

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.

* نویسنده مسئول، ایمیل: elham.izadinia@gmail.com

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

چکیده

صنایع لبنی، مصرف کننده حجم بالایی از آب هستند که بخش اعظم آن به صورت فاضلاب دفع می‌گردد. این بررسی با ساخت پایلوت و به صورت مطالعه آزمایشگاهی بر حذف مواد آلی بر پایه کربن در صنایع تولید بستنی به مدت یک ماه با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی انجام شد. نمونه مرجع مورد آزمایش خروجی واحد متعادل‌ساز کارخانه بستنی مهر واقع در شهرک صنعتی جی اصفهان تهیه شد. در این تحقیق متغیر غلظت COD، TSS و BOD به ترتیب 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 الکتروود آهن، آلومینیوم، آهن و آلومینیوم با نسبت برابر و آهن و آلومینیوم به نسبت ۱ به ۲ به عنوان الکتروود آند مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین راندمان حذف COD، BOD و TSS در pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکتروود 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 بدست آمد.

کلیدواژه‌ها: اکسیداسیون شیمیایی، تصفیه فاضلاب، صنایع لبنیات، فرایند انعقاد الکتریکی.

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

Elham Izadinia^{1*} Ali Nasri²

1 - Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

*- Corresponding author: Elham.izadinia@gmail.com

2- Master's degree in Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Received: 15/05/2025

Revised: 05/08/2025

Accepted: 20/08/2025

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 J 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.

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 به عنوان فاضلاب تلقی می‌شود. فاضلاب تولیدی در هر صنعت با توجه به ماهیت آلودگی می‌بایست تصفیه شود و بداخل منابع پذیرنده تخلیه شود. در این خصوص سازمان محیط زیست وظیفه کنترلی دارد تا محیط زیست آلوده نشود. از جمله اقدامات محیط زیست ملزم کردن صنایع در خصوص احداث تصفیه خانه فاضلاب است. در دهه اخیر اکثر صنایع بموجب این اهمیت در حال احداث و بهره‌گیری از تصفیه خانه‌های فاضلاب صنعتی می‌باشند. لازم بذکر است اغلب تصفیه خانه‌های فاضلاب صنعتی بدلیل طراحی نامناسب و غیر اصولی 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 نیمه خشک، یکی از مهمترین معضلات موجود در بخش صنعت و کشاورزی است (رضائی، ۱۴۰۱). از این‌رو استفاده از منابع آبی نامتعارف (از جمله پساب تصفیه خانه‌ها) در این کشورها روز به روز از اهمیت

بیشتری برخوردار می‌شود. کاربرد پساب به عنوان یک منبع دائمی آب در صنعت و کشاورزی علاوه بر تأمین بخشی از نیازهای آبی این بخش، باعث صرفه‌جویی و دوام منابع آبی موجود نیز می‌گردد (Nazari et al., 2012). به کارگیری پساب در صنعت و کشاورزی اگر چه با فواید زیادی توأم است ولی چنانچه این امر بدون برنامه‌ریزی دقیق و اعمال مدیریت و نظارت صحیح انجام پذیرد تبعات بسیار مخربی به دنبال دارد (Venzke et al., 2017). به طور کلی روش‌های مختلف استفاده از پساب به شرح زیر می‌باشد:

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 به شرط خودپالایی رودخانه‌ها، ۷- پرورش آبزیان و... (Yip et al., 2018).

۱-۲- فرایندهای انعقاد شیمیایی

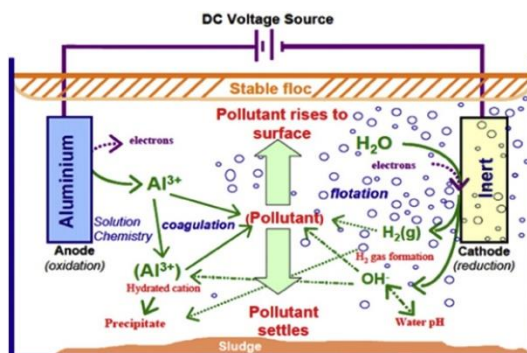
انعقاد الکتریکی^۱ عبارت است از تولید مواد منعقدکننده در محل که با استفاده از تجزیه الکتریکی الکترودهای آلومینیوم یا آهن انجام می‌شود. تولید یون‌های فلزی در آند و گاز هیدروژن در کاتد انجام می‌گیرد. فرایند انعقاد و لخته‌سازی متاسفانه امروزه به صورت متداول از طریق افزودن مواد منعقدکننده آلی، معدنی و... 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 زیست‌محیطی دارد. لذا به منظور یافتن راهکارهای مناسب دیگر در جهت جایگزینی فرایند ترسیب شیمیایی، روش‌های متعددی در سال‌های اخیر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است که از این میان می‌توان فرایند انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی را به عنوان یک نوآوری قابل توجه 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 ... که به صورت آند و کاتد عمل می‌کنند ذرات کلوئیدی موجود در فاضلاب از طریق تولید بارهای مثبت الکتریکی از نظر الکتریکی خنثی شده و در نتیجه یون آهن و آلومینیوم و... لازم در فرایند لخته‌سازی فراهم می‌گردد (Bazrafshan et al., 2013).

شایان ذکر است با طراحی اصولی، این فرایندهای تصفیه را می‌توان به صورت وسیع در صنعت آب و فاضلاب و تصفیه آب‌های زیرزمینی و سطحی به کار برد. در خصوص شناورسازی الکتریکی می‌توان بیان کرد، که فرایندی است که در آن آلاینده‌ها از طریق حباب‌های اکسیژن و هیدروژن تولید شده از الکترولیز آب بر روی سطح آب شناور می‌شوند. به صورت کلی در این فرایند کاتدها گاز هیدروژن و آندها گاز اکسیژن آزاد می‌نمایند (Yuliani et al., 2017).

همانطور که بیان شد فرایند انعقاد الکتریکی یک روش موثر است که عامل منعقدکننده در محل توسط اکسیداسیون الکتریکی آند تولید می‌شود (رئوف و ضمیر، ۱۴۰۴). انعقاد الکتریکی شامل تولید ماده‌ی منعقدکننده در محلول توسط انحلال الکتریکی یون‌های آلومینیوم یا آهن به ترتیب 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 فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترود آلومینیوم در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی با الکترود آلومینیوم

انعقاد الکتریکی شامل ۳ مرحله‌ی موفقیت‌آمیز است:

۱. تشکیل ماده منعقدکننده توسط اکسیداسیون الکتروشیمیایی الکترود مصرف شونده (آند)؛
 ۲. ناپایداری آلاینده‌ها، سوسپانسیون ذرات و شکستن امولسیون‌ها؛
 ۳. تجمع فاز ناپایدار شده و تشکیل لخته.
- واکنش اصلی برای آند آلومینیومی به صورت رابطه‌ی شماره (۱) است:



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



به علاوه یون‌های فلزی تولید شده در آند و یون‌های هیدروکسید تولید شده در سطح الکترودها در محلول پساب واکنش

نشان می‌دهند و هیدروکسیدهای متنوعی تشکیل می‌دهند و در نتیجه شبکه‌های بزرگی را می‌سازند. (روابط شماره ۴ و ۵)



یون‌های آلومینیوم در حال رشد، منعقدکننده‌های بسیار موثری برای منعقد کردن ذرات هستند. یون‌های آلومینیوم آب

کافت شده می‌توانند شبکه‌های بزرگی از پیوندهای $(Al - OH) - (Al - O) - Al$ را تشکیل دهند، که می‌توانند آلاینده‌ها را به صورت

شیمیایی جذب کنند (Ghazouani et al., 2019).

همچنین واکنش اکسیداسیون و احیا به ترتیب در الکترودهای آهنی آند و کاتد در روابط ۶ تا ۸ بیان شده است:



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

۳-۱- فاضلاب صنایع لبنیات

صنایع لبنی صنایعی هستند که در آن‌ها شیر را به عنوان ماده اولیه دریافت کرده و سپس طی فرآیندهای صنعتی خود به محصولات و فرآورده‌های مختلف از قبیل ماست، دوغ، شیر پاستوریزه، بستنی، خامه، کره و پنیر تبدیل می‌نمایند. فاضلاب صنایع لبنی دارای میزان بسیار زیادی چربی محلول و غیر محلول است. وجود مقدار بالا از کربوهیدرات‌ها، لیپید و پروتئین از مهمترین ویژگی‌های فاضلاب صنایع لبنی است. میزان اکسیژن خواهی شیمیایی^۲ (COD) و بیولوژیکی^۳ (BOD) آن بسیار بالا بوده و ذرات جامد معلق^۴ (TSS) فراوانی دارد. به طور کلی می‌توان در یک کارخانه صنایع لبنی با تولیداتی مانند شیر، ماست و دوغ، جدول (۱) را ملاک طراحی تصفیه خانه فاضلاب قرار دارد (Melchioris et al., 2016).

جدول ۱- مقادیر مواد آلی موجود در فاضلاب لبنیات

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

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. به طور کلی منابع تولید فاضلاب در این کارخانجات را می‌توان در دو بخش اصلی شستشوی مخازن در محل دریافت شیر و شستشوی شیرآلات، لوله‌ها و دیگر تأسیسات خلاصه نمود.

۴-۱- پیشینه تحقیق

Benazzi و همکاران در سال ۲۰۱۶ تصفیه فاضلاب صنعتی صنایع لبنیات را با استفاده از پایلوت پیوسته انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها فاضلاب صنایع لبنی را با بار آلی بسیار بالا که عمدتاً حاوی چربی، پروتئین و محصولات تجزیه میکروبی 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 بدست 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 به ترتیب ۹۴، ۹۳ و ۶۵ درصد بدست آمد. Ates و همکاران در سال ۲۰۱۷ با هدف کاهش هزینه‌های بهره برداری و بالابردن کیفیت پساب فاضلاب صنایع لبنیات از تلفیق فرایند غشایی و انعقاد الکتریکی استفاده نمودند. این پژوهشگر 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 فرایند را بهبود بخشید. از یافته‌های این تحقیق بازده حذف پروتئین در الکتروُد آلومینیوم به میزان ۸۳/۸ درصد و حذف کربن آلی در الکتروُد آهن به میزان ۸۶/۴ درصد مشاهده شد. Reilly و همکاران در سال ۲۰۱۹ در یک مقاله مروری تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات و کشتارگاه را با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله تصفیه فاضلاب لبنیات و کشتارگاه را به دلایلی از جمله حجم بالای فاضلاب تولیدی، نیاز به تزریق مواد مغذی و ریز مغذی و کربن آلی بسیار بالا برای حفاظت از محیط زیست ضروری دانست. Gerson و همکاران در سال ۲۰۲۰ 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 ۱۰۰*۱۳۰*۱۵ میلی‌متر و تعداد ۴ صفحه و استفاده از جریان مستقیم ۸۲ آمپر توانستند در مدت زمان ۱۰ دقیقه فرایند تصفیه را تکمیل کنند. محققین میزان حذف COD را ۵۰/۴ درصد و کدورت پساب را در حدود ۹۹/۸ درصد در این آزمایش‌ها بیان داشتند. TriGueros و همکاران در سال ۲۰۲۲ امکان سنجی زیست‌محیطی و اقتصادی تصفیه پساب صنایع لبنی با فرآیند فتوفنتون و انعقاد الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به پتانسیل مطلوب هر دو فرآیند نام برد که با اعمال پارامترهای بهره‌بردارانه بهینه به هر دو این امکان داده می‌شود تا حذف مواد آلی با بهره‌وری انرژی و حداقل هزینه عملیاتی به حداکثر برسد. Krishna و همکاران در سال ۲۰۲۲ توسعه و کاربرد الکتروُد های آلیاژ آلومینیوم - مس برای تصفیه فاضلاب لبنیات با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی بررسی نمودند. در این بررسی بیان شد تصفیه فاضلاب لبنیات از طریق انعقاد الکتریکی یکی از فن‌آوری‌های به سرعت در حال ظهور است و راندمان تصفیه فاضلاب پارامترهای مختلف کیفیت آب برای هر ترکیب الکتروُد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین ترکیب ممکن شناسایی شد. در میان الکتروُد های آلیاژی انتخابی، AC10 برای تصفیه پساب لبنیات با کدورت و حذف COD به ترتیب $3/21 \pm 86/64$ درصد و $0/92 \pm 98/29$ درصد با زمان واکنش محدود ۵۴ دقیقه و حداقل اتلاف الکتروُد را به عنوان آلیاژ بهینه معرفی نمودند. Asaithambi و همکاران در سال ۲۰۲۳، پارامترهای عملیاتی تصفیه فاضلاب صنعتی با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند 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 تصفیه شده را می‌توان به طور کامل به عنوان آب تمیز بازیابی کرد. در این بررسی حذف رنگ ۱۰۰٪، حذف COD ۹۹/۹۰ درصد با ترکیب الکتروُد های Fe/Fe در زمان ۱۸۰ دقیقه بدست آمد. Boinpally و همکاران در سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای ضمن معرفی فرایند انعقاد الکتریکی بیان نمودند، انعقاد الکتریکی (EC) یکی از این فناوری‌ها است که پایه گسترده، بسیار قابل اعتماد و مقرون به صرفه است. همچنین دارای راندمان حذف آلاینده بالایی است و در مقایسه با سایر تکنیک‌ها لجن کمتری تولید می‌کند. علاوه بر آن به‌طور موثر برای تصفیه طیف گسترده‌ای از فاضلاب استفاده می‌شود و عوامل مختلف عملیاتی مانند pH، چگالی جریان، رسانایی محلول، مواد الکتروُد و شرایط اختلاط، بر سیستم انعقاد الکتریکی تأثیر می‌گذارند. TriGueros و همکاران در سال ۲۰۲۳ انعقاد الکتریکی بهینه به عنوان یک فرایند تصفیه صنایع لبنیات پس از تصفیه اکسیداسیون فتوشیمیایی معرفی نمودند و از مزایای این روش حداقل مصرف انرژی الکتریکی و سمیت کمتر فاضلاب لبنیات را نام بردند. Saeed و همکاران در سال ۲۰۲۳ فاضلاب

تولیدی از پالایشگاه روغن نباتی در کشور عراق را با استفاده از ترکیب فرایند انعقاد الکتریکی و اکسیداسیون پیشرفته مورد ارزیابی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به حذف ۹۸ درصد COD موجود در این فاضلاب نام برد. در انتها این محققین کاربرد فرایند انعقاد الکتریکی و الکترواکسیداسیون متوالی را برای اینگونه فاضلاب‌ها پیشنهاد نمودند. Ankoliyam و همکاران در سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف در خصوص فرایند انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب صنایع لبنیات را جمع‌آوری و مقایسه‌ای در این خصوص خود ارائه نمودند. در این تحقیق شدت جریان، زمان الکترولیز، pH، هدایت، دما، جنس الکتروود را به منظور حذف مواد آلی بر پایه کربن با به عنوان پارامترهای بهره‌برداری مورد تحلیل قرار دادند. Faraj و همکاران در سال ۲۰۲۴ مقاله‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی یک سیستم تصفیه با کمک الکتروکواگولاسیون برای فاضلاب لبنیات ارائه نمودند. این مطالعه با هدف بررسی اثربخشی ترکیب انعقاد الکتریکی با جذب بر روی ژئولیت طبیعی برای تصفیه فاضلاب صنایع لبنی انجام شد. در این خصوص چندین پارامتر عملیاتی، از جمله pH اولیه (۵-۹)، زمان واکنش (۱۵-۴۵ دقیقه)، شدت جریان ۱۲-۴۸ آمپر بر سطح الکتروود و دوز ژئولیت (۰/۸۳-۰/۱۵ گرم در میلی لیتر) مورد بررسی قرار گرفت. این محققین شرایط بهینه به منظور حذف مواد آلی (۹۲ درصد حذف COD و ۹۷ درصد حذف کدورت) را در زمان ۲۰ دقیقه با شدت جریان ۳۸ آمپر و دوز ژئولیت ۰/۱۸۳ گرم بر میلی‌لیتر را بدست آوردند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد ابعاد مدل‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و در حجم کمتر از ۵ لیتر انجام شده است. در تحقیق حاضر به ارزیابی روش انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب لبنی و بصورت موردی صنعت بستنی و در مقیاس پایلوت پرداخته شد. در مطالعه حاضر تاثیر پارامترهای شدت جریان، pH، زمان واکنش، جنس الکتروود و نحوه چیدمان آن بر راندمان روش انعقاد الکتریکی در مقیاس پایلوت ارزیابی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ضمن معرفی ضوابط تخلیه فاضلاب صنایع به تصفیه خانه‌های متمرکز در شهرک‌های صنعتی جی اصفهان، طرح آزمایشات و مشخصات پایلوت مورد استفاده در این بررسی بیان می‌گردد.

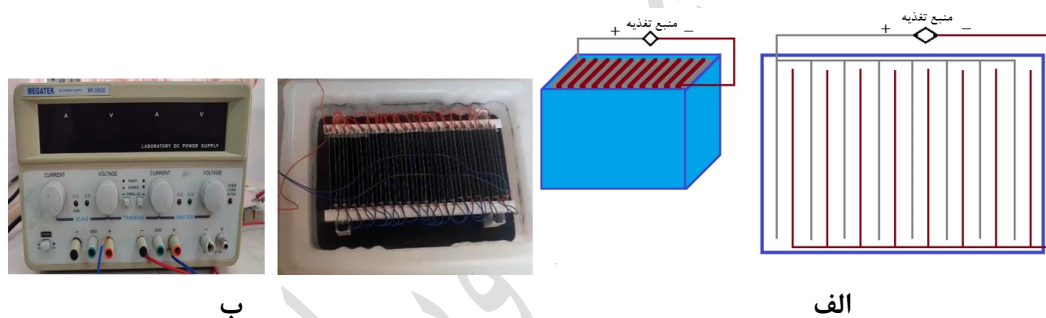
در این تحقیق به منظور طراحی آزمایشات از روش تاگوچی استفاده شد. روش تاگوچی یک روش آماری بسیار قوی است که توسط جنچی تاگوچی در سال ۱۹۵۰ معرفی شد، این روش با بهره‌گیری از آرایه‌های متعامده قادر است که در طی آزمایشات کمتری، شرایط بهینه و تاثیر پارامترهای موثر بر سیستم را مورد بررسی قرار دهد. روش تاگوچی نه تنها موجب کاهش تعداد آزمایشات می‌شود، بلکه به‌طور غیر مستقیم به کاهش هزینه‌های کلی از نظر زمان و هزینه عملیاتی کمک بسیاری می‌کند. انتخاب فاکتورهای قابل کنترل و تعیین سطوح آن‌ها از مهمترین مراحل روش طراحی آزمایش است. جدول (۲) طرح آزمایشات این بررسی را در سطوح مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲- طرح آزمایشات با فرایند انعقاد الکتریکی

پارامتر	واحد	حالت‌های مختلف متغیر
COD/BOD/TSS	mg/L	۸۷۰۰/۶۲۰۰/۴۳۵۰

۶۰	۴۵	۳۰	۱۵	min	زمان
۹	۷	۵	۳	--	pH
Fe-2Al	AL	Fe-Al	Fe	--	الکتروآند
۳	۲/۲۵	۱/۵	۰/۷۵	آمپر	شدت جریان

به منظور بررسی فرایند انعقاد الکتریکی در جهت تصفیه فاضلاب صنایع لبنی نمونه آزمایشگاهی با حجم مفید ۵۰ لیتر و با فرایند 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 به منظور بررسی تخلیه پساب به تصفیه خانه مرکزی آن شهرک بود. در شکل (۲) نمونه ساخته شده این پایلوت به همراه شماتیک آن و همچنین منبع تغذیه جریان الکتریکی مورد استفاده ارائه شده است. در این نمونه تعداد صفحات الکتروآند ۴۰ صفحه به فاصله ۱ سانتی متری با ابعاد مستغرق ۲۰ در ۲۰ سانتی متر با جریان موازی طراحی شد. به ترتیب آندها و کاتدها بصورت یک درمیان به منبع تغذیه متصل شدند. در این پایلوت امکان تغییر جریان بوسیله پل‌ها میان صفحات آلومینیومی و آهنی وجود دارد.



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

۲-۱- ضوابط تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه تصفیه خانه

در این پژوهش به منظور بررسی اطلاعات و داده‌های بدست آمده از نتایج تحقیق حاضر با استانداردهای تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه جمع‌آوری شهرک صنعتی و تصفیه خانه، مقایسه‌ای صورت گرفت. در جدول (۳) مقادیر استاندارد تخلیه به شبکه و تصفیه خانه 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 پیش تصفیه نمایند و بعد از کاهش بار آلی مجوز تخلیه فاضلاب صنعتی صادر می‌شود.

جدول ۳- مقادیر حداکثر مجاز آلاینده‌های فاضلاب واحد صنعتی جهت تخلیه به تصفیه خانه

واحد	مقدار	پارامتر
mg/L	۲۰۰۰	COD
mg/L	۱۰۰۰	BOD ₅
---	۸/۵-۶/۵	pH
mg/L	۵۰	چربی و روغن
mg/L	۴۰۰	سولفات‌ها
mg/L	۳۰۰	TSS
mg/L	۳۰۰۰	TDS
mg/L	۶۰۰	Cl ⁻
mg/L	در حد صفر	دترجنت‌ها

۲-۲- دستگاه اندازه گیری آزمایشات کیفی

به منظور اندازه گیری 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 به منظور انجام آزمایشات

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

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 مدت زمان انجام آزمایش پارامترهای مذکور، راندمان حذف از رابطه شماره (۹) استفاده شد.

$$\text{Efficiency} = \frac{S_{in} - S_{out}}{S_{in}} * 100 \quad (9)$$

در این رابطه:

Efficiency = راندمان بر حسب درصد، Sin = غلظت اولیه بر حسب mg/l، Sout = غلظت ثانویه بر حسب mg/l

۳- نتایج تحقیق

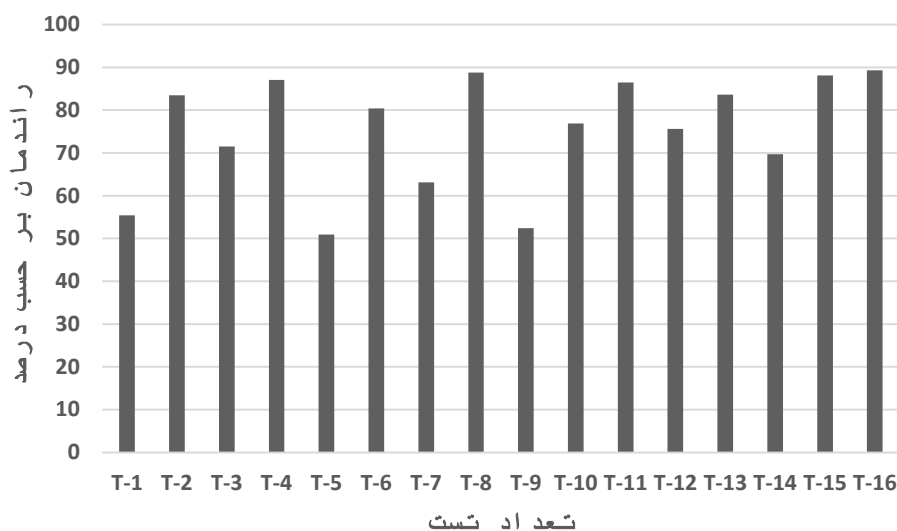
در این بخش از بررسی ارائه نتایج حاصل از راندمان فرایند انعقاد الکتریکی در خصوص حذف بار آلی فاضلاب صنایع بستنی سازی بیان می‌گردد. با توجه به چیدمان طرح آزمایش به روش تاگوچی، تمامی آزمایش‌ها مطابق با طرح آن انجام گرفت و راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS همچنین نسبت COD/BOD بدست آمد.

۳-۱- راندمان حذف COD، BOD و TSS

نتایج حاصل مطابق با طرح آزمایش روش تاگوچی در خصوص راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS از فاضلاب تهیه شده از صنعت تولید بستنی به ترتیب در این بخش بیان گردید. به منظور تعیین اثر هر یک از پارامترها بر راندمان حذف پارامترهای COD، BOD و TSS تمامی آزمایش‌ها در پایلوت مورد بررسی و در شرایط یکسان با مدت زمان انجام واکنش مطابق با طرح آزمایشات و زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه‌ای به منظور جداسازی کلوئیدهای تشکیل شده انجام شد و در نهایت بعد از اتمام این مراحل برای تعیین شاخص مورد نظر نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج این بخش به ترتیب در جدول (۵) و شکل (۳ تا ۵) بیان شد.

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

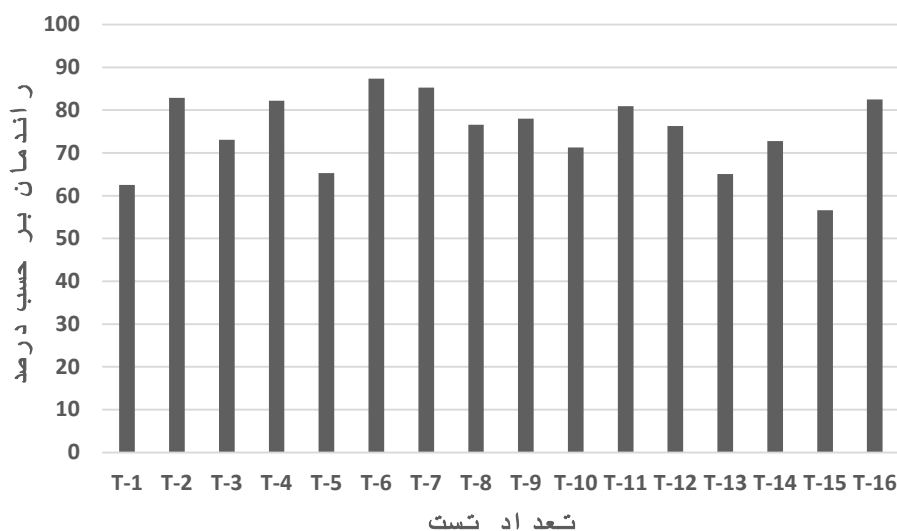
ردیف	pH	زمان واکنش (min)	جنس الکترود آند	شدت جریان	درصد حذف COD	درصد حذف TSS	درصد حذف BOD
۱	۴	۱۵	Fe	۰/۷۵	۵۵/۴	۶۲/۵	۶۸/۱
۲	۵	۱۵	Fe-2Al	۲/۲۵	۸۳/۵	۸۲/۹	۸۲/۹
۳	۷	۱۵	Fe-Al	۳	۷۱/۵	۷۳/۱	۹۳/۷
۴	۹	۱۵	Al	۱/۵	۸۷/۱	۸۲/۲	۹۴/۸
۵	۵	۳۰	Fe-Al	۱/۵	۵۰/۹	۶۵/۳	۶۱/۶
۶	۳	۳۰	Al	۳	۸۰/۴	۸۷/۴	۸۱/۹
۷	۹	۳۰	Fe	۲/۲۵	۶۳/۱	۸۵/۳	۷۶/۳
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

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

همچنین نتایج نشان داد، الکتروودهای 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 منجر به افزایش راندمان حذف نشد، اما در برخی چیدمان‌ها (نظیر Fe-2Al) افزایش جریان با حفظ پایداری نسبی در راندمان همراه بود. به‌طور کلی، ترکیب الکتروود Fe-2Al در کنار اسیدیته پایین و زمان کافی واکنش، مؤثرترین عوامل در بهبود کارایی حذف COD در این فرآیند بودند.



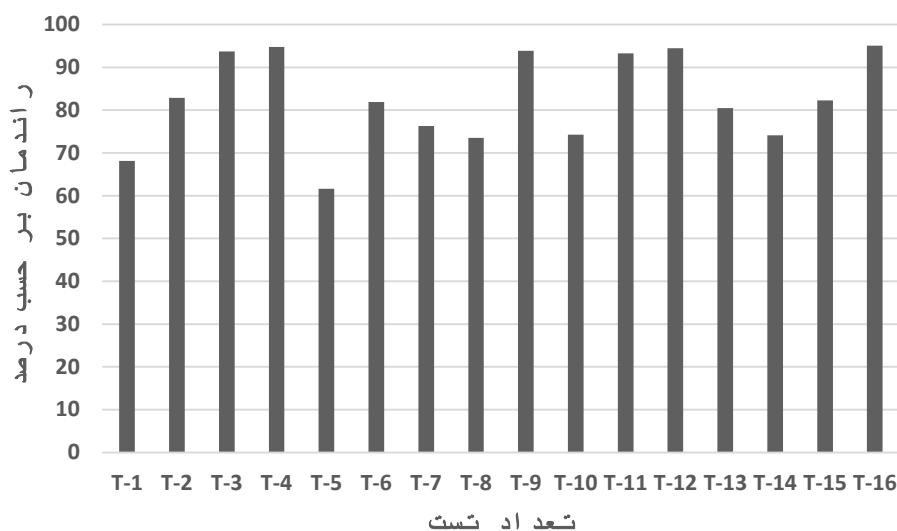
شکل ۴- نمودار درصد حذف TSS منطبق با چیدمان طرح آزمایش تاگوچی

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

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

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

در خصوص 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 به دنبال 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 به حالت یکنواخت می‌رسد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که کنترل دقیق pH در کنار انتخاب بهینه نوع الکتروده 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 الکتروود 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 الکتروود آهن و آلومینیوم حاصل شد که منجر به دستیابی به راندمانی معادل ۹۵/۱ درصد گردید. در مقابل، کمترین راندمان (۶۱/۶ درصد) در شرایط غیر بهینه 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، در حالی که زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) در اغلب موارد منجر به راندمان پایین‌تر شدند. از نظر جنس الکتروود، 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.

در خصوص 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 به طور پیوسته بهبود می‌یابد، به‌ویژه در شدت جریان‌های میانه تا بالا. در مجموع، بهینه‌سازی پارامترهای pH، زمان، جریان و نوع الکتروود 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 ارتقاء عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی ایفا کند.

در این قسمت از مطالعه تعیین رابطه رگرسیون بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل بیان شد. متغیر وابسته در این پژوهش راندمان حذف مواد آلی و غلظت اولیه بر حسب COD، شدت جریان، الکتروود، زمان ماند واکنش و pH محلول به عنوان متغیرهای مستقل توسط رگرسیون خطی چند متغیره مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۶- تحلیل رگرسیون چندمتغیره در این بررسی

متغیر	β (ضریب x)	β استاندارد شده	T	سطح معنی داری
غلظت اولیه (X1)	۰/۰۳۲	۰/۶۳	۳/۵	۰/۰۰۵***
شدت جریان (X2)	۰/۰۳۹	۰/۵۹	۲/۳۳	۰/۰۰۹***
الکتروود (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 معنی داری در سطح ۱ درصد

معادله رگرسیون چند متغیره بر اساس راندمان حذف (رابطه شماره ۱۰):

$$Y = -1.3X5 + 0.33X4 + 0.029X3 + 0.039X2 + 0.032X1 + 60.54 \quad (10)$$

با توجه به جدول (۶) جنس الکتروود و مقدار شدت جریان دو عامل تعیین کننده در واکنش اکسیداسیون با فرایند انعقاد الکتریکی است 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 (R ²)
۰/۸۹	۰/۷۹

میزان همبستگی بین راندمان حذف مواد آلی بر حسب COD با سایر متغیرها را نشان می دهد. در واقع همه این متغیرها با ضریب تبیین ۰/۷۹ را می توان پیش بینی نمود.

۳-۳- بررسی قابلیت تجزیه پذیری بیولوژیکی

با بدست آوردن نسبت BOD به COD میزان کارایی فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب مانند لجن فعال و سایر فرایندهای بیولوژیکی مشخص می شود. هر چه این نسبت به عدد یک نزدیک تر باشد نشان دهنده مطلوب بودن فرایندهای بیولوژیکی به عنوان گزینه مناسب جهت تصفیه تکمیلی فاضلاب است. نتایج این بخش به ترتیب در جدول (۸) و شکل (۶) بیان شد. در این بررسی با توجه به جدول (۸) و شکل (۶) این نسبت در رنج ۰/۸۶ تا ۱/۵ قرار گرفت که این دامنه وسیع نشان دهنده راندمان مناسب فرایندهای بیولوژیکی است. همانطور که مشاهده شد اکثر نسبتها در حدود یک هستند و می توان نتیجه گرفت که برای حذف فاضلاب صنایع تولید بستنی بعد از فرایند انعقاد الکتریکی از فرایندهای بیولوژیکی جهت تکمیل فرایند استفاده شود و یا پساب حاصل از روش تصفیه را به سمت تصفیه خانه های متداول هدایت نمود.

جدول ۸- قابلیت تجزیه پذیری بیولوژیکی نسبت BOD به COD

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



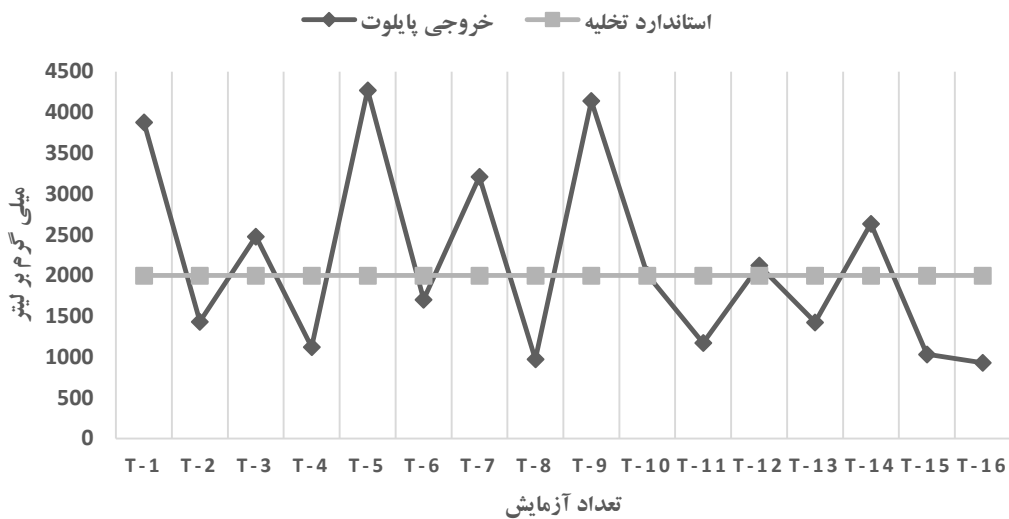
شکل ۶- نمودار نسبت BOD به COD

۳-۴- مقایسه کیفیت پساب در مورد تخلیه به تصفیه خانه مرکزی

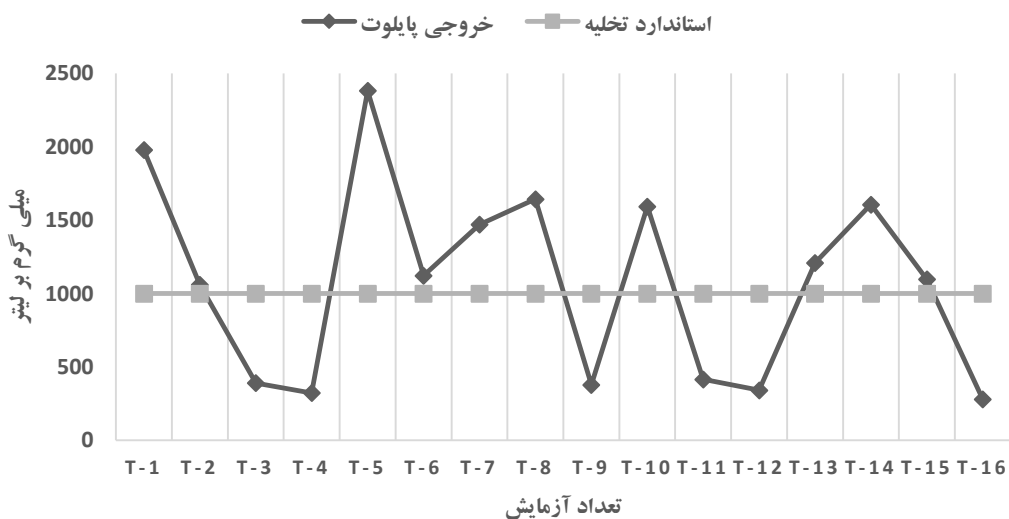
با توجه به استاندارد تخلیه به شبکه شهرک همچنین آزمایش‌های انجام شده در این بخش به منظور مقایسه پارامترهای موثر در انتخاب پساب در جدول (شماره ۹) و اشکال (۷ تا ۹) مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه خانه ارائه گردید.

جدول ۹- مقایسه کیفیت پایلوت با استانداردهای تخلیه به تصفیه خانه

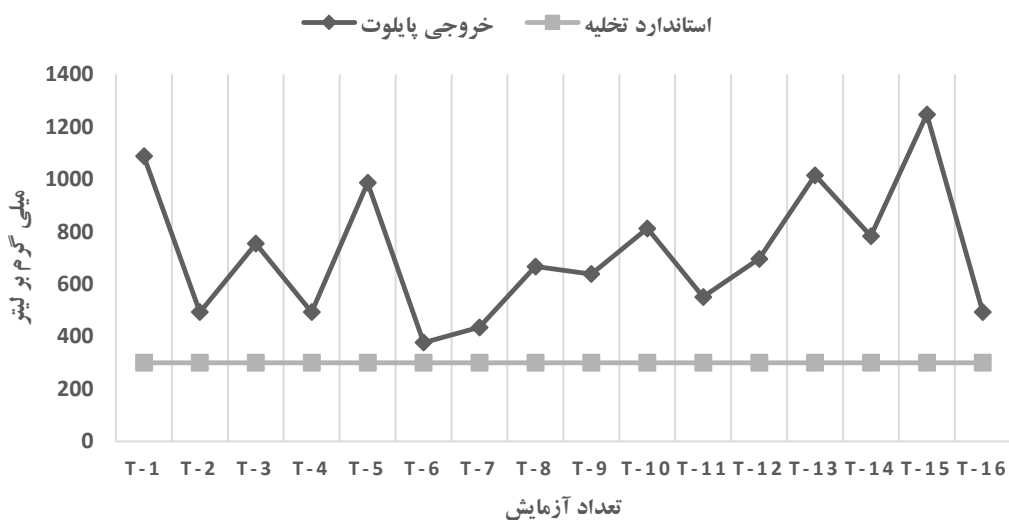
ردیف	پارامتر	واحد	حداقل نتایج	میانگین نتایج	حداکثر نتایج	استاندارد تخلیه
۱	pH		پایلوت بعد از ته‌نشینی نیاز به تعدیل اسیدیته دارد			۸/۶-۵/۵
۲	COD	mg/L	۹۳۱	۲۱۶۰	۴۲۷۲	۲۰۰۰
۳	BOD	mg/L	۳۰۴	۱۰۸۲	۲۳۸۱	۱۰۰۰
۴	TSS	mg/L	۳۶۶	۷۲۷	۱۲۵۹	۳۰۰



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



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



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

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 تصفیه خانه مرکزی آن شهرک بود. نتایج به دست آمده نه تنها 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 موثر در فرایندهای انعقاد شیمیایی محسوب می‌گردد (کریمی و همکاران، ۱۴۰۱). یافته‌های اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

بیشترین مقدار حذف COD در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکتروُد 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 الکتروُد ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با درصد ۵۰/۹ بدست آمد. در خصوص اثر متقابل pH و زمان ماند واکنش بر راندمان حذف این پارامتر مشاهده شد، اسیدیته تأثیر بیشتری نسبت به زمان واکنش در خصوص راندمان حذف این پارامتر دارد. در pH های 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 ۳ بهترین نتایج را نشان داد. در خصوص اثر متقابل اسیدیته با جنس الکتروُد نتایج نشان دادند، چیدمان الکتروُد 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. در خصوص اثر متقابل pH و شدت جریان می‌توان گفت افزایش شدت جریان لزوماً باعث ارتقا 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 الکتروُد ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با درصد ۸۲/۵ بدست آمد. کمترین درصد این پارامتر در آزمایش T-15 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکتروُد آلومینیوم و در شدت جریان ۰/۷۵ آمپر برابر با درصد ۵۶/۶ بدست آمد. در خصوص اثر متقابل اسیدیته با جنس الکتروُد نتایج نشان دادند، چیدمان Fe-2Al راندمان بهینه‌تری در حالت اسیدی نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد. در خصوص 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 باعث ارتقا 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 الکتروُد می‌توان بیان نمود، چیدمان الکتروُد آهن و آلومینیوم در زمان‌های پایین نسبت به سایر

چیدمان‌ها تاثیر کمتری دارد، ولی با زمان دادن بیشتر به این الکتروود رفتار کاملا برعکسی نسبت به سایر چیدمان‌ها از خود نشان می‌دهد. همچنین در خصوص زمان واکنش و شدت جریان الکتریکی بیشترین میزان حذف TSS از پالوت انعقاد الکتریکی در زمان ماند ۳۰ دقیقه و شدت جریان عبوری ۳/۰۰ آمپر با مقدار ۸۷/۴٪ بدست 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 درصد حذف این پارامتر در آزمایش T-16 که میزان pH برابر ۳، با زمان واکنش ۶۰ دقیقه و الکتروود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۲/۲۵ آمپر برابر با ۹۵/۱ درصد بدست آمد. کمترین مقدار حذف BOD در آزمایش T-5 که میزان pH برابر ۵، با زمان واکنش ۳۰ دقیقه و الکتروود ترکیبی آهن و آلومینیوم با نسبت تعداد برابر و در شدت جریان ۱/۵ آمپر برابر با ۶۱/۶ درصد بدست آمد. در خصوص اثر متقابل pH و شدت جریان می‌توان گفت آزاد شدن یون هیدروکسید برای کاهش BOD اثر مطلوبی دارد.

در خصوص نقش محوری pH، نتایج به وضوح نشان داد که pH یک عامل حیاتی و تعیین کننده در راندمان فرآیند انعقاد الکتریکی است. بیشترین راندمان حذف مواد آلی در pH اسیدی برابر با ۳ به دست آمد. این پدیده را می‌توان به دو مکانیسم اصلی نسبت داد: الف) افزایش انحلال الکتروودها و تولید منعقدکننده‌ها: در pH پایین، آند فلزی آهن و آلومینیوم با سرعت بیشتری حل می‌شود. این مورد تولید بیشتر یون‌های Fe^{3+} و Fe^{2+} یا Al^{3+} می‌شود که برای انعقاد ضروری‌اند. 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 کلئیدهای باردار را بهتر خنثی می‌کنند و باعث ناپایداری الکتریکی ذرات و لخته‌های درشت‌تر ایجاد می‌شود. 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 الکتروود ترکیبی Fe-2Al می‌توان گفت، الکتروودهای بواسطه مکانیسم جذب سطحی، تعویض یونی و پلیمری شدن باعث بدام انداختن ذرات آلی شده و عمل انعقاد را انجام می‌دهند. در این بررسی یافته‌ها مبین این هستند که استفاده از الکتروود ترکیبی آهن و آلومینیوم به طور قابل توجهی عملکرد فرآیند را بهبود می‌بخشد. بیشترین راندمان برای حذف COD و BOD در این ترکیب به دست آمد و نشان‌دهنده یک اثر هم‌افزایی مثبت بین دو الکتروود بود، که از مزایای هر دو فلز بهره‌گیری شد. یون‌ها و کمپلکس‌های آلومینیوم به دلیل خواص منعقدکنندگی عالی، به ویژه در حذف مواد کلئیدی و جامدات معلق، موثر هستند و یون‌های آهن علاوه بر ایجاد لخته، می‌توانند با تشکیل گونه‌های واکنشی (مانند رادیکال‌های هیدروکسید 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 به دام انداختن آلاینده‌ها و در نتیجه، راندمان حذف را به حداکثر می‌رساند.

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که شدت جریان و زمان واکنش باید به صورت 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 منجر به پدیده‌هایی مانند تشکیل لخته‌های کوچک‌تر و ناپایدارتر یا رسوب‌گذاری روی الکترودها و کاهش سطح ویژه صفحات شود که کارایی فرایند را کاهش می‌دهد. از طرفی 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 غیرقابل تجزیه بیولوژیکی را حذف کرده و پساب را به ترکیبی با قابلیت تجزیه بیولوژیکی بالا تبدیل می‌کند. این یافته دارای کاربرد صنعتی مهمی است. پساب تصفیه شده با این روش، می‌تواند به عنوان یک خوراک با کیفیت مناسب به واحدهای تصفیه بیولوژیکی (مانند تصفیه خانه‌های مرکزی شهرک‌های صنعتی) هدایت شود. این امر نه تنها باعث کاهش هزینه‌های تصفیه در مراحل بعدی می‌شود، بلکه کارایی کلی سیستم تصفیه را به میزان قابل توجهی ارتقاء می‌بخشد.

در نهایت، 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 (به ویژه pH و نوع الکترودها) نقش کلیدی در دستیابی به حداکثر کارایی و تبدیل پساب به یک جریان قابل مدیریت برای تصفیه خانه‌های 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 سیدعلیرضا مومنی و حمایت‌های معنوی‌شان، همچنین از واحد صنعتی بستنی مهر به منظور حسن خلق و تمامی اپراتورهای تصفیه خانه شهرک صنعتی جی که در این امر ما را یاری نمودند، قدردانی می‌کنند.

۷- مراجع

پورمحمود، م.، حسینی شکیب، 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. doi:

10.22112/jwwse.2022.289711.1277

رضایی، م. (۱۴۰۱)، "بحران آب: دوراهی اجتماعی"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۴): ۱۶-۴. doi:

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. doi: 10.22112/jwwse.2024.469397.1410
- کریمی، س.، رضائی اعتدالی، ه.، و ستوده نیا، عباس.، (۱۴۰۱)، "بررسی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی با استفاده از ماده منعقدکننده کلرورفریک"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۱): ۵۵-۱. doi: 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 (2023) 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., 2017. DOI: 10.1002/clen.201600654.
- Bazrafshan, E., Moein, H., Kord Mostafapour, F., and Nakhaie, Sh., (2013), "Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment", Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Chemistry*. 640139, 1-8. <http://dx.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 & Technology*. (2016) 73 (6): 1418–1425, 2016. doi: 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 (2023) 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 (2024) 100574. <https://doi.org/10.1016/j.csee.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. Doi: 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 (2020) 58-65. doi: 10.5004/dwt.2020.26294.
- Ghazouani, M., Akrouf, 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>.
- Melchioris, 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. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.08.022.
- Nazari, R., Eslamian, S. S., and Khanbilvardi, R., (2012), "Water Reuse and sustainability in Ecological Water Quality", *Water treatment and Reuse*, InTech, pp 495. <https://doi: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*, V: 48, August 2022, 102915. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4065596>.
- Reilly, M., Cooley, A P., Tito, D., Tassou, S. A., and Theodorou, M. K., (2019), "electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters", *Energy Procedia*, 161: 343-351. DOI: 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*, 15:342:118362. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118362.
- TriGueros, Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C. I., (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*, V: 427, 1 May 2022, 113820. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113820>.
- TriGueros, Daniela E.G., Braunm, L., and Hinterholz, C. I., (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*, V: 437, 1 March 2023, 114496. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4182784>.
- Valente, G. de FS., 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*, v.45, n.9, p.1713-1719. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141172>.
- Venzke, C. D., Rodrigues, M. A. S., Giacobbo, A, Bacher, L. E., Lemmert, 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: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. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.901.149, 2017.