



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 51, No. 1, Spring 2025

Print ISSN: 1025-8620

Online ISSN 2345-6922

Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Enhancing the Removal Efficiency of Organic Load, Phosphorus, and Ammonia in the Sequencing Batch Reactor (SBR) Wastewater Treatment by Employing Electrochemical Technology

Zahra Abolhasanzadeh¹ , Gagik Badalians Gholikandi² 

1. Department of Water and Wastewater Treatment, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: zahraabolhasanzadeh721@gmail.com.
2. Corresponding Author, Department of Water and Wastewater Treatment, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran E-mail: g.badalians@yahoo.com; G_Badalians@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 23 January 2024

Received in revised form: 5 May 2025

Accepted: 7 May 2025

Available online: 10 June 2025

Keywords:

Electrochemical technology, Removal of organic load, Phosphorus and nitrogen, Sequencing Batch Reactor (SBR), Wastewater treatment.

ABSTRACT

Objective: Advanced wastewater treatment plays a vital role in reducing environmental pollution and safeguarding water resources, particularly as industrialization and urban development continue to accelerate globally. Among the various treatment technologies available, electrochemical processes have emerged as a promising and innovative option, largely due to their effectiveness in eliminating resistant and hard-to-treat contaminants. These technologies not only offer high treatment efficiency and scalability but also exhibit strong potential for integration with traditional treatment systems, making them a practical enhancement to current infrastructure. Key goals of wastewater treatment include achieving high removal rates of organic pollutants, consistently meeting regulatory thresholds for nutrients like nitrogen and phosphorus in the effluent, and improving the overall operational efficiency of treatment processes, thus ensuring long-term sustainability and effectiveness in environmental management.

Method: This study evaluates the integrated treatment strategy by examining the removal efficiencies of key pollutants, including organic matter, phosphorus, and ammoniacal nitrogen, alongside measurements of sludge volume index (SVI) and energy consumption across a voltage range of 1 to 15 volts. To ensure both practical relevance and methodological robustness, experiments were conducted using a combination of real and synthetic wastewater samples.

Results: The findings revealed that applying voltages below 5 volts significantly enhanced the removal of organic contaminants, achieving up to a 1.5-fold improvement relative to conventional treatment systems. Notably, the system attained a peak organic load removal efficiency of 98% at an applied voltage of 3 volts. In parallel, phosphorus removal efficiency reached 99%, while ammoniacal nitrogen removal was observed at 69% within the 1–5 volt range. Beyond pollutant elimination, the incorporation of electrochemical technology notably improved sludge characteristics. The most substantial decrease in SVI occurred at 15 volts, reducing sludge volume to one-third of that observed in traditional sequencing batch reactor (SBR) systems over an equivalent operational period. Additionally, the system demonstrated favorable energy performance, with maximum energy consumption under optimal operating conditions measured at 1.78 kWh per cubic meter of treated wastewater.

Conclusions: The findings of this study indicate that enhancing the conventional biological wastewater treatment system through the simultaneous application of the electrochemical method leads to increased efficiency in the removal of organic load, phosphorus, and ammonium, particularly at voltages below 5 V. Furthermore, the results suggest that, under optimal operating conditions, the integration of the electrochemical method reduces retention time, significantly improves the sludge volume index (SVI), and optimizes energy consumption, making the process more sustainable, environmentally friendly, and economically viable in the long term.

Cite this article: Abolhasanzadeh, Z., Badalians Gholikandi, G. (2025). Enhancing the Removal Efficiency of Organic Load, Phosphorus, and Ammonia in the Sequencing Batch Reactor (SBR) Wastewater Treatment by Employing Electrochemical Technology. *Journal of Environmental Studies*, 51 (1), 1- 17. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.371371.1008474>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.371371.1008474>

Introduction

Municipal wastewater comprises various organic and inorganic constituents in both dissolved and particulate forms, in addition to a wide array of pathogenic organisms. If discharged into the environment without adequate treatment, it can cause serious and often irreversible damage to water, soil, and air resources. From the standpoint of public health and the potential for wastewater reuse, the effective treatment of sewage is a critical and foundational objective for sustainable development. Among the widely adopted treatment methods, the sequencing batch reactor (SBR) is commonly used due to its operational flexibility and compact design. However, performance limitations have been reported in existing SBR systems, especially under fluctuating or non-standard influent conditions. Notably, increased influent chemical oxygen demand (COD) concentrations up to two to three times the typical levels can significantly impact reactor performance. These impacts include higher sensitivity to shock loading, changes in mixed liquor suspended solids (MLSS) concentrations, and a marked reduction in COD removal efficiency. In addition, determining the number of operational cycles required to achieve steady-state conditions and calibrating experimental findings using mathematical modeling and regression analysis have revealed the necessity of enhancing SBR performance under atypical wastewater characteristics.

Method

1. Specifications of Wastewater sample

To achieve optimal operational conditions for the laboratory-scale systems under investigation, the experiments were conducted in two phases: initially using synthetic wastewater and subsequently with real wastewater samples collected from the influent stream to the aeration tanks of the South Tehran Wastewater Treatment Plant.

2. Laboratory Pilot

A cylindrical laboratory reactor made of plexiglass with a volume of one liter containing two graphite electrodes (anode and cathode) was used. The graphite electrodes had dimensions of 1mm×60mm×120mm, with the placement depth of each electrode and the contact surface with wastewater being 80 mm and 60 mm×80 mm, respectively. A distance of 1.5 cm was maintained between the electrodes. Air supply to the reactor was carried out by two air pumps, namely Hailea aco-5503 and Hailea aco-5505.

3. Operation of laboratory-scale pilots

The study was divided into two phases: the first phase involved synthetic wastewater, whereas the second phase focused on municipal wastewater. Initially, 0.6 liters of excess biological sludge collected from the South Tehran Wastewater Treatment Plant was transferred into each of the two reactors. Then, 0.3 liters of the respective wastewater samples were added to the pilot reactors. Both pilots were connected to aerators to provide aeration and mixing. In this stage, the electrodes were placed inside the reactors after being connected to a power supply, and the current was adjusted using a multimeter.

During the 10-hour retention time, samples were taken from both pilots at 2-hour intervals. At the end of the experiment, the COD, phosphorus, and ammonium concentrations in the effluent samples from both pilots were measured and recorded. These parameters were determined according to the Standard Methods guideline, with all measurements performed in triplicate to ensure the reliability of the results.

Results

Firstly, the results of comparing the efficiency of two pilots in removing organic load (COD) were presented to determine the optimal voltage range. Then, within this range, the percentage of phosphorous and ammonia removal in both systems was investigated.

1. Synthetic wastewater

At voltages higher than 5, the implementation of the electrochemical process led to a reduction in its efficiency. At voltages of 1, 2, 3, and 4 (with current intensity of 0.007, 0.009, 0.01, and 0.02 amperes), the COD removal percentages after an 8-hour period in the combined SBR-electrochemical system increased to 94, 98, 97, and 85 percent, respectively. In contrast, the removal efficiency of the conventional system reached less value, the phosphorous removal percentages were measured as 26% and 96%, 29% and 99%, and 24% and 99% during a 5-hour retention time in both conventional and electrochemical systems respectively and the ammonia

removal percentages were measured as 22% and 28%, 21% and 48%, 24% and 68% during an 8-hour retention time in both systems, respectively. Although the efficiency of the electrochemical system increased at higher voltages, the ammonia removal was elevated within the optimal voltage range, considering the system's priority in COD removal.

2. Wastewater sampled from the wastewater treatment plant

At voltages of 2, 3, and 4 (with current intensities of 0.009, 0.01, and 0.02 amperes), the COD removal percentages over an 8-hour retention time were measured as 83% and 86%, 81% and 87%, 80% and 89% for conventional SBR and the combined SBR-electrochemical systems, respectively. The results indicated that at these voltages, the application of the electrochemical process continued to enhance the system's performance in terms of removing COD from wastewater. At voltages of 2, 3, and 4 (with current intensities of 0.009, 0.01, and 0.02 amperes, respectively), the phosphorous removal percentages were measured to be 28% and 81%, 27% and 87%, and 30% and 94% during a 5-hour retention time in both conventional and electrochemical systems, respectively, and the ammonia removal percentages were 23% and 46%, 24% and 67%, 21% and 79% during an 8-hour retention time in both conventional and electrochemical systems, respectively.

3. Sludge volume index (SVI)

It was observed that the implementation of the electrochemical process led to a significant reduction in the SVI value. Moreover, applying higher voltages resulted in a more pronounced improvement in SVI over a shorter duration.

4. System energy consumption

With an increase in voltage (from 1 to 5), the current intensity also rose (from 0.007 to 0.04). Current intensity and voltage were crucial cost factors. The energy consumption of the electrochemical system at optimal voltages over an 8-hour period ranged from 0.063 to 1.78 kWh for 1m³ wastewater.

Conclusions

Today, the application of hybrid treatment methods has garnered significant attention from researchers and professionals in the water and wastewater industry as an effective approach to overcoming the limitations of conventional wastewater treatment processes. In this context, the improvement of the sequencing batch reactor (SBR) performance, a biological treatment method, was explored by incorporating electrochemical technology.

This study was conducted in two phases using synthetic and real wastewater. It demonstrated that incorporating electrochemical methods into this conventional biological system significantly improves the removal efficiency of organic matter, phosphorus, and ammonium, particularly at voltages below 5 volts, with optimal organic load removal observed between 2 and 4 volts. Moreover, the findings revealed that under optimal operational conditions, the electrochemical enhancement contributes to reduced hydraulic retention time (HRT), substantial improvement in sludge volume index (SVI), and more efficient energy consumption. These improvements are of considerable importance for the optimal design and operation of SBR-based treatment facilities, based on existing operational experiences. While the laboratory-scale results present a promising and effective solution, further investigations at the semi-industrial pilot scale are essential. Given the dual objectives of upgrading existing treatment plants and developing new ones, future research should explore two main hybridization strategies: (1) integration with conventional technologies such as adsorption, membrane processes, ozonation, and multi-stage biological systems; and (2) incorporation of advanced and emerging technologies, including advanced oxidation processes (AOPs) and bioelectrochemical systems.

Transforming traditional biological reactors into bioelectrochemical systems with the aim of water reuse, energy production or recovery, nutrient recovery, and generation of value-added products is regarded as a forward-looking and promising approach. Ultimately, comparative evaluation of outcomes can pave the way for identifying optimal solutions within the water-energy-economy-food-environment nexus.

Based on the conducted experiments, upgrading the SBR system using electrochemical methods leads to increased efficiency in removing organic load, phosphorus, and ammonium, especially at voltages below 5 volts. Additionally, the results of this study demonstrate that under optimal operating conditions, the use of electrochemical methods reduces the retention time in the system compared to the conventional SBR method, significantly influencing the improvement of the sludge volume index (SVI).

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

ارتقای کارآمدی حذف بار آلی، فسفر و آمونیم در تصفیه فاضلاب به روش راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) با استفاده از فناوری الکتروشیمی

زهرا ابوالحسن زاده^۱ | گایگ بدلیانس قلی کندی^۲

۱. گروه آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران رایانامه: zahraabolhasanzadeh721@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران رایانامه: G_Badalians@sbu.ac.ir; g.badalians@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: تصفیه پیشرفته فاضلاب یکی از ضروری ترین اقدامات برای کاهش آلودگی های زیست محیطی و حفظ منابع آبی در مواجهه با افزایش فعالیت های صنعتی و شهری است. این فرآیند با حذف آلاینده های پیچیده و مقاوم، امکان بازگشت آب تصفیه شده به چرخه طبیعی یا استفاده مجدد را فراهم می کند و نقشی کلیدی در توسعه پایدار ایفا می نماید همچنین حذف مطمئن بیشینه بار آلی فاضلاب ورودی به تصفیه خانه و دستیابی مستمر به حدود مجاز غلظت مواد مغذی (فسفر و نیتروژن) در پساب خروجی از تصفیه خانه را می توان از جمله مهمترین اهداف تصفیه فاضلاب به شمار آورد.

روش پژوهش: در این تحقیق، امکان سنجی ارتقای عملکردی روش راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) با استفاده از فناوری الکتروشیمیایی در مقیاس آزمایشگاهی انجام پذیرفت. با به کارگیری فناوری الکتروشیمیایی در سامانه متعارف تصفیه فاضلاب در ولتاژهای مختلف (۱ تا ۱۵ ولت)، میزان حذف بار آلی، فسفر، نیتروژن آمونیاکی، اندیس حجمی لجن و انرژی مصرفی سامانه بر روی دو نمونه فاضلاب واقعی و سنتتیک مورد بررسی قرار گرفت.

یافته ها: با اعمال ولتاژهای کمتر از ۵ ولت میزان حذف بار آلی تا ۱/۵ برابر افزایش یافت و در حالت بهینه (ولتاژ ۳) میزان حذف بار آلی در سامانه به ۹۸ درصد رسید. همچنین کاهش ۹۹ درصدی میزان فسفر موجود در نمونه فاضلاب و ۶۹ درصدی نیتروژن آمونیاکی موجود با اعمال حداقل ولتاژهای ۵ تا ۱ ولت به سامانه متعارف SBR اندازه گیری شد. با اعمال فرایند الکتروشیمیایی، اندیس حجمی لجن (SVI) در مدت زمان کمتر و به میزان به مراتب بیشتر از سامانه متعارف SBR کاهش یافت که بیشترین مقدار کاهش در ولتاژ ۱۵ ولت و تا سه برابر کمتر از مقدار اندیس حجمی لجن در مدت زمان یکسان در سامانه متعارف بوده است. همچنین حداکثر انرژی مصرفی سامانه الکتروشیمیایی تحت شرایط بهینه راهبری برابر ۱/۷۸ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب فاضلاب تعیین گردید.

نتیجه گیری: نتایج این بررسی نشان می دهد که ارتقای این سامانه متعارف تصفیه بیولوژیکی فاضلاب از طریق به کارگیری هم زمان روش الکتروشیمیایی منجر به افزایش کارآمدی در حذف بار آلی، فسفر و آمونیوم به ویژه در ولتاژهای کمتر از ۵ ولت می گردد. علاوه بر این، نتایج این تحقیق نشان می دهد که تحت شرایط بهینه راهبری، به کارگیری روش الکتروشیمیایی منجر به کاهش مدت زمان ماند، بهبود قابل توجه مقدار اندیس حجمی لجن (SVI) و مصرف بهینه انرژی می گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

کلیدواژه ها:

تصفیه فاضلاب،
حذف بار آلی،
حذف فسفر و نیتروژن،
راکتور ناپیوسته متوالی (SBR)،
فناوری الکتروشیمیایی.

استناد: ابوالحسن زاده، زهرا؛ بدلیانس قلی کندی، گایگ. (۱۴۰۴). ارتقای کارآمدی حذف بار آلی، فسفر و آمونیم در تصفیه فاضلاب به روش راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) با استفاده از فناوری الکتروشیمی. نشریه محیط شناسی، ۵۱(۱)، ۱-۱۷. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.371371.1008474>.

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.371371.1008474>

۱. مقدمه

فاضلاب‌های شهری حاوی عناصر گوناگون محلول، معلق و میکروارگانسیم‌های بیماری‌زای گوناگونی هستند که در صورت تخلیه کنترل نشده به محیط، خسارات جبران‌ناپذیری به منابع آب، خاک و هوا وارد می‌سازند (Cherchi et al., 2015; El-Sonbati et al., 2020). همچنین از نقطه نظر تامین بهداشت عمومی و امکان استفاده مجدد از پساب تصفیه شده نیز تصفیه فاضلاب جزو اهداف اساسی و زیربنایی جامعه به‌شمار می‌رود (Bera et al., 2021; Deshpande et al., 2020; Shahedi et al., 2020; Saravanan et al., 2021; Molinos-Senante et al., 2018). نظر به این که یکی از روش‌های انتخابی متعارف تصفیه فاضلاب، راکتور ناپیوسته متوالی^۱ (SBR) می‌باشد و در این گونه تصفیه‌خانه‌های در حال بهره‌برداری، مشکلاتی در خصوص دستیابی به کارآمدی لازم گزارش شده است (Khalaf et al., 2021; Askari et al., 2024; Jagaba et al., 2021; Khosravi et al., 2020). همچنین میزان شوک‌پذیری این راکتور در صورت افزایش غلظت معمول اکسیژن‌خواهی شیمیایی^۲ (COD) فاضلاب شهری به حدودا دو تا سه برابر، تاثیر غلظت جامدات معلق مخلوط مایع و کاهش قابل توجه نرخ حذف COD، تعداد چرخه‌های لازم برای دستیابی به شرایط پایدار بهره‌برداری و واسنجی نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی به کمک مدل‌های ریاضی و منحنی‌های رگرسیون نیز انجام پذیرفته‌اند که نمایانگر لزوم ارتقای عملکردی این راکتور در صورت برقراری شرایط غیرمتعارف کیفی فاضلاب شهری ورودی است (Ahmed et al., 2024).

در یک دهه اخیر، ارتقای عملکردی این راکتور از طریق رویکرد به‌کارگیری راکتور ناپیوسته متوالی چند مرحله‌ای و روش‌های پیشرفته فتوکاتالیستی (L. Fernández et al., 2019; Nie et al., 2022; Pan et al., 2024)، استفاده از نانوکامپوزیت در راکتور ناپیوسته متوالی مغناطیسی (L. Fernández et al., 2019) یا تغییرات ساختاری و راهبری مانند سامانه چرخه‌ای لجن فعال^۳ (CASS)، حوضچه چندبخشی یونی تنک (UNITANK-) (SBR) و راهبری هوادهی گسترده چرخه‌ای^۴ (ICEAS) (Dutta & Sarkar, 2015) حاصل گردید. در همین حال، ارتقای عملکردی این روش از طریق به‌کارگیری فناوری‌های نوین از جمله روش الکتروشیمیایی ممکن است راهکار مناسبی برای رفع مشکلات موجود باشد. به دلیل معایب روش‌های متعارف تصفیه هوازی فاضلاب شامل تولید میزان قابل توجه لجن، انرژی مصرفی زیاد، راهبری غیرپایدار و مشکلات بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات (Zwane et al., 2021; Deng et al., 2022) از سویی و مزیت‌های تصفیه الکتروشیمیایی شامل کارآمدی بالا، ابعاد کوچک تاسیسات، تولید کمینه لجن، راه‌اندازی سریع و راهبری تحت شرایط محیطی (رضائی، و همکاران، ۱۴۰۳؛ نظری‌علوی و همکاران، ۱۴۰۱; Garrido-Cardenas et al., 2019; Fang & Chen, 2017; S. Longo et al., 2016; Crini & Lichtfouse, 2019; Rodrigues et al., 2021; Ano et al., 2019; Tarpeh et al., 2018; Rajaniemi et al., 2021) و امکان تولید انرژی یا هیدروژن (Ben-Sasson et al., 2013)، این فناوری مورد توجه قرار گرفته است.

عامل اصلی تصفیه در روش الکتروشیمیایی، انتقال الکترون است. در این روش، با عبور جریان الکتریکی، واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در داخل سلول‌های الکترولیز یا به اصطلاح سلول‌های الکتروشیمیایی انجام می‌پذیرند. انواع روش‌های الکتروشیمیایی استفاده شده در تصفیه آب و فاضلاب شامل انعقاد الکتریکی، شناورسازی الکتریکی، الکترواکسیداسیون و کاهش الکتروشیمیایی می‌باشند (da Silva et al., 2019; Muddemann et al., 2019; Singh et al., 2019; Zailani et al., 2018; Suman et al., 2021; Guo et al., 2017). اصولاً روش‌های الکتروشیمیایی مورد استفاده برای تخریب مواد آلی از نوع اکسیداسیون الکتریکی بوده که به دو دسته فرآیند اکسیداسیون مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی می‌شوند. در فرآیند اکسیداسیون مستقیم آندی، رادیکال هیدروکسیل به عنوان عامل اکسیدکننده از طریق جذب اکسیژن فعال بر سطح الکتروود تولید می‌شود. در روش غیرمستقیم ابتدا در سطح الکتروود، اکسیدکننده فعال و قوی مانند هیپوکلریت، کلر، اسید هیپوکلروس یا پراکسید هیدروژن به صورت الکتروشیمیایی تولید می‌شود. آلاینده‌ها به وسیله واکنش اکسیداسیون توسط عامل اکسیدکننده تخریب می‌شوند. در مورد فرآیند اکسیداسیون غیرمستقیم می‌توان به عنوان مثال به هیدرولیز نمک اشاره کرد (Kobyta et al., 2019).

1. Sequencing Batch Reactors
2. Chemical Oxygen Demand
3. Cyclic Activated Sludge System
4. Intermediate Cycle Extended Aeration System

الکتروشیمی به ترتیب زیر به وقوع می‌پیوندد (Delil & Gören, 2019; Song et al., 2017):

در آند:



در کاتد:



در این پژوهش دو راکتور تصفیه فاضلاب به روش SBR در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند که در یک راکتور، تصفیه فاضلاب به روش متعارف انجام پذیرفت و راکتور دیگر به همراه اعمال ولتاژ، برای انجام فرآیند الکتروشیمی راهبری گردید. هدف از انجام این تحقیق مقایسه عملکرد دو سامانه تصفیه با اندازه‌گیری میزان حذف مقادیر COD، فسفر، آمونیم و کاهش SVI به ترتیب به عنوان شاخص‌های تصفیه بار آلی و مواد مغذی و قابلیت ته‌نشینی لجن بوده است. بدین ترتیب، امکان‌سنجی ارتقای سامانه متعارف تصفیه از طریق به‌کارگیری فرآیند الکتروشیمی و تعیین شرایط بهینه راهبری آن انجام پذیرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مشخصات نمونه‌های فاضلاب

برای دستیابی به شرایط بهینه راهبری سامانه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی، آزمایش‌ها در دو مرحله، ابتدا با فاضلاب سنتتیک و سپس با نمونه‌های فاضلاب برداشت شده از جریان ورودی به حوض‌های هوادهی تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران انجام پذیرفتند. در مرحله اول، به منظور شبیه‌سازی مشخصات فاضلاب سنتتیک به مشخصات فاضلاب شهری متعارف، مقدار ۰/۵۹ گرم شکر، ۰/۳ گرم پودر آمونیم کلراید و ۰/۲۸ گرم پودر تری‌پتاسیم‌فسفات به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب شبکه شرب شهری اضافه شد. مشخصات فاضلاب سنتتیک حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات نمونه فاضلاب برداشت شده از تصفیه‌خانه یاد شده در جدول ۲ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱. مشخصات فاضلاب سنتتیک

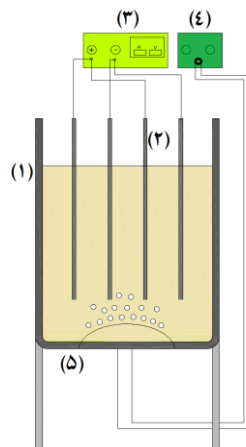
پارامتر	مقدار
COD (میلی‌گرم بر لیتر)	۵۳۰
فسفر (میلی‌گرم بر لیتر)	۵
آمونیم (میلی‌گرم بر لیتر)	۶۰
pH	۶/۹
دما (درجه سانتی‌گراد)	۲۷-۲۵

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های فاضلاب شهری (مرحله ی دوم آزمایش‌ها)

پارامتر	مقدار
COD (میلی‌گرم بر لیتر)	۳۶۸ ± ۲
فسفر (میلی‌گرم بر لیتر)	۷/۱ ± ۱
آمونیم (میلی‌گرم بر لیتر)	۳۴/۸ ± ۱
pH	۱ ± ۷/۲
دما (درجه سانتی‌گراد)	۲۶/۴ - ۲۸/۳

۲-۲. پایلوت آزمایشگاهی

راکتور آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، استوانه‌ای شکل از جنس پلکسی گلاس به حجم یک لیتر حاوی دو الکترود آند و کاتد از جنس گرافیت بود. الکترودهای گرافیتی به ابعاد ($120\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 1\text{ mm}$)، عمق قرارگیری هر الکترود و سطح تماس آن با فاضلاب به ترتیب برابر $80\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ و 80 mm و فاصله بین الکترودها $1/5$ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Ebba et al., 2021). هوادهی در راکتور توسط دو پمپ هوای Hailea aco-5503 و Hailea aco-5505 انجام پذیرفت. در شکل ۱ اجزای تشکیل‌دهنده پایلوت آزمایشگاهی و در شکل ۲ تصویر پایلوت آزمایشگاهی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. طرح‌واره راکتور آزمایشگاهی SBR-الکتروشیمیایی-۱ راکتور ۲- الکترودها (آند و کاتد)، ۳- منبع تغذیه متغیر، ۴- تجهیزات هوادهی، ۵- هواده (منبع: نگارندگان)



شکل ۲. تصویر پایلوت آزمایشگاهی (عکس از نگارندگان)

۲-۳. راهبری پایلوت‌های آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای COD، فسفر و آمونیم

آزمایش‌ها در دو مرحله با راه‌اندازی دو راکتور انجام پذیرفت. در مرحله اول از نمونه فاضلاب سنتتیک استفاده شد و در مرحله دوم، نمونه فاضلاب شهری مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مقداری از نمونه لجن مازاد بیولوژیکی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران به حجم $0/6$ لیتر به داخل هر دو راکتور منتقل گردید. سپس نمونه‌های فاضلاب مورد بررسی به حجم $0/3$ لیتر به پایلوت‌ها اضافه شد. هر دو پایلوت به هواده‌ها متصل گردید و به این طریق هوادهی و اختلاط انجام شد. در این مرحله الکترودها پس از اتصال به منبع تغذیه، درون راکتور قرار گرفتند و آمپر دستگاه به کمک مولتی‌متر تنظیم شد. در مدت زمان ماند 10 ساعت به فاصله زمانی هر 2 ساعت، نمونه‌گیری از هر دو پایلوت انجام شد. در پایان، مقدار COD، فسفر و آمونیم نمونه‌های خروجی هر دو پایلوت اندازه‌گیری و ثبت شدند. تعیین پارامترهای فوق بر اساس راهنمای استاندارد متد با سه بار تکرار جهت اطمینان از نتایج آزمایش‌ها انجام گرفت (APHA, 2017).

۳-۱-۲. تعیین شاخص حجمی لجن^۱ (SVI)

برای کنترل قابلیت ته‌نشینی لجن از شاخص حجمی لجن (SVI) استفاده می‌گردد که بر حسب تعریف عبارتست از حجم یک گرم لجن پس از ۳۰ دقیقه ته‌نشین شدن. هر چه شاخص حجمی لجن کمتر باشد، فرایند ته‌نشینی و لخته‌سازی بهتر انجام می‌گیرد و هر چه این مقدار از حد متعارف بیشتر گردد باعث مشکلاتی در بهره‌برداری در تصفیه‌خانه فاضلاب خواهد شد (Leal et al., 2019; Mackenzie, 2019). مطالعات نشان داده است در بسیاری از موارد به‌کارگیری فرایند الکتروشیمی در تصفیه فاضلاب منجر به کاهش قابل ملاحظه پارامتر SVI و در مدت زمان کمتر نسبت به فرایند متعارف تصفیه فاضلاب شده است (Papadopoulos et al., 2019; Pandey et al., 2020; Mahesh et al., 2022; Rumky et al., 2020; Hu et al., 2022). مقدار SVI با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید (APHA, 2017).

رابطه ۶)

غلطت جامدات معلق مایع مخلوط (g/L) / حجم جامدات ته‌نشین شده (ml) پس از ۳۰ دقیقه = SVI

۳-۲-۲. مصرف انرژی سامانه

در فرایند الکتروشیمیایی دستیابی به بالاترین کارآمدی با حداقل مصرف انرژی و صرف حداقل هزینه اهمیت ویژه‌ای دارد. میزان انرژی مصرفی از معادله $Energy = VI_t / V_R$ محاسبه شده است که در آن V ولتاژ سامانه الکتروشیمی، I شدت جریان الکتریکی، t مدت زمان ماند و V_R حجم فاضلاب در سامانه می‌باشد (Ebba et al, 2021; Khodadadi et al., 2020).

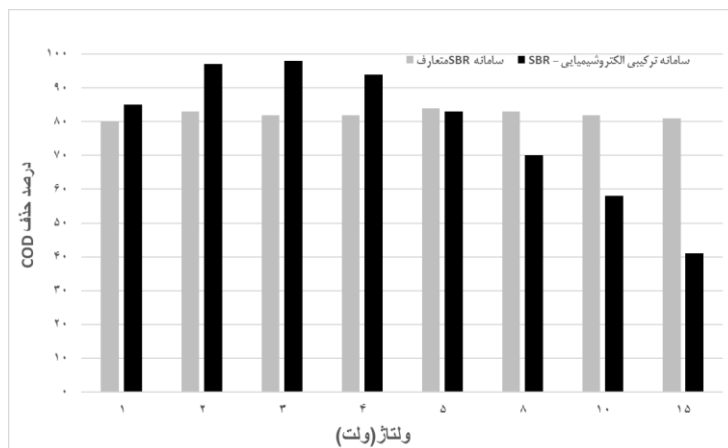
۳. بحث

ابتدا نتایج مقایسه کارآمدی دو پایلوت در خصوص حذف مواد آلی (COD) برای مشخص شدن محدوده بهینه ولتاژ ارائه گردیده است. سپس در این محدوده، درصد حذف فسفر و آمونیم در دو سامانه در ابتدا برای فاضلاب سنتتیک و سپس برای نمونه فاضلاب شهری تصفیه‌خانه در ولتاژهای بهینه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱-۱. فاضلاب سنتتیک

۳-۱-۱-۱. میزان حذف COD

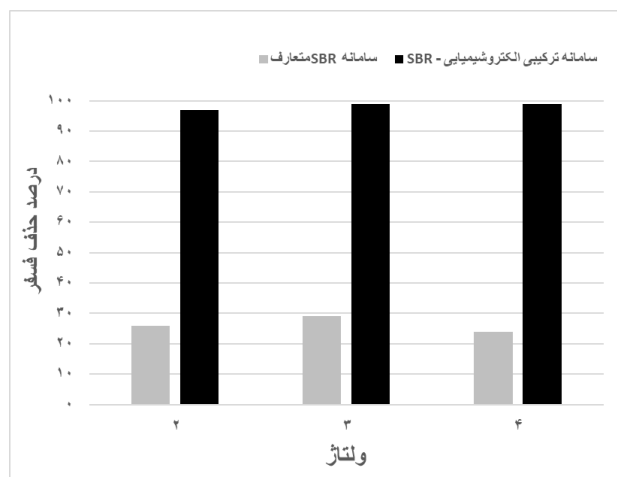
هنگامی که ولتاژ به ترتیب برابر با ۱۵، ۱۰، ۸ و ۵ بود (جریان ۰/۸، ۰/۱، ۰/۰۷ و ۰/۰۴ آمپر)، درصد حذف COD در مدت زمان ماند برابر ۸ ساعت در هر دو سامانه SBR متعارف و ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۸۱ و ۴۱، ۸۲ و ۵۸، ۸۳ و ۷۰، ۸۴ و ۸۳ درصد اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد در این ولتاژها، کارآمدی سامانه متعارف بهتر از سامانه ترکیبی با الکتروشیمی است. در نتیجه می‌توان گفت که در ولتاژهای بالاتر از ۵ به‌کارگیری فرایند الکتروشیمیایی نه تنها سبب ارتقای عملکرد سامانه نمی‌شود بلکه سبب کاهش عملکرد آن نیز گردیده است. دلیل آن را نیز می‌توان در وهله اول، تاثیرگذاری منفی و ایجاد اختلال در عملکرد میکروارگانیسم‌ها دانست. از جمله این تاثیرات بر میکروارگانیسم‌ها می‌توان به تاثیر اکسیدکنندگی و مرگ سلول‌ها به دلیل تولید مواد اکسیدکننده در واکنش الکتروشیمیایی، تراوا شدن غیرقابل برگشت غشاء سلولی و یا پاره شدن غشاء سلولی هنگام مواجهه با جریان الکتریسیته قوی اشاره نمود. بر همین اساس است که بهره‌گیری از ولتاژهای بالاتر (۵ تا ۲۵ ولت) به‌عنوان روشی موثر برای گندزدایی آب یا پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پیشنهاد شده است (Gheraout, 2017; Bayramoğlu et al., 2006). در ولتاژهای برابر ۱، ۲، ۳ و ۴ (جریان ۰/۰۷، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف COD پس از مدت زمان ماند برابر ۸ ساعت در سامانه ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب به ۹۴، ۹۸، ۹۷ و ۸۵ درصد افزایش یافت در حالی که کارآمدی سامانه متعارف پس از این مدت به مقادیر ۸۲، ۸۳، ۸۰ و ۸۳ رسید. نتایج فوق بیان‌کننده این است که در ولتاژهای ۴، ۳ و ۲ بهبود قابل توجه عملکرد سامانه در این رابطه حاصل می‌گردد و در نتیجه، این ولتاژها به عنوان ولتاژ بهینه مطرح می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳. منحنی نتایج آزمایش مقایسه‌ای میزان حذف COD در ولتاژهای ۱ تا ۱۵ (مدت زمان ماند ۸ ساعت، COD ورودی برابر ۵۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، pH=۶/۹) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۱-۲. میزان حذف فسفر

در ولتاژهای ۲، ۳ و ۴ (جریان ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف فسفر در مدت زمان ماند برابر ۵ ساعت در هر دو سامانه مورد بررسی متعارف و الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۲۶ و ۹۷، ۲۹ و ۹۹، ۲۴ و ۹۹ اندازه‌گیری شد. گرچه ممکن است در ولتاژهای بالاتر میزان کارآمدی سامانه الکتروشیمیایی افزایش یابد و سامانه در مدت زمان کوتاه‌تری به این میزان درصد حذف برسد ولی با توجه به اولویت حذف COD از سامانه، میزان حذف فسفر در محدوده ولتاژ بهینه عملکرد سامانه در حذف COD بررسی شد (شکل ۴). نتایج مطالعه‌ای که توسط گوو و همکاران (سال ۲۰۲۰) انجام شد نیز نشان داد که در چگالی جریان ۸ میلی‌آمپر با استفاده از الکتروکد آلومینیوم، در مدت زمان ماند ۱/۵ ساعت، میزان حذف فسفر برابر با ۱۰۰ درصد بود (Guo et al., 2020).

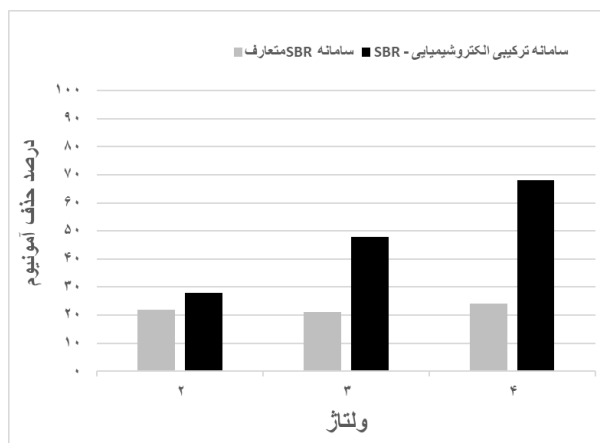


شکل ۴. منحنی نتایج آزمایش‌های مقایسه‌ای میزان حذف فسفر دو سامانه آزمایشگاهی در ولتاژهای بین ۱ و ۵ (مدت زمان ماند ۵ ساعت، فسفر ورودی برابر ۵ میلی‌گرم بر لیتر، pH=۶/۹) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۱-۳. میزان حذف آمونیم

در ولتاژهای ۲، ۳ و ۴ (جریان ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف آمونیم در مدت زمان ماند برابر ۸ ساعت در دو سامانه متعارف SBR و ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۲۲ و ۲۸، ۲۱ و ۴۸، ۲۴ و ۶۸ اندازه‌گیری شد. در این رابطه نیز گرچه ممکن است

در ولتاژهای بالاتر میزان کارآمدی سامانه الکتروشیمیایی افزایش یابد و سامانه در مدت زمان کوتاه‌تری به این میزان درصد حذف برسد و یا در این مدت زمان، میزان حذف افزایش یابد ولی با توجه به اولویت حذف COD از سامانه، میزان حذف آمونیم در محدوده ولتاژ بهینه عملکرد سامانه در حذف COD بررسی شد (شکل ۵).

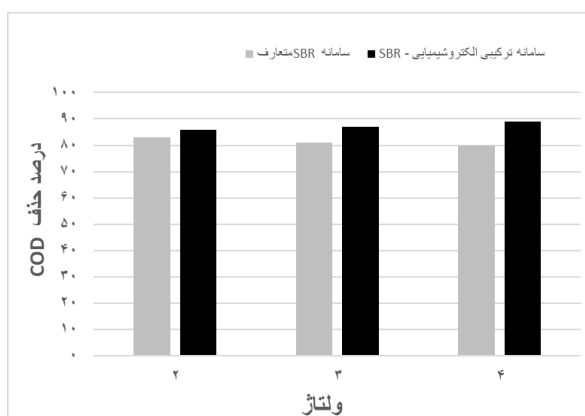


شکل ۵. منحنی نتایج آزمایش مقایسه‌ای میزان حذف آمونیم در ولتاژهای بین ۱ و ۵ (مدت زمان ماند ۸ ساعت، آمونیم ورودی برابر ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، pH=۶/۹) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۲-۳. فاضلاب نمونه‌گیری شده از تصفیه‌خانه فاضلاب

۱-۲-۳. میزان حذف COD

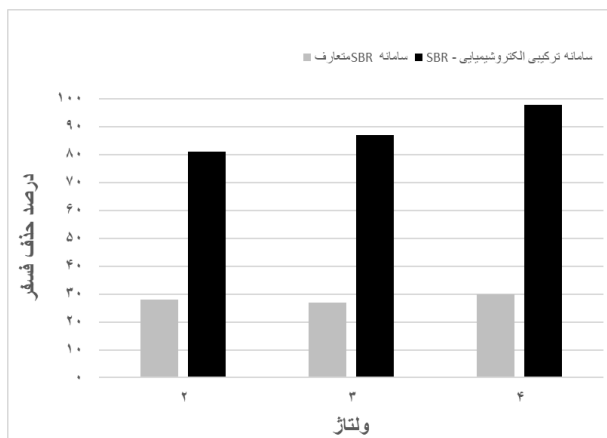
در ولتاژهای ۲، ۳ و ۴ (جریان ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف COD در مدت زمان ماند برابر ۸ ساعت در دو سامانه متعارف SBR و ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۸۳ و ۸۶، ۸۱ و ۸۷، ۸۰ و ۸۹ اندازه‌گیری شد. نتایج فوق بیان‌کننده این است که در این ولتاژها همچنان اعمال فرایند الکتروشیمیایی باعث افزایش عملکرد سامانه در رابطه با حذف میزان COD از فاضلاب می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶. منحنی نتایج آزمایش مقایسه‌ای میزان حذف COD دو سامانه آزمایشگاهی در ولتاژهای بین ۱ و ۵ (مدت زمان ماند ۸ ساعت، COD ورودی برابر ۳۶۸ میلی‌گرم بر لیتر، pH= ۷/۲) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۲-۲-۳. میزان حذف فسفر

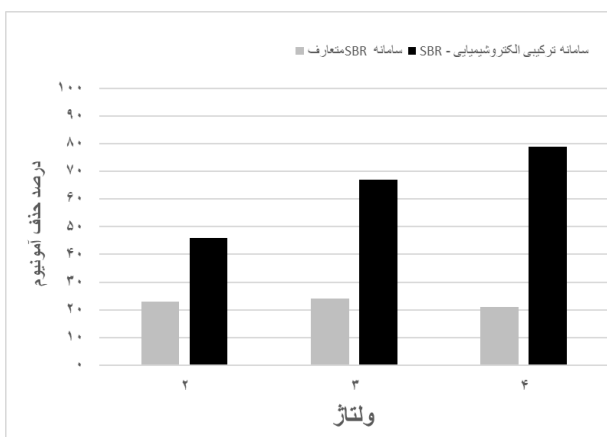
هنگامی که ولتاژ به ترتیب برابر ۲، ۳ و ۴ بود (جریان ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف فسفر در مدت زمان ماند برابر ۵ ساعت (مدت زمان بهینه حذف فسفر از نمونه فاضلاب سنتتیک) در دو سامانه متعارف SBR و ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۲۸ و ۸۱، ۲۷ و ۸۷، ۳۰ و ۹۴ اندازه‌گیری شد (شکل ۷).



شکل ۷. منحنی نتایج آزمایش مقایسه‌ای میزان حذف فسفر در ولتاژ بین ۱ و ۵ (مدت زمان ماند ۶ ساعت، غلظت فسفر ورودی برابر ۷/۱ میلی‌گرم بر لیتر، $pH=7/2$) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۲-۳. میزان حذف آمونیم

در ولتاژهای ۲، ۳ و ۴ ولت (جریان ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ آمپر)، درصد حذف آمونیم در مدت زمان ۸ ساعت در دو سامانه متعارف SBR و ترکیبی SBR-الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۲۳ و ۴۶، ۲۴ و ۶۷ و ۲۱ و ۷۹ اندازه‌گیری شد (شکل ۸). یائو و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی میزان حذف آمونیم از فاضلاب صنعت رنگرزی به کمک سامانه الکتروشیمیایی، با بررسی تاثیر پارامترهای گوناگون، در شدت جریان و مقدار pH مشابه (جریان ۰/۰۲ آمپر و مقدار pH بین ۶ و ۸) نتایج مشابهی گزارش کرده‌اند (Yao et al., 2019).



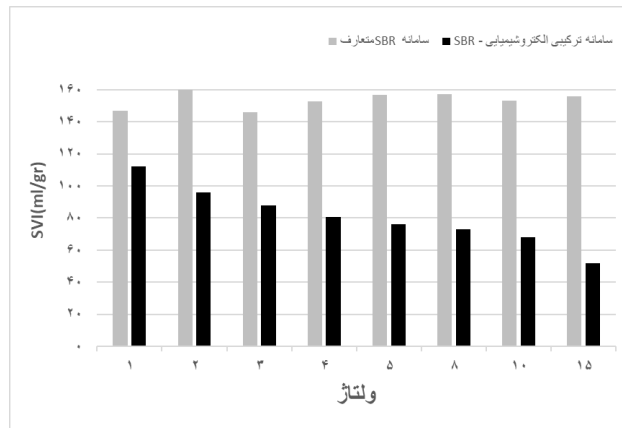
شکل ۸. منحنی نتایج آزمایش‌های مقایسه‌ای میزان حذف آمونیم در ولتاژهای بین ۱ و ۵ (مدت زمان ماند ۸ ساعت، غلظت آمونیم ورودی برابر ۳۴/۲۸ میلی‌گرم بر لیتر، $pH=7$) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۳. شاخص حجمی لجن (SVI)

در طی انجام آزمایش‌ها مشاهده شد که به کارگیری فرآیند الکتروشیمیایی باعث کاهش چشمگیر مقدار SVI لجن در سامانه گردید. همچنین در صورت اعمال ولتاژهای بالاتر، مقدار SVI در مدت زمان کوتاه‌تر و به مقدار بیشتری بهبود می‌یابد. شکل ۹ نتایج مقایسه‌ی مقادیر SVI در دو سامانه متعارف و الکتروشیمیایی را در ولتاژهای ۱ تا ۱۵ ولت را نشان می‌دهد. بالاترین مقدار مربوط به ولتاژ ۱۵ می‌باشد که SVI دو سامانه متعارف و الکتروشیمیایی به ترتیب برابر با ۱۵۶ و ۵۲ میلی‌لیتر بر گرم تعیین گردید. مقادیر SVI در دو سامانه متعارف و الکتروشیمیایی در ولتاژهای ۱ تا ۱۵ ولت در جدول (۳) مشاهده می‌گردد.

جدول ۳. مقادیر SVI در دو سامانه متعارف و الکتروشیمیایی در ولتاژهای ۱ تا ۱۵ ولت (منبع: یافته‌های تحقیق)

ولتاژ (ولت)	SVI در سامانه متعارف SBR	SVI در سامانه -SBR الکتروشیمیایی
۱	۱۴۷	۱۱۲
۲	۱۶۰	۹۶
۳	۱۴۶	۸۸
۴	۱۵۲/۵	۸۰/۵
۵	۱۵۶/۸	۷۶
۸	۱۵۷/۴	۷۳
۱۰	۱۵۳	۶۸
۱۵	۱۵۶	۵۲



شکل ۹. منحنی نتایج مقادیر SVI در ولتاژهای ۱ تا ۱۵ (مدت زمان ماند ۶ ساعت، حجم نمونه لجن ورودی برابر ۶۰۰ میلی لیتر، pH= ۷/۲) (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۴. انرژی مصرفی سامانه

با افزایش ولتاژ، میزان شدت جریان نیز فزونی می‌یابد. نظر به این که شدت جریان و ولتاژ در رآکتورهای الکتروشیمیایی به عنوان عوامل هزینه‌ای در هنگام بهره‌برداری حائز اهمیت می‌باشند، تعیین شده و مورد توجه قرار می‌گیرند. جدول (۴) میزان انرژی مصرفی سامانه الکتروشیمیایی را در ولتاژهای بهینه در مدت زمان ۸ ساعت نشان می‌دهد (Tian et al., 2016).

جدول ۴. انرژی مصرفی سامانه (منبع: یافته‌های تحقیق)

ولتاژ (ولت)	شدت جریان (آمپر)	انرژی مصرفی برای ۱m ³ فاضلاب (کیلووات ساعت)
۵	۰/۰۴	۱/۷۸
۴	۰/۰۲	۰/۷۲
۳	۰/۰۱	۰/۲۷
۲	۰/۰۰۹	۰/۱۶
۱	۰/۰۰۷	۰/۰۶۳

۴. نتیجه‌گیری

امروزه به کارگیری روش‌های ترکیبی (هیبریدی) به عنوان رویکردی کارآمد برای رفع نقاط ضعف روش‌های متعارف تصفیه فاضلاب مورد

توجه ویژه محققین و دست‌اندرکاران صنعت آب و فاضلاب قرار دارد. در این راستا، ارتقای عملکردی روش بیولوژیکی راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) با استفاده از فناوری الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی که در دو بخش، با استفاده از فاضلاب سنتتیک و واقعی انجام پذیرفت، نشان می‌دهند که ارتقای این سامانه متعارف تصفیه بیولوژیکی فاضلاب از طریق به‌کارگیری هم‌زمان روش الکتروشیمیایی منجر به افزایش کارآمدی در حذف بار آلی، فسفر و آمونیوم به ویژه در ولتاژهای کمتر از ۵ ولت می‌گردد (حذف کارآمد بار آلی در ولتاژهای ۲ تا ۴ ولت). علاوه بر این، نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که تحت شرایط بهینه راهبری، به‌کارگیری روش الکتروشیمیایی منجر به کاهش مدت زمان ماند، بهبود قابل توجه مقدار شاخص حجمی لجن (SVI) و مصرف بهینه انرژی می‌گردد. این سه مورد بهبود یاد شده با توجه به تجربیات موجود، از نظر طراحی و راهبری بهینه تصفیه‌خانه‌های به روش راکتور ناپیوسته متوالی از اهمیت به‌سزایی برخوردارند. گرچه نتایج این بررسی در مقیاس آزمایشگاهی نشانگر راهکاری کارآمد و امیدوارکننده هستند، ادامه این بررسی‌ها در مقیاس پایلوت نیمه صنعتی الزامی است. همچنین با توجه به این که دو جنبه اساسی یعنی ارتقای عملکردی تصفیه‌خانه‌های موجود و اجرای تصفیه‌خانه‌های جدید مطرح می‌باشند، لازم است که دو رویکرد اصلی یعنی روش‌های ترکیبی (تکمیلی) با استفاده از فناوری‌های متعارف مانند جذب، غشایی، ازوناسیون و بیولوژیکی چندمرحله‌ای از یک سو و روش‌های ترکیبی با استفاده از فناوری‌های نوین همچون اکسیداسیون پیشرفته و بیوالکتروشیمیایی از سوی دیگر، در پژوهش‌های آینده پیگیری شوند. تبدیل این گونه راکتورهای بیولوژیکی به راکتورهای بیوالکتروشیمیایی با هدف بازیافت آب، تولید انرژی یا بازیابی منبع انرژی، بازیافت مواد مغذی، تولید محصولات با ارزش افزوده، یکی از رویکردهای مورد توجه آینده‌نگر محسوب می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل، دستیابی به راهکارهای بهینه را بر مبنای همبست آب-انرژی-اقتصاد-غذا و محیط‌زیست میسر می‌سازد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها؛ زهرا ابوالحسن‌زاده؛ تهیه گزارش پژوهش؛ زهرا ابوالحسن‌زاده، گایگ بدلیانس قلی‌کندی؛ تحلیل داده‌ها؛ زهرا ابوالحسن‌زاده، گایگ بدلیانس قلی‌کندی

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

رمضانی، مائده؛ رضایی، حسن؛ جهانشاهی، محسن. و آبیاری، هاجر. (۱۴۰۳). بررسی تصفیه‌پذیری مخلوط شیرابه زباله و فاضلاب شهری با استفاده از آرایش‌های مختلف الکترودها در فرایند انعقاد الکتروشیمیایی. *مجله تحقیقات سلامت در جامعه*، ۱۰(۱)، ۱۶-۲۹.

نظری‌علوی، علیرضا؛ سجادی، سیدعلی‌اکبر؛ میرزایی، محمد. و حسینیان، حامد. (۱۴۰۱). تصفیه فاضلاب کارخانجات نساجی به روش انعقاد الکتریکی. *مجله آب و فاضلاب*، ۳۳(۴)، ۱۳۳-۱۴۳.

References

- Ahmed, D., ELKaramany, H. M., & Alged, A. (2024). Enhancement of SBR's treatment under organic shock load. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4477767/v1>.
- Ano, J., Assémian, A. S., Yobouet, Y. A., Adouby, K., & Drogui, P. (2019). Electrochemical removal of phosphate from synthetic effluent: A comparative study between iron and aluminum by using experimental design methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.003>
- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Washington DC: American Public Health Association*
- Askari, S. S., Giri, B. S., Basheer, F., Izhar, T., Ahmad, S. A., & Mumtaz, N. (2024). Enhancing sequencing batch reactors for efficient wastewater treatment across diverse applications: a comprehensive review. *Environmental Research*, 119656. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119656>
- Bayramoğlu, M., Kobya, M., Eyvaz, M. & Senturk, E. (2006). Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Separation and Purification Technology*, No.51.404-408. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.03.003>.
- Bera, S. P., Godhaniya, M., & Kothari, C. (2022). Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: A review. *Journal of Basic Microbiology*, 62(3-4), 245-259. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100259>
- Ben-Sasson, M.; Zidon, Y.; Calvo, R. & Adin, A. (2013). Enhanced removal of natural organic matter by hybrid process of electrocoagulation and dead-end microfiltration. *Chemical Engineering Journal*, 232, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.101>.
- Cherchi, C.; Badruzzaman, M. & Oppenheimer, J.; Bros, Ch. & Jacangelo, J. (2015). Energy and water quality management systems for water utility's operations: A review. *Journal of environmental management*, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.051>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental chemistry letters*, 17, 145-155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- da Silva, L. F., Barbosa, A. D., de Paula, H. M., Romualdo, L. L., & Andrade, L. S. (2016). Treatment of paint manufacturing wastewater by coagulation/electrochemical methods: proposals for disposal and/or reuse of treated water. *Water research*, 101, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.006>
- Delil, A. D., & Gören, N. (2019). Investigation of electrocoagulation and electrooxidation methods of real textile wastewater treatment. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 20(1), 80-91. <https://doi.org/10.18038/auabda.445716>.
- Deng, M.; Wu, K.; Yang, T.; Yu, D.; Liu, G.; Gong, S.; Sun, D. & Petru, M. (2020). Construction of Novel Electro-Fenton Systems by Magnetically Decorating Zero-Valent Iron onto RuO₂-IrO₂/Ti Electrode for Highly Efficient Pharmaceutical Wastewater Treatment, *Water*, <https://doi.org/10.3390/w14071044>
- Deshpande, B.D.; Agrawal, P.; Yenkie, M. & Dhoble, S J. (2020). Prospective of nanotechnology in degradation of waste water: A new challenge. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 22, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.nanos.2020.100442>
- Dutta, A., & Sarkar, S. (2015). Sequencing batch reactor for wastewater treatment: recent advances. *Current Pollution Reports*, 1, 177-190. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0016-y>
- Ebba, M.; Asaithambi, P. & Alemayehu, E. (2021). Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation for wastewater treatment, *Applied Water Science*, <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>
- El-Sonbati, M. A., El-Battrawy, O., Elawadly, E., & Hegazy, T. (2020). Pretreatment of high organic load dairy industry wastewater by chemical coagulation and advanced oxidation processes. *Catrina: The International Journal of Environmental Sciences*, 21(1), 53-60.
- Fang, D., & Chen, B. (2017). Linkage analysis for the water-energy nexus of city. *Applied energy*, 189, 770-779. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.020>.
- Fernández, L.; Gamallo, M.; González-Gómez, M.A.; Vázquez-Vázquez, C.; Rivas, J.; Pintado, M. & Moreira, M.T. (2019). Insight into antibiotics removal: Exploring the photocatalytic performance of a Fe₃O₄/ZnO nanocomposite in a novel magnetic sequential batch reactor. *Journal of Environmental Management*, 237, 595-608. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.089>.
- Garrido-Cardenas, J. A.; Esteban-García, B.; Agüera, A.; Sánchez-Pérez, J. A. & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Process and Their Worldwide Research Trends. *International journal of environmental research and public health*, 17 (1), 170. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170>
- Ghernaout, Dj. (2017). Microorganisms' Electrochemical Disinfection Phenomena. *EC Microbiology*, 160-169.
- Guo, Y., Qi, P. S., & Liu, Y. Z. (2017, May). A review on advanced treatment of pharmaceutical wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 63, No. 1, p. 012025). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/63/1/012025>

- Guo, M., Feng, L., Liu, Y., & Zhang, L. (2020). Electrochemical simultaneous denitrification and removal of phosphorus from the effluent of a municipal wastewater treatment plant using cheap metal electrodes. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(4), 1095-1105. <https://doi.org/10.1039/D0EW00049C>
- Hassan, M. & El Nemr, A. (2017). Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2, 27-35. <https://doi.org/10.11648/j.ijpp.20170101.15>
- Hu, D., Liu, L., Liu, W., Yu, L., Dong, J., Han, F., ... & Zhao, L. (2022). Improvement of sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in the treatment of pesticide wastewater by electrochemical anaerobic membrane bioreactor. *Water Research*, 213, 118153. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118153>
- Jagaba, A. H.; Kutty, S. R. M.; Lawal, I. M.; Abubakar, S.; Hassan, I.; Zubairu, I.; Umaru, I.; Abdurrasheed, A. S.; Adam, A. A.; Ghaleb, A. A. S.; Almahbashi, N. M. Y.; Al-Dhawi, B. N. S. & Noor, A. (2021). Sequencing batch reactor technology for landfill leachate treatment: A state-of-the-art review, *Journal of environmental management*, 282, 111946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111946>
- Khalaf, A. H., Ibrahim, W. A., Fayed, M., & Eloffy, M. G. (2021). Comparison between the performance of activated sludge and sequence batch reactor systems for dairy wastewater treatment under different operating conditions. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1433-1445. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.062>
- Khosravi, A.R.; Karimi, M.; Ebrahimi, H. & Fallah, N. (2020). Sequencing batch reactor/nanofiltration hybrid method for water recovery from textile wastewater contained phthalocyanine dye and anionic surfactant, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103701. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.103701>
- Kobyas, M.; Soltani, R.; Omwene, Ph. & Khataee, A.R. (2020). A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: Reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms, *Chemical Environmental Technology & Innovation*, 17, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100519>
- Leal, C., Val del Río, Á.; Mesquita, D.; Amaral, A.; Castro, P. & Ferreira, E. (2019). Sludge volume index and suspended solids estimation of mature aerobic granular sludge by quantitative image analysis and chemometric tools, *Separation and Purification Technology*, 234, 116049. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116049>
- Longo, S.; d'Antoni, B.M.; Bongards, M. Chaparro, A.; Cronrath, A.; Fatone, F.; Lema, J.M.; Mauricio-Iglesias, M.; Soares, A. & Hospid, A. (2016). Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement, *Applied Energy*. 179, 1251-1268 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043>
- Mackenzie, D. (2019). *Water and Wastewater Engineering : Design Principles and Practice*, Second Edition.
- Ma, D.; Yi, H.; Lai, C.; Liu, X.; Huo, X.; An, Z.; Li, L.; Fu, Y.; Li, B.; Zhang, M.; Qin, L.; Liu, S. & Yang, L. (2021). Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment. *Chemosphere*, 275, 130104. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130104>
- Mahesh, S., Shivaprasad, K. S., & Sanjana, M. (2022). Ayurvedic hospital wastewater degradation using electrochemical treatment. *Water Science and Technology*, 85(6), 1855-1877. <https://doi.org/10.2166/wst2022.079>
- Miklos, D. B.; Remy, C.; Jekel, M.; Linden, K. G.; Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment- A critical review *Water research*. 139. 118- 131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>
- Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., & Iftimi, A. (2018). Energy intensity modeling for wastewater treatment technologies. *Science of the Total Environment*, 630, 1565-1572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.327>
- Muddemann, T., Haupt, D., Sievers, M., & Kunz, U. (2019). Electrochemical reactors for wastewater treatment. *ChemBioEng Reviews*, 6(5), 142-156. <https://doi.org/10.1002/CHEM.201900021>
- Nair, G., Soni, B., & Shah, M. (2023). A comprehensive review on electro-oxidation and its types for wastewater treatment. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100980. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100980>
- Nie, Z., Huo, M., Li, Q., Shi, X., Ma, Y., Yu, G., ... & Bian, D. (2022). Sewage treatment effect of AOA-SBR under different C/P value and its mechanism of nitrogen and phosphorus removal. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102774>
- Pan, Z., Wei, H., Qiu, C., Yang, Q., Liang, Y., Huang, Z., & Li, J. (2024). Two-stage sequencing batch reactors with added iron shavings for nutrient removal and aerobic sludge granulation treating real wastewater with low carbon to nitrogen ratios. *Bioresour. Technol.*, 396, 130380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130380>
- Pandey, N., & Thakur, C. (2020). Study on treatment of paper mill wastewater by electrocoagulation and its sludge analysis. *Chemical Data Collections*, 27, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100390>
- Papadopoulos, K.P.; Argyriou, R.; Economou, C.N.; Charalampous, N.; Dailianis, S.; Tatoulis, T.I.; Tekerlekopoulou, A.G. & Vayenas, D.V. (2019). Treatment of Printing Ink Wastewater Using Electrocoagulation. *Journal of Environmental Management.*, 237, 442-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.080>

- Rajaniemi, K., Hu, T., Nurmesniemi, E. T., Tuomikoski, S., & Lassi, U. (2021). Phosphate and ammonium removal from water through electrochemical and chemical precipitation of struvite. *Processes*, 9(1), 150. <https://doi.org/10.3390/pr9010150>
- Rodrigues, M.; Paradkar, A.; Sleutels, T.; Ter Heijne, A.; Buisman, C. J. N.; Hamelers, H. V. M. & Kuntke, P. (2021). Donnan Dialysis for scaling mitigation during electrochemical ammonium recovery from complex wastewater. *Water Research*, 201, 117260. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117260>
- Rumky, J., Tang, W. Z., & Sillanpää, M. (2020). Statistical analysis of anode efficiency in electrochemical treatment of wastewater and sludge. *Environmental Processes*, 7(4), 1041-1064. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00457-0>
- Saravanan, A.; Senthil Kumar, P.; Jeevanantham, S.; Karishma, S.; Tajsabreen, B.; Yaashikaa, P. R. & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development, *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Shahedi, A. J. C. O. I. E., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. J. C. O. I. E. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current opinion in electrochemistry*, 22, 154-169. <https://doi.org/j.coelec>.
- Singh, G. K., Singh, N. B., Shukla, S. P., & Markandeya. (2019). Remediation of COD and color from textile wastewater using dual stage electrocoagulation process. *SN Applied Sciences*, 1(9), 1000. <https://doi.org/10.1007/s42452.019.1046.7>
- Song, P., Yang, Z., Zeng, G., Yang, X., Xu, H., Wang, L., ... & Ahmad, K. (2017). Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 317, 707-725. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.086>
- Suman, H., Sangal, V. K., & Vashishtha, M. (2021). Treatment of tannery industry effluent by electrochemical methods: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1438-1444. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.300>
- Tarpeh, W. A.; Barazesh, J. M.; Cath, T. Y. & Nelson, K. L. (2018). Electrochemical Stripping to Recover Nitrogen from Source-Separated Urine. *Environmental science & technology*. 52(3). 1453- 1460 <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05488>
- Tian, Y., He, W., Zhu, X., Yang, W., Ren, N., & Logan, B. E. (2016). Energy efficient electrocoagulation using an air-breathing cathode to remove nutrients from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 292, 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.004>
- Yao, J., Mei, Y., Xia, G., Lu, Y., Xu, D., Sun, N., ... & Chen, J. (2019). Process optimization of electrochemical oxidation of ammonia to nitrogen for actual dyeing wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16), 2931. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162931>.
- Zailani, L. W. M., & Zin, N. S. M. (2018). *Application of Electrocoagulation In Various Wastewater And Leachate Treatment-A Review*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012052.
- Zwane, B. N., Orimolade, B. O., Koiki, B. A., Mabuba, N., Gomri, C., Petit, E., ... & Arotiba, O. A. (2021). Combined electro-fenton and anodic oxidation processes at a sub-stoichiometric titanium oxide (Ti4O7) ceramic electrode for the degradation of tetracycline in water. *Water*, 13(19), 2772. <https://doi.org/10.3390/w13192772>