Journal of Research in Environmental Health

Volume 6, Issue 1, Spring 2021

Determining the Efficiency of Plastic, Rubber, and Electronic Wastes for Municipal Wastewater Treatment

ABSTRACT

Background and Aim: Increasing wastewater production and increasing waste production are major threats to human health and the environment; therefore, wastewater treatment and waste reuse should be done. This study aimed to determine the efficiency of plastic, rubber, and electronic wastes for municipal wastewater treatment by the microbial electrochemical method.

Materials and Methods: This experimental-practical research was done on a pilot scale. Impacts of time and initial characteristics (temperature, pH, and EC) on the treatment efficiency were investigated. During the research, sampling (twice a week) was done from the input and output of the reactor, and BOD_5, COD, TSS, pH, and EC parameters were measured according to the standard methods. The results were analyzed by Excel 2010 software.

Results: Mean BOD_5, COD, and TSS in raw sewage were 227, 302, and 274 mg/l. BOD_5 removal efficiencies by electronic, rubber, plastic and control wastes were 72.46, 69.74, 60.82, and 62.17%, respectively. Electronic wastes with 55.52% and 79.96% had the highest removal efficiencies of TSS and COD, respectively.

Conclusion: Bed material affects BOD_5 removal efficiency. Substrates with electronic wastes and crumb rubber had a higher efficiency in removing BOD_5, TSS, and COD, which shows the superior characteristics of wastewater treatment by these wastes.

Keywords: Municipal Wastewater Treatment; Chemical Electro Microbial Process; Electrobacter; Waste

Abolfazl Rahmani sani
Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran.

Allieh Tabasi
* MSc., Studend, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Iran (corresponding Author:ST441369@gmail.com)

Mohammad Miri
Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran

Received: 2021/03/15
Accepted: 2021/05/14

Document Type: Research article

▶ **Citation:** Rahmani sani A, Tabasi A, Miri M. Determining the Efficiency of Plastic, Rubber, and Electronic Wastes for Municipal Wastewater Treatment. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2021; 7(1): 42-52.

تعیین کارایی زائدات پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی در تصفیه فاضلاب شهری

چکیده

زمینه و هدف: افزایش تولید فاضلاب و همچنین تولید روزافزون زائدات، تهدید بزرگی برای سلامت بشر و محیط‌زیست محسوب می‌شود؛ بنابراین باید نسبت به تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از زائدات اقدام نمود. مطالعه حاضر با هدف تعیین کارایی زائدات پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی در تصفیه فاضلاب شهری به روش الکتروشیمیایی - میکروبی انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه تجربی- کاربردی که در مقیاس پایلوت انجام شد، تأثیر زمان‌ماند هیدرولیکی و خصوصیات اولیه (دما، pH و هدایت الکتریکی) بر بازده فرآیند تصفیه، در چهار بستر دارای زائدات مختلف بررسی شد. نمونه‌برداری هفته‌ای ۲ مرتبه از ورودی و خروجی پایلوت‌ها انجام شد و پارامترهای اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن خواهی شیمیایی، کل مواد جامد معلق ، pH و EC بر اساس استاندارد متد اندازه‌گیری و نتایج توسط نرم‌افزار اکسل تجزیه و تحلیل شد.

یافته‌ها: میانگین کل COD، BOD_5 و TSS فاضلاب خام ۲۲۷، ۳۰۲ و ۲۷۴ میلی‌گرم بر لیتر بود و راندمان حذف BOD_5 در بستر زائدات الکترونیکی، لاستیک، پلاستیک و شاهد به‌ترتیب ۷۲/۴۶٪، ۶۹/۷۴٪، ۶۰/۸۲٪ و ۶۲/۱۷٪ به‌دست آمد. زائدات الکترونیکی به‌ترتیب با ۵۵/۵۲٪ و ۷۹/۹۶٪، بیشترین راندمان حذف TSS و COD را داشت.

نتیجه‌گیری: جنس بستر در راندمان حذف BOD_5 تأثیر داشته است. بستر دارای زائدات الکترونیکی و لاستیک در حذف COD، TSS، BOD_5 راندمان بالاتری داشت که نشان‌دهنده خصوصیات برتر تصفیه فاضلاب توسط این زائدات است.

کلید واژه‌ها: الکترویاکتر، تصفیه فاضلاب شهری، زائدات، فرآیند الکترومیکروبی شیمیایی

ابوالفضل رحمانی ثانی
استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران.

عالیه طبسی
* دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران. (نویسنده مسئول):
ST441369@gmail.com

محمد میری
دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴
نوع مقاله: مقاله اصیل پژوهشی

◀ **استناد:** رحمانی ثانی الف، طبسی ع، میری م. تعیین کارایی زائدات پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی در تصفیه فاضلاب شهری. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. بهار ۱۴۰۰؛۷(۱): ۴۲-۵۲.

مقدمه

افزایش جمعیت سبب افزایش تولید فاضلاب می‌گردد که پیامدهای منفی بر سلامت بشر و محیط دارد. با توجه به این‌که حفظ محیط‌زیست و منابع آبی برای انسان حائز اهمیت است، بنابراین باید فاضلاب‌ها قبل از دفع به محیط تصفیه گردند (۱). تصفیه فاضلاب از مسائل مهم در زمینه سلامت جامعه و پیشگیری از گسترش بیماری‌ها در موجودات و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی به شمار می‌رود. استفاده از سیستم‌های تصفیه طبیعی با تکنولوژی ساده و کاربردی، مانند وتلندهای مصنوعی، علاوه بر کاهش هزینه‌های اقتصادی و مصرف پایین انرژی، به اصلاح محیط‌زیست نیز کمک می‌کند (۳,۲). فرآیند الکتروشیمیایی میکروبی[1] الهام گرفته از بیوفیلتر در تالاب‌های مصنوعی است. ادغام استفاده از الکتروباکترها در مفهوم تالاب، منجر به اصطلاح متلند شده است. در بستر وتلندها از مواد بی‌اثر استفاده می‌شود، درحالی‌که بستر متلندها، از مواد رسانا پر می‌گردد (۴, ۵). حدود ۱۰۰ سال پیش مشخص شد که برخی باکتری‌ها توانایی تولید الکتریسیته را دارند و از سال ۲۰۰۶ فناوری پیل سوختی میکروبی در جهت تصفیه فاضلاب همراه با تولید الکتریسیته به‌کار گرفته شد (۶). الکتروباکترها، باکتری‌هایی بی‌هوازی و بی‌هوازی اختیاری می‌باشند که در صورت رسانا بودن بستر، توانایی تولید الکتریسیته را دارند و وظیفه اصلی آن‌ها، تصفیه فاضلاب بر پایه اکسیداسیون مواد معدنی و مواد آلی همراه با جریان الکتریکی- میکروبی است. این فرآیند بر اساس تبادل الکترون‌ها بین باکتری‌های اهداءکننده و گیرنده، از طریق مواد رسانا طراحی شده است (۷-۹). در سال‌های اخیر به ترکیب تالاب‌های مصنوعی و فرآیند الکتروشیمیایی میکروبی، به‌دلیل سازگاری با محیط، راندمان بالا، راهبری آسان، عدم استفاده از سیستم‌های هوادهی و مواد شیمیایی و همچنین صرفه‌جویی در دفع لجن، توجه بیشتری شده است (۴, ۱۰). در مطالعه ونگ و همکاران که بر روی ادغام تالاب با سلول‌های سوختی میکروبی انجام شد، نتایج نشان داد که راندمان حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)[2] و نیتروژن نسبت به سیستم ادغام نشده وتلند بیشتر شد (۱۱). نتایج مطالعه یاداو و همکاران، در رابطه با مقایسه دو بستر وتلند معمولی و متلند نشان داد که متلندها در حذف مواد آلی بهتر عمل می‌کنند (۱۲). همچنین در مطالعه آگوئر سیرا و همکاران به‌دلیل ادغام تالاب‌های ساخته شده با فرآیند الکتروشیمیایی، سطح مورد نیاز برای تالاب‌ها کاهش یافت و نتایج مبنی بر این بود که با وجود بار آلی زیاد، فرآیند الکتروشیمیایی میکروبی توانسته است به استانداردهای دستورالعمل EEC/271/91 جهت استفاده مجدد از آب، دست یابد (۱۳). مطالعه تجدور نشان داد که این سیستم در مقایسه با سیستم‌های بی‌هوازی دیگر، می‌تواند اکسیژن مورد نیاز شیمیایی واکسیژن‌موردنیازبیوشیمیایی(BOD)[3] بیشتری‌راحذف‌کند.همچنین این سیستم می‌تواند ۹۳٪ از کل مواد جامد معلق (TSS)[4] و بیش از ۸۸٪ COD از فاضلاب آبجوسازی را حذف نماید (۱۴). از سویی دیگر با رشد جمعیت و افزایش تولید زائدات، نگرانی در مورد محیط‌زیست باعث شده است که کشورها بیشتر به بحث استفاده مجدد از زائدات در جهت دستیابی به افزایش بهره‌وری اقتصادی و کاهش آلودگی توجه نمایند. از جمله زائدات قابل استفاده مجدد، تایرهای فرسوده می‌باشند که علاوه بر اینکه فضای زیادی از محل دفن را اشغال می‌کنند؛ نسبت به تجزیه زیستی مقاوم هستند و مکان مناسبی برای رشد ناقلین می‌باشند (۲, ۱۵). نوعی دیگر از زائدات مشکل‌آفرین، پسماندهای الکترونیکی می‌باشد که حاوی عناصر خطرناکی مانند سرب، جیوه و کروم و کادمیوم هستند و بخشی از زائدات شهری را تشکیل می‌دهند (۱۶). همچنین پلاستیک‌ها که حدود ۱۲٪ از مواد زائد جامد شهری را در برمی‌گیرد، وقتی سوزانده می‌شوند، گازهای سمی مانند دیوکسین‌ها، فوران‌ها، جیوه و ... را درون جو آزاد می‌کنند. زباله‌های دارای انواع پلاستیک در آب،

1. MET

2. Chemical Oxygen Demand
3. Biochemical Oxygen Demand
4. Total Saspended Solid

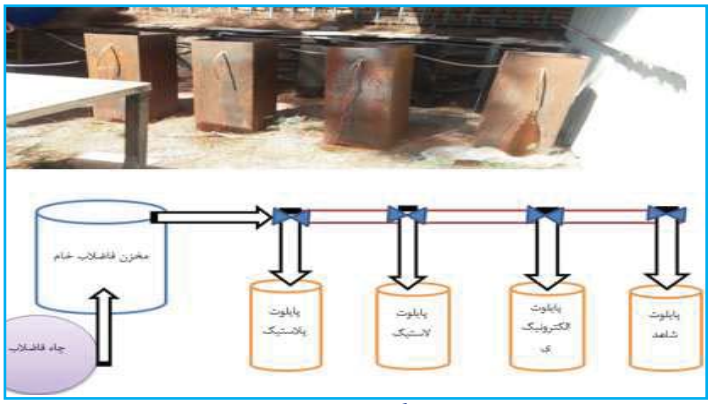
در فرآیند تجزیه، اکسیژن زیادی مصرف می‌کنند که برای آبزیان مخاطره‌آمیز است و کیفیت آب را تغییر می‌دهد (۱۷، ۱۸). رحمانی و حسین‌زاده، دریافتند که کربن فعال موجود در تایر فرسوده می‌تواند به‌عنوان جاذب در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد (۱۹). همچنین مطالعه آلفردو و همکاران، نشان داد که خرده‌های لاستیک به‌عنوان بستر وتلند، می‌تواند کل مواد جامد معلق و BOD_5 را به‌ترتیب ۶۹٪ و ۹۲٪ حذف نماید (۱۵). در مطالعه‌ای دیگر که پرادو و همکاران عملکرد مواد مختلف کربن الکتریکی (گرافیت، کک، بیوشار) و ماسه را برای تصفیه فاضلاب شهری بررسی کردند، نتایج نشان داد که استفاده از فن‌آوری‌های الکتروشیمیایی میکروبی برای تصفیه فاضلاب، نیاز به مقادیر زیادی از مواد کربن الکتریکی به عنوان پرکننده بستر، جهت ترویج انتقال الکترونی خارج سلولی و تجزیه بیولوژیکی دارد. همچنین در مطالعه آنها COD خروجی از هر چهار پایلوت کاهش چشمگیری داشت(۱۸). در مطالعات انجام شده عموماً از بسترهایی مانند گرافیت و زغال در محیط دارای الکترود، به‌صورت پیل سوختی میکروبی همراه با جریان الکتریسیته استفاده شده است، اما در مطالعه حاضر برای اولین بار از زائدات فاقد ارزش و دور ریخته شده، به‌عنوان پرکننده بستر استفاده شد.

با توجه به افزایش روزافزون زائدات پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی در کشور و آسیب‌های ذکر شده ناشی از دفن و دفع آن‌ها، استفاده مجدد بهترین و اقتصادی‌ترین فعالیت مدیریتی در جهت دفع مواد زائد می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت دفع بهداشتی فاضلاب و استفاده مطمئن از پساب تصفیه شده، این تحقیق با هدف تصفیه فاضلاب شهری همراه با استفاده مجدد از این زائدات انجام گرفت و به بررسی عملکرد زائدات گرانول شده، به‌عنوان پرکننده بستر متلند؛ در جهت کاهش TSS، BOD_5 و COD از فاضلاب شهری پرداخته شد و تأثیر جنس بستر در راندمان حذف مواد آلی توسط فرآیند الکتروشیمیایی میکروبی مورد بررسی قرار گرفت.

روش کار

مشخصات فاضلاب ورودی: این مطالعه با استفاده از پایلوت، بر روی فاضلاب خوابگاه مجتمع علوم پزشکی سبزوار، انجام گرفت. میانگین کل COD، BOD_5 و TSS فاضلاب خام، به‌ترتیب ۲۲۷، ۳۰۲ و ۲۷۴ میلی‌گرم بر لیتر بود که از نظر BOD_5 و COD در محدوده فاضلاب ضعیف و از نظر TSS در محدوده فاضلاب متوسط قرار داشت (۲۰).

توصیف پایلوت‌ها: این تحقیق در ۴ پایلوت آهنی عایق‌بندی شده، دارای بسترهای متفاوتی از زائدات، به طول و عرض ۲۵ سانتی‌متر در ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر صورت گرفت. جهت ساخت بدنه اصلی پایلوت‌ها، از ورقه آهن با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. مواد درون بستر پایلوت‌ها، از پایین به بالا شامل ۲۰ سانتی‌متر ماسه نخودی و سپس ۵۰ سانتی‌متر زائدات خرد شده و بر روی آن ۲۰ سانتی‌متر ماسه‌بادی به‌منظور ایجاد شرایط بی‌هوازی قرار گرفت و ۱۰ سانتی‌متر در بالای پایلوت فضای آزاد، در نظر گرفته شد (شکل ۱).



شکل ۱. نحوه قرارگیری پایلوت‌های مورد مطالعه

زائدات گرانول شده و پرکننده بستر؛ به‌ترتیب از پایلوت اول تا سوم شامل: پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی بود. همچنین در پایلوت شاهد از ماسه نخودی به‌جای زائدات استفاده شد. زائدات پلاستیک از سرنگ و سرم‌های بیمارستانی، زائدات الکترونیکی از برد الکترونیکی موجود در وسایل صوتی - تصویری و کامپیوترهای مستعمل و همچنین زائدات لاستیک از تایرهای فرسوده خودرو تهیه شد. این زائدات توسط دستگاه، به ابعاد ۵ میلی‌متر گرانول شده و مورد استفاده قرار گرفتند که در هر پایلوت، زائدات آلی با پایه کربن، نقش کاتد و بستر زیرین آن (ماسه نخودی) نقش آند را بر عهده داشت.

مشخصات جریان: فاضلاب خام به‌وسیله پمپ کفکش از چاه خوابگاه مجتمع علوم پزشکی به مخزنی ۱۰۰۰ لیتری انتقال داده شد. سیستم به‌صورت جریان پیوسته در مدت زمان ۲ ماه با زمان ماند هیدرولیکی (HRT)[1] ۴ روز (ماه اول) و ۲ روز (ماه دوم) بهره‌برداری شد (۱۸). زمان‌ماند هیدرولیکی مورد نظر با تنظیم دبی فراهم گردید. این سیستم با الگوی جریان افقی رو به بالا بهره‌برداری گردید و فاضلاب خام از طریق شلنگ در نزدیک به کف وارد راکتورها شده و در نزدیک به سطح، از پایلوت خارج شد. فرآیند به‌صورت رشد چسبیده مستغرق و بی‌هوازی بود.

نمونه‌برداری و آنالیز: در مدت زمان انجام تحقیق (۲ ماه)، در هر هفته تعداد ۲ نمونه به حجم ۱ لیتر از فاضلاب خروجی از ۴ پایلوت و همچنین یک نمونه از مخزن ورودی برداشت شد و پارامترهای COD، BOD_5 و TSS مورد سنجش قرار گرفت. همچنین فاضلاب ورودی و خروجی به پایلوت‌ها به‌دلیل احتمال افزایش فلزات سنگین ناشی از مواد تشکیل‌دهنده زائدات، به فاضلاب مورد تصفیه؛ از نظر وجود سرب و کادمیوم آنالیز شد و تعداد ۸ نمونه از ورودی و خروجی پایلوت‌های لاستیک و پلاستیک و زائدات الکترونیکی، جهت آزمایش سرب و کادمیوم گرفته شد که در مجموع تعداد ۲۴۸ نمونه برداشت شد. روزهای نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی انتخاب گردید. نمونه‌های فاضلاب در ظروف شیشه‌ای به آزمایشگاه تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر سبزوار انتقال داده شد. جهت سنجش پارامتر COD از ویال استفاده شد و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر DR5000 مدل HACH قرائت شد. همچنین جهت اندازه‌گیری BOD_5 از انکوباور تنظیم شده در دستگاه یخچال کمپانی WTW آلمان استفاده شد. اندازه‌گیری TSS، هدایت الکتریکی (EC)[2] و pH به‌ترتیب به روش وزن‌سنجی توسط دستگاه فور استریلیزاسیون کارخانه بهداد، دستگاه پرتابل مدل HANNA و pHمتر پرتابل کمپانی WTW و مطابق با کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب فاضلاب انجام گرفت (۶، ۲۱-۲۳).

در این مطالعه برای ارزیابی کمی شدت آلودگی، همچنین محاسبات آماری از جمله میانگین و راندمان حذف پارامترها در هر ماه و راندمان کل و تمامی روابط مربوط به راندمان و همچنین تجزیه و تحلیل داده‌های توصیفی از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. به‌منظور میزان حذف پارامترهای مورد مطالعه از رابطه ۱ استفاده گردید.

$$R\% = \frac{(C0-Ce)\times 100}{C0} \qquad (۱)$$

در این رابطه R راندمان، Co غلظت اولیه پارامتر برحسب میلی‌گرم بر لیتر و Ceغلظت خروجی پارامتر برحسب میلی‌گرم بر لیتر است.

یافته‌ها

تأثیر زمان‌ماند هیدرولیکی در راندمان حذف پارامترها: به‌منظور تعیین اثر زمان‌ماند بر فرآیند حذف، کارایی حذف پارامترها در دو زمان‌ماند ۴ و ۲ روز بررسی گردید. در ماه اول انجام مطالعه، زمان‌ماند هیدرولیکی ۴ روز و میانگین BOD_5 اولیه، میانگین COD اولیه و میانگین TSS اولیه به‌ترتیب ۲۳۲، ۳۱۳ و ۲۸۲ میلی‌گرم بر لیتر بود که راندمان حذف BOD_5 از بستر پلاستیک، لاستیک، الکترونیکی و شاهد ۶۶/۵۵، ۷۴/۷۸، ۷۷/۳۸ و ۶۷/۶۹٪ بود. همچنین راندمان حذف COD از بستر

1. Hydraulic retention time

2. Electrical conductivity

پلاستیک، لاستیک، الکترونیکی و بستر شاهد ۵۰/۳۳، ۵۵/۶۵، ۶۰/۲۱ و ۵۰/۴۶٪ شده بود. راندمان حذف TSS بعد از عبور از پایلوت‌ها به‌ترتیب از بستر پلاستیک ۸۲/۵۸٪ و بستر لاستیک ۸۰/۷۶٪ و بستر زائدات الکترونیکی ۸۴/۰۹٪ و پایلوت شاهد ۷۶/۱۸٪ به‌دست آمد.

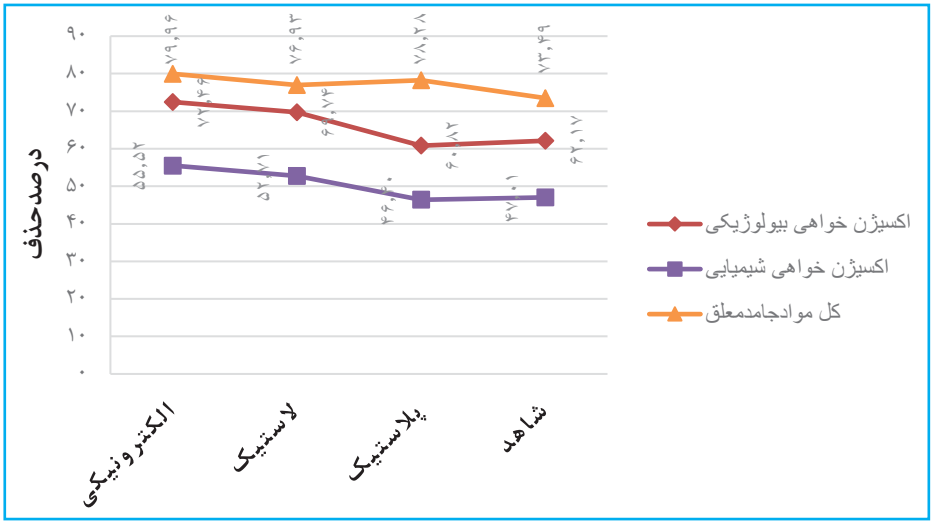
در ماه دوم با کاهش زمان‌ماند هیدرولیکی به ۲ روز، میانگین BOD_5 اولیه، میانگین COD اولیه و میانگین TSS اولیه به‌ترتیب ۲۲۳، ۲۹۲ و ۲۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، راندمان حذف BOD_5 خروجی از بستر پلاستیک ۵۴/۸۷٪، بستر لاستیک ۶۴/۵۳٪، بستر زائدات الکترونیکی ۶۷/۳۷٪ و پایلوت شاهد ۵۶/۴۶٪ به‌دست آمد. همچنین COD خروجی از بستر پلاستیک، لاستیک، الکترونیکی و بستر شاهد ۴۱/۵، ۴۹/۵۷، ۵۰/۵۱ و ۴۳/۲۶٪ حذف شده بود. راندمان حذف TSS بعد از عبور از پایلوت‌ها به‌ترتیب از بستر پلاستیک، لاستیک، الکترونیکی ۷۳/۷۵، ۷۲/۹۰، ۷۵/۶۱٪ و پایلوت شاهد ۷۰/۶۶٪ شده بود. نتایج نشان داد که حداکثر کارایی در این مطالعه در زمان‌ماند ۴ روز رخ می‌دهد و راندمان حذف پارامترها نسبت به ماه دوم با زمان ماند ۲ روز، حدود ۱/۱۴–۱/۲۱ برابر بیشتر بوده است.

تأثیر جنس مواد بستر در راندمان حذف: میزان BOD_5 به COD در فاضلاب ورودی، در ماه اول ۰/۷۴ و در ماه دوم ۰/۷۶ و در ۲ ماه ۰/۷۵ میلی‌گرم بر لیتر بود. مشخصات فاضلاب خام ورودی به بسترها در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات فاضلاب خام ورودی در دو ماه

عنوان	TSS ورودی میلی‌گرم بر لیتر			COD ورودی میلی‌گرم بر لیتر			BOD_5 ورودی میلی‌گرم بر لیتر		
	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط
فاضلاب خام	۲۹۳	۲۵۶	۲۷۴	۳۳۴	۲۹۱	۳۰۲	۲۴۷	۲۰۷	۲۲۷

در این مطالعه، در مدت زمان ۲ ماه راندمان کل حذف COD در پایلوت‌های مورد مطالعه به‌ترتیب در پایلوت دارای زائدات گرانول شده پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی ۴۶/۴٪، ۵۲/۷۱٪ و ۵۵/۵۲٪ بود. همچنین راندمان حذف پارامتر مذکور در بستر کنترل ۴۷٪ بود و بیشترین میزان حذف BOD_5 و TSS در بستر دارای زائدات الکترونیکی به‌ترتیب با ۷۲/۴۶٪ و ۷۹/۹۶٪ و کمترین میزان حذف BOD_5 در بستر زائدات پلاستیک با ۶۰/۸۲٪ رخ داده بود (نمودار ۱).



نمودار ۱. نمودار راندمان حذف میانگین پارامترها در ۲ ماه

تأثیر دما در راندمان حذف: در مطالعه حاضر پایلوت‌ها در محیط قرار داشتند و دمای محیط اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که تغییرات زیادی در محدوده دما ایجاد نشده است و دما در حدود ۲۹-۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است که می‌توان از تأثیر این عامل در عملکرد راکتورهای مطالعه چشم‌پوشی کرد. در مطالعات نشان داده شده است که کاهش دما از ۳۰ به ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر بسیار اندکی در حذف داشته است (۲۴).

جدول ۲. پارامترهای خروجی از پایلوت‌ها

نوع بستر	EC (میکروموس بر سانتی‌متر)	دما (درجه سانتی‌گراد)	pH
پلاستیک	۵۶۴۷	۲۸/۶۳	۷/۹
لاستیک	۶۲۰۱	۲۸/۵۶	۸/۸
الکترونیکی	۶۴۵۱	۲۸/۸۷	۸/۹
شاهد	۵۸۹۸	۲۸/۳۱	۸/۱
ورودی	۴۲۴۳	۲۸/۶۲	۷/۵

تغییرات هدایت الکتریکی (EC): هدایت الکتریکی در فاضلاب خام ورودی به پایلوت‌ها در محدوده ۴۰۰۰-۴۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر بود که بیشترین میزان هدایت الکتریکی در فاضلاب خروجی از بستر زائدات الکترونیکی به میزان ۶۴۵۱ میکروموس بر سانتی‌متر مشاهده شد (جدول ۲).

تغییرات pH: میزان pH در فاضلاب ورودی ۷/۵ بود که بعد از عبور فاضلاب از بسترها، افزایش داشته است. بیشترین میزان افزایش این پارامتر در فاضلاب خروجی از بستر زائدات الکترونیکی با pH=۸/۹ مشاهده شد (جدول ۲).

تغییرات فلزات سنگین: با توجه به مطالعات پیشین و همچنین به‌دلیل ترکیبات تشکیل‌دهنده زائدات الکترونیکی و لاستیک و پلاستیک و همچنین احتمال افزایش فلزات سنگین در فاضلاب خروجی از پایلوت‌ها، آزمایش سرب و کادمیوم از فاضلاب خام و فاضلاب خروجی از پایلوت‌ها انجام شد و نتیجه آزمایش‌ها، عدم وجود سرب و کادمیوم در فاضلاب خام و فاضلاب خروجی از بسترهای مورد مطالعه بود (۱۵).

بحث

در این تحقیق حذف COD، BOD_5 و TSS از فاضلاب شهری توسط زائدات مختلف و با استفاده از تکنولوژی الکتروشیمیایی میکروبی و تأثیر دو پارامتر مؤثر و مهم زمان‌ماند هیدرولیکی و جنس بستر بر تصفیه بیولوژیکی بررسی شد.

در پژوهش حاضر، فاضلاب خام با میزان BOD_5 ۲۰۷-۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۴ پایلوت مورد مطالعه وارد شد. بر اساس نتایج، میزان COD، BOD_5 و TSS بعد از عبور از تمامی بسترها، کاهش داشت و بیشترین راندمان حذف BOD_5 و COD در مدت زمان ۲ ماه، ۷۲/۴۶٪ و ۵۵/۵۲٪ بود که با نتایج مطالعه یاداو و همکاران که بر روی فاضلاب مصنوعی انجام شد، همخوانی داشت (۲۵). همچنین در سال ۲۰۱۶ از بستر پیل سوختی میکروبی ترکیبی با وتلند در مقیاس پایلوت، برای تصفیه فاضلاب شهری استفاده شد و نتایج میزان حذف COD، مطابق با نتایج تحقیق حاضر بود (۲۶)، زیرا فناوری مذکور با استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون و احیاء می‌توانند فاضلاب را با سرعت بالا تصفیه کنند. در مطالعه کارلوس و همکاران که با هدف افزایش ظرفیت حذف مواد آلی توسط وتلندهایی مبتنی بر الکتروشیمیایی میکروبی انجام شد، نتایج حذف BOD_5 و COD بالاتر از راندمان به‌دست آمده در مطالعه حاضر بود (۲۶). علت راندمان مطالعه حاضر را می‌توان متأثر از میزان BOD_5 و COD فاضلاب خام دانست که در محدوده فاضلاب ضعیف به شمار می‌آید. نتایج مطالعه ونگ و همکاران نشان داد که درجه آلودگی فاضلاب در راندمان حذف مواد آلی تأثیر دارد و با افزایش درجه آلودگی فاضلاب از COD444 به ۱۳۳۳ میلی‌گرم بر لیتر، میزان حذف COD از ۷۰٪ به ۷۹٪ افزایش داشت که بیان‌کننده این است که استفاده از پیل سوختی میکروبی تغذیه شده با فاضلاب با آلودگی بالا، نسبت به فاضلاب رقیق شده توانایی بیشتری در حذف COD دارد (۲۴)، زیرا تبدیل بی‌هوازی زائدات آلی به متان فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد که شامل تجمع و افزایش توده باکتریایی است. معمولاً محصول تولید شده توسط یک دسته از

باکتری‌ها، تأمین‌کننده مواد غذایی مورد نیاز برای گروه دیگری از باکتری‌ها می‌باشد، بنابراین حفظ تعادل بین جمعیت باکتری‌ها و منابع غذایی بسیار مهم است. در مطالعات نشان داده شده است هنگامی‌که فاضلاب خام دارای تنوع مواد آلی باشد و همچنین از نظر بار آلی قوی باشد؛ باعث فعالیت بهتر میکروارگانیسم‌ها و تجزیه بهتر مواد آلی توسط الکتروباکترها می‌گردد، زیرا زمانی که فاضلاب فقط دارای یکی از مواد آلی باشد، فقط گروه خاصی از میکروارگانیسم‌ها توانایی مصرف از آن ماده را دارند و بار میکروبی و تنوع میکروبی کم می‌شود. همچنین در پی کم شدن تنوع میکروبی، سرعت تجزیه مواد آلی و راندمان حذف کاهش می‌یابد و زمان بیشتری برای تصفیه نیاز می‌باشد (۲۷). از سویی دیگر در فرآیند بی‌هوازی مواد آلی، ترکیبات واسطه‌ای مانند اسید استیک و اسیدپروپیونیک تولید می‌شوند که بار آلی را برحسب COD افزایش می‌دهند.

در مطالعه لی و همکاران که از راکتور پیل سوختی میکروبی جهت تصفیه پساب واحد تولید روغن استفاده نمودند، استفاده از برس کربنی به‌عنوان آند و پارچه کربنی به‌عنوان کاتد و همچنین استفاده از غشای تبادل کاتیونی، سبب افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها شد. همچنین بر اساس نتایج، حذف COD و BOD_5 به‌مراتب بیشتر از زمانی بود که گرانول کربن فعال استفاده نشده بود (۲۸). در مطالعه سارا تجدور که برای دستیابی به تصفیه فاضلاب آبجوسازی انجام شد؛ گونه‌های ژئوباکتر در لایه‌های پایینی بیوفیلم حضور داشت. همچنین نتایج نشان‌دهنده این بود که پیش‌تصفیه به‌طور مؤثری، بیشتر مواد معلق و مواد مغذی پساب را از بین می‌برد و این سیستم می‌تواند میزان بالایی ازت، فسفر، TSS و بیش از ۸۸٪ COD از فاضلاب آبجوسازی را حذف نماید (۱۴).

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، تأثیر افزایش زمان‌ماند هیدرولیکی در افزایش حذف مواد آلی مشخص شد. از آنجایی‌که فرآیندهای تصفیه طبیعی نسبتاً کند می‌باشند، معمولاً جهت تصفیه مؤثر HRT کافی بسیار اهمیت دارد. مطالعات مختلف تأثیر این پارامتر در راندمان حذف آلاینده‌ها را نشان داده‌اند؛ به‌طوری‌که در HRTهای طولانی‌تر، راندمان حذف BOD و COD بالاتر می‌باشد (۶). در ماه اول انجام پژوهش که زمان‌ماند هیدرولیکی ۲ برابر ماه دوم بود، راندمان حذف مواد آلی بیشتر شده بود. زمان‌ماند هیدرولیکی سیستم بی‌هوازی به ویژگی فاضلاب و شرایط محیطی بستگی دارد و باید زمان‌ماند به‌قدری بالا باشد تا بتواند تصفیه انجام دهد (۲۹-۳۲). از سویی دیگر در برخی مطالعات که از زمان‌ماند هیدرولیکی بیشتری نسبت به مطالعه حاضر استفاده شده بود، به راندمان بالاتری در حذف آلاینده‌ها دست یافتند. زیرا زمان‌ماند بالاتر سبب شده است تا فرصت بیشتری به الکتروباکترها جهت تجزیه داده شود و در نتیجه باعث حذف بیشتر COD می‌گردد (۲۸). همچنین در مطالعه صادقی و همکاران که بر روی حذف فنل توسط وتلند مصنوعی انجام شد، نتایج نشان داد که با افزایش زمان‌ماند هیدرولیکی، میزان حذف افزایش می‌یابد. سیستم‌های بی‌هوازی نسبت به فرآیندهای تصفیه هوازی، به زمان‌ماند بالاتری برای حذف آلاینده‌ها نیاز دارند (۶, ۲۵, ۲۸). نتایج مطالعه مقیسه و همکاران که جهت تجزیه بیولوژیکی ترکیب دارویی آسپرین از فاضلاب انجام دادند، نشان داد که این فرآیند قادر است داروی آسپرین و محصولات جانبی (COD) را با عملکرد بالا از فاضلاب حذف نماید. نتایج نشان داد برای حذف آسپرین و سایر آلاینده‌ها تا رسیدن به استاندارد خروجی پساب نیاز به زمان بیشتری است (۳۳). در مطالعه پرادو و همکاران که عملکرد سه بستر متفاوت شامل گرافیت، کک و بیوشار را برای تصفیه فاضلاب شهری با روش الکتروشیمیایی میکروبی بررسی کردند، نتایج نشان داد که با افزایش زمان‌ماند هیدرولیکی، میزان حذف COD بیشتر شده است که با نتایج مطالعه حاضر مشابه بود (۱۸). همچنین در مطالعه پرادو مشاهده شد که در این فرآیند تصفیه بیولوژیکی، جنس بستر؛ نقش مهمی را در تصفیه ایفا می‌کند و استفاده از مواد با پایه کربن و همچنین مواد رسانا به‌عنوان پرکننده بستر، بسیار اهمیت دارد و با توجه به رسانایی بالاتر گرافیت نسبت به کک، عملکرد آن در تجزیه پایین‌تر بوده است و با وجود آنکه بیوشار

کمترین رسانای الکتریکی بوده، بیشترین راندمان حذف COD را داشته است که علت این امر ناشی از اهمیت بیشتر میزان کربن نسبت به رسانایی، در مواد تشکیل‌دهنده بستر است (۸، ۱۸)؛ به‌طوری‌که مواد درون بستر رسانا با میزان بالای کربن، عملکرد بهتری در حذف آلاینده‌ها نسبت به سایر بسترهای رسانا دارند. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش را می‌توان با سایر مطالعات مشابه در این زمینه مقایسه نمود. نتایج مطالعه آگوئر و همکاران که بر روی فاضلاب شهری در بیوفیلم الکترواکتیو انجام شد، نشان داد نرخ حذف COD به جریان الکترون در سیستم‌های رسانا مربوط می‌باشد و همچنین مشاهدات، نشان‌دهنده افزایش حذف آلاینده‌ها، با تبدیل مواد بی‌اثر به مواد رسانا بود (۳۴). بسترهای مورد استفاده باید دارای خاصیت رسانایی بالا و از جنس مواد کربنی باشند. در واقع در کنار تأثیر بالای رسانایی مواد موجود در بستر، کربن موجود در مواد بستر، تأثیر بالاتری در حذف مواد آلی و راندمان حذف COD دارد. دلیل این امر این است که در فنّاوری الکتروشیمیایی میکروبی، از الکتروباکتر جهت ایجاد جریان الکتریکی برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌گردد (۱۰). در مطالعه حاضر راندمان حذف آلاینده‌ها در بستر دارای زائدات الکترونیکی بیشترین مقدار بود و در بستر دارای زائدات خرد شده لاستیک نیز راندمان مناسبی از حذف آلاینده‌ها مشاهده شد. تایرهای خرد شده دارای ظرفیت تبادل یون بهینه‌ای هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد به‌عنوان جاذب در بسترهای وتلند و بسترهای متلند استفاده شوند. از سوی دیگر استفاده از زائدات خرد شده تایر در بستر وتلند نسبت به ماسه، به‌دلیل حجم بالایی که دارد، باعث استفاده کمتر از مواد در یک بستر یکسان شده است. همچنین میزان تخلخل در تراشه‌های لاستیک بالاتر از ماسه است که این موضوع سبب بالاتر رفتن راندمان حذف مواد جامد معلق و مواد آلی در بستر می‌گردد (۱۵). میزان تخلخل و زبری سطح مدیا سبب تشکیل بیوفیلم بیشتر و تجزیه بهتر می‌گردد و در راندمان حذف تأثیرگذار بوده است. سطح صاف و صیقلی و همچنین جنس پلاستیک به‌کار برده شده در این مطالعه، سبب ایجاد تخلخل کمتر در بستر دارای پلاستیک نسبت به بستر ماسه نخودی شد که این امر سبب شده تا پایلوت دارای ماسه نخودی (بستر شاهد) نسبت به پایلوت دارای گرانول‌های پلاستیک، راندمان بالاتری در حذف COD و BOD_5 داشته است. در مطالعه عزی و بهترین عملکرد مربوط به پیل سوختی میکروبی با غشای سرامیکی به همراه ۱۵٪ زئولیت بود، زیرا بالاترین تخلخل و پایین‌ترین مقاومت الکتریکی را داشت. افزایش زئولیت به‌دلیل افزایش تخلخل سبب افزایش راندمان شده است (۳۵). نتایج پژوهش حاضرنشان داد که بسترهای مورد مطالعه، راندمان مناسبی را در حذف TSS داشته‌اند و بیشترین راندمان حذف TSS، مربوط به بستر دارای زائدات الکترونیکی بوده است. نتایج مطالعات قبلی نیز نشان‌دهنده راندمان بالای راکتورهای الکتروشیمیایی میکروبی، در تولید پساب با کیفیت مناسب جامدات معلق خروجی بود، زیرا در متلندها هم‌زمان که فاضلاب با سرعت کم از بستر عبور می‌کند، ذرات معلق در منافذ مدیا می‌نشینند و دستخوش تجزیه بیولوژیکی می‌شوند (۲۸، ۳۶).

در رابطه با تغییرات هدایت الکتریکی، نتایج مطالعه حاکی از آن بود که افزایش حذف COD، BOD_5 در پایلوت‌ها سبب افزایش میزان هدایت الکتریکی در فاضلاب خروجی پایلوت‌ها نسبت به فاضلاب ورودی شده است؛ به‌طوری‌که در پایلوتی که میزان حذف مواد آلی موجود در فاضلاب بیشتر بود، تقریباً میزان هدایت الکتریکی هم افزایش بیشتری داشته است. در فرآیند تصفیه فاضلاب، ماکرومولکول‌ها شکسته می‌شوند. از سویی راندمان حذف COD بالا می‌رود و از سوی دیگر به‌دلیل شکسته شدن این پیوندها، مقداری مواد محلول به فاضلاب آزاد می‌شود که میزان جامدات محلول را بالا می‌برند. در نتیجه به‌دلیل رابطه مستقیم جامدات محلول با هدایت الکتریکی، سبب افزایش میزان هدایت الکتریکی می‌شوند. از سویی دیگر در فرآیند بی‌هوازی مواد آلی، ترکیبات واسطه‌ای مانند اسید استیک و اسید پروپیونیک تولید می‌شوند که بار آلی را برحسب COD افزایش می‌دهند. همچنین فاضلاب خروجی از بسترها با افزایش pH همراه بوده است. pH در محیط داخل راکتور اثر می‌گذارد. سیستم‌های بی‌هوازی از لحاظ

عملکرد به‌شدت به pH و دمای مناسب وابسته هستند. تفاوت در میانگین pH در فاضلاب خروجی از بسترهای مورد مطالعه ناچیز می‌باشد و در راکتورهای با حذف بالاتر مواد آلی (زائدات الکترونیکی و لاستیک)، افزایش بیشتر در pH مشاهده می‌شود.

نتیجه گیری

استفاده از مواد دورریز، می‌تواند هزینه‌های سرسام‌آور مربوط به تصفیه فاضلاب را کاهش دهد. با توجه به اینکه زائدات مصرف شده در این تحقیق، کارایی مناسبی در جهت حذف مواد آلی و مواد جامد معلق داشته‌اند، می‌توان به‌عنوان بسترهای ارزان با کارایی بالا در جهت تصفیه فاضلاب معرفی شوند. از این تکنولوژی در شهرهای صنعتی که زائدات مذکور به راحتی در دسترس هستند، می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش استراتژی‌های جدید مورد بررسی قرار گرفت تا به تنگناهای تکنولوژی الکتروشیمیایی-میکروبی غلبه کند و بتوان از این روش نسبتاً جدید و اقتصادی، بهتر و بیشتر در تصفیه فاضلاب استفاده کرد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که پساب خروجی از این بسترها برای استفاده مجدد در کشاورزی و آبیاری مناسب بوده است. پیشنهاد می‌شود کاربرد این روش برای تصفیه فاضلاب‌هایی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت بررسی شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از معاونت تحقیقات دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، به‌خاطر حمایت‌های مالی جهت انجام این تحقیق با کد ۹۸۰۹۷ و با شناسه اخلاق IR-MEDSAB.REC.1398.055 و برگرفته از پایان‌نامه با عنوان "استفاده از زائدات پلاستیک، لاستیک و زائدات الکترونیکی به‌عنوان پرکننده بستر متلند در تصفیه فاضلاب شهری" تقدیر و تشکر می‌شود.

References

l. Alipoor M, Alidadi H, Najafpoor A, Peirovi R, Rahmatiyar H. The evaluation of the performance of stabilization ponds in the wastewater treatment plant of Olang Mashhad, 2011-2012. J Res Environ Health. 2015;1(1):60-8.
2. Tchobanoglous G, Burton FL. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse: Metcalf & Eddy.; 1991.
3. Crini G, Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. Environmental Chemistry Letters. 2019;17(1):145-55.
4. Xu F, Cao F-q, Kong Q, Zhou L-l, Yuan Q, Zhu Y-j, et al. Electricity production and evolution of microbial community in the constructed wetland-microbial fuel cell. Chemical Engineering Journal. 2018;339:479-86.
5. Corbella C, Puigagut J, Garfí M. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. Science of the total environment. 2017;584:355-62.
6. Sadeghi S. Effect of hydraulic retention time and aeration on performance of horizontal subsurface flow constructed wetland in phenol removal. 2018.
7. Xu L, Zhao Y, Wang X, Yu W. Applying multiple bio-cathodes in constructed wetland-microbial fuel cell for promoting energy production and bioelectrical derived nitrification-denitrification process. Chemical Engineering Journal. 2018;344:105-13.
8. Hartl M. Constructed wetlands operated as bioelectrochemical systems for improvement and control of wastewater treatment: Ghent University; 2020.
9. Hartl M, García-Galán MJ, Matamoros V, Fernández-Gatell M, Rousseau DP, Du Laing G, et al. Constructed wetlands operated as bioelectrochemical systems for the removal of organic micropollutants. Chemosphere.129593.
10. Corbella C, Garfí M, Puigagut J. Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. Science of the total environment. 2016;563:448-55.
11. Xu L, Zhao Y, Wang T, Liu R, Gao F. Energy capture and nutrients removal enhancement through a stacked constructed wetland incorporated with microbial fuel cell. Water Science and Technology. 2017;76(1):28-34.
12. Srivastava P, Yadav AK, Mishra BK. The effects of microbial fuel cell integration into constructed wetland on the performance of constructed wetland. Bioresource Technology. 2015;195:223-30.
13. Aguirre-Sierra A, Reija A, Berná A, Salas JJ, Esteve-Núñez A. Microbial Electrochemical Constructed Wetlands (METlands): design and operation conditions for enhancing

the removal of pollutants in real urban wastewater.
14. Tejedor Sanz S. Merging microbial electrochemical systems with conventional reactor designs for treating wastewater. 2016.
15. García-Pérez A, Harrison M, Chivers C, Grant B. Recycled shredded-tire chips used as support material in a constructed wetland treating high-strength wastewater from a bakery: case study. Recycling. 2016;1(1):3-13.
16. Yong YS, Lim YA, Ilankoon I. An analysis of electronic waste management strategies and recycling operations in Malaysia: challenges and future prospects. Journal of Cleaner Production. 2019;224:151-66.
17. Proshad R, Kormoker T, Islam MS, Haque MA, Rahman MM, Mithu MMR. Toxic effects of plastic on human health and environment: A consequences of health risk assessment in Bangladesh. International Journal of Health. 2018;6(1):1-5.
18. Prado A, Berenguer R, Esteve-Núñez A. Electroactive biochar outperforms highly conductive carbon materials for biodegrading pollutants by enhancing microbial extracellular electron transfer. Carbon. 2019;146:597-609.
19. Hoseinzadeh E, Rahmanie AR. Evaluation of cadmium removal efficiency from aqueous solution by activated carbon derived from scrap tire. Koomesh. 2014;15(4):557-66.
20. Metcalf L, Eddy HP, Tchobanoglous G. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse: McGraw-Hill New York; 1991.
21. Baird RB. Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd: Water Environment Federation, American Public Health Association, American ...; 2017.
22. Droste RL, Gehr RL. Theory and practice of water and wastewater treatment: John Wiley & Sons; 2018.
23. Shokoohi R, Dargahi A, Karami A. A Survey on Efficiency of Natural Wastewater Treatment Systems and Activated Sludge for Municipal Wastewater Treatment. Journal of Environmental Science and Technology. 2020;22(1):15-25.
24. Wang X, Feng Y, Lee H. Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell. Water Science and Technology. 2008;57(7):1117-21.
25. Yadav AK, Dash P, Mohanty A, Abbassi R, Mishra BK. Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. Ecological Engineering. 2012;47:126-31.
26. Ramírez-Vargas CA, Arias CA, Carvalho P, Zhang L, Esteve-Núñez A, Brix H. Electroactive biofilm-based constructed wetland (EABB-CW): a mesocosm-scale test of an innovative setup for wastewater treatment. Science of The Total Environment. 2019;659:796-806.
27. Pant D, Singh A, Van Bogaert G, Olsen SI, Nigam PS, Diels L, et al. Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. Rsc Advances. 2012;2(4):1248-63.
28. Hejazi F, Ghoreyshi A, Rahimnejad M. Simultaneous phenol removal and electricity generation using a hybrid granular activated carbon adsorption-biodegradation process in a batch recycled tubular microbial fuel cell. Biomass and Bioenergy. 2019;129:105336.
29. MOSTAED S, AMIN MM, HASSANI A, TAKDASTAN A. Anaerobic biofilm reactor system efficiency in sugar cane industry wastewater treatment. 2010.
30. Doherty L, Zhao Y, Zhao X, Hu Y, Hao X, Xu L, et al. A review of a recently emerged technology: constructed wetland–microbial fuel cells. Water research. 2015;85:38-45.
31. Kim JR, Zuo Y, Regan JM, Logan BE. Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater. Biotechnology and bioengineering. 2008;99(5):1120-7.
32. Xu L, Zhao Y, Doherty L, Hu Y, Hao X. The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2016;46(1):60-91.
33. Moghiseh Z, Rezaee A, Ghanati F, Esrafili A. Metabolic activity and pathway study of aspirin biodegradation using a microbial electrochemical system supplied by an alternating current. Chemosphere. 2019;232:35-44.
34. Aguirre-Sierra A, Bacchetti-De Gregoris T, Berná A, Salas J, Aragón C, Esteve-Núñez A. Microbial electrochemical systems outperform fixed-bed biofilters in cleaning up urban wastewater. Environmental Science: Water Research & Technology. 2016;2(6):984-93.
35. Ezy S. application of zeolite ceramic membrane for microbial fuel cells for municipal wastewater treatment. 2019.
36. Xu L, Yu W, Graham N, Zhao Y, Qu J. Application of integrated bioelectrochemical-wetland systems for future sustainable wastewater treatment. ACS Publications; 2019.