The Optimization of Electrocoagulation Process Efficiency in the Removal of Amoxicillin Antibiotic and COD from Aqueous Solutions and Hospital Wastewater under Optimal Conditions: A Case Study of Alimoradian Hospital, Nahavand

Gholamreza Karim Mehrabankhahi [1], Mostafa Leili [2]; Reza Shokooni [3], Alireza Rahmani [4], Ghasem Azarian [5], Nasrin Shirmohammadi Khorram [6], Mahmood Razavi [7]

1.MSc Student, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0002-1372-4505

2. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. (Corresponding Author), Tel: 8138380026, Email: mostafa.leili@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6209-0038

3. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0002-5358-8632

4. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0001-9321-8073

5. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0001-8067-3405

6. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0002-3800-9575

7. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. ORCID: 0000-0002-5714-5505

ABSTRACT

Background and Aim: Amoxicillin antibiotic is one of the antibiotics which is used in medicine and veterinary medicine to treat bacterial infectious diseases. In this study, a special electrochemical cell design was used as it could integrate the process units and the operation units to reduce COD and amoxicillin antibiotic residues from the wastewater of Alimoradian Hospital. Also, to optimize the operational parameters, the central composite design of response surface methodology (RSM) was used.

Materials and Methods: This experimental study was conducted in two parts. In the first stage, synthetic wastewater was prepared from Amoxicillin antibiotics to investigate the effect of various parameters such as reaction time, initial antibiotic concentration, current density, and pH on the efficiency of the method. In the second stage, the efficiency of the method in removing the antibiotic and reducing COD from the actual wastewater of Alimoradian hospital was evaluated.

Results: Using the RSM, the optimal conditions of the laboratory findings were determined as follows: reaction time = 30 min, pH = 7.5, current density = 2.31 mA/cm^2, and initial concentration of amoxicillin = 54.66 mg/L. Under these conditions, the removal amount of amoxicillin was 90.56%. The results also showed that under optimal conditions, the removal rate of COD and TOC from synthetic wastewater is 65.5% and 44.5%, respectively, and in the effluent of Alimoradian hospital is 47.7% and 38%, respectively. The reason for this difference is probably due to the presence of some resistant compounds in the real wastewater.

Conclusion: This experimental study showed that the combined electrocoagulation process can be a more effective method in removing the amoxicillin antibiotic and COD from aqueous solutions and hospital wastewater.

Keywords: Electrocoagulation process; Optimization; Alimoradian hospital; RSM-CCD

Received: Mar 15, 202022 **Accepted:** July 19, 2022

How to cite the article: Gholamreza Karim Mehrabankhahi; Mostafa Leili; Reza Shokooni; Alireza Rahmani; Ghasem Azarian; Nasrin Shirmohammadi Khorram; Mahmood Razavi. The Optimization of Electrocoagulation Process Efficiency in the Removal of Amoxicillin Antibiotic and COD from Aqueous Solutions and Hospital Wastewater under Optimal Conditions: A Case Study of Alimoradian Hospital, Nahavand .ŚJKU 2023;27(1):135-155.

Copyright © 2018 the Author (s). Published by Kurdistan University of Medical Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial License 4.0 (CCBYNC), where it is permissible to download, share, remix, transform, and buildup the work provided it is properly cited. The work cannot be used commercially without permission from the journal

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان / دوره بیست و هشت / فروردین اردیبهشت ۱۴۰۲/۱۵۵-۱۳۵

بهینه‌سازی کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین و غلظت COD ناشی از آن از محلول‌های آبی و فاضلاب بیمارستانی در شرایط بهینه: مطالعه موردی بیمارستان علیمرادیان نهاوند

غلامرضا کریم مهربانخواهی [۱]؛ مصطفی لیلی [۲*]؛ رضا شکوهی [۳]؛ علیرضا رحمانی [۴]؛ قاسم آذریان [۵]؛ نسرین شیرمحمدی خرم [۶]؛ محمود رضوی [۷]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گرایش بهره برداری و نگهداری از تأسیسات بهداشتی شهری، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۴۵۰۵-۱۳۷۲-۰۰۰۲-۰۰۰۰

۲. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۰۰۳۸-۶۲۰۹-۰۰۰۱-۰۰۰۰

۳. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. پست الکترونیک: m.leili@umsha.ac.ir mostafa.leili@gmail.com;

تلفن/ فکس: ۰۸۱۱۸۳۸۰۳۹۸ ؛ کد ارکید: ۸۶۳۲-۵۳۵۸-۰۰۰۲-۰۰۰۰

۴. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۳۴۰۵-۸۰۶۷-۰۰۰۱-۰۰۰۰

۵. استادیار، معاونت تحقیقات و فناوری، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۹۳۲۱-۸۰۷۳-۰۰۰۱-۰۰۰۰

۶. کارشناس ارشد، گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. کد ارکید: ۹۵۷۵-۳۸۰۰-۰۰۰۲-۰۰۰۰

۷. کارشناس بهداشت محیط بیمارستان علیمرادیان نهاوند. کد ارکید: ۵۵۰۵-۵۷۱۴-۰۰۰۲-۰۰۰۰

چکیده

زمینه و هدف: آموکسی‌سیلین آنتی‌بیوتیکی است که در پزشکی و دامپزشکی برای درمان عفونت‌های باکتریایی استفاده می‌شود. هدف این مطالعه طراحی سل الکتروشیمیایی ویژه‌ای بود که بتوان واحد فرآیندی و واحدعملیاتی را با هم ادغام نمود تا امکان کاهش غلظت‌های COD و حذف آنتی بیوتیک از فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند فراهم گردد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش تجربی در دو بخش انجام گرفت. در مرحله اول فاضلاب سنتتیک تهیه شد و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله زمان ماند، غلظت اولیه آنتی بیوتیک، دانسیته جریان، نوع الکترود و pH بر کارایی روش مورد بررسی قرار گرفت. برای بهینه سازی پارامترهای راهبری از روش طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ استفاده شد. در مرحله دوم، کارایی روش در حذف آنتی‌بیوتیک و کاهش COD از فاضلاب واقعی بیمارستان علیمرادیان نهاوند مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی، شرایط بهینه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر تعیین شد: زمان واکنش ۳۰ دقیقه، pH = ۷/۵ ، دانسیته‌ی جریان (CD) ۲/۳۱ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع و غلظت اولیه‌ی آموکسی سیلین ۵۴/۶۶ میلی گرم بر لیتر. کارایی حذف آزمایشگاهی آنتی بیوتیک آموکسی سیلین ۹۰/۵۶٪ بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، میزان حذف COD و TOC از فاضلاب سنتتیک به ترتیب ۶۵/۵ و ۴۴/۵ درصد و در پساب واقعی بیمارستان علیمرادیان نهاوند به ترتیب ۴۷/۷ و ۳۸ درصد بدست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد میزان حذف COD و TOC از فاضلاب سنتتیک بیشتر از پساب واقعی می‌باشد که دلیل این اختلاف راندمان، احتمالاً به خاطر وجود برخی از ترکیبات مقاوم در پساب واقعی می‌باشد. این مطالعه تجربی نشان داد فرآیند الکتروکواگولاسیون یکجا می‌تواند روش موثرتری در حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین و غلظت COD ناشی از آن از محلول‌های آبی و فاضلاب بیمارستانی باشد.

کلمات کلیدی: فرآیند الکتروشیمیایی، بهینه سازی، بیمارستان علیمرادیان، روش پاسخ سطح-طرح مرکب مرکزی (**RSM-CCD**)

وصول مقاله:۱۴۰۰/۱۲/۱۴ اصلاحیه نهایی: ۱۴۰۱/۴/۱۹ پذیرش:۱۴۰۱/۴/۲۸

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

مقدمه

با رشد فزاینده جمعیت و گسترش صنعت و کشاورزی در سال‌های اخیر و کمبود آب سالم در جهان، ضرورت تصفیه و بازیابی مجدد آب‌های مصرفی اهمیت خاصی پیداکرده است. در سال‌های اخیر، حضور ترکیبات فعال دارویی ازجمله آنتی‌بیوتیک‌ها به‌عنوان آلاینده های نوظهور در محیط به‌خصوص منابع آبی نگرانی‌هایی را ایجاد نموده است(۱). آنتی‌بیوتیک‌ها حدود ۱۵٪ کل داروها را به خود اختصاص می‌دهند. سالانه صد هزار تا دویست هزار تن آنتی‌بیوتیک به‌طور گسترده در پزشکی، دامپزشکی و پرورش آبزیان به‌منظور پیشگیری، درمان عفونت‌های میکروبی و افزایش رشد دام‌ها و آبزیان در جهان مصرف می‌شود، که ورود آنتی‌بیوتیک‌ها و همچنین متابولیت‌های حاصل از آن‌ها در محیط‌های آبی در سال‌های اخیر نگرانی‌های زیادی را به دنبال داشته است(۳ و ۲). حضور آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های آبی به‌عنوان یک نگرانی اصلی دیگر در ارتباط با آسیب به اکوسیستم‌ها مطرح است، زیرا پتانسیل اکوسیستم را دچار دگرگونی می‌نماید. مطالعات گوناگون نیز نشان داده‌اند که آنتی‌بیوتیک‌ها تقریباً غیرقابل تجزیه بیولوژیکی هستند. گروه‌های مختلفی از آنتی‌بیوتیک‌ها در آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی، فاضلاب شهری، آب آشامیدنی و حتی در خاک یافت می‌شوند. اهمیت عمده آنها، به دلیل ایجاد مقاومت باکتریایی بوده، و لذا به این‌ترتیب تهدیدی برای سلامتی بشر محسوب می‌شوند(۴). این آنتی‌بیوتیک‌ها می‌توانند پس از ورود به محیط‌زیست به زنجیره غذایی وارد شده و بر سلامت انسان تأثیرگذار باشند و موجب ایجاد مقاومت باکتریایی گردند(۵). اگرچه غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها و مواد دارویی در آب شرب در حد نانوگرم و میکروگرم است، اما بیشتر از ۸۰ نوع مختلف مواد دارویی فعال در محیط‌زیست در غلظت‌های تا حد میکروگرم در خروجی واحدهای تصفیه فاضلاب، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و آب شرب یافت شده است(۶). حدود ۹۰-۳۰٪ آنتی‌بیوتیک‌ها در بدن انسان و حیوانات متابولیزه نمی‌شوند و در نهایت از طریق ادرار و مدفوع به شکل فعال به محیط‌زیست وارد می‌شوند. همچنین درصد بالایی از ترکیبات آنتی‌بیوتیک مورد مصرف انسان، دام و همچنین آبزیان به‌صورت تغییرنیافته و یا به صورت متابولیت‌های دارویی از طریق ادرار و مدفوع به محیط تخلیه می‌شوند(۷). بنابراین لازم است این نوع فاضلاب‌ها قبل از تخلیه به محیط زیست یا بدنه‌های آبی مورد تصفیه قرار گیرند.

روش‌های متداول حذف آنتی‌بیوتیک‌ها و باقیمانده‌های دارویی از آب و فاضلاب شامل روش‌های شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشند. از روش‌های شیمیایی می‌توان به ازن زنی(۸)، الکتروشیمیایی(۹)، تابش الکترونی(۱۰)، نانوفیلتراسیون(۱۱)، انعقاد شیمیایی(۱۲)، تعویض یونی(۱۳) و فرآیند جذب سطحی(۱۴) اشاره نمود. در فرآیندهای جذب صرفاً انتقال فاز آلاینده صورت می‌گیرد و هزینه بالای روش‌های شیمیایی باعث محدودیت کاربرد این روش‌ها می‌شود. فرآیندهای بیولوژیکی عمده برای حذف آنتی‌بیوتیک‌ها عبارت هستند از: تصفیه با روش لجن فعال، فرآیندهای بیوراکتورهای غشایی (Membrane bioreactor)، فرآیندهای بیوراکتورهای غشایی رشد چسبیده، نیزارهای مصنوعی، زیست راکتورهای نوری جلبکی (Algae photobioreactor) و برکه‌های تثبیت(۱۵). استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب بیمارستانی بخاطر مزایای زیاد از جمله دوست دار محیط زیست بودن بسیار مورد توجه قرارگرفته است. از بین روش‌های موجود، فرآیند لجن فعال دارای کاربرد گسترده‌ای در تصفیه فاضلاب بیمارستانی در ایران و جهان می‌باشد، ولی به دلیل کیفیت پائین لجن تصفیه‌خانه و تلقیح نکردن به‌موقع لجن دارای کارکرد مناسبی نیست(۱۷ و ۱۶). همچنین حذف و تصفیه زیستی آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

وجود حلقه پایدار نفتول (به‌عنوان ساختار اصلی) و سمیت آن برای میکروارگانیسم‌ها و همچنین تجزیه‌پذیری زیستی کم آن‌ها مشکل است(۱۹ و ۱۸).

بنابراین، پژوهشگران به دنبال استفاده از فرآیندهای جدید هستند که بتوانند با راهبری ساده آلاینده مورد نظر را با درصد بالایی حذف نموده و مشکلات زیست محیطی را کاهش دهند. از روش‌های جدید و مطرح در زمینه تصفیه آلایندها به ویژه آلاینده‌های آلی، فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی یا الکتروکواگولاسیون است. فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی در تصفیه آب و فاضلاب در محدوده و سیعی کاربرد دارد و کارایی بالایی در حذف آلودگی‌های آلی، معدنی، و پاتوژن‌ها دارد. این فرآیند برای ناپایدار کردن ذرات سوسپانسیون معلق و آلاینده‌های محلول می‌باشد(۲۱ و ۲۰). در فرآیند الکترو کواگولاسیون، الکترود آند یون‌های فلزی را به الکترولیت وارد می‌کنند(۲۳ و ۲۲). در مقایسه با انعقاد معمولی الکتروکواگولاسیون دارای چندین مزیت است، که می‌توان به بهره‌برداری ساده، مقدار کم لجن تولیدی و حذف سریع آلاینده‌های آلی از فاضلاب اشاره کرد(۲۴).

الکتروکواگولاسیون (Electrocoagulation, EC) توانسته است به‌عنوان یک روش موثر برای تصفیه انواع فاضلاب‌های صنعتی مطرح گردد. این فرآیند از جریان الکتریکی مستقیم برای تولید یون‌های فلزی در محلول استفاده می‌کند. ماده منعقد کننده در این فرآیند به وسیله انحلال آند قربانی تولید می‌شود(۲۵). آلاینده‌های موجود در محلول‌های آبی طی واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی طی مکانسیم انعقاد، جذب و ترسیب آلاینده حذف می‌گردند. در این فرآیند با استفاده از الکترودهای مختلف، یون‌های فلزی که دارای بار الکتریکی و خاصیت جذب بالا هستند هیدروکسیدهای فلزی، پلیمرها و مونومرها را تشکیل می‌دهند و با آلاینده‌ها تشکیل لخته داده و با دو مکانیسم ته-نشینی و یا شناورسازی از محلول جدا می‌گردند.

الکتروکواگولاسیون به طور موفقیت آمیزی برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های مختلفی از جمله صنعت آبکاری(۲۲)، شیرابه‌های محل دفن(۲۶)، و نیز بطورگسترده برای حذف آرسنیک(۲۷)، سولفید، سولفات، و سولفیت(۲۸)، کروم شش ظرفیتی(۲۹)، استفاده شده است. بنابراین EC توانسته است بر عدم موفقیت تکنولوژی‌های تصفیه آب و فاضلاب معمول غلبه کند و یک روش با هزینه/اثربخشی مناسب، قابل اعتماد، ساده و ارزان را برای تصفیه فاضلاب بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی فراهم نماید(۲۸).

هر چند برخی از بیمارستان‌های کشور دارای سیستم تصفیه فاضلاب هستند. ولی عمده بیمارستان‌ها فاقد سیستم تصفیه فاضلاب بوده و فاضلاب آنها بدون تصفیه و یا با یک تصفیه مقدماتی وارد فاضلابرو شهری می‌گردد. با توجه به قرارگیری بیمارستان‌ها در محدوده اماکن مسکونی استفاده از برخی سیستم‌های متداول مانند، سیستم‌های بیولوژیکی به دلیل تولید و انتشار بوهای نامساعد، مناسب نبوده و برخی از آنها نیز به دلیل نیاز به تجهیزات پیشرفته و یا نیاز به استفاده از مواد شیمیایی مقبولیت ندارند. همچنین برخی از این سیستم-ها دارای واحدهای عملیاتی و فرآیندی متعدد بوده که به دلیل وجود محدودیت زمین قابل کاربرد در محوطه بیمارستان نیستند. اخیراً استفاده از روش‌های انعقاد الکتریکی به دلیل نیاز به زمین کمتر و نیاز کمتر به مواد شیمیایی از مقبولیت بسیار زیادی برای تصفیه آب و فاضلاب برخوردار بوده به نحوی که می‌توان با طراحی ویژه واحدهای عملیاتی و فرآیندی را در این روش ادغام نمود. لذا در این مطالعه که در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت به‌عنوان نوآوری تحقیق از یک طراحی سل الکتروشیمیایی ویژه استفاده شد که بتوان واحد فرآیندی (انعقاد الکتریکی) و واحدعملیاتی (واحد ته‌نشینی و شناورسازی) را با هم ادغام نمود (الکتروکواگولاسیون یکجا)، تا در شرایط بهینه بدست آمده، میزان کاهش آنتی‌بیوتیک آموکسی سیلین و COD ناشی از آن از فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند مورد

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

بررسی قرار گیرد و کارایی آن با روش الکتروکواگولاسیون مجزا مورد مقایسه قرار گیرد. روش‌های رویه پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی مبتنی بر برازش معادله چند جمله‌ای به داده‌های آزمایش است که با ساخت نمودارهای رویه پاسخ در ناحیه‌ی مورد مطالعه می‌تواند چگونگی رفتار متغیرها را نشان دهد. بنابراین این روش شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌ها جهت جستجوی مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر پاسخ می‌باشد(۳۰). لذا هدف اصلی این مطالعه طراحی سل الکتروشیمیایی ویژه‌ای بود که بتوان واحد فرآیندی و واحدعملیاتی را با هم ادغام نمود تا امکان کاهش غلظت‌های COD و حذف آنتی بیوتیک از فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند فراهم گردد. هدف دیگر این مطالعه، بهینه‌سازی پارامترهای راهبری در حذف آن از محلول‌های آبی با استفاده از روش رویه - پاسخ بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات راکتور مورد مطالعه:

راکتورهای مورد استفاده در این مطالعه شامل دو راکتور مجزا و تلفیقی بود که در مقیاس آزمایشگاهی و با جریان هیدرولیکی منقطع مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در راکتور تلفیقی (یا یکجا) واحدهای الکتروشیمیایی و شناورسازی مشترک است. راکتورانعقادالکتریکی-شناورسازی الکتریکی به صورت استوانه‌ایی و به حجم مفید ۱ لیتر بود. جفت الکترودهای انعقادالکتریکی در بالای راکتور و از جنس آلومینیوم و یا آهن باسطح موثر ۴۳۲ سانتی‌مترمربع و با فاصله ۱ سانتیمتر از هم (باهدف تولید یون‌های فلزی ازسطح آند قربانی و تولید هیدروکسیدهای فلزی جهت لخته‌سازی) در داخل راکتور جانمایی شد. با هدف تسریع شناورسازی بیشتر لخته‌های تولیدی و برای تولید گاز هیدروژن و اکسیژن بیشتر از جفت الکترود استیل زنگ نزن در نزدیک کف راکتور استفاده شد. (شکل ۱). جفت الکترودهای انعقاد الکتریکی با فاصله ۱ سانتیمتر از هم و به صورت شعاعی (با هدف تولید یون‌های فلزی از سطح آند قربانی و تولید هیدروکسیدهای فلزی جهت لخته‌سازی) در داخل راکتور جانمایی شد. تمام الکترودها با آرایش مونوپلار به طور جداگانه به مولد جریان الکتریسیته از نوع مستقیم (ساخت شرکت داژنگ درمحدوده کارایی صفرتا ۳۰ ولت) وصل شد. در طول انجام واکنش، محتویات داخل راکتور توسط همزن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه (rpm) هم زده شد.

در بخش اول، از فاضلاب سنتتیک جهت بررسی کارایی راکتور در حذف آنتی بیوتیک و به منظور بهینه‌سازی پارامترهای راهبری استفاده شد. همچنین از غلظت ۱/۵- ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر NaCl به‌عنوان الکترولیت کمکی برای دو جنس الکترود آهن و آلومینیوم شد. قبل از انجام هر آزمایش ابتدا الکترودها با سنباده نرم (۲۰۰) صیقل داده شد و با محلول اسید کلریدریک ۱۵ درصد و سپس با آب مقطر شستشو شدند. کلیه مراحل انجام آزمایش در دمای اتاق انجام گرفت. در مرحله دوم برای مقایسه کارایی انعقاد الکتریکی ساده (مجزا) و فرآیند تلفیقی انعقاد الکتریکی و شناورسازی (یکجا) از فاضلاب سنتتیک و واقعی استفاده شد. کارایی فرآیند جهت تصفیه فاضلاب مورد مطالعه در شرایط مختلف با بررسی متغیرهای pH (۱۰-۵)، دانسیته جریان (A/cm^2 ۱/۵-۰/۵)، جنس الکترود (آهن و آلومینیوم)، زمان واکنش (۵۰-۱۰ دقیقه)، غلظت آنتی بیوتیک (mg/L ۸۰-۵) مورد ارزیابی قرار گرفت (لازم به توضیح است مقادیر پیش فرض بر اساس مطالعات مشابه انتخاب شده، و مقادیر دقیق با انجام آزمایشات پری تست در طول انجام تحقیق مشخص شدند).

متغیرها در این مطالعه به روش طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ جهت مدل‌بندی و بهینه‌سازی طراحی شد. در این مطالعه از آنتی بیوتیک آموکسی سیلین با درجه خلوص ۱۰۰ درصد استفاده شد. فرمول شمیایی آنتی بیوتیک مورد استفاده بصورت $C16\ H_{19}N_3O_5S$ با وزن مولکولی

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

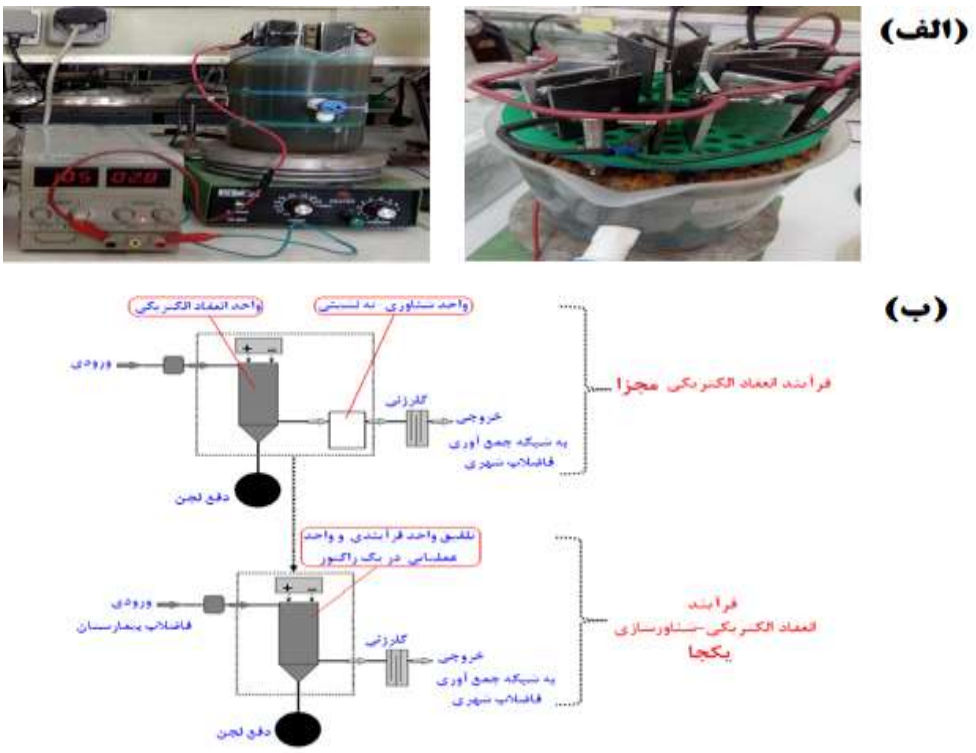
[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

g/moL ۳۶۵/۴ و nm ۲۷۲ =λ_{max} بود(۸). جهت تهیه محلول آنتی‌بیوتیک ، ۱ گرم از آنرا با ترازوی دیجیتال وزن کرده و در آب دوبار تقطیر حل کرده و حجم محلول به یک لیتر رسید و به این ترتیب محلول مادر آنتی بیوتیک سنتتیک یک گرم بر لیتر تهیه شد و با تکنیک رقیق سازی محلول‌هایی با غلظت‌های مورد نظر در غلظت‌های بین (۵-۸۰mg/L)، از آن تهیه می‌شود. برای تعیین غلظت آنتی بیوتیک در محلول‌های مایی از دستگاه اسپکتروفتومتر UV استفاده شد(۸). به این ترتیب که با ترسیم منحنی کالیبراسیون در غلظت‌های مختلف، معادله خط مربوط به جذب و غلظت تعیین شد و غلظت‌های مختلف ورودی و خروجی فرآیند از طریق معادله خط بدست آمده، محاسبه شد. برای راه اندازی راکتور در هرمرحله ۱۰۰۰mL فاضلاب سنتتیک با غلظت‌های معین آموکسی سیلین و پس از تنظیم pH در محدوده ۱۰-۵ وارد راکتور شد، و زمان ماند نیز در پنج سطح در نظر گرفته شد، و بعد از بکار انداختن راکتور جهت تعیین پارامترهای بهینه راه‌اندازی شد. شاخص بار آلی در این مطالعه، COD می‌باشد. برای اندازه‌گیری COD از روش رنگ‌سنجی (رفلاکس بسته) طبق روش 5220D کتاب استاندارد متد و برای اندازه-گیری TSS از روش وزن‌سنجی بر اساس روش استاندارد کتاب استاندارد متد آزمایشات آب و فاضلاب استفاده شد(۳۱). جهت تنظیم pH از pH متر پرتابل مدل Sensl Hach ساخت آلمان استفاده شد. در بخش دوم، کارایی راکتور در کاهش غلظت COD، TSS و TDS فاضلاب واقعی برداشت شده از بیمارستان علیمرادیان نهاوند تحت شرایط بهینه بدست آمده در مرحله قبل مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌بردای از پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان بصورت ساده انجام شد. باتوجه به تنوع آنتی بیوتیک‌های استفاده شده در بیمارستان علیمرادیان و همچنین غلظت پایین آنها در پساب خروجی ازتصفیه خانه بیمارستان و نیاز به اندازه گیری دقیق آن توسط دستگاه‌های پیشرفته آنالیز دستگاهی مثل HPLC، امکان استفاده از آن در این پایان نامه مقدور نبود لذا برای رفع این مشکل از شاخص COD و TOC جهت بررسی کارایی روش استفاده شد که به‌عنوان شاخص در تحقیقات مشابه مورد استفاده قرار گرفته است.

راکتور مورد استفاده در تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]



شکل ۱. (الف) راکتور انعقاد الکتریکی، (ب) جفت الکترودهای فرآیند انعقاد الکتریکی، (ج) راکتور انعقاد الکتریکی-شناورسازی الکتریکی.

تجزیه و تحلیل داده‌ها :

کارایی سیستم مورد مطالعه در حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین و کاهش غلظت COD با استفاده از معادله زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$\text{کارایی}\ (\%) = (\frac{X_i - X_t}{X_i}) \times 100 \quad (۱)$$

در معادله بالا، کارایی راکتور (٪) ، و X_i و X_t به ترتیب غلظت در ورودی (یا زمان صفر) و غلظت در زمان t می‌باشد.

بهینه‌سازی آماری:

طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ جهت مدل‌بندی و بهینه‌سازی استفاده شد. با توجه به سلسله مراتبی بودن اجرای طرح مرکب مرکزی تعداد آزمایشات بر اساس نقاط اصلی، نقاط محوری و نقاط مرکزی در طول اجرا مشخص شد. درجه‌ی مدل بر اساس بهترین مدل برازش شده در هر مرحله از آزمایش و مرحله‌ی نهایی مشخص شد. تحلیل و طراحی آزمایشات با استفاده از نرم افزارهای R ۳/۲ و Design Expert 7 و در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. مقادیر محدوده‌های پیش فرض متغیرهای مستقل، مقادیر کدشده و مقادیر واقعی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن محدوده زمان ۴ سطح، تعداد سطوح شدت جریان الکتریکی ۴ سطح، تعداد ۴ سطح pH و ۴ سطح غلظت آموکسی سیلین و با درنظر گرفتن طرح مرکب مرکزی و به روش سلسه مراتبی آزمایشات در هر مرحله مشخص و تعداد نمونه‌ی مورد نیاز در این تحقیق در طول آزمایش مشخص شد (جدول ۲).

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

جدول ۱. مقادیر محدوده‌های متغیرهای مستقل، مقادیر کدشده و مقادیر واقعی آنها

نماد	متغیر مستقل	سطح کد شده متغیرها				
		+۲	+۱	۰	−۱	−۲
X_1	زمان (دقیقه)	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
X_2	pH	۱۰	۸/۷۵	۷/۵	۶/۲۵	۵
X_3	دانسیته جریان (mA/cm^2)	۱/۵	۱/۲۵	۱	۰/۷۵	۰/۵
X_4	غلظت آموکسی سیلین (mg/L)	۸۰	۶۱/۲۵	۴۲/۵۰	۲۳/۷۵	۵

جدول ۲. تعداد آزمایشات بر اساس محدوده‌های تعریف شده در جدول ۱

#run	Coded variable level			
	Time	pH	CD	Conc.
1	1	1	-1	-1
2	1	1	1	-1
3	-1	1	1	1
4	-1	-1	-1	1
5	1	-1	1	-1
6	-1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1
9	-1	-1	1	1
10	1	1	-1	1
11	1	-1	1	1
12	1	1	-1	-1
13	-1	1	-1	1
14	1	-1	-1	-1
15	1	-1	-1	1
16	-1	-1	-1	-1
17	0	-2	0	0
18	0	2	0	0
19	0	0	0	-2
20	0	0	0	0
21	-2	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	-2	0
24	0	0	2	0
25	0	0	0	2
26	2	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

یافته‌ها

نتایج طراحی آزمایش:

به منظور ارزیابی اثرات چهار متغیر روی درصد حذف آموکسی سیلین روش رویه پاسخ طراحی مرکب مرکزی به کار گرفته شد. یک مدل درجه دو که رابطه بین پارامترها و درصد حذف را توصیف می کند به صورت معادله زیر به دست آمد:

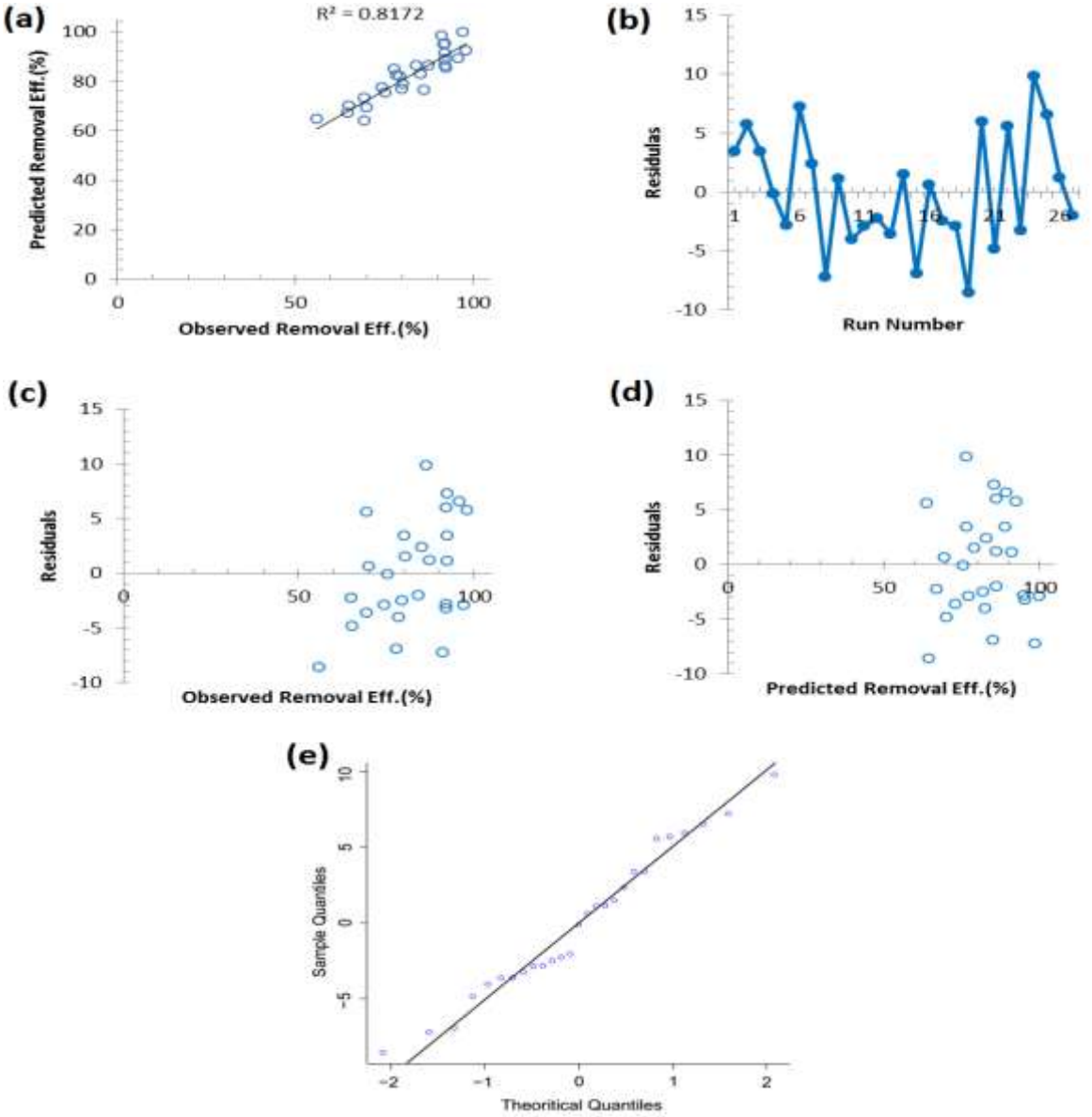
$$Y = 86.23 - 6.55(Block) + 4.76(X_1) - 1.15(X_2) + 7.89(X_3) + 2.97(X_4) - 2.29(X_4)^2 \quad (۲)$$

که در آن Y درصد حذف، Block یکی از دو مرحله طرح مرکب مرکزی، X_1، X_2، X_3، X_4 پارامترهای کدبندی شده پارامترها، $(X_4)^2$ اثر درجه دوم پارامتر غلظت اولیه است.

به منظور بررسی کفایت مدل تحلیل واریانس انجام شد. مدل نهایی پیشنهادی برای پیش بینی درصد حذف تحت شرایط مختلف پارامترهای مورد بررسی، ضریب تعیین مطلوبی R^2=۰/۸۲ را نشان داد. ضریب تعیین تعدیل شده adjusted R^2=۰/۷۶ نیز قابل قبول و نزدیک به ضریب تعیین بود. ارزیابی مفروضات رگرسیونی با استفاده از نمودارهای زیر انجام شد. نمودار ۲a نشان می‌دهد توافق مطلوبی بین درصد حذف مشاهده شده و برآورد شده وجود دارد. نمودار ۲b، الگوی تصادفی برای توزیع باقیمانده ها و در نتیجه آزمایشات را نشان می دهد. نمودارهای ۲c و ۲d الگوی تصادفی پراکندگی نقاط حول خط راست را نشان می‌دهد. نمودار ۲e نمودار وزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین مدل درجه دو پیشنهادی مناسب است.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]



شکل ۲. ترسیم باقیمانده‌ها برای ارزیابی کفایت مدل

اثرات متقابل پارامترهای راهبری:

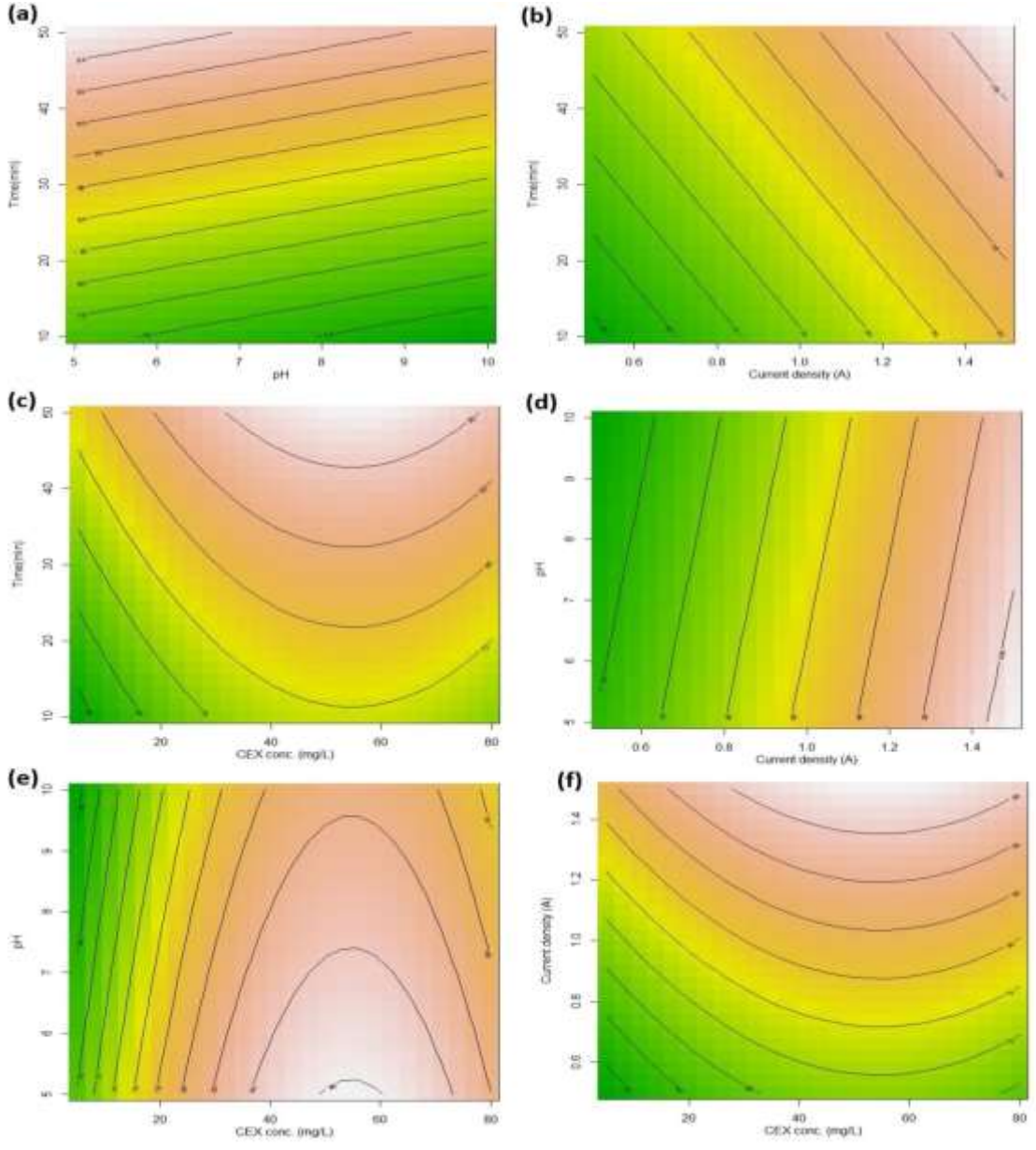
نمودارهای سطح پاسخ و کانتر برای حذف آموکسی سیلین به‌عنوان تابعی از متغیرهای مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. هر منحنی کانتور یک عدد مؤثر از ترکیبی از دو متغیر آزمایش را نشان می‌دهد که با دو متغیر دیگر در سطح صفر خود نگهداشته شده‌اند. حداکثر مقدار پیش بینی شده توسط سطح محدود شده در کوچکترین بیضی در نمودار کانتور مشخص شده است. در این روش مشخص شده است که در صورت وجود برهمکنش خوب بین متغیرهای مستقل، خطوط بیضوی بدست می‌آیند. همانگونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود نقاط بهینه برای متغیرهای مختلف، متفاوت بوده و بستگی به سطح و مقادیر متغیر تغییر می‌کند.

با استفاده از طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ و مدل پیشنهادی شرایط بهینه بیشینه سازی درصد حذف به صورت زیر به دست آمد:

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

زمان (دقیقه)	pH	دانسیته جریان (آمپر)	غلظت (mg/L)
۳۰	۷/۵	۱	۵۴/۶۶



شکل ۳. نمودار کانتور بازده حذف آموکسی‌سیلین، به عنوان تابعی از برهم کنش زمان (دقیقه)، pH، دانسیته‌ی جریان (mA/cm^2) و غلظت آموکسی‌سیلین (میلی گرم در لیتر) در مرکز (بهینه) سایر پارامترها

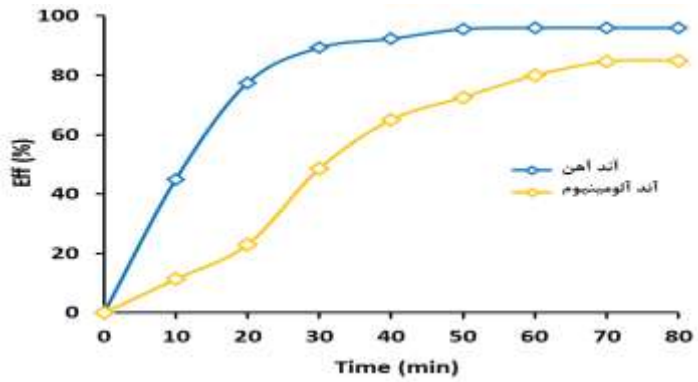
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

شکل ۳ (a) (اثر متقابل بین pH و زمان را در شرایط بهینه سایر پارامترها نشان می‌دهد. درصد حذف از مینیمم مقدار ۷۴ در سمت راست پایین نمودار به ماکزیمم مقدار ۹۴ در سمت چپ بالای نمودار افزایش یافته است. شکل ۳ (b) اثر متقابل بین دانسیته جریان و زمان را در شرایط بهینه سایر پارامترها نشان می‌دهد. درصد حذف از مینیمم مقدار ۶۰ در سمت چپ پایین نمودار به ماکزیمم مقدار ۱۰۰ در سمت راست بالای نمودار افزایش یافته است. شکل ۳ (c) اثر متقابل بین غلظلت اولیه و زمان را در شرایط بهینه سایر پارامترها نشان می‌دهد همانگونه که مشاهده می‌شود درصد حذف از مینیمم مقدار ۶۰ در سمت چپ پایین نمودار به ماکزیمم مقدار ۹۰ در سمت راست بالای نمودار افزایش یافته است. اثر متقابل بین pH و دانسیته جریان را در شرایط بهینه سایر پارامترها در شکل ۳ (d) نشان داده شده است. در اینجا نیز درصد حذف از کمترین مقدار ۷۰ در سمت چپ نمودار به بیشترین مقدار ۱۰۰ در سمت راست نمودار افزایش یافته است. شکل ۳ (e) اثر متقابل بین pH و غلظلت اولیه را در شرایط بهینه سایر پارامترها) نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود درصد حذف از کمترین مقدار ۶۶ در سمت چپ نمودار به ماکزیمم مقدار ۸۶ در مرکز نمودار افزایش یافته است و شکل۳ (f) نیز اثر متقابل بین دانسیته جریان و غلظلت اولیه را در شرایط بهینه سایر پارامترها را نشان می‌دهد. درصد حذف از مینیمم مقدار ۵۵ در سمت چپ پایین نمودار به ماکزیمم مقدار ۹۵ در سمت راست بالای نمودار افزایش یافته است.

مقایسه کارایی آند آهن و آلومنیوم :

از نقاط بهینه بدست آمده از طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ و مدل پیشنهادی استفاده شد و کارایی دو الکترود آهن و آلومنیوم برای حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کارایی الکترود آهن بهتر از الکترود آلومینیوم می‌باشد. بیشترین راندمان حذف آنتی‌بیوتیک با استفاده از الکترود آهن و آلومینیوم به ترتیب در مدت زمان بهینه ۳۰ دقیقه و به ترتیب به میزان ۹۰ و ۸۴ درصد بدست آمد. هنگام استفاده از الکترود آلومینیوم برای حذف کامل آنتی بیوتیک به مدت زمان طولانی‌تر نیاز است. همچنین لجنی با حجم بالا با خصوصیات شناورسازی پایین تولید می‌گردد. همچنین، فلوک‌های تولید شده متراکم نبوده و لجن ژله‌ای با خصوصیات جذب پایین تولید می‌کنند که توانایی لازم برای به دام اندازی آلاینده‌ها را به طور کامل ندارد(۳۰). البته نتایج بستگی به ماهیت فاضلاب خواهد داشت.



شکل ۴. مقایسه کارایی الکترود آهن و آلومینیوم طی فرآیند انعقاد الکتریکی یکجا جهت حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین در شرایط بهینه، pH=۷/۵، دانسیته‌ی جریان الکتریکی (1A) و غلظت آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین (۵۴mg/L).

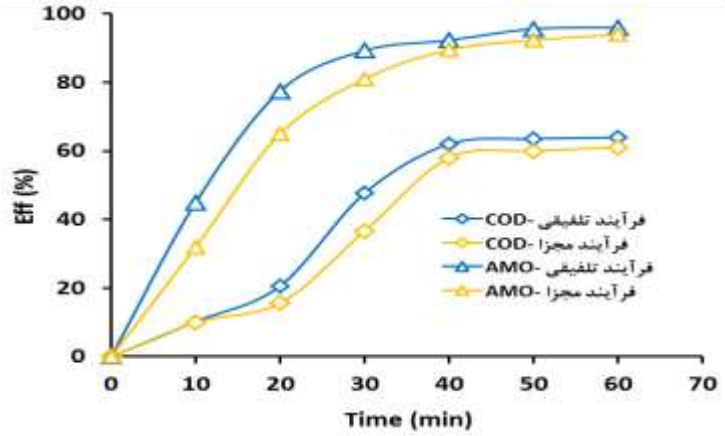
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

از نقاط بهینه بدست آمده، از طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ و مدل پیشنهادی استفاده شده، و کارایی راکتور در تصفیه فاضلاب واقعی (پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان) مورد ارزیابی قرار گرفت.

مقایسه کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا و انعقاد الکتریکی یک:

کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا و انعقاد الکتریکی یکجا در حذف COD، آنتی‌بیوتیک آموکسی سیلین و مواد معلق (TSS) از پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد در فرآیند انعقاد الکتریکی یکجا راندمان حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی سیلین بیشتر از مقدار حذف COD بوده و در مدت زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۸۹/۳ و۴۷/۷ درصد می‌باشد. این درحالی است که برای حذف COD به مدت زمان بیشتری نیاز بوده و در مدت زمان ۴۰ دقیقه و به میزان ۶۲ درصد بدست آمد. هرچند در فرآیند انعقاد الکتریکی مکانیسم اصلی حذف آلاینده انعقاد می‌باشد اما احتمال تخریب ملکول آلاینده به ملکول‌های کوچکتر نیز وجود دارد که نمی‌توانند به روش لخته‌سازی و ترسیب حذف گردد لذا مقدار حذف آنتی بیوتیک بیشتر از مقدار حذف COD بدست آمد(۸). حذف آنتی بیوتیک و COD در فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا تقریباً مشابه فرآیند تلفیقی بوده و به مقدار جزیی از فرآیند انعقاد الکتریکی یکجا کمتر است و در مدت زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۸۱/۰ و ۳۶/۶ درصد می‌باشد این درحالی است که برای حذف COD به مدت زمان بیشتری نیاز بوده و در مدت زمان ۴۰ دقیقه و به میزان ۵۸ درصد بدست آمد.



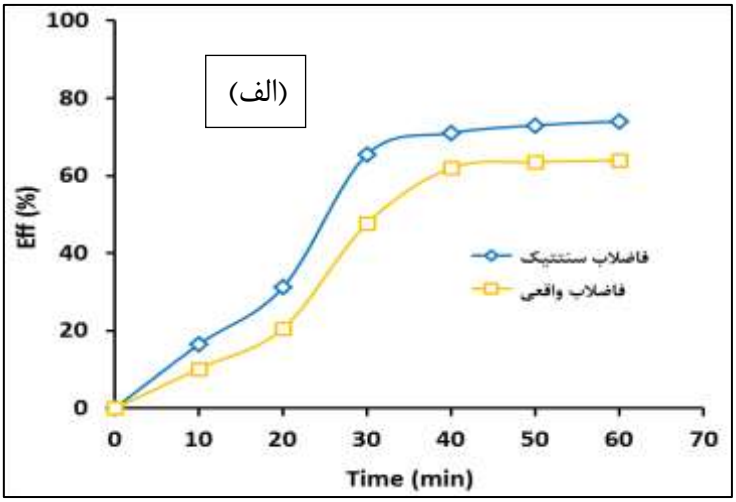
شکل ۵. مقایسه کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا و یکجا جهت حذف COD و آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین در پساب واقعی در شرایط بهینه

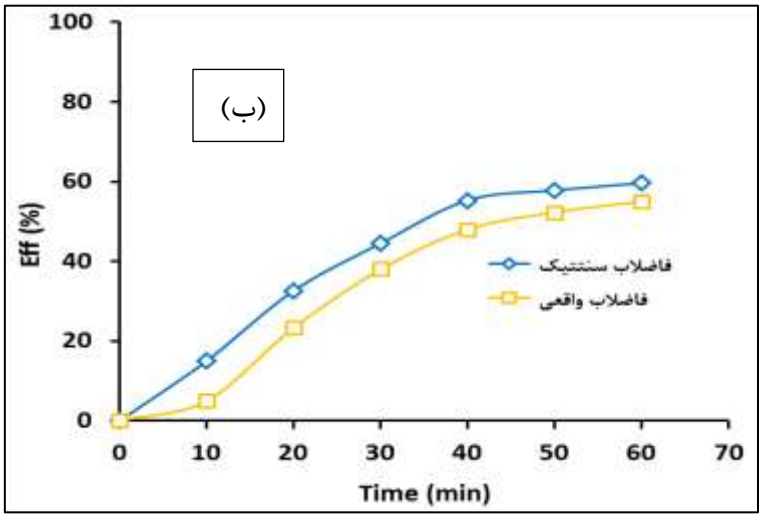
بررسی حذف COD و TOC :

تاثیر تلفیق واحد فرآیندی با واحد عملیاتی در یک راکتور (انعقاد الکتریکی یکجا) در حذف COD (شکل ۶-الف) و TOC (شکل ۶-ب) از فاضلاب سنتتیک و پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند در شرایط بهینه، pH=۷/۵، دانسیته‌ی جریان الکتریکی (1A) و غلظت آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین (۵۴mg/L) نشان داد، که حذف COD و TOC در فاضلاب سنتتیک بیشتر از پساب واقعی می باشد. به طوری که در مدت زمان بهینه ۳۰ دقیقه (برای حذف آنتی بیوتیک) مقدار حذف COD و TOC در فاضلاب سنتتیک به ترتیب برابر با ۶۵/۵ و ۴۴/۵ درصد و در پساب واقعی ترتیب برابر با ۴۷/۷ و ۳۸ درصد می‌باشد. هرچند نقطه بهینه برای حذف COD و TOC در زمان ماند ۴۰ دقیقه (برای پساب واقعی) به ترتیب برابر با ۶۲ و ۴۸ درصد بدست آمد.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]





شکل ۶. تأثیر تلفیق واحد فرآیندی با واحد عملیاتی در یک راکتور(انعقاد الکتریکی یکجا) در حذف COD (الف) و TOC (ب)

بررسی تغییرات TDS، EC و pH:

تغییرات TDS، EC و pH قبل و بعد از تصفیه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی یکجا مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر به صورت میانگین (در تعداد کل ۷ نمونه) مورد بررسی گزارش گردیده و نتایج در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد مقادیر میانگین TDS و EC قبل و بعد از فرآیند از تغییرات بسیار کمی برخوردار بوده و به مقدار جزیی در پساب تصفیه شده کاهش می‌یابد. مقدار EC به طور متوسط از مقدار ۱۳۱۹ $\mu S/cm^2$ به ۱۱۷۸ $\mu S/cm^2$ و مقدار TDS نیز به

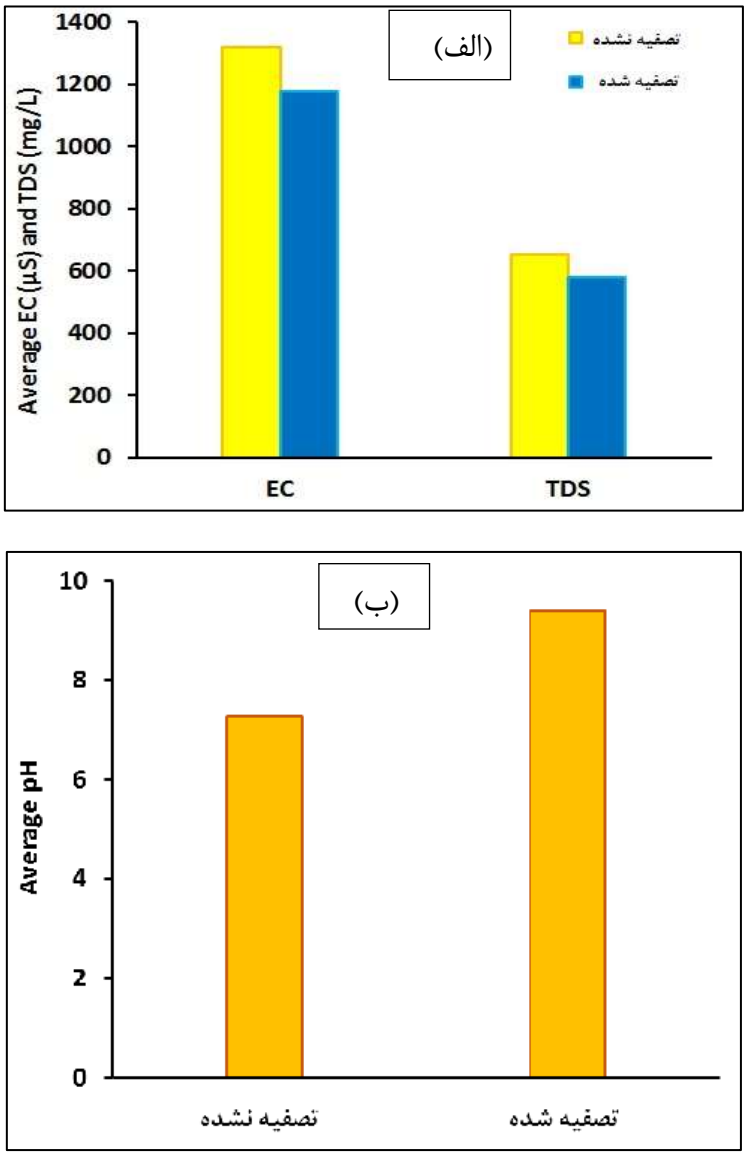
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

طور متوسط از مقدار ۶۵۴ mg/L به ۵۸۱ mg/L کاهش یافت.

همچنین در این مطالعه مقدار تغییرات pH نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد pH فاضلاب پس از طی واکنش انعقاد الکتریکی افزایش می‌یابد. به طوری که پس از طی ۴۰ دقیقه واکنش به طور متوسط از مقدار اولیه ۷/۳ به مقدار ۹/۴ افزایش یافت (شکل ۷ (ب))

.



شکل ۷. تغییرات (الف) TDS و EC و (ب) pH قبل و بعد از تصفیه پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند

بحث

بررسی نتایج حاصل از مدل برای بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری:

بر اساس نتایج ارائه شده، مقادیر حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین برای سطوح مختلف متغیرها متفاوت بوده، و برهم‌کنش متغیرها نیز برای سطوح مختلف نتایج متفاوتی بهمراه دارد. روش CCD و RSM امکان بررسی و تفسیر

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

هر دو اثر اصلی و برهم‌کنشی را فراهم می‌آورد. این تفسیر با استفاده از اشکال غیرخطی در فضایی چند بعدی ایجاد می‌شود(۳۰). در مورد تأثیر pH محلول و برهم‌کنش آن با سایر متغیرها می‌توان گفت pH اولیه‌ی محلول آبی به‌عنوان یکی از فاکتورهای اصلی بهره‌برداری، به علت تأثیر در عملکرد انعقاد الکتروشیمیایی، مورد توجه است(۳۲). رادیکال‌های هیدروکسیدهای فلزی تولید شده در pH خنثی و کمی بازی نسبت به سایر pHها مهمترین عامل انعقاد و شناورسازی محسوب می‌شود، بنابراین شرایط خنثی برای حذف این آنتی بیوتیک طی فرآیند انعقاد الکتریکی مطلوب‌تر است(۳۳). هر چند که در سایر سطوح pH نیز کارایی حذف قابل قبول می‌باشد که می‌تواند ناشی از اکسیداسیون مستقیم آنتی‌بیوتیک باشد. در این مطالعه بین غلظت اولیه و pH رابطه‌ی معنی‌دار آماری مشاهده نشد (P=۰/۳۱۷). نتایج مشابه در سایر مطالعات در مورد تاثیر pH در ارتباط با تجزیه‌ی سایر آلاینده‌های دارای ترکیب حلقوی مشابه مثل حشره‌کش‌ها گزارش شده است. در مطالعه‌ی Garrett جهت تجزیه‌ی الکتروشیمیایی سموم مالاتیون، ایمیداکلوپرید و کلروپریفوس مشاهده شد که بیشترین راندمان حذف COD در شرایط نسبتاً اسیدی بدست می‌آید(۳۴). در مطالعه‌ی Abdel-Gawad و همکاران جهت حذف حشره‌کش‌های مالاتیون، ایمیداکلوپرید و کلروپریفوس با استفاده از الکترود آهن مشخص گردید که pH بهینه بین محدوده‌ی ۵ تا ۷ قرار دارد، که می‌تواند ناشی از اکسیداسیون مستقیم آلاینده باشد(۳۵). در مطالعه‌ی دیگر همین محقق جهت حذف حشره‌کش‌های فوق الذکر از فاضلاب‌های کشاورزی با استفاده از الکترودهای $Ti/TiO_2/Rh_2O_3$ مناسب بودن شرایط اسیدی برای تجزیه را تأیید کرده و مشخص گردید که pH بهینه حذف برابر ۳ می‌باشد(۳۶). پارامتر مهم دیگر در فرآیندهای انعقاد الکتریکی، زمان الکترولیز می‌باشد. همان‌گونه که در فصل قبل نشان داده شد آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین به طور موثری در زمان تماس حدود ۳۰ دقیقه حذف می‌شود.

لازم به ذکر است که اگر چه با افزایش زمان ماند، کارایی حذف نیز افزایش می‌یابد، اما به دلیل مصرف انرژی بیشتر و حجم راکتور بزرگتر، افزایش زمان تماس فراتر از محدوده‌های بهینه مطلوب نمی‌باشد. با این حال راندمان معدنی‌سازی مطلوبی در ۳۰ دقیقه بدست می‌آید. بر اساس نتایج بدست آمده، بیشترین ارتباط بین زمان تماس و شدت جریان وجود داشته و این رابطه معنی‌دار بود (P<۰/۰۰۱). همچنین با توجه به نمودار ۳ (c)، بین زمان تماس و غلظت اولیه‌ی آموکسی سیلین ارتباط وجود دارد ولی این ارتباط معنی‌دار نمی‌باشد (P >۰/۰۵). در مطالعه‌ی Abdel-Gawad و همکاران جهت حذف حشره‌کش‌های مالاتیون، ایمیداکلوپرید و کلروپریفوس با استفاده از الکترود آهن مشخص گردید که مدت زمان بهینه جهت حذف این حشره‌کش‌ها ۱۰ دقیقه می‌باشد(۳۵). یکی دیگر از پارامترهای مهم در این فرآیندها، شدت جریان می‌باشد. شدت جریان تأثیر مهمی روی کارایی حذف آلاینده‌هایی مانند آنتی‌بیوتیک داشته و فاکتور مهمی در کنترل سرعت واکنش الکتروشیمیائی می‌باشد(۳۷). همانگونه که در شکل ۳(f) نشان داده شد در سطح ثابت و مرکزی زمان تماس برابر ۳۰ دقیقه و pH=۷/۵، تغییر در میانگین حذف آموکسی سیلین به سطح CD و غلظت اولیه‌ی آموکسی‌سیلین بستگی دارد. بعلاوه اینکه، برای سطوح پائین دانسیته‌ی جریان، این افزایش شیب تندی دارد و برعکس. این یافته‌ها با نتایج بدست آمده از سایر مطالعات همخوانی دارد(۳۵ و ۳۴).

در شدت جریان‌های بالاتر از محدوده‌ی بهینه، کارایی حذف آموکسی سیلین تقریباً ثابت می‌ماند. طبق قانون فارادی با افزایش شدت جریان، شتاب بیشتر مواد بر سطح الکترود و تولید بیشتر عوامل اکسیدان رخ می‌دهد که منجر به کارایی بیشتر حذف آنتی بیوتیک می‌گردد(۳۸). از این

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

رو شدت جریان حدود $2/3\ mA/cm^2$ به‌عنوان مقدار بهینه برای آزمایشات بعدی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در شدت جریان‌های بالاتر از شرایط بهینه، سطح الکترود آند تخریب شده و عوامل اکسیدان کافی جهت تجزیه وجود نخواهد داشت، لذا آلاینده‌ها حذف نخواهند شد که با نتایج مطالعه رحمانی و همکاران همخوانی دارد. بر اساس نتایج سایر مطالعات افزایش شدت جریان می‌تواند باعث تخریب رادیکال‌های های $OH^{\bullet}$ شود(۳۹). در مطالعه‌ای که توسط Ridruejo و همکاران جهت حذف ماده‌ی بیهوش کننده تتراکائین انجام گرفت از فرآیند اکسیداسیون الکتروشیمیایی با الکترودهای الماس داپت شده با بور (BDD)، پلاتین و آند IrO_2 استفاده شد. شدت جریان استفاده در این مطالعه برابر $33/3\ mA/cm^2$بود. و هزینه‌ی الکترودهای استفاده شده بیشتر از هزینه‌ی مورد نیاز برای این مطالعه می‌باشد. ضمن اینکه برای دستیابی به ۵۰ درصد حذف TOC به ۳۶۰ دقیقه زمان تماس نیاز می‌باشد که در مقایسه، کارایی مطالعه‌ی حاضر بسیار بیشتر می‌باشد(۴۰). غلظت اولیه‌ی آلاینده پارامتر دیگری است که می‌تواند بر کارایی فرآیند تأثیرگذار باشد. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار غلظت آلاینده رابطه‌ی معکوس با کارایی فرآیند دارد. هر چند که در محدوده‌ی غلظت‌های مطالعه شده، این تأثیر معنی‌دار نمی‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای نشان داده شده، هر چند که هر یک از متغیرهای مورد بررسی یک پارامتر مؤثر در حذف الکتروشیمیایی اموکسی سیلین هستند، افزایش زمان واکنش در غلظت‌های پایین منجر به راندمان‌های بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، وقتی که غلظت آموکسی سیلین بیشتری وجود دارد، مدت زمان واکنش طولانی‌تری تحت شرایط دانسیته‌ی جریان بهینه برای همان بازده حذف نیاز است نتایج نشان می‌دهد که سرعت و کارایی فرآیند رابطه مستقیمی با غلظت اولیه‌ی آنتی‌بیوتیک دارند. اما همانطور که دیده می‌شود، با افزایش غلظت آنتی‌بیوتیک به مقدار بیش از مقدار بهینه‌ی غلظت اولیه، کارایی حذف کاهش یافته و به زمان الکترولیز طولانی‌تری نیاز است که از لحاظ اقتصادی مطلوب نیست. استفاده از غلظت و شدت جریان الکتریکی بهینه در زمان الکترولیز بهینه بدست آمده برای حذف این آنتی بیوتیک می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد. علاوه بر این، نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان داد، که در شدت جریان‌های بیشتر از مقادیر بهینه، به دلیل مصرف بیشتر الکترود آند که نقش مهمی در این نوع فرآیندها دارد، در زمان‌های کوتاه باید الکترود آند تعویض گردد.نتایج با مطالعات سمرقندی، رحمانی،عسگری، و محوی همخوانی دارد.

مقایسه کارایی آند آهن و آلومنیوم:

همان‌طوری که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است عملکرد الکترود آهن برای حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین بهتر از الکترود آلومینیوم می‌باشد وکیک لجنی با تراکم مناسب ایجاد می‌نماید که می‌تواند با یک لجن روب مناسب از سطح راکتور جدا گردد. بیشترین راندمان حذف آنتی-بیوتیک با استفاده از الکترود آهن و آلومینیوم به ترتیب در مدت زمان بهینه ۳۰ دقیقه و به ترتیب به میزان ۹۰ و ۸۴ درصد بدست آمد. هنگام استفاده از الکترود آلومینیوم برای حذف کامل آنتی‌بیوتیک به مدت زمان طولانی‌تر نیاز است، همچنین لجنی با حجم بالا با خصوصیات شناورسازی پایین تولید می‌گردد.

مقایسه کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا و انعقاد الکتریکی یکجا :

بررسی کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا و انعقاد الکتریکی یکجا طبق شکل ۵ برای تصفیه نهایی پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نشان داد که کارایی انعقاد الکتریکی یکجا برای حذف COD و آنتی-بیوتیک آموکسی‌سیلین بالاتر از فرآیند انعقاد الکتریکی مجزا است. طی فرآیند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترود آند آهن فلوک‌های سبک تشکیل می‌گردد. که بر روی سطح مایع شناور می‌شود، هرچند طی فرآیند انعقاد

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

الکتروشیمیایی میکروحباب‌های گاز هیدروژن بر روی سطح کاتد تشکیل می‌گردد، که مسئول شناور شدن ذرات می‌باشد. اما وجود میکروحباب‌های بیشتر می‌تواند، تغلیظ لجن در سطح مایع را افزایش داده، و لجنی متراکم را تشکیل دهد به نحوی که به راحتی از سطح مایع جدا گردد. در این مطالعه یک واحد شناورسازی الکتریکی در پایین راکتور جانمایی گردید. لذا با تولید میکروحباب‌های گاز هیدرون و اکسیژن به ترتیب بر روی سطح کاتد و آند شناورسازی ذرات و فلوک‌های را تسریع کرده، لذا علاوه بر افزایش کارایی سیستم باعث ایجاد دو مزیت نسبت به واحدهای سنتی انعقاد الکتریکی می‌گردد: ۱. شناوری ذرات و تغلیظ سریع لجن بر روی سطح راکتور و امکان جداسازی آن از سطح راکتور با طراحی مناسب (امکان تلفیق واحد عملیاتی و فرآیندی در یک راکتور)، ۲. کاهش زمان ماند فاضلاب در راکتور و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن. در طراحی راکتورهای انعقاد الکتریکی به صورت سنتی محفظه واکنش الکتروشیمیایی و محفظه جداسازی لجن جدا از هم بوده، و انتقال محصول واکنش انعقاد الکتروشیمیایی به محفظه ته‌نشینی/شناوری سازی باعث شکستن فلوک‌ها شده و راندمان افت پیدا می‌کند.

بررسی حذف COD و TOC :

در یک راکتور (انعقاد الکتریکی یکجا) در حذف COD (شکل ۶ الف) و TOC (شکل ۶ ب) از فاضلاب سنتتیک و پساب تصفیه خانه فاضلاب بیمارستان علیمرادیان نهاوند در شرایط بهینه، نشان می دهد که حذف COD و TOC در فاضلاب سنتتیک بیشتر از پساب واقعی می‌باشد. دلیل این امر احتمالا به خاطر وجود برخی از ترکیبات مقاوم در پساب بیمارستان علیمرادیان نهاوند می‌باشد، به طوری که در مدت زمان بهینه ۳۰ دقیقه (برای حذف آنتی‌بیوتیک) مقدار حذف COD و TOC در فاضلاب سنتتیک به ترتیب برابر با ۶۵/۵ و ۴۴/۵ درصد و در پساب واقعی ترتیب برابر با ۴۷/۷ و ۳۸ درصد می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد زمان بهینه برای حذف COD و TOC بیشتر از حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین می‌باشد به طوری‌که علی رغم اینکه زمان بهینه برای حذف آنتی‌بیوتیک ۳۰ دقیقه می‌باشد. نقطه بهینه برای حذف COD و TOC در زمان ماند ۴۰ دقیقه برای پساب واقعی به ترتیب برابر با ۶۲ و ۴۸ درصد بدست آمد.

بررسی تغییرات TDS، EC و pH:

با توجه به تغییرات کم کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی پساب واقعی، لذا امکان بررسی تأثیر تغییرات این پارامترها بر کارایی روش وجود نداشت ولی به طور کلی و بر اساس نتایج مربوط به فاضلاب سنتتیک، هر چه غلظت TDS کمتر باشد مقاومت سل افزایش پیدا کرده و بر مصرف انرژی تأثیرگذار می‌باشد. طی فرآیند اانعقاد الکتریکی واکنش آندی عمدتاً مربوط به خوردگی و رویین شدن آند است، که طی واکنش‌های زنجیره‌وار پلیمرهای فلزی را برای انعقاد ذرات و لخته‌ها تولید می‌نماید و به طور جزیی گاز اکسیژن در سطح آند تولید می‌شود(۳۶ و ۲۵). در طرف مقابل و در سطح کاتد عمده محصول واکنش احیاء آب و تولید رادیکال هیدروکسیل در پساب می‌باشد. لذا pH محلول حاصل از الکترولیز افزایش می‌یابد. اما به دلیل تولید توام یون هیدروژن مقداری از افزایش بیش از حد pH محلول ممانعت به عمل می آید اما به دلیل خروج یون‌های هیدروژن از محیط به صورت گاز H_2 محیط کمی قلیایی می‌گردد(۳۵).

به طور خلاصه، با توجه به نتایج بدست آمده، این روش به‌عنوان یک فناوری پاک و دوست‌دار محیط زیست می‌تواند به‌عنوان یک روش امیدوار کننده برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنایع داروسازی و بیمارستانی باشد که البته نیاز به انجام مطالعات اقتصادی و کاربرد در مقیاس پایلوت جهت دست‌یابی به اطلاعات فنی در مقیاس واقعی می‌باشد. به‌عنوان یک گزینه‌ی دیگر، این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش پیش تصفیه قبل از فرآیندهای معمول موجود در تصفیه‌خانه‌های مربوطه مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

نتیجه گیری

روش‌های الکتروشیمیایی به دلیل انطباق و سازگاری با محیط‌زیست اخیرا مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. در مقایسه با روش‌های تصفیه متداول، مزایای آن بیشتر آشکار می‌شود. از آن جمله می‌توان به تجهیزات ساده، بهره‌برداری آسان، زمان تصفیه کوتاه‌تر، مصرف انرژی الکتریکی بهینه، عدم نیاز به الکترولیت، کاهش استفاده از مواد شیمیایی افزودنی، تولید لجن کمتر و سرعت بالای رسوب و یا شناورشدن لخته‌های منعقد شده اشاره کرد. لذا هدف از این پژوهش، تعیین کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین و کاهش غلظت COD ناشی از آن از محلول‌های آبی و فاضلاب واقعی بیمارستانی (بیمارستان علیمرادیان نهاوند) بود. در این مطالعه، مشخص شد روش انعقاد الکتریکی بازده بالای ۹۰ ٪ برای حذف آنتی بیوتیک آموکسی سیلین، در مدت زمان ۳۰ دقیقه را دارد که با توجه به تکنولوژی ساده و بهره‌برداری آسان آن، امکان استفاده از این تکنولوژی در حجم بیشتر بخوبی قابل تعمیم است. هرچند زمان بهینه برای کاهش COD و TOC بیشتر از زمان مورد نیاز برای حذف آنتی بیوتیک می‌باشد کارایی روش در کاهش COD و TOC در زمان ماند ۴۰ دقیقه برای پساب واقعی به ترتیب برابر با ۶۲ و ۴۸ درصد بدست آمد. یکی از معایب روش انعقاد الکتریکی متداول، شکستن لخته‌های تشکیل شده حین انعقاد می‌باشد که هنگام انتقال به واحد ته-نشینی/شناورسازی اتفاق می‌گردد. بنابراین در این مطالعه نشان داده شد که با تلفیق واحد عملیاتی و فرآیندی در یک راکتور عمل جداسازی لجن در همان سلول الکتروشیمیایی انجام گرفته، و علاوه بر حذف واحد ته‌نشینی و شناورسازی کیفیت پساب تصفیه شده بهتر می‌شود. بر اساس یافته‌های این مطالعه می‌توان بیان نمود که فرآیند استفاده شده در این مطالعه می‌تواند به طور موثر در حذف آنتی‌بیوتیک آموکسی‌سیلین از پساب سنتتیک و پساب واقعی به کار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد گرایش بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات بهداشتی شهری می‌باشد و نویسندگان مقاله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی همدان بخاطر حمایت مالی این پایان‌نامه قدردانی می‌نمایند (شماره پایان نامه ۹۹۰۹۱۱۶۲۱۸). (شناسه اختصاصی کمیته اخلاق: IR.UMSHA.REC.1399.693)

منابع

1. Githinji LJ, Musey MK, Ankumah RO. Evaluation of the fate of ciprofloxacin and amoxicillin in domestic wastewater. Water Air Soil Pollut. 2011;219(1):191-201
2. Homem V, Santos L. Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices–a review. J Environ Manage. 2011;1;92(10):2304-47.
3. Dimitrakopoulou D, Rethemiotaki I, Frontistis Z, Xekoukoulotakis NP, Venieri D, Mantzavinos D. Degradation, mineralization and antibiotic inactivation of amoxicillin by UV-A/TiO_2 photocatalysis. J Environ Manage. 2012;98:168-74.
4. Tsakona M, Anagnostopoulou E, Gidarakos E. Hospital waste management and toxicity evaluation: a case study. J Waste Manag. 2007;27(7):912-20.
5. Ghafouri Safa S, Mirzaali A, Ghorbanpour R, Kamali H, Gholizadeh A. Performance evaluation of wastewater treatment facilities in selected hospitals of North Khorasan in 2012-2013. Journal of North Khorasan University of Medical Sciences. 2014;6(2):371-9.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

6. Zuccato E, Castiglioni S, Bagnati R, Melis M, Fanelli R. Source, occurrence and fate of antibiotics in the Italian aquatic environment. J Hazard Mater. 2010;179(1-3):1042-8.
7. Ferrari B, Mons R, Vollat B, Fraysse B, Paxēaus N, Giudice RL, et el. Environmental risk assessment of six human pharmaceuticals: are the current environmental risk assessment procedures sufficient for the protection of the aquatic environment?. Environ Toxicol Chem 2004;23(5):1344-54.
8. Norabadi E, Panahi AH, Ghanbari R, Meshkinian A, Kamani H, Ashrafi SD. Optimizing the parameters of amoxicillin removal in a photocatalysis/ozonation process using Box-Behnken response surface methodology. Desalin. Water Treat. 2020;192(192):234-40.
9. Carabineiro SA, Thavorn-Amornsri T, Pereira MF, Figueiredo JL. Adsorption of ciprofloxacin on surface-modified carbon materials. Water Res. 2011;45(15):4583-91.
10. Lin AY, Lin CF, Chiou JM, Hong PA. O_3 and O_3/H_2O_2 treatment of sulfonamide and macrolide antibiotics in wastewater. J Hazard Mater. 2009;171(1-3):452-8.
11. Rozas O, Contreras D, Mondaca MA, Pérez-Moya M, Mansilla HD. Experimental design of Fenton and photo-Fenton reactions for the treatment of ampicillin solutions. J Hazard Mater. 2010;177(1-3):1025-30.
12. Kim TH, Kim SD, Kim HY, Lim SJ, Lee M, Yu S. Degradation and toxicity assessment of sulfamethoxazole and chlortetracycline using electron beam, ozone and UV. J Hazard Mater. 2012;227:237-42.
13. Koyuncu I, Arikan OA, Wiesner MR, Rice C. Removal of hormones and antibiotics by nanofiltration membranes. J Membr Sci. 2008;309(1-2):94-101.
14. Choi KJ, Kim SG, Kim SH. Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration. J Hazard Mater. 2008;151(1):38-43.
15. Tiwari B, Sellamuthu B, Ouarda Y, Drogui P, Tyagi RD, Buelna G. Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. Bioresour Technol. 2017;224:1-2
16. Bitton G. Wastewater microbiology. 3rd ed. John Wiley & Sons; 2005: 125-236.
17. Pell M, Wörman A. Biological wastewater treatment systems. Ecosystem Ecology. 1st ed. The Netherlands: Elsevier, 2008; 26 – 441.
18. Rind FM, Laghari MG, Memon AH, Khuhawar MY, Maheshwari ML. Spectrophotometric determination of ceftriaxone using 4-dimethylaminobenzaldehyde. Pak J Anal Environ. 2008;9(1):7.
19. Shen S, Ren J, Chen J, Lu X, Deng C, Jiang X. Development of magnetic multiwalled carbon nanotubes combined with near-infrared radiation-assisted desorption for the determination of tissue distribution of doxorubicin liposome injects in rats. J Chromatogr A. 2011;1218(29):4619-26.
20. Gupta V, Gupta B, Rastogi A, Agarwal S, Nayak A. A comparative investigation on adsorption performances of mesoporous activated carbon prepared from waste rubber tire and activated carbon for a hazardous azo dye—Acid Blue 113. J Hazard Mater. 2011;186(1):891-901.
21. Wang H, Zheng X-W, Su J-Q, Tian Y, Xiong X-J, Zheng T-L. Biological decolorization of the reactive dyes Reactive Black 5 by a novel isolated bacterial strain Enterobacter sp. EC3. J Hazard. Mater. 2009;171(1-3):654-9.
22. Adhoum N, Monser L, Bellakhal N, Belgaied J-E. Treatment of electroplating wastewater containing Cu2+, Zn2+ and Cr (VI) by electrocoagulation. J. Hazard. Mater. 2004;112(3):207-13.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]

23.Feng J-w, Sun Y-b, Zheng Z, Zhang J-b, Li S, Tian Y-c. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. J Environ Sci. 2007;19(12):1409-15.
24. Hanafi F, Assobhei O, Mountadar M. Detoxification and discoloration of Moroccan olive mill wastewater by electrocoagulation. J Hazard Mater. 2010;174(1-3):807-12.
25. Merzouk B, Gourich B, Sekki A, Madani K, Vial C, Barkaoui M. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. J Chem Eng. 2009;149(1-3):207-14.
26. Ilhan F, Kurt U, Apaydin O, Gonullu MT. Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. J Hazard Mater. 2008;154(1-3):381-9.
27.Gomes JA, Daida P, Kesmez M, Weir M, Moreno H, Parga JR, et al. Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al–Fe electrode system and characterization of products. J Hazard Mater. 2007;139(2):220-31.
28. Murugananthan M, Raju GB, Prabhakar S. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. J Hazard Mater. 2004;109(1-3):37-44.
29. Yao X, Deng S, Wu R, Hong S, Wang B, Huang J, et al. Highly efficient removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater using aminated wheat straw. RSC advances. 2016;6(11):8797-805.
30. Lenth RV. Response-surface methods in R, using rsm. J Stat Softw. 2009;32(7):1-17.
31. Bahobail A, Gad El-Rab SMF, Amin GA. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 st ed. Washington, DC, USA, 2005.
32. Babu BR MK, Venkatesan P. Removal of pesticides from wastewater by electrochemical methods–A comparative approach. Sustain. Environ. Res. 2011;12(16):3-12.
33. Su-Myeong Hong CM, Hye-young Kwon, Taek-kyum Kima, and Doo-ho Kim. Aqueous Degradation of Imidacloprid and Fenothiocarb using Contact Glow Discharge Electrolysis: Degradation Behavior and Kinetics. Food Sci Biotechnol. 2013;22:1773-8.
34. Garrett P. Electrochemical degradation of some pesticides in agricultural wastewater by using modified electrode. Int J Agric Res. 2013;61:1-5.
35. Abdel-Gawad SA BA, Omran KA, Mokhtar MM. Removal of some pesticides from the simulated waste water by electrocoagulation method using iron electrodes. Int J Electrochem Sci. 2012;7:6654-65.
36. Abdel-Gawad SA, Omran KA, Mokhatar MM, Baraka AM. Electrochemical degradation of some pesticides in agricultural wastewater by using modified electrode. J Am Sci. 2011;7(7):44-50.
37. Rahmani AR, Goodini K, Nematollahi D, Azarian G. Electrochemical oxidation of activated sludge by using direct and indirect anodic oxidation. Desalin Water Treat. 2015;56:2234-45.
38.Godini K, Azarian Gh, Rahmani AR, Zolghadrnasab H. Treatment of waste sludge: a comparison between anodic oxidation and electro-Fenton processes. J Res Health Sci. 2013;13:188-93.
39. Turabik M, Gözmen B, Oturan MA. Efficient removal of insecticide imidacloprid from water by electrochemical advanced oxidation processes. Environ Sci Pollut Res. 2014;21:8387-97.
40. Ridruejo C, Salazar C, Cabot PL, Centellas F, Brillas E, Sirés I. Electrochemical oxidation of anesthetic tetracaine in aqueous medium. Influence of the anode and matrix composition. J Chem. Eng. 2017;326:811-9

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61186/sjku.28.1.135]