بررسی کارآیی روش الکتروشیمیایی در حذف COD از پساب

علیرضا رحمانی [۱] محمدرضا سمرقندی [۲]

(دریافت ۸۵/۱۲/۲۶ پذیرش ۸۶/۶/۷)

چکیده

هدف از انجام این تحقیق بررسی تصفیه‌پذیری پسابها با استفاده از روش الکتروشیمیایی بوده است. به همین منظور از پارامتر کیفی COD به عنوان شاخص آلودگی استفاده گردید. در این تحقیق چگونگی حذف یا کاهش COD با استفاده از الکترودهای آهن، آلومینیم و استنلس‌استیل در زمانهای مختلف الکترولیز (۰ تا ۱۲۰ دقیقه) و نیز ولتاژهای مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت) و با فواصل میانی ۲سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که راندمان حذف با جنس الکترود، زمان تماس و ولتاژ رابطه مستقیم دارد. در ولتاژ ۳۰ ولت و با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم می‌توان در فاصله زمانی ۶۰ دقیقه حدود ۷۴ درصد و با استفاده از الکترود استنلس استیل ۵۳ درصد از بار COD را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: تصفیه فاضلاب، الکتروشیمیایی، آلومینیم، پساب.

Electrochemical Removal of COD from Effluents

Alireza Rahmani [1] Mohammad Reza Samarghandi [2]

(Received Mar. 8, 2007 Accepted Aug. 29, 2007)

Abstract

This study aims to conduct an experimental investigation of treating effluents using the electrochemical method. Removal of COD from effluents was investigated at different electric currents, different electrodes (Al, Fe and Stainless steel), and various electrolysis times. The experimental results show that removal efficiency depends on electrolysis time, type of electrode, and the current applied. From the experiments carried out at 30V, it was found that the efficiency of COD removal over an electrolysis time of 60 minutes was 74% for Al and Fe and 53% for Stainlss steel.

Keywords: Treatment, Electrochemical, Al, Wastewater.

۱- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، rah1340@yahoo.com
۲- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

1. Associate Professor of Environmental Health, Department of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, rah1340@yahoo.com
2. Assistant Professor of Environmental Health, Department of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences

۱- مقدمه

اثرات آلوده کننده فاضلابهای با BOD و COD بالا، به همراه ترکیبات فنلی، ترکیبات کلرینه، جامدات معلق، اسیدهای چرب، تانین، لیگنین و مشتقات آنها در صورت تخلیه به آبهای پذیرنده می‌تواند خطراتی جدی برای موجودات آبزی و آنهایی که از آب استفاده می‌نمایند ایجاد کند [۱]. فاضلابها معمولاً با روشهای متداولی از جمله اکسیداسیون بیولوژیکی، جذب، شناورسازی، انعقاد و تجزیه شیمیایی مورد تصفیه قرار می‌گیرند [۲]. در خصوص کاهش یا حذف COD، به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخصهای آلودگی فاضلاب و پساب، تحقیقات متعددی با استفاده از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی انجام شده است. از جمله روشهای مورد مطالعه می‌توان به استفاده از صافیهای شنی، اولترافیلتراسیون، تبادل یون، رسوب با آهک و روشهای اصلاح شده‌ای مثل اضافه کردن پراکسید، هیپوکلریت، جذب بر روی لجن و کربن فعال اشاره نمود [۳-۶].

از روشهای رو به توسعه که در طی سالهای اخیر در تصفیه فاضلابهای صنعتی و فاضلابهای حاوی آلوده کننده‌های آلی مورد توجه قرار گرفته است روشهای الکتروشیمیایی و الکتروکواگولاسیون می‌باشند [۷-۱۰]. روشهای الکتروشیمیایی به دلیل سازگاری با محیط و امکان تصفیه مایعات، گازها و جامدات مورد توجه ویژه‌ای هستند. در روشهای الکتروشیمیایی عامل اصلی تصفیه، انتقال الکترون می‌باشد. در این روش با عبور جریان الکتریکی واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در داخل سلول‌های الکترولیز یا اصطلاحاً سلول‌های الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. ویژگیهای روش الکتروشیمیایی را در کاربرد آسان، تجهیزات ساده، زمان ماند کوتاه، کاهش یا حذف تجهیزات اضافه نمودن مواد شیمیایی و کاهش حجم لجن می‌توان نام برد[۱۱]. این روش می‌تواند به طور گسترده‌ای برای تصفیه پسابهای حاوی مواد پروتئینی، روغن، شوینده‌های سنتتیک، محلولهای حاوی فلزات سنگین، رنگ و کدورت بالا به کار گرفته شود [۱۲ و ۱۳]. به طور کلی روشهای الکتروشیمیایی مورد استفاده برای تخریب مواد آلی به دو دسته فرآیندهای الکترولیتیکی مستقیم و غیر مستقیم طبقه‌بندی می‌شوند. فرآیندهای الکترولیتیک مستقیم شامل روشهای متعارف احیاء کاتدی و اکسیداسیون آندی می‌باشد. روشهای غیرمستقیم برحسب استفاده از واسطه‌های اکسید کننده یا احیاء کننده که به طور الکتروشیمیایی به صورت برگشت‌پذیر و یا مواد اکسید کننده غیرقابل برگشت در فرآیند الکتروشیمیایی در الکترود آند و یا در الکترود کاتد تولید می‌گردند، به کار برده می‌شوند. از فرآیندهای الکترولیتیکی که به منظور جداسازی فازها استفاده می‌شود می‌توان به روشهای الکتروکواگولاسیون و الکتروفلوکولاسیون و الکتروفلوتیشن اشاره کرد [۱۴ و ۱۵]. در ایران نیز در طی سالهای گذشته حذف آلاینده‌ها با روشهای فوق مورد مطالعه قرار گرفته که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. موسویان و رضایی برای تصفیه فاضلاب، دو روش الکتروکواگولاسیون و الکتروشیمیایی را همراه با اشعه گاما حاوی مواد آلی بالا، رنگ و کلیفرم مدفوعی مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. ربانی نیز در پایان‌نامهٔ دکترای خود استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی همراه با انرژی خورشیدی را در تصفیه پیشرفته فاضلاب مورد بررسی قرار داده است [۱۷]. رنگ زدایی با استفاده از روش الکتروشیمیایی نیز از دیگر مطالعاتی است که توسط دانشور و همکاران صورت پذیرفته است [۱۲ و ۱۸]. در خصوص استفاده از روش الکتروشیمیایی در گندزدایی آب نیز مطالعاتی توسط رحمانی و همکاران انجام شده است [۱۹].

هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه امکان حذف و یا کاهش COD از فاضلاب و پساب با استفاده از روش الکتروشیمیایی بوده است. از آنجا که تاکنون استفاده از الکترودهای آهن، آلومینیم و استنلس استیل در حذف COD مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند در این تحقیق تأثیر نوع الکترود، ولتاژ و زمان الکترولیز نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

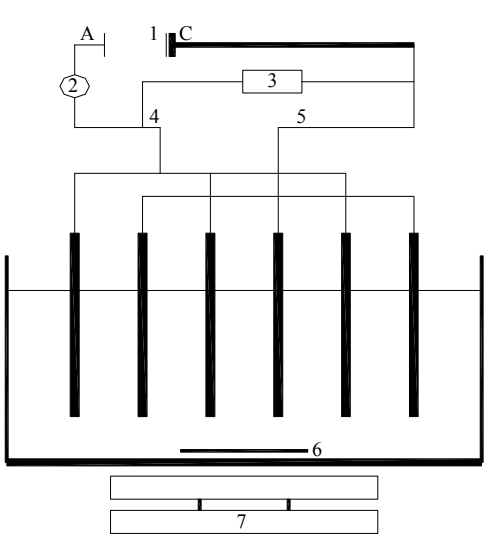
۲- مواد و روشها

این تحقیق یک مطالعه توصیفی - تحلیلی کاربردی است که به منظور بررسی تأثیر جریان الکتریسیتهٔ پیوسته بر روی شاخص آلودگی (COD) در نمونه‌های پساب انجام شده است. برای انجام آزمایش‌ها از بشر ۵۰۰ میلی‌لیتر استفاده شد و بعد از اضافه نمودن پساب با استفاده از الکترودهای مختلف، در زمان ماند و ولتاژ متغیر، جریان الکتریسیته برقرار گردید. قبل و بعد از اتمام هر مرحله، COD نمونه تعیین مقدار گردید. نمونه‌های پساب مورد استفاده در این تحقیق از کانال طبیعی جمع‌آوری فاضلاب در شهر همدان در طی سال ۱۳۸۴ برداشت گردید. انجام کلیه آزمون‌ها در این تحقیق بر اساس روشهای ارائه شده در کتاب روشهای استاندارد انجام پذیرفته است [۲۰]. متوسط پارامترهای کیفی نمونه‌های برداشتی در جدول ۱ آورده شده است.

الکترودهای مورد استفاده از جنس آهن، آلومینیم و استنلس استیل با ابعاد ۴ در ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد و از اسید کلریدریک (۱۵درصد وزنی) برای تمیز کردن الکترودها قبل از شروع آزمایش استفاده گردید. در این آزمون‌ها ترکیب الکترودها به صورت (St-St)، (Al-Al) و (Fe-Fe) انتخاب شد. در هر سری از آزمایش‌ها از سه الکترود آند و سه الکترود کاتد که به صورت موازی و یک در میان نصب شده بودند استفاده گردید.

جدول ۱- ویژگیهای نمونه پساب مورد استفاده

پارامتر	مقدار متوسط
رنگ	قهوه‌ای
pH	۷/۴
T(˚C)	۲۷
DO (mg/L)	۰/۱۴
EC (µs/cm)	۱۰۴۲
NH_4 (mg/L)	۲۲/۵۶
COD (mg/L)	۴۵۰
BOD (mg/L)	۲۵۵
TDS (mg/L)	۵۴۵



۱- منبع تغذیه مستقیم
۲- آمپرمتر
۳- ولت‌متر
۴- آند
۵- کاتد
۶- میله مغناطیسی
۷- همزن مغناطیسی

شکل ۱- نمای راکتور طراحی شده در این تحقیق

فاصله بین هر دو الکترود ۲ سانتی‌متر و الکترودها یک در میان با سیم به همدیگر متصل شده بودند. آزمایش‌ها در سه دامنه ولتاژ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت در مراحل جداگانه و با زمان ماند ۲ ساعت برای هر سری از الکترودها انجام پذیرفت. در این آزمایش‌ها با توجه به ولتاژ عبوری شدت جریان بین ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌آمپر متغیر بود. در هر سری از آزمایش‌ها به صورت دوره‌ای هر ۱۰ دقیقه یک بار از داخل بشر نمونه‌برداری شد و بعد از فیلتر نمودن، COD آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. از یک ترانس مبدل برق متناوب به پیوسته، برای تأمین انرژی و از یک ولت متر و آمپرمتر نیز برای اندازه‌گیری ولتاژ و شدت جریان استفاده گردید. به منظور یکنواخت‌سازی نمونه‌ها در طی انجام الکترولیز از یک همزن مغناطیسی نیز استفاده شد (شکل ۱). تمام آزمایش‌ها در محدوده درجه حرارت آزمایشگاه (حدود ۲۰ درجه سلسیوس) انجام پذیرفت.

۳- نتایج

نتایج آزمایش‌های انجام گرفته جهت حذف COD با استفاده از روش الکتروشیمیایی و الکترودهای آهن، آلومینیم و استنلس استیل

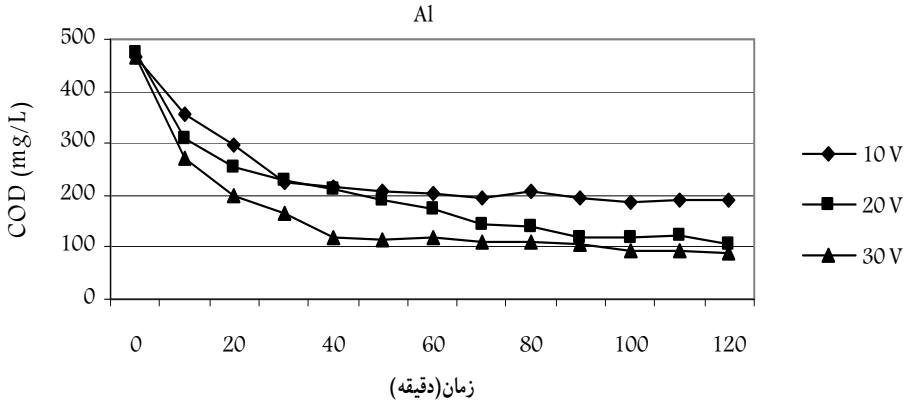
در سه جریان الکتریسیته پیوسته ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت و در فواصل زمانی مختلف در شکلهای ۲ تا ۴ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ و زمان ماند، درصد حذف COD افزایش می‌یابد. بیشترین کارآیی مربوط به الکترود آهن و کمترین آن، مربوط به الکترود استنلس استیل می‌باشد.

۴- بحث

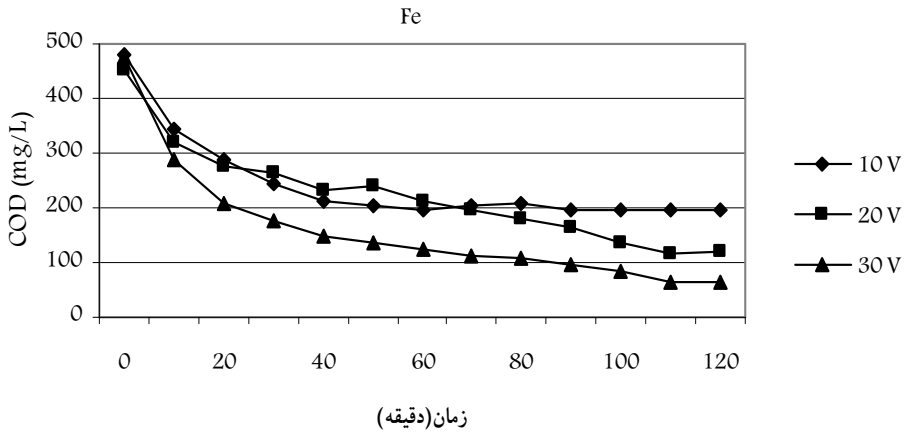
حذف و یا کاهش COD با استفاده از فرآیندهای الکتروشیمیایی از جمله روشهای رو به توسعه می‌باشد. در این تحقیق حذف الکتروشیمیایی COD به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخصهای آلودگی با تأکید بر نوع الکترود، زمان ماند و ولتاژ مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تأثیر جریان پیوسته در حذف COD با استفاده از الکترودهای آلومینیم، آهن و استنلس استیل نشان داده است که برای تمام ترکیب الکترودهای به کار گرفته شده راندمان حذف با افزایش ولتاژ رابطه مستقیم دارد. این نتایج همچنین نشان دهنده این است که افزایش زمان الکترولیز نیز باعث افزایش راندمان حذف می‌گردد.

در طی انجام الکترولیز با به جریان افتادن الکتریسیته پیوسته زمانی که از الکترود آلومینیم یا آهن استفاده می‌شود به ترتیب یون آلومینیم و آهن در آند و یون هیدروکسیل در کاتد تولید می‌گردد [۱۱، ۱۲ و ۲۱]. در حالی که در استفاده از الکترود استنلس استیل محصول تولیدی در کاتد، یون هیدروکسیل و در آند، بستگی به ترکیب آب داشته که به عنوان مثال در محلول نمکی، یون کلرور خواهد بود [۲۲]. طبق تحقیقات انجام شده محصولات ناشی از هیدرولیز از جمله Al^{3+}، Fe^{3+} و Cl^- در فرآیندهای تشکیل فلاک و حذف نقش دارند. امکان تشکیل ترکیبات متنوعی از محصولات هیدرولیز نیز وجود دارد که ممکن است یک یا تعدادی از آنها در انجام فرآیند دخالت داشته باشند [۲۳]. به دلیل تشکیل هیدروکسیدهای آهن و آلومینیم امکان جذب عوامل تولید COD در فلاک‌های شکل گرفته فراهم می‌گردد. همان گونه که در شکل ۵ مشخص است در ولتاژ ۳۰ و با گذشت زمان، میزان جداسازی COD با الکترودهای آهن و آلومینیم در مقایسه با الکترود استنلس استیل بیشتر است. علی‌رغم اینکه درصد حذف برای الکترودهای آهن و آلومینیم بعد از ۶۰ دقیقه، ثابت و در حدود ۷۴ درصد می‌باشد اما درصد حذف برای الکترود آهن با گذشت زمان افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. حداکثر راندمان به دست آمده بعد از ۱۲۰ دقیقه برای الکترودهای آهن و آلومینیم به ترتیب ۸۶/۵۵ و ۸۰/۷۷ درصد بوده است. در استفاده از الکترود استنلس استیل کارآیی حذف بعد از ۶۰ دقیقه حدود ۵۳ درصد بوده و بعد از آن شیب کارآیی به حالت نسبتاً ثابتی می‌رسد به گونه‌ای که با اضافه شدن زمان بعد از گذشته ۶۰ دقیقه، کارآیی حذف تنها ۱۰درصد افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای که با الکترودهای ترکیبی آلومینیم- استنلس استیل انجام پذیرفته، غلظت COD بعد از ۳۵ دقیقه از ۵۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است [۱۳]. نتایج حاصله از مطالعه دیگری که در مراحل جداگانه با استفاده از آندهای آهن و آلومینیم انجام شده، نشان داد که راندمان حذف COD برابر با ۸۴ درصد است [۱۲]. در مطالعات موسویان و رضایی که با الکترود آهن در pH بین ۸/۵ تا ۱۰ انجام شد راندمان حذف COD بعد از ۲۸ دقیقه برابر ۶۸ درصد بود [۱۶]. در مطالعات دانشور و همکاران که حذف رنگ با استفاده از الکترودهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است با شدت جریان ۸۰ آمپر بر مترمربع، ۸۵ درصد از COD حذف شد [۱۸].

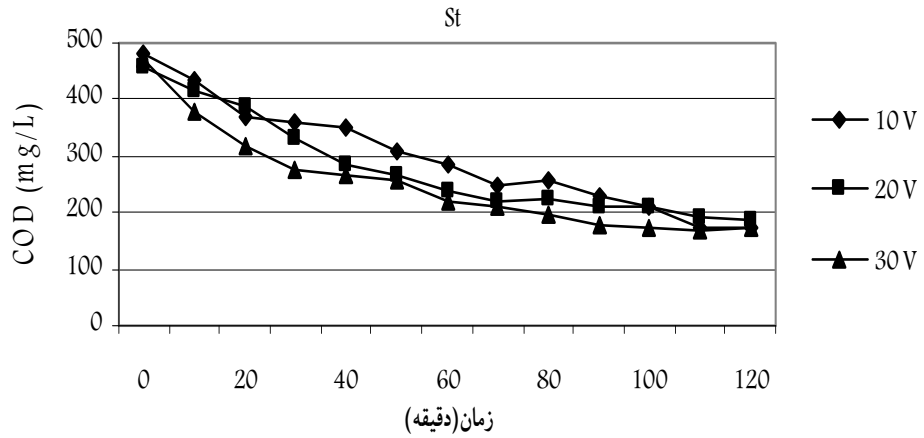
میزان حذف COD پساب در دوره‌های زمانی ۱۰ دقیقه و در ولتاژهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.



شکل ۲- نتایج حاصل ازحذف COD در ولتاژ و زمانهای مورد مطالعه با استفاده از الکترود آلومینیم



شکل ۳- نتایج حاصل ازحذف COD در ولتاژ و زمانهای مورد مطالعه با استفاده از الکترود آهن



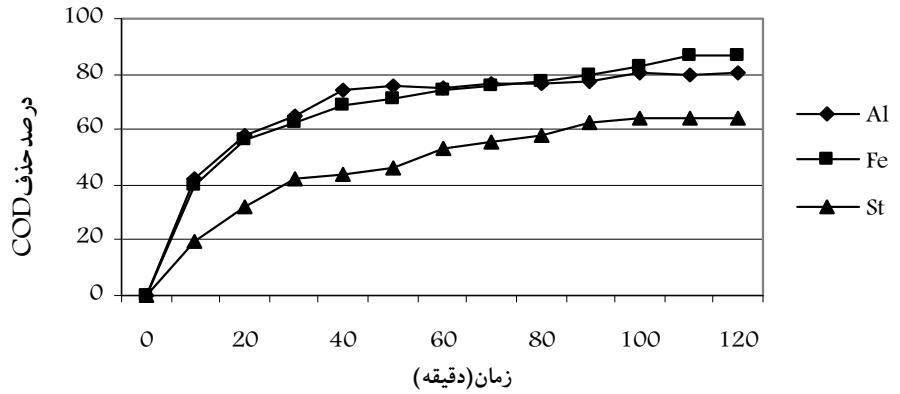
شکل ۴- نتایج حاصل ازحذف COD در ولتاژ و زمانهای مورد مطالعه با استفاده از الکترود استنلس استیل

مطالعات انجام شده بر روی فاضلابهای مختلف با استفاده از فرآیندهای الکتروشیمیایی نشان می‌دهد که افزایش شدت جریان و ولتاژ در راندمان تصفیه تأثیر گذار می‌باشد [۲، ۸ و ۲۳]. نتایج حاصله نشان داده است که راندمان تصفیه به طور چشمگیری با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. با افزایش ولتاژ و شدت جریان، پتانسیل انجام واکنش الکترود نیز افزایش می‌یابد [۲۴]. مطالعات انجام شده توسط شین و همکاران نیز نشان می‌دهد که کارآیی حذف OD در شدت جریانهای ۵، ۱۰ و ۱۵ آمپر به ترتیب ۶۹، ۷۸ و ۸۱ درصد افزایش می‌یابد [۲۵]. با تأمین انرژی کافی، ترکیبات آلی در کاتد احیاء و در آند اکسیده شده و مولکول‌های کوچک‌تری شکل می‌گیرد. بعضی از این مولکول‌های کوچک و جامدات معلق از میان مولکول‌های $Fe(OH)_3$ و یا $Al(OH)_3$ گرفته شده و ضمن تشکیل فلاک با مکانیسم‌های ته‌نشینی و یا شناورسازی توسط H_2 شکل گرفته در کاتد جداسازی می‌شوند [۸].

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق چگونگی حذف COD با استفاده از روش الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده کارآیی حذف COD با افزایش ولتاژ و زمان تماس رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج نشان داده است که در ولتاژ ۳۰ و با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم می‌توان در فاصله زمانی ۶۰ دقیقه حدود ۷۴ درصد و با استفاده از الکترود استنلس استیل ۵۳ درصد از بار COD را کاهش داد.

در مجموع با توجه به نتایج حاصله دیده می‌شود که از روش الکتروشیمیایی می‌توان به عنوان یک روش سازگار با محیط در تصفیه فاضلابهای صنعتی و مخصوصاً برای کاهش غلظت و آمادگی آن برای ورود به سایر واحدهای تصفیه به ویژه واحد بیولوژیکی استفاده نمود.



شکل ۵- مقایسه کارآیی حذف COD با استفاده از الکترودهای آهن، آلومینیم و استنلس استیل در ولتاژ ۳۰

۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان به خاطر حمایت مالی از این تحقیق و فراهم نمودن امکانات لازم و همچنین از خانمها معصومه جمالی و سمیه سادات حسینی به خاطر همکاری در انجام تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۷- مراجع

1- Muna Ali, T. R. (2001). "Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: A review." *Advances in Environmental Research,* 5, 175-196.

2- Gurses, A., Yalcn, M., and Doar, C. (2002). "Electro coagulation of some reactive dyes: A statistical investigation of some electrochemical variables." *Waste Management*, 22, 491-499.

3- Clark, T., Bruce, M., and Anderson, S. (1994). "Decolarization of extraction stage bleach plant effluent by combined hypochlorite oxidation and anaerobic treatment." *Water Sci. Tech.,* 29(5-6), 421-432.

4- Frostell, B., Boman, B., Ek, M., Palvall, B., Berglund, M., and Lindstroem, A. (1994). "Influence of bleaching conditions and membrane filtration on pilot scale biological treatment of kraft mill bleach effluent." *Water Sci. Tech.*, 29(5-6), 163- 176.

5- Streat, M., Patrick, J. W., and Camporro Perez, M. J. (1995). "Sorption of phenol and chlorophenol from water using conventional and novel activated carbons." *Water Res.,* 29 (2), 467-472.

6- Diez, M. C., Mora, M. L., and Videla, S. (1999). "Adsorption of phenolic compounds and color from bleached Kraft mill effluent allophonic compounds." *Water Res*., 33(1), 125-130.

7- Panizzo, M., Bocca, C., and Cerisola, G. (2000). "Electrochemical treatment of wastewater containing polyaromatic organic pollutants." *Water Res*., 34(9), 2601-2605.

8- Lin, S. H., Shyu, C. T., and Sun, M. C. (1998). "Saline wastewater treatment by electrochemical method." *Water Res*., 32 (4), 1059-1066.

9- Lin, S. H., and Peng, C. F. (1996). "Continuous treatment of textile wastewater by combined coagulation, electrochemical oxidation and activated sludge." *Water Res*., 30 (3), 587-592.

10- Tsai, C. T., Lin, S. T., Shue, Y. C. and Su, P. L. (1997). "Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills." *Water Res.,* 31 (12), 3073-3081.

11-Weerachai, P., Sombat, C., and Duang, B. (2000). "Electrocoagulation and subsequent recovery of phenolic compounds." *Analytical Sciences*, 16, 1083-1084.

12- Daneshvar, N., Ashassi Sorkhabi, H., and Tizpar, A. (2003). "Decolorization of orange 11 by electrocoagulation method." *Separation and Purification Tech.,* 31, 153-162.

13- Findlay, G. E., Darryl, L. F., and Jesse, V. L. (2006). "Electrolytic treatment of an industrial wastewater from a hosiery plant." *Water Environmental Research*, 78(4), 435-441.

14- Worlds greatest encyclodictionamana capedia (2006). "Electrolysis." <http://www.answers.com/topic/electrolysis> (Jan. 5, 2006).
15- Tarr, M. A. (2003). *Chemical degradation methods for waste & pollutants, environmental & industrial application*, Marcel Dekker, New York, 235-295.
۱۶- موسویان، س. م.، و رضایی، ع. (۱۳۸۳). "تصفیه فاضلاب آلوده حاوی رنگ زیاد صنایع به روش تلفیقی الکتروشیمیایی _ تابش اشعه گاما." *مجموعه مقالات چهارمین همایش سراسری بهداشت حرفه ای ایران*، ۳۵۵-۳۶۰.
۱۷- ربانی، د. (۱۳۸۲). "کاربرد توأم انرژی خورشیدی فرآیند الکتروشیمیایی و سیکل مرطوب سازی_ رطوبت زدایی در تصفیه پیشرفته فاضلاب." پایان نامه دکترا (بهداشت محیط)، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
18- Daneshvar, N., Ashassi Sorkhabi, H., and Kasiri, B. (2004). "Decolorization of dye solution containing acid red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrodes connection." *J. Hazardous Material*, 112 (1-2), 55-62.
19- Rahmani, A. R., Jonidi Jafari, A., and Mahvi, A. H. (2005). "Investigation of water disinfection by electrolysis." *Pakistan J. of Biological Sciences*, 8(6), 910-913.
20- Clesceria, L. S., Greenberg, A. E., and Eaton, A. D., eds. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater,* APHA, WEF, AWWA, 20th Ed., Washington, D.C.
21-Can, O. T., Bayramoglu, M., and Kobya, M. (2003). "Decolorization of reactive dye solutions by electrocoagulation using aluminum electrodes." *Ind. Eng. Chem. Res.,* 42, 3391-3396.
22- Buso, A., Giomo, M., Boaretto, L., Sandona, G., and Paratella, A. (1997). "New electrochemical reactor for wastewater treatment: electrochemical characterization." *Chemical Engineering Processing*, 36, 255-260.
23- Utveren, U. B., and Koparal, S. (1994). "Color removal from textile effluents by electrochemical destruction." *J. Environ. Sci. Health,* A29 (1), 1-16.
24- Xiong, Y., and Karlsson, H. T. (2002). "An experimental investigation of chemical oxygen demand removal from the wastewater containing oxalic acid using three-phase three-dimensional electrode reactor." *Advances in Environmental Research*, 7, 139-145.
25- Shin, S. H., Kim, Y. H., Jung, S. K., Suh, K. H., Kang, S. G., Jeong, S. K., and Kim, H. G. (2004). "Combined performance of electrocoagulation and magnetic separation processes for treatment of dye wastewater." *Korean J. Chem. Eng.,* 21(4), 806-810.