Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 10, No. 4, PP. 15-28, Winter 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2025.518464.1453

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دهم، شماره ۴، صفحات ۱۵-۲۸، زمستان ۱۴۰۴

Research Paper

Investigation of Organic Matter Removal by Electrocoagulation Process in Dairy Industry (Case Study: Mehr Ice Cream Company, Isfahan)

Elham Izadinia[1*] and Ali Nasri[2]
1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.
2- MSc Graduate, Water and Hydraulic Structures Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: elham.izadinia@gmail.com

Received: 15/05/2025
Revised: 05/08/2025
Accepted: 20/08/2025
© IWWA

Abstract

Dairy industries are high consumers of water, most of which is discharged as wastewater. This study was conducted by constructing a pilot system and performing a laboratory-scale investigation on the removal of organic matter based on carbon in ice cream manufacturing industries over one month using the electrocoagulation process. The reference samples tested were taken from the effluent of the equalization unit of the Mehr ice cream factory located in the Isfahan Jay Industrial Town. In this research, the variables COD, TSS, and BOD concentrations were respectively 8700, 2900, and 6200 mg/L at reaction times of 15, 30, 45, and 60 minutes and pH values of 3, 5, 7, and 9 with current intensities of 0.75, 1.5, 2.25, and 3 amperes. These were evaluated in four electrode arrangements: iron, aluminum, iron and aluminum with equal ratios, and iron to aluminum in a 1:2 ratio as the anode electrode. The results showed that the highest removal efficiencies for COD, BOD, and TSS were at pH 3, with a reaction time of 60 minutes, using a combined iron and aluminum electrode with equal numbers, and a current intensity of 2.25 amperes, achieving removal rates of 89.3%, 95.1%, and 82.5%, respectively.

Keywords: Chemical Oxidation, Dairy Industry, Electrocoagulation Process, Wastewater Treatment.

مقاله پژوهشی

بررسی حذف مواد آلی توسط فرایند انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی (مطالعه موردی: شرکت بستنی مهر اصفهان)

الهام ایزدی‌نیا [۱*] و علی نصری [۲]
۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: elham.izadinia@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

صنایع لبنی، مصرف‌کننده حجم بالایی از آب هستند که بخش اعظم آن به‌صورت فاضلاب دفع می‌شود. این بررسی، با ساخت پایلوت و به‌صورت مطالعه آزمایشگاهی بر حذف مواد آلی بر پایه کربن در صنایع تولید بستنی به‌مدت یک ماه با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی انجام‌شد. نمونه مرجع مورد آزمایش خروجی واحد متعادل‌ساز کارخانه بستنی مهر واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان تهیه‌شد. در این تحقیق متغیر غلظت COD، TSS و BOD به‌ترتیب ۸۷۰۰، ۲۹۰۰ و ۶۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مدت زمان ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه و pH برابر ۳، ۵، ۷ و ۹ با شدت جریان ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ آمپر در چهار چیدمان الکترود آهن، آلومینیوم، آهن و آلومینیوم با نسبت برابر و آهن و آلومینیوم به نسبت ۱ به ۲ به‌عنوان الکترود آند مورد ارزیابی قرارگرفت. بیش‌ترین راندمان حذف COD، BOD و TSS در pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با درصد ۸۹/۳، ۹۵/۱ و ۸۲/۵ به‌دست آمد.

کلمات کلیدی: اکسیداسیون شیمیایی، تصفیه فاضلاب، صنایع لبنیات، فرآیند انعقاد الکتریکی.

۱- مقدمه

آب یکی از ملزومات اصلی کارخانه‌ها و صنایع مختلف است. هر صنعت با توجه به تولیدات خود از این مایع حیاتی استفاده می‌کند و بعد از استفاده به‌عنوان فاضلاب تلقی می‌شود. فاضلاب تولیدی در هر صنعت با توجه به ماهیت آلودگی باید تصفیه شود و داخل منابع پذیرنده تخلیه شود. در این‌خصوص سازمان حفاظت محیط‌زیست، وظیفه کنترلی دارد تا محیط‌زیست آلوده نشود. ازجمله اقدامات این سازمان، ملزم کردن صنایع درخصوص احداث تصفیه‌خانه فاضلاب است. در دهه اخیر اکثر صنایع به‌دلیل این اهمیت، در حال احداث و بهره‌گیری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی هستند. لازم‌به ذکر است اغلب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی به‌دلیل طراحی نامناسب و غیراصولی با مشکلات بهره‌برداری و کاهش راندمان مواجه هستند که متأسفانه با وجود هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری بالا، کارایی مطلوبی ندارد.

۱-۱- نگرش استفاده مجدد از فاضلاب

محدودیت منابع آب در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، یکی از مهم‌ترین معضلات موجود در بخش صنعت و کشاورزی است (رضائی، ۱۴۰۱). از این‌رو استفاده از منابع آبی نامتعارف (ازجمله پساب تصفیه‌خانه‌ها) در این کشورها روزبه‌روز از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌شود. کاربرد پساب به‌عنوان یک منبع دائمی آب در صنعت و کشاورزی، علاوه‌بر تأمین بخشی از نیازهای آبی این بخش، موجب صرفه‌جویی و دوام منابع آبی موجود نیز می‌شود (نظری و همکاران، ۱۳۹۱). به‌کارگیری پساب در صنعت و کشاورزی اگرچه با فواید زیادی همراه است، ولی اگر این امر بدون برنامه‌ریزی دقیق و اعمال مدیریت و نظارت صحیح انجام پذیرد، تبعات بسیار مخربی به‌دنبال دارد (Venzke et al., 2017). به‌طورکلی روش‌های مختلف استفاده از پساب به‌شرح زیر است:

۱- آبیاری اراضی کشاورزی؛ ۲- ایجاد فضای سبز و درختکاری؛ ۳- مصارف صنعتی؛ ۴- مصارف شهری؛ ۵- تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی؛ ۶- تخلیه به آب‌های سطحی به‌شرط خودپالایی رودخانه‌ها؛ ۷- پرورش آبزیان و غیره (Yip et al., 2018).

۱-۲- فرآیندهای انعقاد شیمیایی

انعقاد الکتریکی[1] عبارت است از، تولید مواد منعقدکننده در محل که با استفاده از تجزیه الکتریکی الکترودهای آلومینیوم یا آهن انجام می‌شود. تولید یون‌های فلزی در آند و گاز هیدروژن در کاتد انجام می‌گیرد. فرآیند انعقاد و لخته‌سازی متأسفانه امروزه به‌صورت متداول از طریق افزودن مواد منعقدکننده آلی، معدنی و غیره به محیط آب و فاضلاب انجام می‌پذیرد. روش ترسیب شیمیایی علی‌رغم سابقه نسبتاً طولانی در تصفیه آب و فاضلاب دارای معایبی از قبیل هزینه بالای بهره‌برداری و تولید لجن شیمیایی و تبعات نامطلوب محیط‌زیستی است. لذا به‌منظور یافتن راه‌کارهای مناسب دیگر در راستای جایگزینی فرآیند ترسیب شیمیایی، روش‌های متعددی در سال‌های اخیر مورد توجه و بررسی قرارگرفته است که از این میان می‌توان فرآیند انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی را به‌عنوان یک نوآوری قابل‌توجه در صنعت تصفیه سامانه‌های آبی مطرح نمود (پورمحمود و همکاران، ۱۴۰۱). در این روش، با استفاده از جریان الکتریکی و نصب الکترودهای شیمیایی از جنس آلومینیوم، آهن و غیره که به‌صورت آند و کاتد عمل می‌کنند، ذرات کلوئیدی موجود در فاضلاب از طریق تولید بارهای مثبت الکتریکی از نظر الکتریکی خنثی شده و درنتیجه یون آهن و آلومینیوم و غیره لازم در فرآیند لخته‌سازی فراهم می‌شود (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۲).

شایان ذکر است با طراحی اصولی، این فرآیندهای تصفیه را می‌توان به‌صورت وسیع در صنعت آب و فاضلاب و تصفیه آب‌های زیرزمینی و سطحی به‌کار برد. درخصوص شناورسازی الکتریکی می‌توان بیان کرد فرآیندی است که در آن آلاینده‌ها از طریق حباب‌های اکسیژن و هیدروژن تولیدشده از الکترولیز آب بر روی سطح آب شناور می‌شوند. به‌صورت کلی، در این فرآیند کاتدها گاز هیدروژن و آندها گاز اکسیژن آزاد می‌کنند (Yuliani et al., 2017).

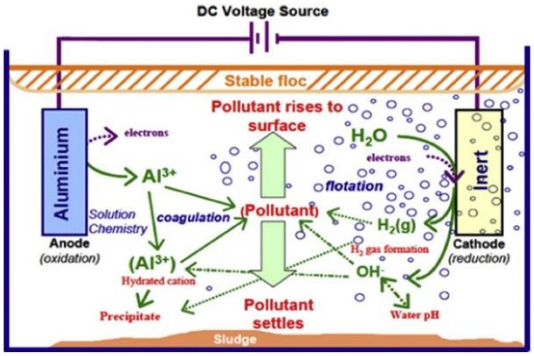
همان‌طور که بیان شد فرآیند انعقاد الکتریکی، یک روش مؤثر است که عامل منعقدکننده در محل توسط اکسیداسیون الکتریکی آند تولید می‌شود (رئوف و ضمیر، ۱۴۰۴). انعقاد الکتریکی شامل تولید ماده منعقدکننده در محلول توسط انحلال الکتریکی یون‌های آلومینیوم یا آهن به‌ترتیب از الکترودهای آلومینیوم و آهن است. تولید یون‌های فلزی در آند اتفاق می‌افتد و گاز هیدروژن در کاتد رها می‌شود. گاز هیدروژن می‌تواند به شناورسازی ذرات توده‌ای برای خروج از آب کمک کند (Ghazouani et al., 2019). نحوه عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترود آلومینیوم در شکل ۱ نشان داده شده است.

انعقاد الکتریکی شامل سه مرحله موفقیت‌آمیز است:

۱- تشکیل ماده منعقدکننده توسط اکسیداسیون الکتروشیمیایی الکترود مصرف‌شونده (آند)؛

۲- ناپایدارسازی آلاینده‌ها، سوسپانسیون ذرات و شکستن امولسیون‌ها؛

۳- تجمع فاز ناپایدارشده و تشکیل لخته.



شکل ۱- نحوه عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی با الکترود آلومینیوم

واکنش اصلی برای آند آلومینیومی به‌صورت رابطه (۱) است:

$$AL_s \rightarrow AL^{3+} + 3e^- \qquad (۱)$$

الکترولیز آب نیز در کاتد و آند مطابق روابط (۲) و (۳) رخ می‌دهد.

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^- \qquad (۲)$$

$$2H_2O + 4H^- \rightarrow O_{2(g)} + 4e^- \qquad (۳)$$

به‌علاوه یون‌های فلزی تولیدشده در آند و یون‌های هیدروکسید تولیدشده در سطح الکترودها در محلول پساب واکنش نشان می‌دهند و هیدروکسیدهای متنوعی تشکیل می‌دهند و درنتیجه شبکه‌های بزرگی را می‌سازند (رابطه‌های (۴) و (۵)).

$$AL^{3+} + 3OH^- \rightarrow AL(OH)_{3(s)} \qquad (۴)$$

$$nAl(OH)_3(s) \rightarrow Al_n(OH)_{3n} \qquad (۵)$$

یون‌های آلومینیوم در حال رشد، منعقدکننده‌های بسیار مؤثری برای منعقد کردن ذرات هستند. یون‌های آلومینیوم آب کافت‌شده می‌توانند شبکه‌های بزرگی از پیوندهای $AL-O-(AL-OH)$ را تشکیل دهند، که می‌توانند آلاینده‌ها را به‌صورت شیمیایی جذب کنند (Ghazouani et al., 2019).

هم‌چنین واکنش اکسیداسیون و احیا به‌ترتیب در الکترودهای آهنی آند و کاتد در روابط (۶) الی (۸) بیان شده است.

$$4Fe^+ \leftrightarrow 4Fe^{2+} + 8e^- \qquad (۶)$$

$$4Fe^+ + 10H_2O + O_2 \leftrightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^+ \qquad (۷)$$

$$8H^+ + 8e^- \leftrightarrow 4H_2 \qquad (۸)$$

از دیگر مزایای این روش حذف فلزات سنگین بین ۸۰٪ الی ۱۰۰٪ و حذف کدورت بیش از ۹۰٪ و امکان بازیابی ذرات رسوب و استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده است (Geraldino et al., 2015).

۱-۳- فاضلاب صنایع لبنیات

صنایع لبنی، صنایعی هستند که در آن‌ها شیر را به‌عنوان ماده اولیه دریافت کرده و سپس طی فرآیندهای صنعتی، به محصولات و فرآورده‌های مختلف از قبیل ماست، دوغ، شیر پاستوریزه، بستنی، خامه، کره و پنیر تبدیل می‌شود. فاضلاب صنایع لبنی دارای میزان بسیار زیادی چربی محلول و غیرمحلول است. وجود مقدار بالا از کربوهیدارت‌ها، لیپید و پروتئین از مهم‌ترین ویژگی‌های فاضلاب صنایع لبنی است. میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)[۲] و بیولوژیکی (BOD)[۳] آن بسیار بالا بوده و ذرات جامد معلق (TSS)[۴] فراونی دارد. به‌طورکلی می‌توان در یک کارخانه صنایع لبنی با تولیداتی مانند شیر، ماست و دوغ، جدول ۱ را ملاک طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب قرار دارد (Melchiors et al., 2016).

جدول ۱- مقادیر مواد آلی موجود در فاضلاب لبنیات

پارامتر	مقدار (میلی‌گرم بر لیتر)
COD	۳۵۰۰-۳۰۰۰
BOD	۲۰۰۰-۱۲۰۰
TSS	۹۶۰
Oil and Grease	۳۵۰-۲۰۰
pH	۱۰-۷

تصفیه فاضلاب صنایع لبنی با توجه به ماهیت و نوع تولیدات آن مانند شیر، ماست، دوغ، پنیر و بستنی در مرحله اول توسط روش‌های فیزیکی، شیمیایی و در مرحله دوم توسط روش‌های بیولوژیکی صورت می‌گیرد. به‌طورکلی منابع تولید فاضلاب در این کارخانجات را می‌توان در دو بخش اصلی شست‌وشوی مخازن در محل دریافت شیر و شست‌وشوی شیرآلات، لوله‌ها و دیگر تأسیسات خلاصه نمود.

۱-۴- پیشینه تحقیق

Benazzi et al. (2016) تصفیه فاضلاب صنعتی صنایع لبنیات را با استفاده از پایلوت پیوسته انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قراردادند. آن‌ها فاضلاب صنایع لبنی را با بار آلی بسیار بالا که

عمدتاً حاوی چربی، پروتئین و محصولات تجزیه میکروبی است، معرفی کردند. این محققین با تغییر در ولتاژ، فاصله الکترودها و زمان ماند هیدرولیکی حذف کدورت، رنگ و کل کربن آلی را بررسی نمودند. از یافته‌های این تحقیق به‌دست آمدن زمان ماند بهینه ۹۰ دقیقه، مقدار ولتاژ ۱۰ ولت و فاصله بین الکترودها به میزان یک سانتی‌متر بود. در این شرایط راندمان حذف رنگ، کدورت و کربن آلی به‌ترتیب ۹۴، ۹۳ و ۶۵ درصد به‌دست آمد.

Ates et al. (2017) با هدف کاهش هزینه‌های بهره برداری و بالابردن کیفیت پساب فاضلاب صنایع لبنیات، از تلفیق فرآیند غشایی و انعقاد الکتریکی استفاده نمودند. این پژوهشگران با بررسی الکترودهای آهن و آلومینیوم، حذف کربن آلی و پروتئین را از فاضلاب ارزیابی داشتند. هم‌چنین برای کاهش ذرات معلق و فیلتراسیون غشایی این فرآیند را بهبود بخشیدند. از یافته‌های این تحقیق بازده حذف پروتئین در الکترود آلومینیوم به میزان ۸۳/۸ درصد و حذف کربن آلی در الکترود آهن به میزان ۸۶/۴ درصد مشاهده شد.

Reilly et al. (2019) تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات و کشتارگاه را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها تصفیه فاضلاب لبنیات و کشتارگاه را به‌دلایلی ازجمله حجم بالای فاضلاب تولیدی، نیاز به تزریق مواد مغذی و ریزمغذی و کربن آلی بسیار بالا برای حفاظت از محیط‌زیست ضروری دانست.

Gerson et al. (2020) فاضلاب صنایع لبنی را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش که در مقیاس واقعی انجام شد، با ابعاد صفحه ۱۵ × ۱۰۰ × ۱۳۰ میلی‌متر و تعداد ۴ صفحه و استفاده از جریان مستقیم ۸۲ آمپر توانستند در مدت‌زمان ۱۰ دقیقه فرآیند تصفیه را تکمیل کنند. محققین میزان حذف COD را ۵۰/۴ درصد و کدورت پساب را در حدود ۹۹/۸٪ در این آزمایش‌ها بیان داشتند.

TriGueros et al. (2022) امکان‌سنجی محیط‌زیستی و اقتصادی تصفیه پساب صنایع لبنی با فرآیند فتوفنتون و انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قراردادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به پتانسیل مطلوب هر دو فرآیند نام برد که با اعمال پارامترهای بهره‌برداری بهینه به هر دو این امکان داده می‌شود تا حذف مواد آلی با بهره‌وری انرژی و حداقل هزینه عملیاتی به حداکثر برسد.

Krishna et al. (2022) توسعه و کاربرد الکترودهای آلیاژ آلومینیوم - مس برای تصفیه فاضلاب لبنیات با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی را بررسی کردند. در این بررسی بیان‌شد تصفیه فاضلاب لبنیات از طریق انعقاد الکتریکی یکی از فن‌آوری‌هایی است که به‌سرعت در حال ظهور است. هم‌چنین راندمان تصفیه فاضلاب پارامترهای مختلف کیفیت آب، برای هر ترکیب الکترود مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت و بهترین ترکیب ممکن شناسایی شد. در میان الکترودهای آلیاژی انتخابی، AC10 برای تصفیه پساب لبنیات با کدورت و حذف COD به‌ترتیب ۳/۲۱ ± ۸۶/۶۴ درصد و ۰/۹۲ ± ۹۸/۲۹ درصد با زمان واکنش محدود ۵۴ دقیقه و حداقل اتلاف الکترود را به‌عنوان آلیاژ بهینه معرفی کردند.

Asaithambi et al. (2023) پارامترهای عملیاتی تصفیه فاضلاب صنعتی با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قراردادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که فرآیند انعقاد الکتریکی با گردش مجدد، این پتانسیل را دارد که راه‌حل امیدوارکننده‌تری برای مشکل حذف آلاینده‌ها از پساب و پساب صنعتی باشد و تحت شرایط بهینه، فاضلاب تصفیه‌شده را می‌توان به‌طور کامل به‌عنوان آب تمیز بازیابی کرد. در این بررسی حذف رنگ ۱۰۰٪، حذف COD ۹۹/۹۰٪ با ترکیب الکترودهای Fe/Fe در زمان ۱۸۰ دقیقه به‌دست آمد.

Boinpally et al. (2023) ضمن معرفی فرآیند انعقاد الکتریکی، بیان کردند انعقاد الکتریکی (EC) یکی از این فناوری‌هایی است که پایه گسترده، بسیار قابل‌اعتماد و مقرون‌به‌صرفه است. هم‌چنین دارای راندمان حذف آلاینده بالایی است و در مقایسه با سایر تکنیک‌ها لجن کم‌تری تولید می‌کند. علاوه‌بر آن به‌طور مؤثر برای تصفیه طیف گسترده‌ای از فاضلاب استفاده می‌شود و عوامل مختلف عملیاتی مانند pH، چگالی جریان، رسانایی محلول، مواد الکترود و شرایط اختلاط بر سیستم انعقاد الکتریکی تأثیر می‌گذارند. TriGueros et al. (2023) انعقاد الکتریکی بهینه به‌عنوان یک فرآیند تصفیه صنایع لبنیات پس از تصفیه اکسیداسیون فتوشیمیایی را معرفی‌کرده و از مزایای این روش، به حداقل مصرف انرژی الکتریکی و سمیت کم‌تر فاضلاب لبنیات اشاره نمودند.

Saeed et al. (2023) فاضلاب تولیدی از پالایشگاه روغن نباتی در کشور عراق را با استفاده از ترکیب فرآیند انعقاد الکتریکی و اکسیداسیون پیشرفته مورد ارزیابی قراردادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به حذف ۹۸٪ COD موجود در این فاضلاب اشاره کرد. در انتها این محققین کاربرد فرآیند انعقاد الکتریکی و الکترواکسیداسیون متوالی را برای این‌گونه فاضلاب‌ها پیشنهاد کردند.

Ankoliyam et al. (2023) مطالعات انجام‌شده توسط محققین مختلف درخصوص فرآیند انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات را جمع‌آوری و مقایسه‌ای در این خصوص ارائه نمودند. در این تحقیق شدت جریان، زمان الکترولیز، pH، هدایت، دما، جنس الکترود را به‌منظور حذف مواد آلی بر پایه

کربن به‌عنوان پارامترهای بهره‌برداری، مورد تحلیل قراردادند.

Faraj et al. (2024) مطالعه‌ای با هدف بررسی اثربخشی ترکیب انعقاد الکتریکی با جذب بر روی زئولیت طبیعی برای تصفیه فاضلاب صنایع لبنی انجام دادند. در این‌خصوص چندین پارامتر عملیاتی، ازجمله pH اولیه (۵-۹)، زمان واکنش (۱۵-۴۵ دقیقه)، شدت جریان ۱۲-۴۸ آمپر بر سطح الکترود و دوز زئولیت (۰/۰ - ۱۵/۰۸۳ گرم در میلی‌لیتر) مورد بررسی قرارگرفت. این محققین شرایط بهینه به‌منظور حذف مواد آلی (۹۲٪ حذف COD و ۹۷٪ حذف کدورت) را در زمان ۲۰ دقیقه با شدت جریان ۳۸ آمپر و دوز زئولیت ۰/۱۸۳ گرم بر میلی‌لیتر به‌دست آوردند.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد ابعاد مدل‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و در حجم کم‌تر از ۵ لیتر انجام شده است. در تحقیق حاضر، روش انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب لبنی؛ به‌صورت موردی صنعت بستنی و در مقیاس پایلوت ارزیابی‌شد. در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای شدت جریان، pH، زمان واکنش، جنس الکترود و نحوه چیدمان آن بر راندمان روش انعقاد الکتریکی در مقیاس پایلوت ارزیابی شد.

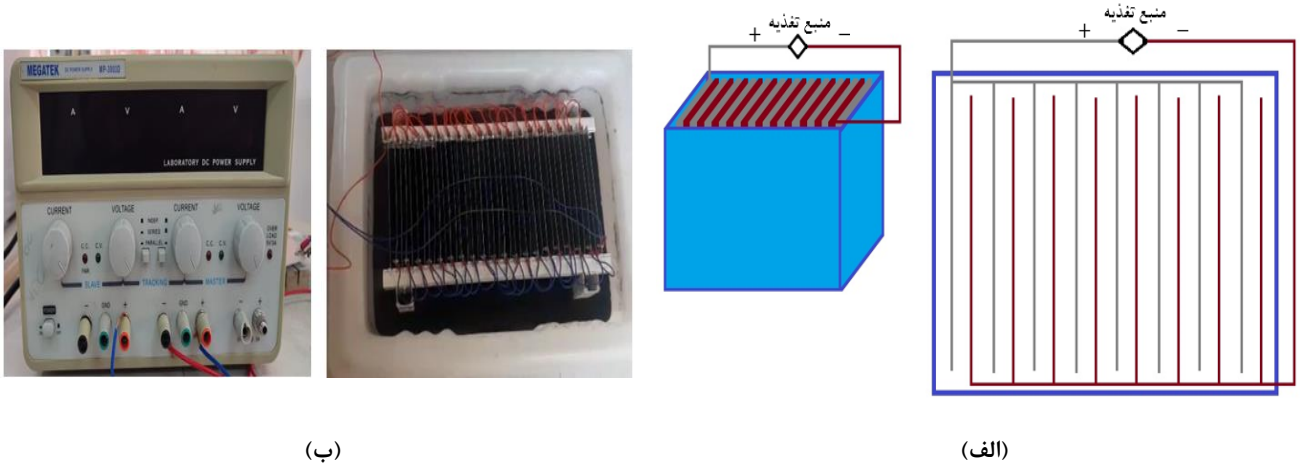
۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ضمن معرفی ضوابط تخلیه فاضلاب صنایع به تصفیه‌خانه‌های متمرکز در شهرک‌های صنعتی جی اصفهان، طرح آزمایش‌ها و مشخصات پایلوت مورد استفاده در این بررسی بیان می‌شود. در این تحقیق به‌منظور طراحی آزمایشات از روش تاگوچی استفاده شد (Taguchi, 1986) که یک روش آماری بسیار قوی است که توسط تاگوچی در دهه ۱۹۵۰ معرفی شد. این روش با بهره‌گیری از آرایه‌های متعامد[۵]، قادر است که در طی آزمایشات کم‌تری، شرایط بهینه و تأثیر پارامترهای مؤثر بر سیستم را مورد بررسی قراردهد. روش تاگوچی نه‌تنها موجب کاهش تعداد آزمایشات می‌شود، بلکه به‌طور غیرمستقیم به کاهش هزینه‌های کلی از نظر زمان و هزینه عملیاتی کمک بسیاری می‌کند. انتخاب فاکتورهای قابل‌کنترل و تعیین سطوح آن‌ها از مهم‌ترین مراحل روش طراحی آزمایش است. جدول ۲ طرح آزمایش‌های این بررسی را در سطوح مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲- طرح آزمایش‌های با فرآیند انعقاد الکتریکی

پارامتر	واحد	حالت‌های مختلف متغیر			
COD/BOD/TSS	mg/L	۸۷۰۰/۶۲۰۰/۴۳۵۰			
زمان	min	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
pH	--	۳	۵	۷	۹
الکترود آند	--	Fe	Fe-Al	AL	Fe-2Al
شدت جریان	آمپر	۰/۷۵	۱/۵	۲/۲۵	۳

به‌منظور بررسی فرآیند انعقاد الکتریکی در راستای تصفیه فاضلاب صنایع لبنی، نمونه آزمایشگاهی با حجم مفید ۵۰ لیتر و با فرآیند منقطع ساخته شد. در این مطالعه از فاضلاب صنعتی شرکت بستنی مهر واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان در پایلوت استفاده شد و هدف آن کاهش بار آلاینده‌های این واحد به‌منظور بررسی تخلیه پساب به تصفیه‌خانه مرکزی آن شهرک بود. در شکل ۲ نمونه ساخته‌شده این پایلوت به‌همراه شماتیک آن و هم‌چنین منبع تغذیه جریان الکتریکی مورد استفاده، ارائه‌شده است. در این نمونه، تعداد صفحات الکترود ۴۰ صفحه به فاصله ۱ سانتی‌متری با ابعاد مستغرق ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر با جریان موازی طراحی شد. به‌ترتیب آندها و کاتدها به‌صورت یک‌درمیان به منبع تغذیه متصل شدند. در این پایلوت امکان تغییر جریان به‌وسیله پل‌ها میان صفحات آلومینیومی و آهنی وجود دارد.



(الف) (ب)

شکل ۲- الف) شماتیک پایلوت؛ و ب) نمایی از پایلوت مورد مطالعه و منبع تغذیه به‌روش انعقاد الکتریکی

۲-۱- ضوابط تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه تصفیه‌خانه

در این پژوهش به‌منظور بررسی اطلاعات و داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج تحقیق حاضر با استانداردهای تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه جمع‌آوری شهرک صنعتی و تصفیه‌خانه، مقایسه‌ای صورت گرفت. در جدول ۳، مقادیر استاندارد تخلیه به شبکه و تصفیه‌خانه شهرک صنعتی جی بیان شده است. واحدهای صنعتی که دارای بار آلی بالاتر از این استاندارد باشند باید قبل از تخلیه به شبکه جمع‌آوری، از پیش‌تصفیه استفاده نمایند و بعد از کاهش بار آلی مجوز تخلیه فاضلاب صنعتی صادر می‌شود.

جدول ۳- مقادیر حداکثر مجاز آلاینده‌های فاضلاب واحد صنعتی برای تخلیه به تصفیه‌خانه

پارامتر	مقدار	واحد
COD	۲۰۰۰	mg/L
BOD_5	۱۰۰۰	mg/L
pH	۸/۶-۵/۵	---
چربی و روغن	۵۰	mg/L
سولفات‌ها	۴۰۰	mg/L
TSS	۳۰۰	mg/L
TDS	۳۰۰۰	mg/L
Cl^-	۶۰۰	mg/L
دترجنت‌ها	در حد صفر	mg/L

۲-۲- دستگاه اندازه گیری آزمایشات کیفی

به‌منظور اندازه‌گیری آزمایشات مورد بررسی، از دستگاه‌های مختلف مطابق با استاندارد متد و استاندارد سازنده این تجهیزات استفاده شد. در جدول ۴، مشخصات کلی این دستگاه‌ها آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده به‌منظور انجام آزمایشات

اسم دستگاه	توضیحات
BOD سنج	مدل AL606 برند آکوالیتیک آلمان
COD سنج	مدل AL250 برند آکوالیتیک آلمان
MultiDirect	دستگاه نورسنجی برند آکوالیتیک آلمان
pH سنج	مدل AL20pH برند آکوالیتیک آلمان
EC سنج	مدل AL20con برند آکوالیتیک آلمان

۲-۳- محاسبه راندمان حذف مواد آلی

باتوجه به این‌که هدف اصلی این تحقیق، بررسی راندمان حذف رنگ و COD از فاضلاب خام صنایع لبنی بود، در مدت‌زمان انجام آزمایش پارامترهای مذکور، راندمان حذف از رابطه (۹) استفاده شد.

$$Efficiency = \frac{S_{in} - S_{out}}{S_{in}} \times 100 \qquad (۹)$$

که *Efficiency*: راندمان برحسب درصد، S_{in}: غلظت اولیه برحسب mg/l و S_{out}: غلظت ثانویه برحسب mg/l است.

۳- نتایج تحقیق

در این بخش، ارائه نتایج حاصل از راندمان فرآیند انعقاد الکتریکی درخصوص حذف بار آلی فاضلاب صنایع بستنی‌سازی بیان می‌شود. با توجه به چیدمان طرح آزمایش به‌روش تاگوچی، تمامی آزمایش‌ها مطابق با طرح آن انجام گرفت و راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS همچنین نسبت COD/BOD به‌دست آمد.

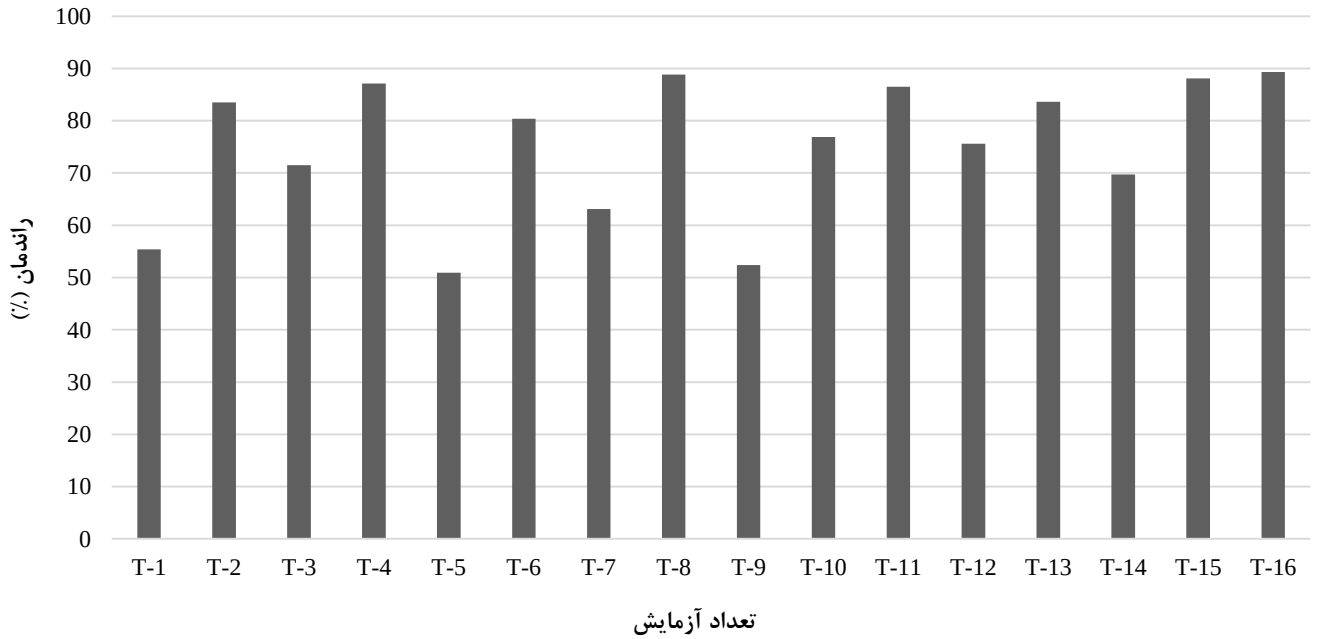
۳-۱- راندمان حذف COD، BOD و TSS

نتایج حاصل، مطابق با طرح آزمایش روش تاگوچی درخصوص راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS از فاضلاب تهیه‌شده از صنعت تولید بستنی به‌ترتیب در این بخش بیان شد. به‌منظور تعیین اثر هریک از پارامترها بر راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS تمامی آزمایش‌ها در پایلوت مورد بررسی و در شرایط یکسان با مدت‌زمان انجام واکنش مطابق با طرح آزمایشات و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه‌ای به‌منظور جداسازی کلوئیدهای تشکیل‌شده انجام‌شد و درنهایت بعد از اتمام این مراحل، برای تعیین شاخص مورد نظر نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج این بخش به‌ترتیب در جدول ۵ و شکل‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است.

بررسی اثرات متقابل pH، زمان واکنش، شدت جریان و جنس الکترود بر عملکرد پایلوت انعقاد الکتریکی نشان داد که بیش‌ترین درصد حذف COD (۸۹/۳٪) در شرایط بهینه شامل pH برابر ۳، زمان واکنش ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۲/۲۵ آمپر و استفاده از الکترود ترکیبی آهن-آلومینیوم (Fe-2Al) حاصل شد. در مقابل، کم‌ترین راندمان حذف (۵۰/۹٪) در شرایط pH برابر ۵، زمان واکنش ۳۰ دقیقه و شدت جریان ۱/۵ آمپر با همان چیدمان الکترودی مشاهده شد. در میان متغیرهای بررسی‌شده، pH نقش مؤثرتری نسبت به زمان واکنش و شدت جریان در کنترل واکنش‌های اکسیداسیون ایفا کرد، به‌گونه‌ای که در محیط‌های اسیدی‌تر (به‌ویژه در pH برابر با ۳) واکنش‌های یونی به‌طور مؤثرتری رخ داده و راندمان حذف افزایش یافت.

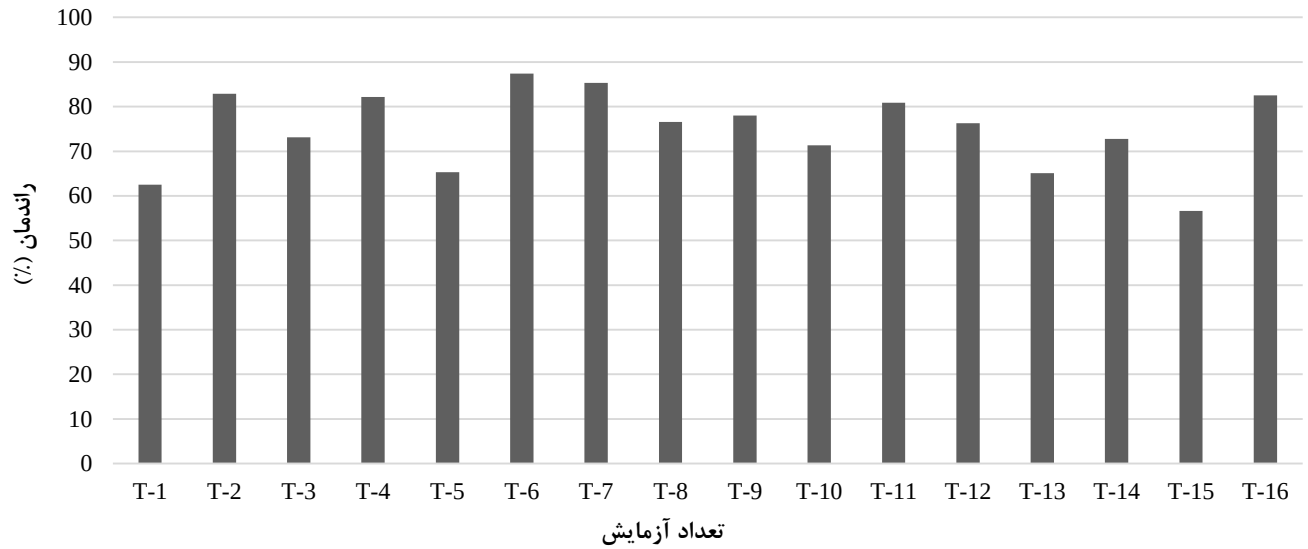
جدول ۵- نتایج حاصل از درصد حذف پارامترهای کیفی منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

ردیف	pH	زمان واکنش (min)	جنس الکترود آند	شدت جریان	درصد حذف COD	در صد حذف TSS	در صد حذف BOD
۱	۳	۱۵	Fe	۰/۷۵	۵۵/۴	۶۲/۵	۶۸/۱
۲	۵	۱۵	Fe-2Al	۲/۲۵	۸۳/۵	۸۲/۹	۸۲/۹
۳	۷	۱۵	Fe-Al	۳	۷۱/۵	۷۳/۱	۹۳/۷
۴	۹	۱۵	Al	۱/۵	۸۷/۱	۸۲/۲	۹۴/۸
۵	۵	۳۰	Fe-Al	۱/۵	۵۰/۹	۶۵/۳	۶۱/۶
۶	۳	۳۰	Al	۳	۸۰/۴	۸۷/۴	۸۱/۹
۷	۹	۳۰	Fe	۲/۲۵	۶۳/۱	۸۵/۳	۷۶/۳
۸	۷	۳۰	Fe-2Al	۰/۷۵	۸۸/۸	۷۶/۶	۷۳/۵
۹	۷	۴۵	Al	۲/۲۵	۵۲/۴	۷۸	۹۳/۹
۱۰	۹	۴۵	Fe-Al	۰/۷۵	۷۶/۹	۷۱/۳	۷۴/۳
۱۱	۳	۴۵	Fe-2Al	۱/۵	۸۶/۵	۸۰/۹	۹۳/۳
۱۲	۵	۴۵	Fe	۳	۷۵/۶	۷۶/۳	۹۴/۵
۱۳	۹	۶۰	Fe-2Al	۳	۸۳/۶	۶۵/۱	۸۰/۵
۱۴	۷	۶۰	Fe	۱/۵	۶۹/۷	۷۲/۸	۷۴/۱
۱۵	۵	۶۰	Al	۰/۷۵	۸۸/۱	۵۶/۶	۸۲/۳
۱۶	۳	۶۰	Fe-Al	۲/۲۵	۸۹/۳	۸۲/۵	۹۵/۱



شکل ۳- نمودار درصد حذف COD منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

همچنین نتایج نشان داد، الکترودهای ترکیبی Fe-2Al در مقایسه با چیدمان‌های صرفاً آهنی، در اکثر شرایط، عملکرد بهینه‌تری داشتند، به‌ویژه در زمان‌های کوتاه و شدت جریان‌های مختلف. اگرچه افزایش شدت جریان به‌طور مطلق منجربه افزایش راندمان حذف نشد، اما در برخی چیدمان‌ها (نظیر Fe-2Al) افزایش جریان با حفظ پایداری نسبی در راندمان همراه بود. به‌طورکلی، ترکیب الکترود Fe-2Al در کنار اسیدیته پایین و زمان کافی واکنش، مؤثرترین عوامل در بهبود کارایی حذف COD در این فرآیند بودند.



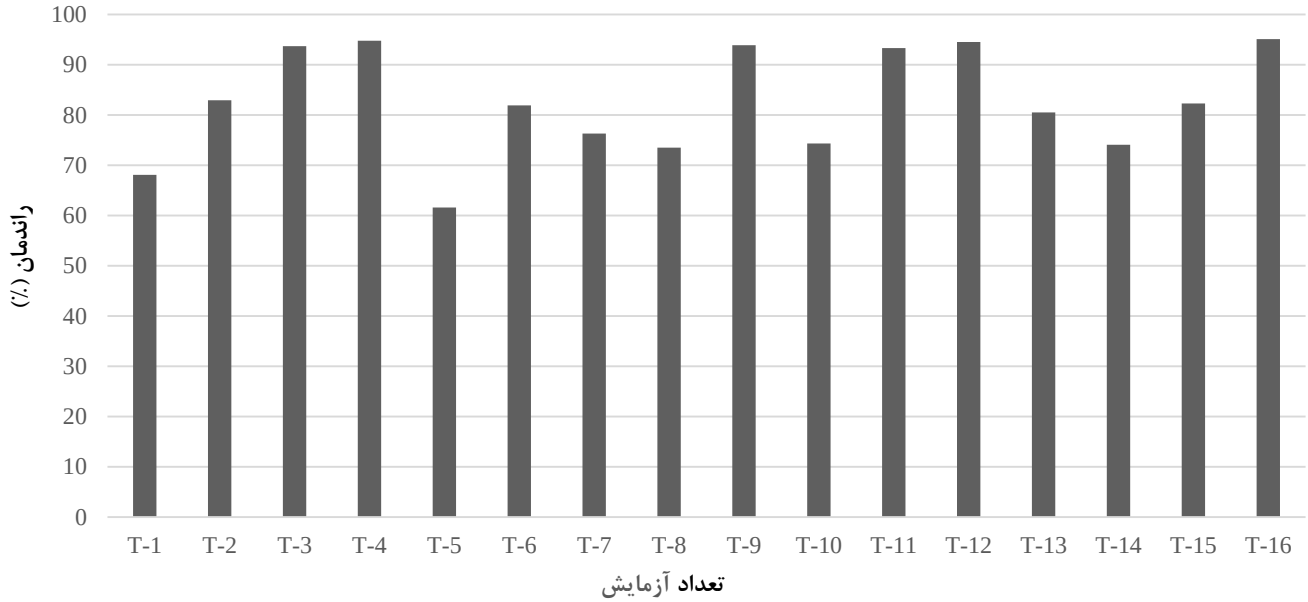
شکل ۴- نمودار درصد حذف TSS منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

بررسی اثرات متقابل متغیرهای عملیاتی بر حذف TSS از پساب توسط پایلوت انعقاد الکتریکی نشان داد که بیش‌ترین راندمان حذف (۸۷/۴٪) در شرایط بهینه شامل pH برابر ۳، زمان ماند ۳۰ دقیقه، شدت جریان ۳ آمپر و استفاده از الکترود آلومینیوم حاصل شده است. کم‌ترین راندمان (۵۶/۶٪) نیز در شرایط pH برابر ۵، زمان ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۰/۷۵ آمپر و همان الکترود مشاهده شد.

نتایج حاکی از آن است که pH نقش مؤثرتری نسبت به سایر پارامترها مانند زمان، جریان و نوع الکترود در کنترل فرآیند انعقاد الکتریکی دارد. محیط‌های اسیدی (به‌ویژه در pH برابر با ۳) با افزایش فعالیت یونی و تسهیل واکنش‌های اکسیداسیون، بیش‌ترین کارایی را در حذف ذرات معلق نشان دادند.

هم‌چنین، الکترود آلومینیوم نسبت به سایر چیدمان‌ها، به‌ویژه در شدت جریان‌های بالا، راندمان بالاتری داشت. چیدمان الکترود ترکیبی Fe-2Al نیز در بسیاری از شرایط، به‌خصوص در pH پایین و جریان بالا، عملکرد پایداری از خود نشان داد.

درخصوص زمان واکنش، مشخص شد که زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) در بسیاری از ترکیب‌ها نتایج بهتری داشته‌اند، هرچند در برخی موارد افزایش زمان، بهبود عملکرد برخی الکترودها را به‌دنبال داشت. هم‌چنین افزایش شدت جریان تا حدود مشخصی باعث افزایش راندمان می‌شود، اما از یک نقطه به بعد، تأثیر pH غالب‌تر بوده و کارایی جریان بالا کاهش می‌یابد یا به‌حالت یکنواخت می‌رسد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که کنترل دقیق pH در کنار انتخاب بهینه نوع الکترود و تنظیم شدت جریان و زمان ماند می‌تواند عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی را در حذف TSS از پساب بهینه سازد.



شکل ۵- نمودار درصد حذف BOD منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

بررسی اثرات متقابل پارامترهای عملیاتی شامل pH، زمان واکنش، شدت جریان و نوع الکترود بر راندمان حذف BOD در فرآیند انعقاد الکتریکی نشان داد که شرایط بهینه حذف این آلاینده در اغلب موارد در pH اسیدی (حدود ۳)، زمان ماند ۶۰ دقیقه، شدت جریان ۲/۲۵ آمپر و استفاده از ترکیب الکترود آهن و آلومینیوم به‌وجود آمد که منجربه دستیابی به راندمانی معادل ۹۵/۱ درصد شد. در مقابل، کم‌ترین راندمان (۶۱/۶ درصد) در شرایط غیربهینه شامل pH برابر ۵، زمان ماند ۳۰ دقیقه و شدت جریان ۱/۵ آمپر مشاهده شد.

نتایج نشان داد که pH محیط، به‌ویژه در بازه اسیدی، نقش کلیدی در افزایش راندمان حذف BOD دارد. هم‌چنین مشخص شد که زمان ماند طولانی‌تر (۶۰ دقیقه) موجب بهبود عملکرد فرآیند می‌شود، درحالی‌که زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) در اغلب موارد منجربه راندمان پایین‌تر شدند. از نظر جنس الکترود، چیدمان آلومینیوم و آهن، به‌ویژه در جریان‌های بالاتر عملکرد بهتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت و در برخی شرایط، چیدمان آلومینیوم به‌تنهایی نیز عملکرد یکنواخت‌تری نشان داد.

درخصوص شدت جریان، جریان‌های میانه (۲/۲۵ آمپر) در اغلب موارد بیش‌ترین کارایی را از خود نشان دادند و افزایش بیش از حد آن لزوماً به بهبود راندمان منجر نشد. هم‌چنین، اثرات ترکیبی شدت جریان و زمان واکنش نشان داد که اگرچه در زمان کوتاه، راندمان پایین است؛ اما با افزایش زمان، راندمان نیز به‌طور پیوسته بهبود می‌یابد، به‌ویژه در شدت جریان‌های میانه تا بالا.

در مجموع، بهینه‌سازی پارامترهای pH، زمان، جریان و نوع الکترود برای دستیابی به حداکثر راندمان حذف BOD ضروری است. از سوی دیگر، این نتایج نشان می‌دهند که طراحی مناسب سیستم و کنترل شرایط عملیاتی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی ایفا نماید.

۳-۲- بررسی رابطه آماری بین متغیرها

در این قسمت از مطالعه تعیین رابطه رگرسیون بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل بیان شده است. متغیر وابسته در این پژوهش راندمان حذف مواد آلی و غلظت اولیه بر حسب COD، شدت جریان، الکترود، زمان ماند واکنش و pH محلول به‌عنوان متغیرهای مستقل توسط رگرسیون خطی چندمتغیره مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۶- تحلیل رگرسیون چندمتغیره در این بررسی

متغیر	β (ضریب x)	β استاندارد شده	T	سطح معنی‌داری
غلظت اولیه (X1)	۰/۰۳۲	۰/۶۳	۳/۵	۰/۰۰۵**
شدت جریان (X2)	۰/۰۳۹	۰/۵۹	۲/۳۳	۰/۰۰۹**
الکترود (X3)	۰/۰۲۹	۰/۰۴۳	۰/۳۱	۰/۷۹۸
زمان واکنش (X4)	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۸	۰/۵
pH محلول (X5)	-۱/۳	-۰/۰۶۳	-۰/۳۲	۰/۷۵۸
عرض از مبدا	۰/۶۰۵۴	-	۴/۲	۰/۰۰۲**

** نشان‌دهنده سطح معنی‌داری در سطح ۱ درصد

معادله رگرسیون چندمتغیره بر اساس راندمان حذف (رابطه (۱۰)).

$$Y=-1.3X5+0.33X4+0.029X3 +0.039X2+0.032X1+60.54 \quad (۱۰)$$

با توجه به جدول ۶، جنس الکترود و مقدار شدت جریان، دو عامل تعیین‌کننده در واکنش اکسیداسیون با فرایند انعقاد الکتریکی هستند که این نتایج با سایر مطالعات در این خصوص مطابقت دارد.

جدول ۷- همبستگی و ضریب تبیین متغیرهای وابسته و مستقل

ضریب همبستگی (R)	ضریب تبیین (R2)
۰/۸۹	۰/۷۹

جدول ۷، میزان همبستگی بین راندمان حذف مواد آلی برحسب COD با سایر متغیرها را نشان می‌دهد. درواقع همه این متغیرها را با ضریب تبیین ۰/۷۹ می‌توان پیش‌بینی نمود.

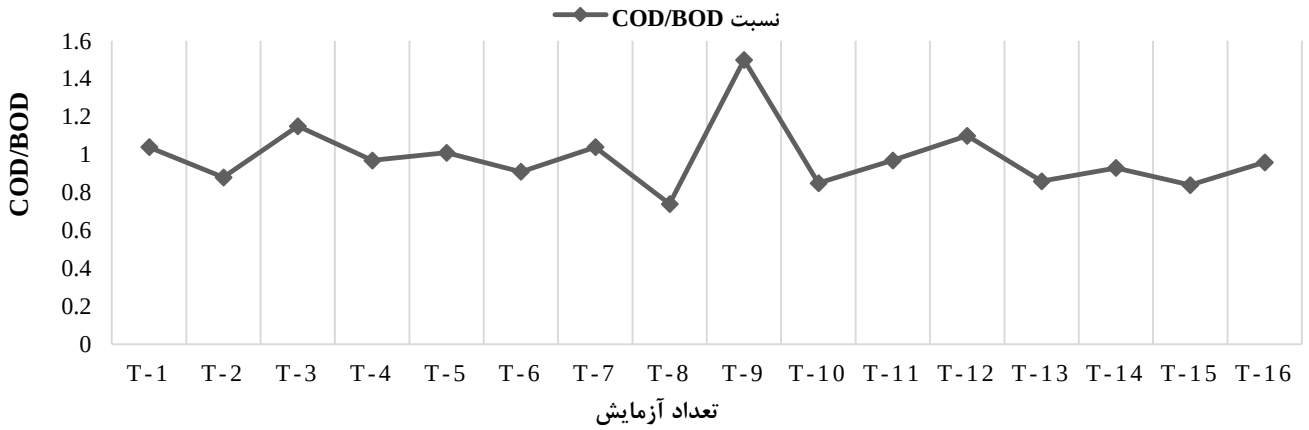
۳-۳- بررسی قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی

با به‌دست آوردن نسبت BOD به COD، میزان کارایی فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال و سایر فرایندهای بیولوژیکی مشخص می‌شود. هرچه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده مطلوب بودن فرآیندهای بیولوژیکی به‌عنوان گزینه مناسب برای تصفیه تکمیلی فاضلاب است. نتایج این بخش به‌ترتیب در جدول ۸ و شکل ۶ بیان شده است. در این بررسی با توجه به جدول ۸ و شکل ۶، این نسبت در محدوده ۰/۸۶ تا ۱/۵ قرارگرفت که این دامنه وسیع، نشان‌دهنده

راندمان مناسب فرایندهای بیولوژیکی است. همان‌طور که مشاهده شد اکثر نسبت‌ها در حدود یک هستند و می‌توان نتیجه گرفت که برای حذف فاضلاب صنایع تولید بستنی بعد از فرآیند انعقاد الکتریکی، از فرآیندهای بیولوژیکی برای تکمیل فرآیند استفاده شود و یا پساب حاصل از روش تصفیه را به سمت تصفیه‌خانه‌های متداول هدایت نمود.

جدول ۸- قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی نسبت BOD به COD

آزمایش	BOD/COD	آزمایش	BOD/COD	آزمایش	BOD/COD	آزمایش	BOD/COD
T-1	۱/۰۴	T-5	۱/۰۱	T-9	۱/۵	T-13	۰/۸۶
T-2	۰/۸۸	T-6	۰/۹۱	T-10	۰/۸۵	T-14	۰/۹۳
T-3	۱/۱۵	T-7	۱/۰۴	T-11	۰/۹۷	T-15	۰/۸۴
T-4	۰/۹۷	T-8	۰/۷۴	T-12	۱/۱	T-16	۰/۹۶



شکل ۶- نمودار نسبت BOD به COD

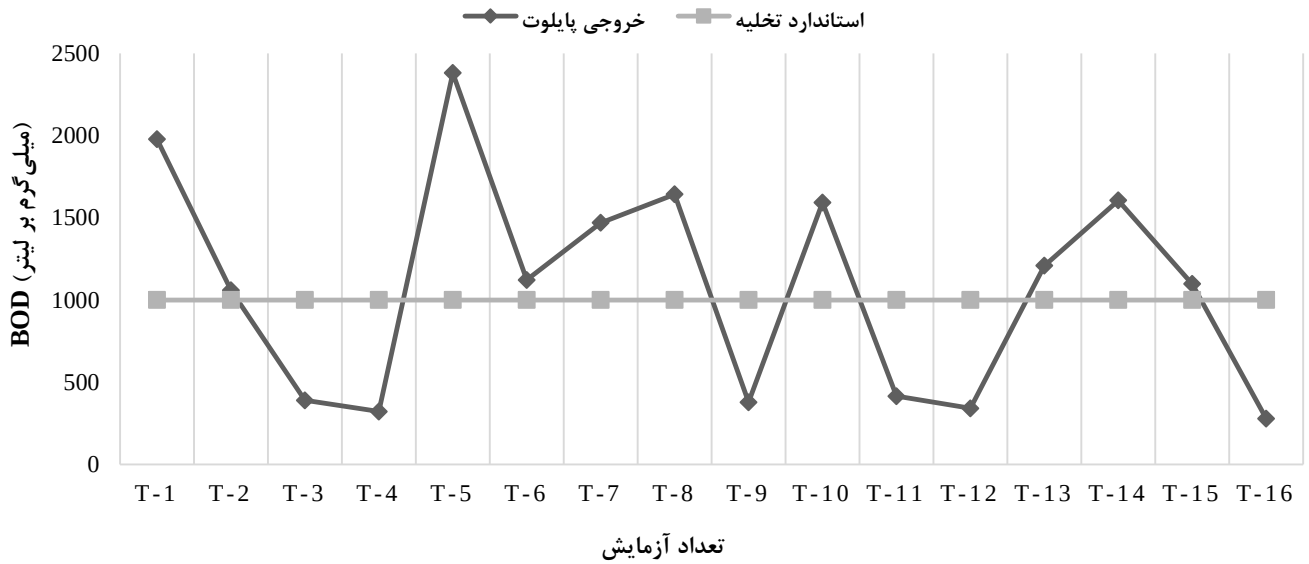
۳-۴- مقایسه کیفیت پساب در مورد تخلیه به تصفیه‌خانه مرکزی

با توجه به استاندارد تخلیه به شبکه شهرک، همچنین آزمایش‌های انجام‌شده در این بخش به‌منظور مقایسه پارامترهای مؤثر در انتخاب پساب در جدول ۹ و شکل‌های ۷ الی ۹، مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه ارائه شد.

جدول ۹- مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه

ردیف	پارامتر	واحد	حداقل نتایج	میانگین نتایج	حداکثر نتایج	استاندارد تخلیه
۱	pH		پایلوت بعد از ته‌نشینی نیاز به تعدیل اسیدیته دارد			۸/۶-۵/۵
۲	COD	mg/L	۹۳۱	۲۱۶۰	۴۲۷۲	۲۰۰۰
۳	BOD	mg/L	۳۰۴	۱۰۸۲	۲۳۸۱	۱۰۰۰
۴	TSS	mg/L	۳۶۶	۷۲۷	۱۲۵۹	۳۰۰

شکل ۷- نمودار مقایسه کیفیت COD خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه



شکل ۸- نمودار مقایسه کیفیت BOD خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه

شکل ۹- نمودار مقایسه کیفیت TSS خروجی پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه‌خانه

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیند انعقاد الکتریکی برای تصفیه پساب صنایع لبنی انجام شد. در این مطالعه از فاضلاب صنعتی شرکت بستنی مهر، واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان در پایلوت استفاده شد و هدف آن کاهش بار آلاینده‌های این واحد و بررسی تخلیه پساب به تصفیه‌خانه مرکزی آن شهرک بود. نتایج به‌دست‌آمده نه‌تنها کارایی بالای این روش را در کاهش بار آلودگی COD، BOD و TSS تأیید می‌کند، بلکه با تحلیل دقیق تأثیر متقابل پارامترهای عملیاتی کلیدی، یک مدل جامع برای بهینه‌سازی و تفسیر علمی فرآیند ارائه می‌دهد و در این خصوص، باید به این نکته هم توجه نمود که فاکتور pH در آزمایش یک فاکتور کلیدی و مؤثر در فرآیندهای انعقاد شیمیایی محسوب می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۴۰۱). یافته‌های اصلی این تحقیق به‌شرح زیر است:

بیش‌ترین مقدار حذف COD در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با درصد ۸۹/۳ و کم‌ترین مقدار حذف این پارامتر در آزمایش T-5 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۳۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با ۵۰/۹٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل pH و زمان ماند واکنش بر راندمان حذف این پارامتر، مشاهده شد اسیدیته تأثیر بیش‌تری نسبت به زمان واکنش دارد. درpHهای

اسیدی و قلیایی فعالیت یونی داخل محیط آبی بیش‌تر بوده و به تبع آن واکنش اکسیداسیون بهتر صورت گرفته است. این مورد در pH برابر با ۳ بهترین نتایج را نشان داد. در مورد اثر متقابل اسیدیته با جنس الکترود نتایج نشان دادند، چیدمان الکترود آهن نسبت به سایر چیدمان‌ها تأثیر کم‌تری دارد و چیدمان Fe-2Al راندمان بهینه‌تری نسبت به سایر چیدمان‌ها در تمام حالت‌های مختلف pH داشته است. درخصوص اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت افزایش شدت جریان لزوماً موجب ارتقای راندمان در این پایلوت نمی‌شود و تأثیر pH نسبت به جریان عبوری، فعالیت اکسیداسیون را بهتر کنترل می‌کند.

بیش‌ترین درصد حذف TSS در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با ۸۲/۵٪ به‌دست آمد.کم‌ترین درصد این پارامتر در آزمایش T-15 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود آلومینیوم و در شدت جریان ۰/۷۵ آمپر برابر با ۵۶/۶٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل اسیدیته با جنس الکترود، نتایج نشان دادند چیدمان Fe-2Al راندمان بهینه‌تری در حالت اسیدی نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد. در رابطه با اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت آزاد شدن یون هیدروکسیل برای کاهش ذرات معلق اثر مطلوبی دارد. هم‌چنین با مشاهده نمودار می‌توان گفت افزایش شدت جریان لزوماً موجب ارتقای راندمان در این پایلوت نمی‌شود و تأثیر pH نسبت به جریان عبوری، فعالیت اکسیداسیون را بهتر کنترل می‌کند. در این نمودار مشاهده شد جریان ۲/۲۵ آمپر راندمان مناسب‌تری در مقایسه با سایر ولی در تمامی حالت‌های اسیدیته داشته و تقریباً نمودار یکنواختی دارد. با توجه به زمان واکنش و جنس الکترود می‌توان بیان نمود، چیدمان الکترود آهن و آلومینیوم در زمان‌های پایین نسبت به سایر چیدمان‌ها تأثیر کم‌تری دارد، ولی با زمان دادن بیش‌تر به این الکترود، رفتار کاملاً برعکسی نسبت به سایر چیدمان‌ها از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین درخصوص زمان واکنش و شدت جریان الکتریکی، بیش‌ترین میزان حذف TSS از پایلوت انعقاد الکتریکی در زمان ماند ۳۰ دقیقه و شدت جریان عبوری ۳/۰۰ آمپر با مقدار ۸۷/۴٪ به‌دست آمد و کم‌ترین مقدار در مدت زمان ۶۰ دقیقه و شدت جریان عبوری ۰/۷۵ آمپر با مقدار ۵۶/۶٪ مشاهده شد.

نتایج حاصل از آزمایش BOD نشان داد که بیش‌ترین مقدار حذف این پارامتر در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با ۹۵/۱٪ به‌دست آمد. کم‌ترین مقدار حذف BOD در آزمایش T-5 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۳۰ دقیقه و الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با ۶۱/۶٪ به‌دست آمد. درخصوص اثر متقابل pH و شدت جریان، می‌توان گفت آزاد شدن یون هیدروکسیل برای کاهش BOD اثر مطلوبی دارد.

در مورد نقش محوری pH، نتایج به‌وضوح نشان داد که pH یک عامل حیاتی و تعیین‌کننده در راندمان فرآیند انعقاد الکتریکی است. بیش‌ترین راندمان حذف مواد آلی در pH اسیدی برابر با ۳ به‌دست آمد. این پدیده را می‌توان به دو مکانیسم اصلی نسبت داد: الف) افزایش انحلال الکترودها و تولید منعقدکننده‌ها: در pH پایین، آند فلزی آهن و آلومینیوم با سرعت بیش‌تری حل می‌شود. این مورد موجب تولید بیش‌تر یون‌های Fe^{3+} و Fe^{2+} یا Al^{3+} می‌شود که برای انعقاد ضروری هستند. از طرفی یون‌ها هیدرولیز شده و به تولید هیدروکسیدهای فلزی کمک می‌کند که با ذرات معلق ترکیب می‌شوند و ته‌نشینی این ذرات صورت می‌گیرد؛ ب) تشکیل مؤثرتر لخته‌ها و کاهش تشکیل رسوبات نامطلوب: هیدروکسیدهای فلزی در pH اسیدی، کلوئیدهای باردار را بهتر خنثی می‌کنند و باعث ناپایداری الکتریکی ذرات و لخته‌های درشت‌تر می‌شوند. در pH بالاتر، تشکیل گونه‌های آمفوتر مانند $Al(OH)_4^-$ و $Fe(OH)_4^-$ باعث کاهش کارایی انعقاد می‌شود. بنابراین، کنترل دقیق pH برای دستیابی به حداکثر راندمان ضروری است.

از طرفی با توجه به هم‌افزایی الکترود ترکیبی Fe-2Al می‌توان گفت، الکترودها به‌واسطه مکانیسم جذب سطحی، تعویض یونی و پلیمری شدن موجب به‌دام انداختن ذرات آلی شده و عمل انعقاد را انجام می‌دهند. در این بررسی یافته‌ها مبین این هستند که استفاده از الکترود ترکیبی آهن و آلومینیوم به‌طور قابل‌توجهی عملکرد فرآیند را بهبود می‌بخشد. بیش‌ترین راندمان برای حذف COD و BOD در این ترکیب به‌دست آمد و نشان‌دهنده یک اثر هم‌افزایی مثبت بین دو الکترود بود، که از مزایای هر دو فلز بهره‌گیری شد. یون‌ها و کمپلکس‌های آلومینیوم، به‌دلیل خواص منعقدکنندگی عالی، به‌ویژه در حذف مواد کلوئیدی و جامدات معلق، مؤثر هستند و یون‌های آهن علاوه‌بر ایجاد لخته، می‌توانند با تشکیل گونه‌های واکنشی (مانند رادیکال‌های هیدروکسیل در حضور اکسیژن محلول) به اکسیداسیون مستقیم و شکستن زنجیره‌های مولکول‌های آلی پیچیده کمک کنند. ترکیب این دو مکانیسم باعث تولید لخته‌هایی با ساختار فیزیکی متراکم‌تر و پایدارتر می‌شود که کارایی به‌دام انداختن آلاینده‌ها و در نتیجه، راندمان حذف را به حداکثر می‌رساند.

هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که شدت جریان و زمان

واکنش باید به‌صورت بهینه و هم‌زمان با pH تنظیم شوند. با افزایش شدت جریان، سرعت انحلال آند و تولید یون‌های فلزی بیش‌تر می‌شود، اما این رابطه تا یک حد مشخصی کارایی را افزایش می‌دهد. افزایش بیش از حد جریان (مثلاً بالاتر از ۲/۲۵ آمپر) می‌تواند منجربه پدیده‌هایی مانند تشکیل لخته‌های کوچک‌تر و ناپایدارتر یا رسوب‌گذاری روی الکترودها و کاهش سطح ویژه صفحات شود که کارایی فرآیند را کاهش می‌دهد. ازطرفی زمان واکنش کافی (تا ۶۰ دقیقه) برای تکمیل فرآیند انعقاد، رشد لخته‌ها و ته‌نشینی آن‌ها حیاتی است. در این زمان، لخته‌های کوچک به یکدیگر پیوسته و لخته‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که ته‌نشینی آن‌ها آسان‌تر است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، تأثیر فرآیند انعقاد الکتریکی بر قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری پساب بود. افزایش چشم‌گیر نسبت BOD/COD به مقادیر نزدیک به ۱ پس از تصفیه، نشان می‌دهد که این فرآیند آلاینده‌های آلی مقاوم و غیرقابل‌تجزیه بیولوژیکی را حذف کرده و پساب را به ترکیبی با قابلیت تجزیه بیولوژیکی بالا تبدیل می‌کند. این یافته دارای کاربرد صنعتی مهمی است. پساب تصفیه‌شده با این روش، می‌تواند به‌عنوان یک خوراک با کیفیت مناسب به واحدهای تصفیه بیولوژیکی (مانند تصفیه‌خانه‌های مرکزی شهرک‌های صنعتی) هدایت شود. این امر نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌های تصفیه در مراحل بعدی می‌شود، بلکه کارایی کلی سیستم تصفیه را به میزان قابل‌توجهی ارتقا می‌بخشد.

درنهایت، این پژوهش یک راهنمای عملی برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های تصفیه پساب با فناوری انعقاد الکتریکی در صنایع لبنی ارائه می‌دهد و تأکید می‌کند که کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی (به‌ویژه pH و نوع الکترود) نقش کلیدی در دستیابی به حداکثر کارایی و تبدیل پساب به یک جریان قابل‌مدیریت برای تصفیه‌خانه‌های متمرکز دارد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Electrocoagulation
2- Biochemical Oxygen Demand
3- Chemical Oxygen Demand
4- Total Suspended Solid
5- Orthogonal Arrays

۶- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از جناب آقای دکتر سید علیرضا مؤمنی و حمایت‌های معنویشان، هم‌چنین از واحد صنعتی بستنی مهر به‌دلیل حسن خلق و تمامی اپراتورهای تصفیه‌خانه شهرک صنعتی جی که در این امر ما را یاری نمودند، قدردانی می‌کنند.

۷- مراجع

پورمحمود، م.، حسینی‌شکیب، م.، و خمسه، ع.، (۱۴۰۱)، "فناوری‌های هوشمند و نوآوری سبز در صنعت تصفیه فاضلاب: نقش میانجی پایداری شرکت و استراتژی‌های پایداری"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴)، ۶۰-۷۴، https://doi.org/ 10.22112/jwwse.2022.289711.1277.

رضایی، م. (۱۴۰۱)، "بحران آب: دوراهی اجتماعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴)، ۴-۱۶، https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.330611.1311.

رئوف، ر.، و ضمیر، س. م.، (۱۴۰۴)، "ارزیابی عملکرد یک پیل نمک‌زدای میکروبی با کاتد زیستی برای نمک‌زدایی از آب شور"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۱۰(۱)، ۴۱-۴۸، https://doi.org/10.22112/jwwse.2024.469397.1410.

کریمی، س.، رمضانی اعتدالی، ه.، و ستوده‌نیا، عباس.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلرورفریک"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۱)، ۵۵-۶۱، https://doi.org/10.22112/jwwse.2021.284006.1271.

Ankoliyam, D., Mudgal, A., Sinha, M.K., Patel, V., and Patel, J., (2023), "Application of electrocoagulation process for the treatment of dairy wastewater: A mini review", *Materials Research Proceedings*, 77(1), 117-124, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.254.

Asaithambi, P., Yesuf, M.B., Govindarajan, R., Selvakumar, P., Niju, S., Pandiyarajan, T., Abudukeremu Kadier, D., Nguyen, D., and Alemayehu, S., (2023), "Industrial wastewater treatment using batch recirculation electrocoagulation (BRE) process: Studies on operating parameters", *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100014, https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100014.

Ates, H., Ozay, Y., and Dizge, N., (2017), "Treatment of dairy industry cleaning-in-place wastewater by electrocoagulation supported with immersed membrane process", *CLEAN Soil Air Water*, 45(11), 1-9, https://doi.org/10.1002/clen.201600654.

Bazrafshan, E., Moein, H., Kord Mostafapour, F., and Nakhaie, Sh., (2013), "Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment", *Journal of Chemistry*, Hindawi Puplishing Corporation, 640139, 1-8, https://doi.org/10.1155/2013/640139.

Benazzi, T.L., Luccio, M.D., Dallago, R.M., Steffens, J., Mores, R., Nascimento, M.S., Krebs, J., and Ceni. G., (2016), "Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries", *Water Science and Technology*, 73(6), 1418-1425, https://doi.org/10.2166/wst.2015.620.

Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., and Vemuri, J., (2023), "A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment", *Water Cycle*, 4, 26-36, https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001.

Faraj, H., Jamrah, A., Al-Omari, S., and Al-Zghoul, T.M., (2024), "Optimization of an electrocoagulation-assisted adsorption treatment system for dairy wastewater", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100574, https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100574.

Geraldino, H.C.L., Simionato, J.I., Souza Freitas, T.K.F., Garcia, J.C., Júnior, O.C., and Correr, C.J., (2015), "Efficiency and operating cost of electrocoagulation system applied to the treatment of dairy industry wastewater", *Acta Scientiarum Technology*, 37(3), 401-408, https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i3.26452.

Gerson D.F., Valente, S., Mendonca, R.C.S., and Felix, L.B., (2020), "Electrocoagulation using zinc electrodes for dairy industry wastewater treatment", *Desalination and Water Treatment*, 206, 58-65, https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26294.

Ghazouani, M., Akrout, H., Jellali, S., and Bousselmi, L., (2019a), "Comparative study of electrochemical hybrid systems for the treatment of real wastewaters from agri-food activities", *Science of The Total Environment*, 647(10), 1651-1664, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.023.

Melchiors, M.S., Piovesan. M., Becegato, V.R., Becegato, V.A., Tambourgi, E.B., and Paulino, A.T., (2016), "Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery", *Journal of Environmental Management*, 182(1), 574-580, https://doi,org10.1016/j.jenvman.2016.08.022.

Nazari, R., Eslamian, S., and Khanbilvardi, R., (2012), "Water reuse and sustainability", *Ecological Water Quality–Water Treatment and Reuse*, 241-254, https://doi.org/10.5772/34428.

Rahul Krishna, B., Bhuvaneshwari, S., Majeed, F., and Aravind, S.P., (2022), "Development and applicability of Aluminium - Copper alloy electrodes for dairy wastewater treatment", *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102915, https://doi.org/10.2139/ssrn.4065596.

Reilly, M., Cooley, AP., Tito, D., Tassou, S.A., and Theodorou, M.K., (2019), "Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters", *Energy Procedia*, 161, 343-351, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.106.

Saeed, O.F., Hameed, K.W., and Abbar, A.H., (2023), "Treatment of vegetable oil refinery wastewater by sequential electrocoagulation-electrooxidation process", *Journal of Environmental Management*, 342, 118362, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118362.

Taguchi, G., (1986), *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*, Asian Productivity Organizatin.

TriGueros, D.E., Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C.L., (2022), "Environmental and economic feasibility of the treatment of dairy industry wastewater by photo-Fenton and electrocoagulation process: Multicriteria optimization by desirability function", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 427, 11382, https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113820.

TriGueros, D.E., Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C.L., (2023), "Optimal electrocoagulation as a post-treatment to photochemical oxidation: Minimal electrical energy consumption and lower acute toxicity of dairy wastewater", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 437, 114496, https://doi.org/10.2139/ssrn.4182784.

Valente, G.D.F.S., Mendonça, R.C.S., and Pereira, J.A.M., (2015), "The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry", *Ciência Rural, Santa Maria*, 45(9), 1713-1719, https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141172.

Venzke, C.D., Rodrigues, M.A.S., Giacobbo, A, Bacher, L.E., Lemmertz, I.S., Viegas, Ch, Striving, J., and Pozzebon, Sh., (2017), "Application of reverse osmosis to petrochemical industry wastewater treatment aimed at water reuse", *Management of Environmental Quality An International Journal*, 28(1), 70-77, https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0149.

Yip, J., Cheng, L., Meng, N.C., Phaik, P.E., Vieritz, A., Talei, A., and Chow, M.F., (2018), "Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions", *Journal of Cleaner Production*, 176(1), 946-958, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.020.

Yuliani, G., Mitasari, K., and Setiabudi, A., (2017), "The use of electrocoagulation technique for paper mill wastewater treatment", *Materials Science Forum*, 901, 149-153, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.901.149, 2017.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.