوان الکترود آند و کاتد در طول عملیات استفاده کردند و OPTS 5 میلی‌لیتر در روزبه محفظه آند به‌عنوان سوخت برای جامعه باکتریایی در عملیات اضافه می‌شد [1].

آرادانا سینگ[20] و همکاران در سال 2021 به بررسی حذف فلزات کادمیوم توسط پیل سوختی میکروبی دو محفظه بیوکاتد از محلول‌های آبی پرداختند . آن‌ها موفق به حذف 87 درصد کادمیوم در غلظت اولیه 10 میلی‌گرم در لیتر شدند و با افزایش غلظت اولیه به 25 میلی‌گرم در لیتر حذف به هنگام استفاده از بیوکاتد 70 درصد افزایش یافت. در این بررسی MFCهای پلی آکریلات دو محفظه (هر یک 1 لیتر) مجهز به الکترودهای برس گرافیتی مورداستفاده قرار

[16] CEM
[17] Asim Ali Yaqoob
[18] OPTS (oil palm trunk sap)
[19] Fajar Harapan
[20] Aradhana Singh

گرفتند و با یک غشای تبادل پروتون جدا شدند. الکترودهای گرافیتی مورداستفاده به‌عنوان آند و کاتد با ابعاد (طول 15 سانتی‌متر و عرض 9 سانتی‌متر) بر روی یک سیم آلیاژی مبتنی بر Al قرار گرفتند. فاضلاب کارخانه تقطیر که پتانسیل خود را به‌عنوان ماده اولیه در MFC برای تولید برق در مطالعات قبلی ما نشان داده است به‌عنوان بستر در محفظه آند استفاده شد که از یک کارخانه تقطیر مجاور در NCR، دهلی جمع‌آوری شد [16].

در سال 2014 نیز کارول ابوراچد[21] و همکارانش در یک پیل سوختی میکروبی تک محفظه کاتد هوا به راندمان بالای حذف کادمیوم 90 درصد رسیدند. در این آزمایش MFC های تک محفظه کاتد هوا مورداستفاده قرار گرفتند. MFC از یک محفظه استوانه‌ای پلاستیکی (پلکسی گلاس) (12 میلی‌لیتر) تشکیل شده بود. آند و کاتد به‌طور موازی در دو طرف محفظه با فاصله 1,7 سانتی‌متر قرار گرفتند. آند (1/8سانتی‌متر مربع) از پارچه کربن نوع A (بدون عایق مرطوب) درحالی‌که کاتد (7 سانتی‌متر مربع) از پارچه کربن نوع B (30 درصد عایق مرطوب) ساخته‌شده است. کاتد با پوشش کاتالیزور 1 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع پلاتین بر روی پارچه کربنی تهیه شد. سوختی میکروبی با یک کشت باکتریایی مخلوط که در اصل از لجن فاضلاب به‌دست‌آمده از کارخانه تصفیه فاضلاب Corvallis[22] غنی‌شده بود تلقیح شدند [17].

عاصم علی یعقوب و همکارانش در سال 2022، پیل سوختی میکروبی را با عملکرد دو الکترود آند مبتنی بر کامپوزیت گرافن _اکساید گرافن (GO) و گرافن اکساید_پلیمر _اکسید فلز (GO-PANI -Ag) برای حذف فلزات سنگین مثل کادمیوم مورداستفاده قراردادند و به‌طورکلی الکترود GO-PANI –Ag با حذف 80/25 درصد کادمیوم حذف بالاتری نسبت به GO داشت. در این مطالعه از MFC با دو محفظه جداشده توسط غشای مبادله پروتون Nafion استفاده کردند ، هرکدام با طول و قطر 10 × 9/5 سانتی‌متر حجم کلی تقریباً 1000 میلی‌لیتر اما ظرفیت عملیاتی تنها 500 میلی‌لیتر بود. محفظه آند MFCها دارای فاضلاب مصنوعی (500 میلی‌لیتر) بود درحالی‌که محفظه کاتد دارای آب‌لوله‌کشی با بافر فسفات (0/1M) بود که برای حفظ pH منبع تلقیح آند استفاده می‌شد [20].

2-6- نیکل

در میان آلاینده‌های فلزات سنگین محیطی، نیکل به‌عنوان یک خطر بهداشتی صنعتی و شغلی در نظر گرفته می‌شود، زیرا بسیاری از ترکیبات نیکل در محیط زیست انسان قابل‌دسترسی هستند. شیمیدان سوئدی اکسل کرونستد[23] در سال 1951 اولین فردی بود که نیکل خالص‌شده را به دست آورد. استفاده صنعتی وسیع از نیکل در طول تولید، بازیافت و دفع آن منجر به آلودگی زیست‌محیطی گسترده شده است. نیکل یا از طریق استخراج نیکل یا فرآیندهای صنعتی مختلف مانند نیروگاه‌ها یا زباله سوزها، صنایع لاستیک‌سازی و پلاستیک، صنایع باتری نیکل-کادمیم و صنایع آبکاری به اتمسفر تخلیه می‌شود. استفاده گسترده از نیکل در صنایع مختلف و یا قرار گرفتن در معرض شغلی آن قطعاً تأثیر جدی بر سلامت انسان دارد. برخی از اثرات سمیت نیکل برای انسان‌ها شامل اختلال ژنتیکی، افزایش خطر بروز سرطان، اختلال در عملکرد سیستم ایمنی بدن و ... می‌باشد [25].

[21] Carole Abourached
[22] Corvallis, OR
[23] Axel Cronstedt

علاوه بر فلز کادمیوم که آرادانا سینگ و همکاران که توسط پیل سوختی میکروبی دو محفظه بیوکاتد از محلول‌های آبی حذف کردند. آن‌ها موفق به حذف 92 درصد نیکل در غلظت اولیه 10 میلی‌گرم در لیتر شدند و با افزایش غلظت اولیه به 25 میلی‌گرم در لیتر حذف به هنگام استفاده از بیوکاتد 70 درصد افزایش یافت [16].

همانطورکه در قسمت قبل توضیح داده شد، در آزمایشی که عاصم علی یعقوب و همکاران انجام دادند علاوه بر فلز کادمیوم به حذف فلز نیکل نیز پرداختند که به میزان حذف 80 درصد برای این فلز در شرایط مشابه دست یافتند [1].

6-3- روی

در جدول تناوبی عناصر، روی در گروه فلزات واسطه به همراه دو فلز سمی کادمیوم و جیوه یافت می‌شود. با این‌وجود، روی برای انسان نسبتاً غیر سمی است. بدن انسان حاوی 2 تا 3 گرم روی است و تقریباً 90 درصد آن در ماهیچه‌ها و استخوان‌ها یافت می‌شود. در مقایسه با چندین یون فلزی دیگر با خواص شیمیایی مشابه، روی نسبتاً بی‌ضرر است. تنها قرار گرفتن در معرض دوزهای بالا اثرات سمی دارد و مسمومیت حاد روی را به یک رویداد نادر تبدیل می‌کند [32].

در آزمایشی که کارول ابوراچد و همکارانش انجام دادند در همان شرایط ذکر شده برای فلز کادمیوم، فلز روی را نیز با راندمان بالای 97 درصد حذف کردند [17].

در سال 2021 سویی سو لیما[24] و همکاران به بررسی امکان حذف فلز روی از پساب‌های صنعتی توسط پیل سوختی میکروبی پرداختند . در این مطالعه حذف روی در پیل سوختی میکروبی از پساب‌های صنعتی با غلظت اولیه کمتر از 2 میلی مولار ، پس از 22 ساعت کارکرد دستگاه به بیش از 96 درصد رسید. این مطالعه را با راه‌اندازی نیمه سلولی (بدون بیواند) آغاز کردند. تنظیم شامل یک آند و کاتد غیرزنده بود که توسط یک غشای تبادل آنیونی جداشده بودند. هر دو محفظه آندی و کاتدی به‌طور یکسان از Perspex شفاف با حجم کاری داخلی 7 x 7 x 2 سانتی مترمکعب ساخته‌شده‌اند. هر دو الکترود از نمدهای کربنی ساده با یک منطقه پیش‌بینی‌شده فعال 3 x 3 سانتی‌متر مربع در فضای داخلی محفظه‌ها پیچ شده بودند [15].

6-4- طلا

فلز طلا یکی از ارزشمندترین فلزات دنیاست که از دیرباز برای تزئینات، جواهرات، پول و مدال‌ها استفاده می‌شود. استفاده از فلز طلا در ساخت جواهرات و سایر محصولات، به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی آن، بسیار محبوب است. بااین‌حال، به دلیل برخی مواد شیمیایی که ممکن است در فرآیند استخراج و پالایش فلز طلا به آن اضافه شوند، ممکن است این فلز مضراتی برای سلامتی داشته باشد. به‌عنوان‌مثال، استفاده از طلا در محصولات بهداشتی، مانند دست‌شویی و محصولات آرایشی، می‌تواند باعث بروز حساسیت و آلرژی در برخی افراد شود. همچنین مصرف طولانی‌مدت غذاهایی که در ظروفی از طلا قرار داشته‌اند، ممکن است باعث انتشار فلز طلا در بدن شود و به‌سلامتی آسیب برساند [31].

[24] Swee Su Lima

در سال 2013 چانسو چویی[25] و همکاران با استفاده از پیل سوختی میکروبی دو محفظه مکعبی ساخته‌شده از مستطیل اکریلیک در این مطالعه استفاده شد. هر دو محفظه آند و کاتد دارای حجم 72 میلی‌لیتر (طول: 4 سانتی‌متر، عرض: 4 سانتی‌متر، ارتفاع: 4/5 سانتی‌متر) بودند، اما حجم مؤثر 60 میلی‌لیتر بود. دو محفظه را توسط یک غشای تبادل کاتیونی با مساحت 18 سانتی‌متر مربع (4/54سانتی‌متر) از هم جدا کردند. آند برس کربن (2/5 = L سانتی‌متر، 2/5 = D سانتی‌متر) و کاتد پارچه کربنی، که سطح آن 2/2سانتی‌متر مربع (1/7x 1/3 سانتی‌متر) بود. ازآنجایی‌که از CEM استفاده می‌شد، $AuCl_4$ مستقیماً از طریق محفظه کاتد به محفظه آند منتقل نمی‌شد، که احتمالاً از دست دادن $AuCl_4$ جلوگیری می‌کرد. مخلوطی از 20 میلی‌لیتر لجن با 40 میلی‌لیتر فاضلاب مصنوعی به محفظه آند پمپ شد و سپس با گاز نیتروژن به مدت 20 دقیقه برای حذف اکسیژن محلول پاک‌سازی شد. در آزمایشی که انجام شد، در غلظت اولیه 200 میلی‌گرم در لیتر طلا به میزان حذف 99/89 درصد رسیدند و غلظت نهایی طلا به 0/22 میلی‌گرم در لیتر رسید . حداکثر راندمان واقعی این MFC حدود 57 درصد به دست آمد [22].

و همچنین در بررسی انجام‌شده توسط سامیر العاشه[26] و همکاران در سال 2022 راندمان حذف طلا در محلول یون‌های AuCl4 خالص با استفاده از پیل سوختی میکروبی دو محفظه ، پس از پنج ساعت از عملکرد ، پساب حاوی غلظت اولیه 250 میلی‌گرم در لیتر یون طلا به راندمان حذف 95 درصد دست یافتند این مقدار پس از 48 ساعت کارکرد برای نمونه ضایعاتی با غلظت اولیه طلا ppm 250 به 98/86 درصد افزایش یافت. در این مطالعه، MFC ساخته‌شده از بلوک‌های مستطیلی اکریلیک بود . این سلول از دو محفظه تشکیل‌شده است، محفظه اول محفظه آندی حاوی محیط میکروبی و آندی است که به اختلاط مداوم نیاز است . یک تراشه مغناطیسی کوچک در داخل محفظه آند قراردادند درحالی‌که کل سلول روی پایه همزن مغناطیسی قراردادند تا از اختلاط مناسب اطمینان حاصل شود. برس کربن به دلیل مساحت سطح بالاتر در مقایسه با الکترودهای پارچه کربنی به‌عنوان الکترود استفاده می‌شود. محفظه آنیونی توسط غشای Nafion درحالی‌که یک ورق لاستیکی واشر در دو طرف قرار می‌گیرد برای جلوگیری از نشت شکافته می‌شود. محفظه دوم که به‌عنوان محفظه حذف فلزات سنگین شناخته می‌شود، محلول‌های کاتولیت موردنظر در آن تغذیه می‌شود. پارچه کربن در این مورد به‌عنوان یک الکترود استفاده می‌شود. سلول در شرایط بی‌هوازی کار می‌کند به همین دلیل تمام محفظه‌ها با نیتروژن پاک‌سازی شدند تا اکسیژن محلول داخل هر محفظه خارج شود و سپس سوراخ‌های بالای هر محفظه مهروموم شدند [14].

5-6- مس

مس یک ماده معدنی ضروری است که برای سلامت جسمی و روانی بسیار مهم است. اما به دلیل شیوع گسترده مس در غذای ما، لوله آب گرم، قرص کمبودهای تغذیه‌ای و قرص‌های ضدبارداری احتمال مسمومیت مس را افزایش می‌دهد. مس یک مهارکننده قوی آنزیم‌ها است. گردش و استفاده مناسب از مس در بدن نیاز به عملکرد خوب کبد، کیسه صفرا و غدد فوق کلیوی دارد. اگر هر یک از آن اندام‌ها آسیب ببینند، بدن نمی‌تواند به‌درستی مس را دفع و از آن استفاده کند. با افزایش اقتباس مس در مغز، مفاصل و ریه‌ها تجمع می‌یابد و بر ساختار و عملکرد بافت‌ها تأثیر منفی می‌گذارد. مس یک اکسیدان قوی است که باعث التهاب و آسیب رادیکال‌های آزاد به بافت‌ها می‌شود [30].

[25] Chansoo Choi
[26] Sameer Al-Asheh

در بررسی که مین هانگ دو[27] که در سال 2022 انجام داد، با استفاده از محفظه دوگانه MFC-B که از پلکسی گلاس و به شکل مستطیل با حجم کاری محفظه آند و کاتد به ترتیب 300 و 400 میلی‌لیتر ساختند . و از Nafion 117 Dupont، (5 سانتی‌متر x 5 سانتی‌متر) برای جدا کردن محفظه‌های آند و کاتد استفاده شد. نمد کربن (قطر 3 سانتی‌متر، ضخامت 6 میلی‌متر) در محفظه آند قرار داده شد، درحالی‌که یک برس فیبر کربنی که 3 سانتی‌متر طول و 4 سانتی‌متر قطر داشت به‌عنوان الکترود کاتد عمل می‌کرد. سیم تیتانیوم نیز برای ترکیب دو الکترود از طریق مقاومت خارجی انتخاب کردند. 100 میلی‌لیتر لجن بی‌هوازی و 200 میلی‌لیتر فاضلاب در محفظه آندی قراردادند. پیل سوختی میکروبی با مقاومت خارجی 1000 اهم در حالت پیوسته تغذیه می‌شد. محفظه آند با شستشوی توسط نیتروژن به مدت 30 دقیقه در حالت بی‌هوازی نگه‌داشته شد تا اکسیژن حذف شود. محفظه کاتد در حالت هوازی با فریسیانید پتاسیم به‌عنوان محلول کاتولیت باقی ماند. در این سیستم کاهش خطی در ولتاژ سلول و غلظت مس برابر با R^2 =0/989 مشاهده شد[11].

صفوت[28] و همکارانش در سال 2023 از پیل‌های سوختی میکروبی به‌عنوان حسگرهای زیستی برای تشخیص سمت مس در فاضلاب موردبررسی قراردادند. در این آزمایش دو سیستم معمولی از MFCهای دو محفظه برای راه‌اندازی آزمایشی استفاده شد. محفظه آند با فاضلاب مصنوعی و محفظه کاتد در یک سیستم با فریسیانید[29] (MFC-F) و در سیستم دیگر آب‌لوله‌کشی هوادهی شده (MFC-T) پر شد. محفظه‌ها از مکعب‌های اکریلیک برای ساخت سلول‌ها برای کاهش احتمال مشکلات گرفتگی استفاده شد . طول محفظه‌های آند و کاتد به ترتیب 4 سانتی‌متر و 3 سانتی‌متر و عرض محفظه مستطیل شکل 6 سانتی‌متر و ارتفاع اتاقک‌ها 7 سانتی‌متر بود. سوراخ‌های ضروری برای پرآب‌های اندازه‌گیری، ورودی و خروجی محلول‌ها و پخش‌کننده هوا ساخته شد. دو محفظه با یک غشای تبادل پروتون از هم جدا شدند. غشاها را با غوطه‌ور کردن آن‌ها در محلول 5% NaCl به مدت 12 ساعت قبل از استفاده از آن‌ها طبق توصیه سازنده، هیدراته و منبسط کردند. مواد الکترود آند یکپارچه کربنی ساده 6/5 x 6/5 سانتی‌متر و ماده الکترود کاتد از پارچه کربنی 6/5 x 6/5 سانتی‌متر ساختند که با 0/5 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع پلاتین 20 درصد به‌عنوان یک کاتالیزور پوشانده شده بود. با استفاده از این دستگاه و شرایط به کار گرفته‌شده نسبت بازداری مس برای MFC-F 13/3 درصد و برای MFC-T 4/7 درصد بود [18].

در سال 2017 ییننگ وو[30] و همکاران حذف مس را در راکتورهای MFC تک محفظه بدون غشاء توسط یک Perspex مستطیلی با طول 4 سانتی‌متر و قطر 3 سانتی‌متر که هر یک از راکتورهای MFC (28 میلی‌لیتر) شامل برس کربن (قطر 2 سانتی‌متر x طول 2 سانتی‌متر) به‌عنوان آند و پارچه کربنی حاوی کاتالیزور 0/5 میلی‌گرم بر سانتی‌متر پلاتین (مساحت سطح 7 سانتی‌متر مربع) به‌عنوان کاتد با مقاومت خارجی که برابر 1000 اهم بود، موردبررسی قراردادند. مواد الکترود ابتدا در HCl 1مولار و سپس در NaOH 1 مولار شسته شدند تا فلزات از سطح قبل از نصب حذف شوند.MFCها با استفاده از لجن دانه‌ای به‌دست‌آمده از بستر لجن بی‌هوازی با جریان بالا تلقیح

[27] Minh Hang Do
[28] Safwat
[29] Ferricyanide
[30] Yining Wu

شدند. پیل سوختی میکروبی تک محفظه مورداستفاده در این آزمایش مس را در غلظت اولیه 12/5 میلی‌گرم در لیتر، باراندمان 98/3 درصد حذف کرد [19].

6-6-آرسنیک

آرسنیک یک عنصر طبیعی است که در همه‌جا به‌صورت آلی و معدنی در محیط وجود دارد. آلودگی آرسنیک یک موضوع نگران‌کننده در سراسر جهان است. آرسنیک یک آلاینده زیست‌محیطی است و آلودگی آن در آب آشامیدنی به‌عنوان یک تهدید جدی برای سلامت محیط‌زیست در سراسر جهان محسوب می‌شود. قرار گرفتن در معرض مزمن با آرسنیک علت ناراحتی شدید سلامتی است زیرا باعث افزایش خطر اختلالات مختلف مانند ناهنجاری‌های قلبی عروقی، دیابت شیرین، سمیت عصبی و سمیت کلیوی می‌شود. علاوه بر این، مطالعات کمی القای سرطان‌زایی به‌ویژه سرطان پوست، مثانه و ریه را پس از قرار گرفتن در معرض مزمن با آرسنیک نشان دادند [24].

در بررسی که مین هانگ دو که در سال 2022 انجام داد، علاوه بر فلز مس به حذف فلز آرسنیک نیز پرداختند که در این سیستم کاهش خطی در ولتاژ سلول و غلظت آرسنیک برابر با R^2= 0/982 مشاهده شد [11].

6-7-سرب

سرب یکی از قدیمی‌ترین سموم شناخته‌شده و گسترده‌ترین سموم شغلی و محیطی است که موردمطالعه قرارگرفته است. شواهدی از مسمومیت با سرب را می‌توان یافت که قدمت آن به دوران روم بازمی‌گردد. جمعیت عمومی به دلیل لعاب ضعیف ظروف سرامیکی، استفاده از لحیم سرب در صنایع کنسروسازی مواد غذایی، سطوح بالای سرب در آب آشامیدنی، استفاده از ترکیبات سرب در رنگ و لوازم‌آرایشی و رسوب روی محصولات و گردوغبار می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی در معرض قرار گیرند. در سطوح بسیار بالای سرب خون، سرب یک سقط جنین قوی است. در سطوح پایین‌تر، با سقط جنین و وزن کم هنگام تولد نوزادان همراه بوده است [26].

همانطور که در قسمت فلز کادمیوم توضیح داده‌شد، عاصم علی یعقوب و همکارانش هر دو الکترود آند برای حذف فلز سرب نیز مورداستفاده قراردادند و به‌طورکلی الکترود GO-PANI –Ag با حذف 78/10 درصد سرب حذف بالاتری نسبت به GO داشت [20].

علاوه بر پژوهشی که عاصم علی یعقوب و همکاران درمورد حذف فلز کادمیوم و نیکل انجام‌دادند، فلز سرب را نیز در همان شرایط موردبررسی قرارداده که به میزان حذف 75 درصد رسیدند [1].

6-8- جیوه

جیوه (Hg) یک آلاینده است که یک تهدید جهانی است و در سال 2017 توسط سازمان جهانی بهداشت به‌عنوان یکی از ده ماده شیمیایی نگران‌کننده فهرست شده است. هنگامی‌که جیوه از سنگ معدن، سوخت‌های فسیلی و ذخایر معدنی در جو آزاد می‌شود، می‌تواند بسیار متحرک باشد و در خاک‌های سطحی، بدنه‌های آبی و رسوبات کف رسوب کند [27]. کارخانه‌های متعددی که به‌طور مستقیم پساب‌های تصفیه نشده را پمپاژ می‌کنند، آب‌های زیرزمینی را آلوده می‌کنند. آب آلوده باران اسیدی تولید می‌کند که درنهایت همه آب‌ها را آلوده می‌کند. مسیرهای متعدد جیوه از طریق هوا، غذا، آب، داروها، لوازم‌آرایشی و غیره، دسترسی آسان آن به انسان را به‌حساب می‌آورند، عواملی مانند بزرگنمایی زیستی جیوه در طول زنجیره غذایی این مشکل را پیچیده می‌کند. جمعیت ماهی‌خوار در معرض خطر

بیشتری هستند. جیوه با دوز پایین باعث اختلال بر سیستم عصبی کودکان و بزرگسالان، اختلال بر سیستم کلیه، ایجاد مشکل در تولیدمثل، تاثیر بر سیستم ایمنی ، سیستم قلبی عروقی و فعالیت حرکتی می‌شود [28].
همچنین عاصم علی یعقوب و همکاران در شرایط ذکر شده برای حذف فلز کادمیوم؛ فلز جیوه را به میزان 60 درصد حذف کردند [1].

9-6-کروم

کروم (Cr) یک فلز سنگین سمی است که در محیط در حالت‌های اکسیداسیون مختلف از 2- تا 6 یافت می‌شود. اما پایدارترین شکل‌ها کروم سه‌ظرفیتی و شش ظرفیتی است. کروم یکی از ضایعات صنعتی عمده تولیدشده از بسیاری از صنایع مانند نساجی، دباغی، آبکاری، متالورژی است که باعث مشکلات سلامتی در انسان و حیوانات می‌شود و همچنین بر زندگی دریایی تأثیر می‌گذارد. خطرات اولیه بهداشتی ناشی از کروم عبارت‌اند از آسم برونش، زخم و سرطان ریه و بینی، آلرژی‌های پوستی، مشکلات تولیدمثلی و رشدی و این کروم ماهیت سرطان‌زا دارد. در صورت مصرف بیش‌ازحد ممکن است باعث مرگ شود [29].
در بررسی که منگ لی[31] و همکارانش در سال 2018 درمورد فناوری پیل سوختی میکروبی برای تصفیه فاضلاب حاوی کروم (VI) انجام دادند ، در این کار از سلول‌های سوختی میکروبی دو محفظه ساخته‌شده از پلکسی گلاس استفاده شد و هر محفظه دارای حجم مؤثر 340 میلی‌لیتر بود (طول= 7 سانتی‌متر، عرض= 7 سانتی‌متر، ارتفاع= 7 سانتی‌متر). محفظه آند و محفظه کاتد توسط غشای تبادل پروتون جدا شدند و PEM در H_2O_2 در (30 درصدV/V)، آب یونیزه شده، و اسیدسولفوریک (0/5 مولار) جوشانده شده و سپس در آب یونیزه، هر یک به مدت 1 ساعت نگهداری شدند . نمد کربن (مساحت مؤثر = 16 سانتی‌متر مربع) به‌عنوان الکترود آند MFC استفاده شد. پارچه کربن، برس کربن، نمد کربن (مساحت مؤثر = 16 سانتی‌متر مربع) به‌عنوان الکترود کاتد MFC استفاده شد. قبل از استفاده، این مواد کربنی با استون شسته شده و سپس در کوره muffle در دمای 450 درجه سانتی‌گراد حدود 30 دقیقه گرم می‌شود. فاصله بین دو الکترود حدود 3 سانتی‌متر بود و توسط سیم‌های تیتانیوم با مقاومت خارجی 1000 اهم به هم متصل شدند. با استفاده از این آزمایش به میزان حذف 100 ، 33/45 و 12/72 درصد برای کروم (VI) به ترتیب با استفاده از پارچه کربن، برس کربن و نمد کربن را به‌عنوان کاتد دست یافتند[21].
در پژوهش انجام شده صفوت و همکاران در شرایط آزمایش مشابه فلز مس، به نسبت بازداری کروم برای MFC-F 41/8 درصد و برای MFC-T 10درصد دست یافتند [18].
فلز کروم نیز توسط عاصم علی یعقوب و همکاران در سال 2021، با همان شرایط آزمایش حذف کادمیوم، به میزان 75 درصد حذف شد [1].

۶- نتایج و بحث

باتوجه به مقالاتی که بررسی شد حذف فلزات سنگین توسط پیل سوختی میکروبی امکانپذیر است و می‌توان از این فناوری به عنوان راهکاری موثر برای حذف و بازیابی فلزات استفاده کرد. فلزاتی که در اینجا مورد بررسی قرارگرفتند با درصدهای قابل توجهی حذف شدند، اما در بین آن‌ها فلز طلا و روی در آزمایش‌هایی که انجام گرفت با درصد

[31] Meng Li

حذف بالای 96 درصد، میزان حذف بالاتری نسبت به دیگر فلزات داشتند [22، 17، 15، 14]. شرایط مختلفی در میزان حذف فلزات موثر بودند. از جمله این شرایط می‌توان به pH، دما، غلظت اولیه فلزات، نوع آند و کاتد، مقاومت خارجی و شرایط دیگری که به‌طور خاص در برخی از مقالات استفاده شدند که با بدست آوردن مقادیر بهینه برای هرکدام از این پارامترها به بیشترین میزان حذف ممکن دست یافتند.

۷- افق‌های آینده

باتوجه به نتایج گسترده در زمینه کاربرد پیل سوختی میکروبی در تصفیه انواع مختلف فاضلاب و حذف فلزات سنگین، چشم‌انداز این فناوری بسیار مثبت است. به‌دلیل سازگاری با محیط زیست و توانایی تولید برق از موادآلی می‌توان از این فناوری در مناطق مختلف که دسترسی به برق ندارند استفاده کرد. این فناوری همواره درحال رشد است و محققان بسیاری درحال بررسی راه‌های جدیدی برای بهبود عملکرد MFCها، حذف بیشتر فلزات سنگین و بازیافت آنها، افزایش مقیاس برای کاربردهای صنعتی و همچنین کاهش هزینه‌ها هستند. بنابراین می‌توان از فناوری پیل سوختی میکروبی به عنوان یک فناوری امیدوارکننده یاد کرد.

۸- نتیجه‌گیری

از آنجایی‌که آلودگی فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن ازلحاظ زیستی و اثرات سمی، در حال تبدیل‌شدن به یک مسئله جهانی است، پیل‌های سوختی میکروبی روشی درحال‌توسعه و قابل‌توجه هستند که امروزه به‌عنوان راهکاری مؤثر برای حذف فلزات سنگین مورداستفاده قرار می‌گیرند و انرژی شیمیایی را با استفاده از باکتری‌هایی که به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. پیل‌های سوختی میکروبی به دلیل پایداری آن‌ها به‌عنوان یک فناوری قابل‌دوام برای تولید انرژی و حذف آلاینده‌های سمی از منابع فاضلاب شناخته‌شده‌اند. در این مقاله انواع مختلف فاضلاب‌های صنعتی و مصنوعی در پیل سوختی میکروبی بررسی شدند که به میزان حذف 70 تا 80 درصدی برای کادمیوم و سرب، حذف 40 تا 100 درصدی برای کروم، 96 تا 97 درصد روی، جیوه تا میزان 60 درصد، نیکل 80 تا 90 درصد ، حذف 13 تا 98 درصد برای مس و همچنین 98 تا 99 درصد برای طلا در شرایط بهینه آزمایش دست یافتند. شرایط عملیاتی از جمله pH ، دما، مقاومت خارجی، و غلظت اولیه فلزات نقش مهمی در میزان حذف و توان خروجی پیل سوختی میکروبی دارند.

۹- منابع

[1] A. A. Yaqoob, M. N. M. Ibrahim, A. S. Yaakop, A. Ahmad, "Application of microbial fuel cells energized by oil palm trunk sap (OPTS) to remove the toxic metal from synthetic wastewater with generation of electricity", *Appl. Nanosci.*, vol. 11, no. 6, pp. 1949–1961, 2021.

[2] D. Haldar, M. S. Manna, D. Sen, T. K. Bhowmick, "Chapter 11 Microbial Fuel Cell for the Treatment of Wastewater", vol. 46, pp. 289–306, 2019.

[3] S. Berchmans, "Microbial fuel cell as alternate power tool: Potential and challenges", *Microb. Fuel Cell A Bioelectrochemical Syst. that Convert. Waste to Watts*, pp. 403–419, 2017.

[4] Z. Yavari, H. Izanloo, K. Naddafi, H. R. Tashauoei, M. Khazaei, "Performance of microbial fuel cell for wastewater treatment and electricity generation", *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 2, no. 2, pp. 131–135, 2013.

[5] Y. Zeng, Y. F. Choo, B. H. Kim, P. Wu, "Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell", *J. Power Sources*, vol. 195, no. 1, pp. 79–89, 2010.

[6] فاطمه نوربخش، فهامه ذوالفقارزاده، محمد پازوکی، محمد جعفر رضایانی. "جایگاه فناوری پیل سوختی میکروبی در تصفیه انواع فاضلاب‌های صنعتی، خانگی و شهری"، *مهندسی شیمی ایران*، صص. 54-73، مهر و آبان 1397.
[7] B. Kanani, "Microbial Fuel Cell, New Technologies in the Field of Green Energy and Wastewater Treatment", *Anat. Physiol. Biochem. Int. J.*, vol. 2, no. 5, pp. 87–90, 2017.
[8] L. Ezziat, A. Elabed, S. Ibnsouda, S. El Abed, "Challenges of microbial fuel cell architecture on heavy metal recovery and removal from wastewater", *Front. Energy Res.*, vol. 7, no. January, pp. 1–13, 2019.
[9] T. Touqeer, W. Miran, M. W. Mumtaz and H. Mukhtar, "Design and configuration of microbial fuel cells." In Microbial Fuel Cells for Environmental Remediation, pp. 25-39. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
[10] B. Antony Fantin, S. Ramesh, J. S. Sudarsan, P. Vanamoorthy Kumaran, "Microbial fuel cell and its efficiency in treating wastewater - A novel technique for wastewater treatment", Int. J. Eng. Technol., vol. 7, no. 3, pp. 69–72, 2018.
[11] M. H. Do *et al.*, "A dual chamber microbial fuel cell based biosensor for monitoring copper and arsenic in municipal wastewater", *Sci. Total Environ.*, vol. 811, pp. 152261, 2022.
[12] M. Zaynab *et al.*, "Health and environmental effects of heavy metals", *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 34, no. 1, pp. 101653, 2022.
[13] Sukrampal, R. Kumar, S. A. Patil, "Removal of heavy metals using bioelectrochemical systems", INC, 2020.
[14] S. Al-Asheh, M. Bagheri, A. Aidan, "Removal of heavy metals from industrial wastewater using microbial fuel cell", *Eng. Life Sci.*, vol. 22, no. 8, pp. 535–549, 2022.
[15] S. S. Lim *et al.*, "Zinc removal and recovery from industrial wastewater with a microbial fuel cell: Experimental investigation and theoretical prediction", *Sci. Total Environ.*, vol. 776, pp. 145934, 2021.
[16] A. Singh, A. Kaushik, "Removal of Cd and Ni with enhanced energy generation using biocathode microbial fuel cell: Insights from molecular characterization of biofilm communities", J. Clean. Prod., vol. 315, no. May, pp. 127940, 2021.
[17] C. Abourached, T. Catal, H. Liu, "Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production", *Water Res.*, vol. 51, pp. 228–233, 2014.
[18] S. M. Safwat, A. Khaled, A. Elawwad, M. E. Matta, "Dual-chamber microbial fuel cells as biosensors for the toxicity detection of benzene, phenol, chromium, and copper in wastewater: Applicability investigation, effect of various catholyte solutions, and life cycle assessment", *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 170, no. December 2022, pp. 1121–1136, 2023.
[19] Y. Wu *et al.*, "Copper removal and microbial community analysis in single-chamber microbial fuel cell", *Bioresour. Technol.*, vol. 253, pp. 372–377, 2018.
[20] A. A. Yaqoob *et al.*, "Utilizing Biomass-Based Graphene Oxide–Polyaniline–Ag Electrodes in Microbial Fuel Cells to Boost Energy Generation and Heavy Metal Removal", *Polymers (Basel).*, vol. 14, no. 4, 2022.
[21] M. Li *et al.*, "Simultaneous Cr(VI) reduction and bioelectricity generation in a dual chamber microbial fuel cell", *Chem. Eng. J.*, vol. 334, no. October 2017, pp. 1621–1629, 2018.
[22] C. Choi, N. Hu, "The modeling of gold recovery from tetrachloroaurate wastewater using a microbial fuel cell", *Bioresour. Technol.*, vol. 133, pp. 589–598, 2013.
[23] G. Genchi, M. S. Sinicropi, G. Lauria, A. Carocci, A. Catalano, "The effects of cadmium toxicity", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 11, pp. 1–24, 2020.
[24] A. P. Singh, R. K. Goel, T. Kaur, "Mechanisms pertaining to arsenic toxicity", Toxicol. Int., vol. 18, no. 2, pp. 87–93, 2011.

[25] K. K. Das et al., "Primary concept of nickel toxicity – an overview, pp. 1–12, 2018.
[26] Gidlo. D. A., *Lead toxicity*, Occup. Med. (Chic. Ill)., vol. 54, no. 2, pp. 76–81, 2004.
[27] D. Raj, S. K. Maiti, "Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review", *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, no. 9, 2019.
[28] F. Zahir, S. J. Rizwi, S. K. Haq, R. H. Khan, "Low dose mercury toxicity and human health", *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 20, no. 2, pp. 351–360, 2005.
[29] B. J. Kirti Shekhawat, Sreemoyee Chatterjee, "Chromium toxicity and its health hazards", *Int. J. Adv. Res.*, vol. 3, no. July 2015, pp. 167, 2015.
[30] B. Ashish, K. Neeti, K. Himanshu, "Copper Toxicity: A Comprehensive Study", Res. J. Recent Sci., vol. 2, pp. 58–67, 2013.
[31] World Health Organization (WHO). (1990). Gold. Environmental Health Criteria,107.Retrieved from https://www.who.int/ipcs/publications/ehc/en/ehc_107.pdf
[32] L. M. Plum, L. Rink, H. Hajo, "The essential toxin: Impact of zinc on human health", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 7, no. 4, pp. 1342–1365, 2010.
[33]https://wsm.doe.ir/portal/home/?114886/%D9%81%D8%A7%D8%B6%D9%84%D8%A7%D8%A8.