

Efficiency of Electrocoagulation/Electroflotation Processes to Remove Turbidity from Effluent of Filtration Process in Tehranpars Water Treatment Plant

Massoudinejad M¹, Nazari Sh², Sarkhosh M³, Ahmadi E⁴, Mohseni SM*⁵, Yaghoobinejad R⁶

1. Professor of Environmental Health Engineering, Faculty of Health and Member of Safety Promotion and Injury Prevention Research Center, Shahid Beheshti University of Medical Science, Tehran, Iran.

2. M.Sc in Environmental Health Engineering, School of Public Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.

3. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

4. Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

5. Students Research Office, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

6. Head of group improve efficiency, Tehran water and wastewater company

*Corresponding author. Tel: +989301410133, Fax: +982177310103, E-mail: eng_mohseni_env@yahoo.com

Received: Feb 8, 2015 Accepted: Jun 14, 2015

ABSTRACT

Background & Objectives: Rapid sand filter backwashing water typically consists of 2-5% of the total treated water and it has high turbidity. Therefore, effluent treatment of rapid sand filter backwashing is essential. This research aimed to survey turbidity removal from filtration effluent of Tehranpars water treatment plant using Electrocoagulation (EC)/Electroflotation (EF) process.

Methods: This practical study was done in a continuous system at laboratory scale. An electrocoagulation tank with the dimensions of 24×17×18 cm and volume of 7.35 l from plexiglass was used in this work. Inside the tank 4 Al or Fe plates (15×22×0.1cm) were used as cathode and anode. Each electrode was immersed up to 16 cm in effluent of electrocoagulation tank. 126 samples with turbidities of 320, 350, and 400 NTU were taken from effluent of rapid sand filter backwashing and the removal efficiency was tested at current densities of 4.16, 5.83, 7.5, 10, 11.66, and 13.33 mA cm⁻² in detention times ranging from 10 to 30 min. The space of electrodes is fixed at 1.5cm and pH at 8.2. Data analyzed by excel software.

Results: The optimum pH of 8.2 was determined for this process. The optimum current density and detention time for both electrodes were the same and equal to 13.33 mA cm⁻² and 30 min, respectively. At optimum conditions the respective highest turbidity removal by Al and Fe electrodes were 95.13 and 4.87%.

Conclusion: Regarding the results, using electro coagulation-electro floatation processes has an appropriate efficiency in turbidity removal. One can say that aluminum electrode has higher efficiency than iron electrode to remove turbidity.

Keywords: Electrocoagulation; Turbidity; Effluent of Rapid Sand Filter.

بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی برای حذف کدورت از پساب فرآیند صاف سازی تصفیه خانه آب تهران پارس

محمد رضا مسعودی نژاد^۱، شهرام نظری^۲، مریم سرخوش^۳، احسان احمدی^۴، سید محسن محسنی^{۵*}،
رویا یعقوبی نژاد^۶

۱. استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، عضو موسس مرکز تحقیقات ارتقاء ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌های دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران ۲. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران ۳. عضو هیئت علمی مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران ۴. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران ۵. عضو کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران ۶. رئیس گروه بهبود بهره‌وری، شرکت آب و فاضلاب استان تهران * نویسنده مسئول، تلفن ۰۹۱۴۹۵۳۹۱۷۳، فکس: ۰۲۱ ۷۷۳۱۰۱۰۳، ایمیل: eng_mohseni_env@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: پساب شستشوی معکوس صافی‌های شنی تند به طور معمول ۵-۲ درصد از کل آب تصفیه شده را تشکیل می‌دهد و دارای کدورت بالایی است بنابراین این تصفیه پساب شستشوی معکوس این فیلترها ضروری می‌باشد. در این تحقیق حذف کدورت از پساب فرآیند صاف سازی تصفیه خانه آب تهران پارس به وسیله سیستم جریان پیوسته انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی بررسی شد.

روش کار: این مطالعه از نوع مطالعه کاربردی می‌باشد که در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت پیوسته انجام شد. در این مطالعه از یک مخزن انعقاد الکتریکی با ابعاد ۱۸×۱۸×۱۷ سانتیمتر از جنس پلکسی گلاس به حجم ۷/۳۵ لیتر استفاده گردید. داخل مخزن از چهار تیغه آلومینیوم یا آهن (با ابعاد غیر مفید ۲۲ سانتیمتر ۱۵× سانتیمتر ۰/۱× سانتیمتر) به عنوان کاتد و آند استفاده شد که هر تیغه تا ارتفاع ۱۶ سانتیمتری خود در مخزن انعقاد الکتریکی و در محلول غوطه‌ور گردید. در این تحقیق تعداد ۱۲۶ نمونه با کدورت‌های ۳۲۰، ۳۵۰، ۴۰۰ NTU از پساب شستشوی معکوس فیلتر شنی تند برداشت شد و راندمان حذف با مقدار شدت جریان‌های (۱۶/۸، ۵/۸۳، ۷/۵، ۱۰، ۱۱/۶۶ و ۱۳/۳۳) میلی آمپر بر سانتی متر مربع در زمان ماند‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق فضای بین الکترودها ۱/۵ سانتی متر و pH در ۸/۲ تثبیت شد. داده‌ها با نرم افزار اکسل آنالیز شدند.

یافته‌ها: pH بهینه فرایند ۸/۲ تعیین شد. مقدار دانسیته جریان و زمان ماند بهینه برای هر دو الکترود آهن و آلومینیوم یکسان بود و به ترتیب ۱۳/۳۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و ۳۰ دقیقه تعیین شد که بالاترین کارایی حذف در این شرایط بهینه برای الکترود آلومینیوم و آهن به ترتیب برابر با ۹۵/۱۲ و ۸۷/۴۰ درصد بود.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج آزمایش‌ها، انعقاد الکتریکی - شناورسازی الکتریکی در حذف کدورت کارایی مناسبی دارد. همچنین می‌توان گفت کارایی الکترود آلومینیوم در حذف کدورت از محلول بیشتر از کارایی الکترود آهن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انعقاد الکتریکی، کدورت، پساب صافی شنی تند

پذیرش: ۹۴/۳/۲۴

دریافت: ۹۳/۱۱/۱۹

منابع آب و جلوگیری از آلوده شدن محیط زیست، تصفیه پساب شستشوی معکوس فیلتر شنی تند اجتناب ناپذیر است. کدورت در آب عموماً توسط مواد معلق مثل خاک و گل و لای، مواد آلی و

مقدمه

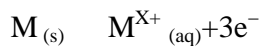
پساب شستشوی معکوس صافی‌های شنی تند به طور معمول ۵-۲ درصد از کل آب تصفیه شده را تشکیل می‌دهد و دارای کدورت بالایی است. به دلیل کمبود

معدنی ریز، ترکیبات آلی رنگی محلول و پلانکتون‌ها و سایر میکرواورگانیزم‌ها ایجاد می‌شود. به علت اندازه، شکل، ضریب شکست نور مربوط به ذرات و ویژگی پراکندگی نور در سوسپانسیون، ارتباط دادن کدورت با غلظت وزنی مواد معلق بسیار مشکل است (۱).

ذرات کوچک به ویژه ذراتی با چگالی نزدیک به آب مانند باکتریها و ذرات کلویدی ممکن است هرگز ته نشین نشوند و همچنان در آب معلق بمانند. بنابراین تراکم ذرات و به هم پیوستن آنها گام ضروری برای حذف آنها توسط رسوب‌دهی است (۲). امروزه منعقدکننده‌هایی که عمدتاً شامل سولفات آلومینیوم (آلوم) و کلرید فریک هستند، بیشترین کاربرد را در حذف کدورت از آب و پساب دارند. محدودیت‌های استفاده از نمک آلوم، آلومینیوم باقیمانده و مشکوک بودن ارتباط با بیماری آلزایمر است. همچنین استفاده از کلرید فریک در حذف کدورت با ایجاد رنگ در آب همراه است که بر روی اجسام لکه زرد متمایل به قرمز قهوه‌ای ایجاد می‌کند و اگر مقدار آن در آب بیشتر از 1 mg/l باشد موجب کدورت و مزه‌ی دارویی به آب می‌دهد (۳). البته این مشکل وقتی به وجود می‌آید که آب تصفیه شده با کلریدفریک در معرض هوا قرار گیرد بنابراین این مشکل در محل مصرف آب نمایان می‌شود. از سال ۲۰۰۰ علاوه بر منعقدکننده‌های شیمیایی از فناوری‌های الکتروشیمی برای حذف بسیاری از مواد محلول و غیر محلول از جمله کدورت استفاده گردیده است (۴). در سال‌های اخیر، انعقاد الکتریکی به عنوان فرآیند سازگار با محیط زیست توجه زیادی به خود جلب کرده است، این فرآیند موثر و مقرون به صرفه بوده است به طوری که در بعضی آلاینده‌ها راندمان حذف تا ۹۹ می‌باشد (۵). فرآیند انعقاد الکتریکی در کاهش نیترات (۶)، آرسنیک (۷)، فلوراید (۸،۹) و دیگر مواد آلی و معدنی (۱۰) به کار رفته است. حرکت ناشی از

شار الکتریکی موجب تجمع ذرات باردار منفی در ناحیه آند و یون‌های باردار مثبت در ناحیه کاتد می‌گردد. فلز آند، برای تولید پیوسته کاتیون‌های فلزی چند ظرفیتی استفاده می‌گردد. این کاتیون‌ها، بار ذرات حمل شده به طرف آند را به وسیله حرکت ناشی از شار الکتریکی خنثی می‌کنند و از این رو فرآیند انعقاد را تسهیل می‌نمایند. به عبارت دیگر، در فرآیند انعقاد الکتریکی- شناورسازی الکتریکی کاتیون‌های چند ظرفیتی از اکسیداسیون آند و گازهای حاصل از کاتد بوجود می‌آیند تا عمل لخته سازی انجام گیرد. روش الکتروکواگولاسیون به ایجاد عوامل ناپایدارکننده جهت خنثی‌سازی آلاینده‌ها و الکتروفلوتاسیون به تولید حباب‌های گاز جهت شناورسازی مواد سبک و حذف آنها از سیستم توسط انجام کفاب‌گیری اشاره دارد. روشی که برای حذف کدورت در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، روش انعقاد و شناورسازی الکتریکی با الکتروکواگولاسیون و آهن می‌باشد که در آن از ترکیب دو روش الکتروشیمیایی الکتروکواگولاسیون و الکتروفلوتاسیون استفاده شده است. مکانیسم کلی انعقاد و شناورسازی الکتریکی ترکیبی از عملکرد مکانیسم‌های مختلف و همزمان است که به طور زنجیروار باعث تشدید عملکرد همدیگر می‌شوند. مکانیسم اصلی در فرایند ممکن است از طریق فرایندهای دینامیکی به عنوان واکنش‌های پیش رونده عمل کند و با توجه به نوع آلاینده‌ها و پارامترهای محیطی و عملیاتی تغییر نماید. چنانچه الکترودهای آهن یا آلومینیوم به عنوان آند بکار گرفته شوند، آلاینده‌های موجود به عنوان یک لیگاند با یون‌های فرو یا آلومینیوم رها شده در داخل محلول ترکیبات پلیمری را تشکیل می‌دهند. این ترکیبات با فضای سطحی بسیار زیاد در هنگام تشکیل می‌توانند در جذب و متراکم کردن آلاینده‌ها بسیار فعال و توانمند باشند. این ترکیبات می‌توانند یون‌های هیدروکسیدی فلزی مونومری یا پلیمری باشند که با

برداری آسان، بی نیازی از مواد شیمیایی ویژه، لجن دفعی اندک و زمان ماند کوتاه، این روش برای تصفیه فاضلاب‌های قوی و سمی بسیار مناسب است (۳، ۵). در ساده‌ترین شکل یک راکتور انعقاد الکتریکی ممکن است از یک سلول الکترولیتی با یک آند و یک کاتد با استفاده از یک مولد برق مستقیم ایجاد شود (۴). مطالعات متعددی در رابطه با کاربرد روش‌های الکتروشیمیایی نظیر الکترواکسیداسیون (اکسیداسیون الکتریکی)، انعقاد الکتریکی (انعقاد الکتریکی) و الکتروفلوئاسیون (شناورسازی الکتریکی) برای حذف آلاینده‌ها از آب انجام شده است. مطالعه‌ای با عنوان بررسی فرایند تصفیه انعقاد شیمیایی برای حذف جامدات معلق کل و کدورت از فاضلاب شهری توسط آلادین و همکاران انجام شد. در این مطالعه از الکترودهای آهنی استفاده شد. این مطالعه نشان داد راندمان حذف TSS و کدورت وابسته به مقدار آهن تولیدی از آند است. بالاترین میزان حذف TSS برابر ۹۴/۵٪ بدست آمد (۴).



سادین و همکاران در تحقیق خود در ارتباط با حذف کدورت توسط فرایند الکتروکواگولاسیون به راندمان ۹۹٪ دست یافتند (۵).

هدف از اجرای این طرح بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی- شناورسازی الکتریکی برای حذف کدورت از پساب فرآیند صاف‌سازی تصفیه خانه آب تهران پارس بوده است.

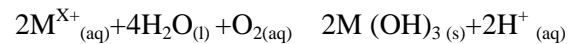
روش کار

این مطالعه از نوع مطالعه کاربردی می‌باشد که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. در این مطالعه یک مخزن انعقاد الکتریکی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد (عمق) ۲۴ × (عرض) ۱۷ × (طول) ۱۸ سانتی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس به حجم ۷/۳۵ لیتر ساخته شد. در داخل مخزن ۴ عدد صفحه فلزی (الکتروود) از جنس آلومینیوم و یا آهن به ابعاد (عرض) ۱۵ ×

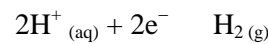
توجه به pH محلول شکل می‌گیرند. حباب‌های اکسیژن که بطور طبیعی در سطح آند تولید می‌شوند اکسید کننده قوی هستند که می‌توانند مولکول‌های مواد آلی را اکسید کرده و آنها را به ذرات کوچکتر تبدیل نمایند. حباب‌های هیدروژن تولیدشده در کاتد می‌توانند مولکول‌های آلی بسیار پایدار را اصلاح نموده و مقاومت آنها را در برابر اکسیداسیون کاهش دهند (۹-۸). همچنین گاز هیدروژن تولید شده می‌تواند به اختلاط و شناورسازی هر چه بهتر محلول کمک نماید. هنگامی که یک لخته شکل می‌گیرد، گازهای الکترولیتیک تولیدی با چسبیدن به لخته و تولید نیروی غوطه‌وری باعث شناورسازی و حذف آلاینده‌ها در سطح مایع می‌شود. این واکنش‌ها در زیر به عنوان مثال برای الکتروود آلومینیوم ذکر شده است، که M نوع فلز و X ظرفیت فلز می‌باشد.

در محیط اسیدی

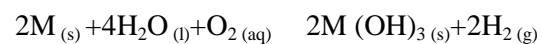
واکنش آندی:



واکنش کاتدی:

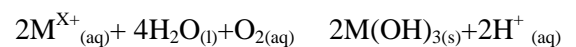


واکنش کلی:



در محیط قلیایی

واکنش آندی:



واکنش کاتدی:

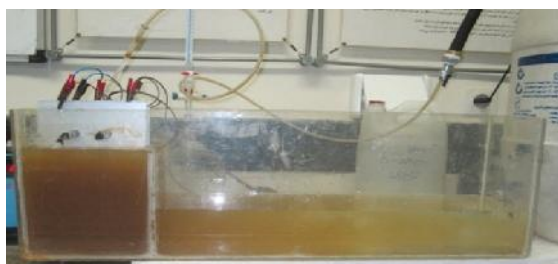


واکنش کلی:

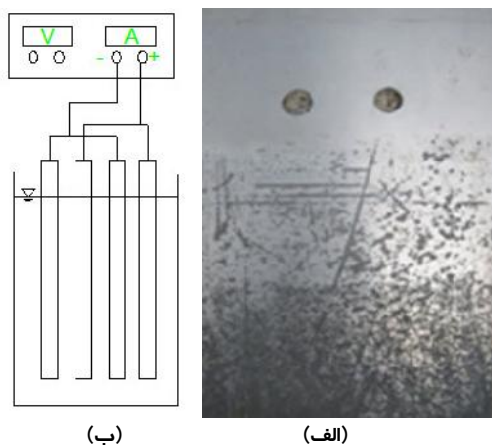


مکانیسم‌های حذف در انعقاد الکتریکی ممکن است شامل اکسایش، کاهش، تخریب، ترسیب، انعقاد، جذب، رسوب دهی باشد (۴). یکی از انواع روش‌های فیزیکوشیمیایی روش انعقاد الکتریکی است. به دلیل مزایایی چون بازده بالای حذف، تجهیزات ساده، بهره

مخزن انعقاد الکتریکی، مولد برق DC برای تامین انرژی الکتریکی روشن گردید و پس از طی زمان ماند مورد نظر (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) و تحت تاثیر قرار گرفتن با جریان‌های (۴/۱۶، ۵/۸۳، ۷/۵، ۱۰، ۱۱/۶۶ و ۱۳/۳۳) میلی آمپر بر سانتی متر مربع از مخزن انعقاد الکتریکی جریان سرریز کرده و وارد مخزن ته نشینی گردید. در اتاق ته نشینی سه تا شیر برای خروج جریان آب تصفیه شده تعبیه شده بود، نحوه قرارگیری این شیرها به گونه‌ای بود که جریان آب ته نشینی بعد از مدت زمان ۳۰ دقیقه از طریق آنها به صورت خودکار خارج می‌گردید. تعداد ۱۲۶ نمونه با کدورت‌های ۳۲۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ NTU از پساب شستشوی معکوس فیلتر شنی تند برداشت شد. پس از نمونه برداری، نمونه‌ها توسط دستگاه توربیدومتر (توربیدومتر 2100N HACH) قرائت شدند (۴،۵). در نهایت داده‌های بدست آمده با نرم افزار اکسل آنالیز شد.



شکل ۱. مخزن انعقاد الکتریکی و مخزن ته نشینی

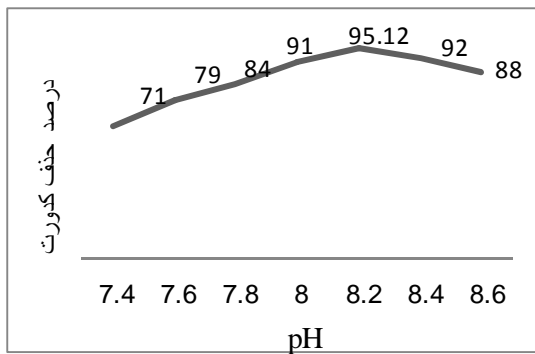


شکل ۲. الکترود آلومینیم پس از انجام آزمایشات (الف) آرایش تک قطبی موازی (ب)

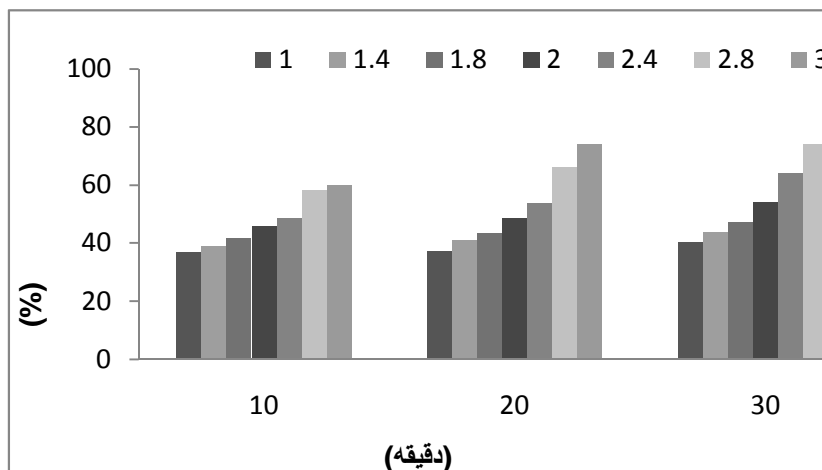
(طول) ۱۶ سانتی متر و ضخامت ۱ میلی متر به فاصله ۱/۵ سانتی متری از هم قرار داده شد. قبل از هر آزمایش ابتدا الکترودها با سنباده نرم ساییده شدند تا پوسته‌های آنها از بین برود، سپس با اسید سولفوریک ۱ نرمال شستشو داده شدند. در این تحقیق از دو الکترود به عنوان آنود (قربانی) و دو الکترود به عنوان کاتد استفاده گردیده است (تک قطبی موازی). تمامی آزمایشات یک بار با الکترود آلومینیوم و یک بار با الکترود آهن انجام گردید، یک مگنت در کف مخزن جهت اختلاط استفاده شد (سرعت مگنت ۳۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد). محفظه ته نشینی به ابعاد (عمق) ۲۴ × (عرض) ۱۷ × (طول) ۵۳ سانتی متر از جنس پلکسی گلاس به حجم ۲۱/۵ لیتر (برای زمان ماند ۳۰ دقیقه) ساخته شد برای تنظیم جریان الکتریکی از یک دستگاه ترانسفورماتور جهت تامین برق مستقیم و آمپر قابل تنظیم (۶-۱۰ آمپر) استفاده گردید. در شکل ۲ الکترود آلومینیم پس از انجام آزمایشات (۲-الف) و آرایش تک قطبی موازی فرایند الکترودکواگولاسیون (۲-ب) نشان داده شده است. راکتور انعقاد الکتریکی و ته نشینی به حالت سری طراحی گردیدند. پساب شستشوی صافی‌ها در مخزنی به مدت ۱ ساعت بدون حرکت نگهداری گردید تا در صورت وجود ذرات قابل ته نشینی (یک ساعته) این ذرات حذف شوند سپس محلول در ابتدا وارد حوض انعقاد الکتریکی شد. برای تنظیم pH در این حوض از اسیدسولفوریک ۱ نرمال و هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال و برای تنظیم هدایت الکتریکی (۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر) از کلرید سدیم استفاده گردید. قابل توجه است که به دلیل تغییرات pH پساب (۷/۴-۸/۶) در طول زمان آزمایشات و با توجه به اهمیت زیاد این موضوع بر راندمان حذف و همچنین برای مقایسه بهتر راندمان، pH پساب در مقادیر بهینه اعم از ۷/۴-۷/۶-۷/۸-۸-۸/۲-۸/۴-۸/۶ مورد بررسی قرار گرفت. پس از ورود جریان به

یافته‌ها

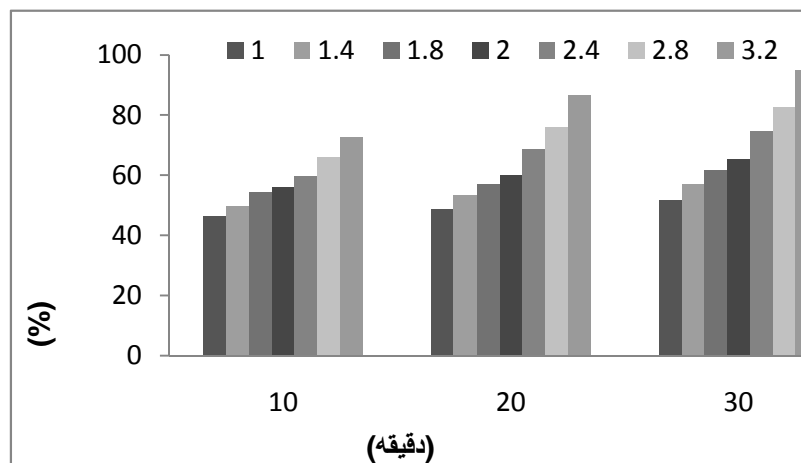
با توجه به اثر pH بر هیدرولیز فلز در فرآیند انعقاد الکتریکی نیاز به آزمایشات اولیه با pHهای مختلف و انتخاب مقدار بهینه pH می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده pH=۸/۲ به عنوان pH بهینه انتخاب گردید. در شکل‌های ۴ تا ۹ تاثیر زمان ماند و دانسیته جریان بر روی کارایی الکترودهای آهن و آلومینیوم در حذف کدورت‌های مختلف در pH=۸/۲ نشان داده شده است. همینطور که در شکل ۳ تا ۱۰ مشاهده می‌شود بهترین راندمان در مقدار جریان ۱۳/۳۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان ماند ۳۰ دقیقه و کدورت ۳۲۰ با الکتروده آلومینیم بدست آمد.



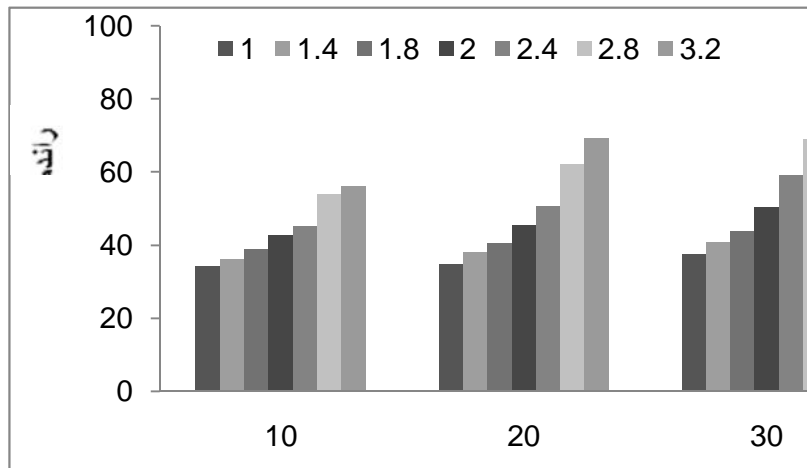
شکل ۳. تاثیر pH بر میزان حذف کدورت از پساب (کدورت NTU ۳۲۰، مقدار جریان ۱۳/۳۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان ماند ۳۰ دقیقه)



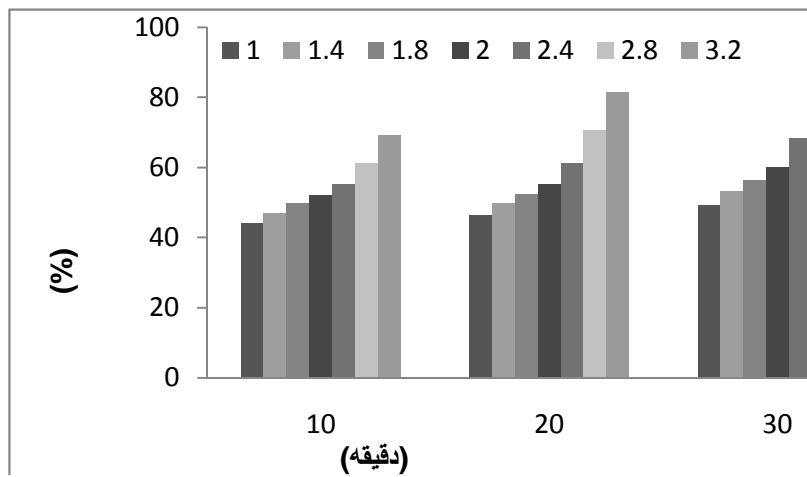
شکل ۴. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آهن در زمان‌های ماند مختلف- مقدار جریان مختلف- کدورت NTU ۳۰۰



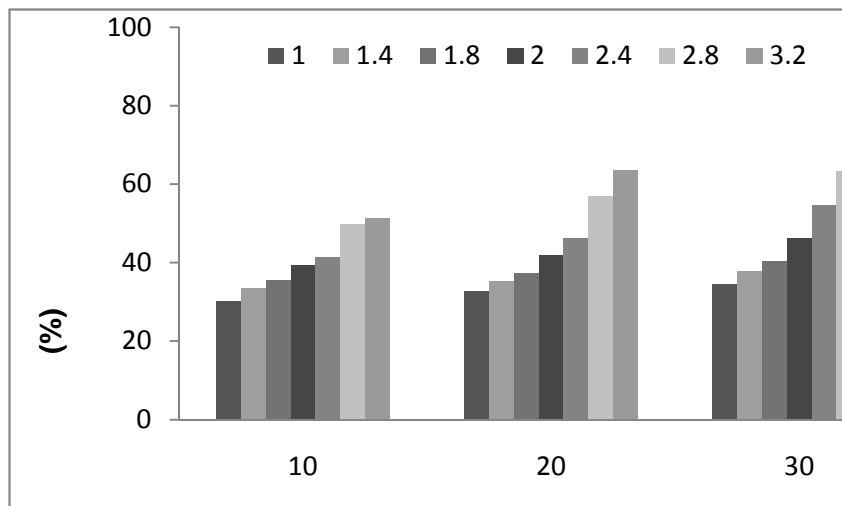
شکل ۵. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آلومینیوم در زمان‌های ماند مختلف، مقدار جریان مختلف و کدورت NTU ۳۲۰



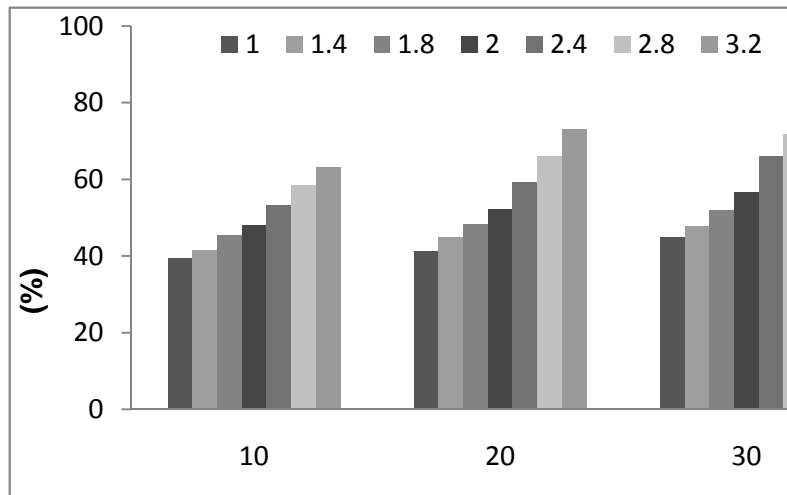
شکل ۶. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آهن در زمان‌های ماند مختلف، مقدار جریان مختلف و کدورت ۳۵۰ NTU



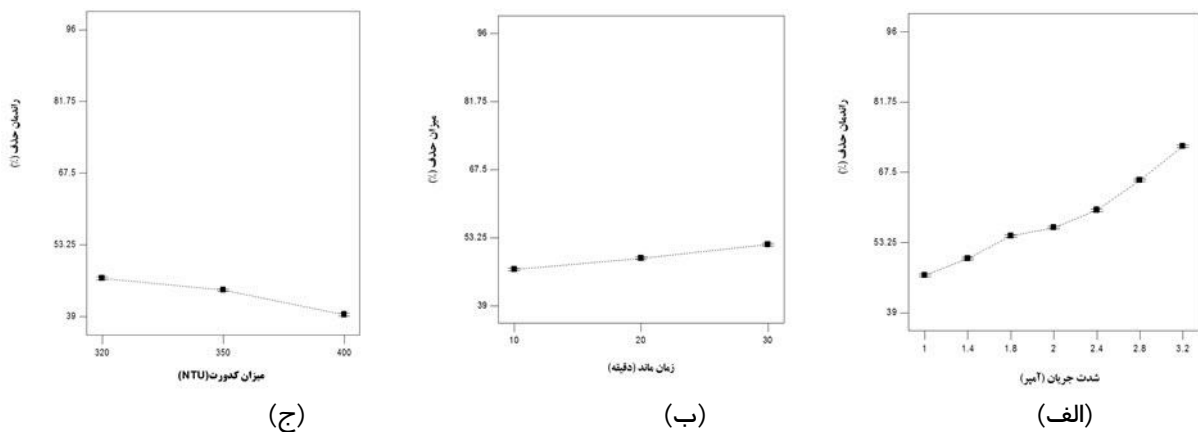
شکل ۷. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آلومینیوم در زمان‌های ماند مختلف، مقدار جریان مختلف و کدورت ۳۵۰ NTU



شکل ۸. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آهن در زمان‌های ماند مختلف، مقدار جریان مختلف و کدورت ۴۰۰ NTU



شکل ۹. مقایسه راندمان حذف با الکترودهای آلومینیوم در زمان‌های ماند مختلف، مقدار جریان مختلف و کدورت ۴۰-NTU



شکل ۱۰. به ترتیب رابطه مقدار حذف کدورت با استفاده از الومینیوم با متغیر الف) شدت جریان ب) زمان ماند ج) میزان کدورت

مقدار برق مصرفی و هزینه تصفیه

مقدار جریان الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت با فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$VIT = \text{مقدار جریان الکتریکی مصرفی}$$

$V =$ مقدار اختلاف پتانسیل الکتریکی (ولتاژ) $I =$ مقدار جریان الکتریکی (آمپر) $T =$ زمان (ساعت)

با توجه به مقدار ولتاژ ۲۵ ولت می‌توان مقدار مصرف برق و هزینه را محاسبه نمود (جدول ۱). هزینه هر کیلووات ساعت برق توسط وزارت نیرو

جمهوری اسلامی ایران در سال ۹۵ به مبلغ ۸۰۰ ریال می‌باشد.

با توجه به این شرایط در شرایط بهینه، محاسبه به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{مقدار جریان الکتریکی مصرفی} = ۴۰ = ۵ / \text{ساعت} \times ۳/۲ \text{ آمپر} \times ۲۵ \text{ ولت} \cdot \text{kw.h}$$

ریال $۳۲۰۰۰ = ۴۰ \times ۸۰۰ =$ هزینه تصفیه برای هر آزمایش (۳۰ لیتر پساب تصفیه شده)

$$\text{ریال} ۱۰۶۶ = \text{هزینه تصفیه هر لیتر پساب}$$

جدول ۱. مقدار هزینه تصفیه پساب و مصرف انرژی با استفاده از روش انعقاد الکتریکی - شناورسازی

زمان (دقیقه)	میزان جریان (آمپراژ)	مصرف انرژی الکتریکی (کیلووات ساعت)	هزینه انرژی الکتریکی مصرفی (هزینه به ریال برای ۳۰ لیتر تصفیه پساب)	هزینه تصفیه پساب برای هر لیتر پساب (ریال)
۱۰	۳/۲	۱۳/۳	۱۰۶۴۰	۳۵۴,۶
۱۰	۲/۸	۱۱/۶	۹۲۸۰	۳۰۹,۳
۱۰	۲/۴	۹/۹۹	۷۹۹۲	۲۶۶,۴
۱۰	۲	۸/۳۳	۶۶۶۴	۲۲۲,۱
۱۰	۱/۸	۷/۴۹	۵۹۹۲	۱۹۹,۷
۱۰	۱/۴	۵/۸۳	۴۶۶۴	۱۵۵,۴
۱۰	۱	۴/۱۶	۳۳۲۸	۱۱۰,۹۳
۲۰	۳/۲	۲۶/۶	۲۱۲۸۰	۷۰۹,۳۳
۲۰	۲/۸	۲۳/۲	۱۸۵۶۰	۶۱۸,۶۶
۲۰	۲/۴	۱۹/۹۸	۱۵۹۸۴	۵۳۲,۸
۲۰	۲	۱۶/۶۶	۱۳۳۲۸	۴۴۴,۲۶
۲۰	۱/۸	۱۴/۹۸	۱۱۹۸۴	۳۹۹,۴۶
۲۰	۱/۴	۱۱/۶۶	۹۳۲۸	۳۱۰,۹۳
۲۰	۱	۸/۳۲	۶۶۵۶	۲۲۱,۸۶
۳۰	۳/۲	۴۰	۳۲۰۰۰	۱۰۶۶
۳۰	۲/۸	۳۴/۸	۲۷۸۴۰	۹۲۸
۳۰	۲/۴	۲۹/۹۷	۲۳۹۷۶	۷۹۹,۲
۳۰	۲	۲۴/۹۹	۱۹۹۹۲	۶۶,۴
۳۰	۱/۸	۲۲/۴۷	۱۷۹۷۶	۵۹۹,۲
۳۰	۱/۴	۱۷/۴۹	۱۳۹۹۲	۴۶۶,۴
۳۰	۱	۱۲/۴۸	۹۹۸۴	۳۳۲,۸

بحث

مقدار حذف کدورت از پساب شستشوی صافی‌ها توسط الکترود آهن بین ۳۰/۱ تا ۸۷/۴ درصد و توسط الکترود آلومینیوم بین ۳۹/۳۶ تا ۹۵/۱۲ درصد بدست آمد. در نتیجه با تغییر جنس آنود و کاتد، راندمان فرآیند می‌تواند متفاوت باشد. در مطالعه انجام گرفته توسط لی و همکاران حذف کدورت در مقادیر بالا در آب با استفاده از فرایند الکترود کواگولاسیون با صفحات آهن، استیل و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که استفاده از صفحات از جنس آلومینیوم به عنوان الکترود، کارایی بهتری نسبت به الکترود از جنس آهن و استیل دارد (۱۱) نتایج مطالعه انجام گرفته توسط ژانگ و همکاران که در آن از دو الکترود آهن و آلومینیوم به منظور

تصفیه فاضلاب صنایع نساجی با استفاده از فرایند الکترود کواگولاسیون استفاده شده است. حاکی از آن است که استفاده از الکترود آهن نتایج بهتری در حذف کدورت از آب در مقایسه با الکترود آلومینیوم داشته است (۱۲) جانو و همکاران در مطالعه‌ای تأثیر فرایند الکترود کواگولاسیون / فلوتاسیون را در حذف جلبک به عنوان عامل ایجادکننده کدورت از آب با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها حکایت از اثر بخشی بیشتر آلومینیوم در حذف جلبک از آب در مقایسه با الکترود آهن داشته است (۱۳). بنابراین با عنایت به تأثیرگذار بودن جنس الکترود در کارایی فرایند الکترودشیمیایی و فرایندهای توأم الکترودشیمیایی / شناورسازی و عدم وجود اطلاعات جامع در این زمینه به خصوص در حذف کدورت در مقادیر بالا،

این پژوهش به منظور تعیین کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون و فرایند تصفیه الکتروکواگولاسیون / فلوتاسیون در حذف کدورت در غلظتهای مختلف با استفاده از الکتروکواگولاسیون و آلومینیوم و تاثیر فاکتورهای مختلف بر انجام فرایند انجام گرفت. در فرآیند انعقاد الکتریکی شدت جریان یک فاکتور مهم، بر کارایی فرآیند می باشد. چنانچه در این تحقیق مشخص شد با افزایش جریان الکتریکی راندمان حذف کدورت افزایش میابد. به این دلیل با افزایش دانسیته جریان، مقدار تولید هیدروکسیدهای فلزی افزایش می یابد و در نتیجه افزایش محل های فعال برای جذب مولکول ها اتفاق می افتد و این امر سبب افزایش راندمان با افزایش شدت جریان می شود، در نتیجه افزایش حذف کدورت را به دنبال خواهد داشت. کارایی فرایند حاکی از آن است که در شدت جریان بالاتر، فرایند حذف سریعتر انجام می شود و همانطور که شدت جریان افزایش می یابد زمان لازم برای رسیدن به کارایی مشابه کاهش می یابد. احتمالاً این کارایی بیشتر در نتیجه تولید مقادیر زیاد حباب های گاز مشاهده شده در طول فرایند انعقاد و شناورسازی الکتریکی بدست می آید. همچنین به علت وجود بار آلودگی ناشی از ذرات معلق، با افزایش دانسیته جریان راندمان حذف بالاتری حاصل می شود. به این ترتیب که با افزایش دانسیته جریان سطح ویژه حباب های تولیدی در واحد حجم افزایش می یابد با وجود بالابودن ذرات معلق و کلوئیدی موجود در پساب، افزایش سطح ویژه و تعداد حباب ها باعث افزایش برخورد و چسبیدن حباب ها به ذرات معلق شده و در نتیجه راندمان حذف آلاینده ها را به دنبال خواهد داشت (۱۵-۱۲). در تحقیقی که کشمیرزاده و همکاران در ارتباط با حذف کدورت از فاضلاب انجام دادند، در تمام حالت های الکتروکواگولاسیون، افزایش شدت جریان سبب افزایش راندمان حذف کدورت از فاضلاب گردید (۱۶). یکی دیگر از پارامترهای مهم در واکنش های

شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی بحث زمان ماند یا زمان واکنش می باشد. در این تحقیق متوسط کارایی حذف در ۲۰ دقیقه اول رخ داده است، لذا می توان نتیجه گرفت که قسمت عمده حذف کدورت در ۲۰ دقیقه اول رخ می دهد. مطالعه ای با عنوان بررسی فرایند تصفیه انعقاد شیمیایی برای حذف جامدات معلق کل و کدورت از فاضلاب شهری توسط آلادین و همکاران انجام شد. در این مطالعه از الکترودهای آهنی استفاده شد. این مطالعه نشان داد راندمان حذف TSS و کدورت وابسته به مقدار آهن تولیدی از آن است. بالاترین میزان حذف TSS (۵/۹۴٪) در جریان ۳/۳۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و زمان تماس ۵ دقیقه بود. (ع). در تحقیقی که توسط تیر و همکاران انجام شد، میزان راندمان حذف کدورت و COD با استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون با الکتروکواگولاسیون در فاضلاب حاوی نفت به ترتیب ۹۹ و ۹۰ درصد در زمان ۲۲ دقیقه با شدت جریان ۲۵ میلی آمپر بر سانتی متر مربع بدست آمد (۱۷). pH یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در واکنش های شیمیایی می باشد. بسته به هدف تصفیه (تولید لخته از الکترودهای آلومینیوم و آهن، نوع آلاینده و غیره) میزان مطلوب pH متفاوت است. در این تحقیق pH بهینه ۸/۲ بدست آمد. هنگامی که pH مطالعه بین ۶ تا ۸ باشد، یون های Al^{3+} و OH^- گونه های متنوع مونومریک مانند $Al(OH)_2^{2+}$ و $Al(OH)_2^+$ و گونه های پلیمریک مانند $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ و $Al_7(OH)_{17}^{2+}$ و $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ را تولید می کنند. که سرانجام به $Al(OH)_3$ نامحلول از طریق کینیتیک های ترسیب و پلیمریزاسیون تغییر شکل می دهند. ترکیبات $Al(OH)_3$ سطح بزرگتری دارند و برای جذب ترکیبات آلی محلول و بدام انداختن ذرات کلوئیدی مناسب تر هستند. در نتیجه با توجه به اینکه در pH ۸/۲ احتمالاً تراکم عوامل منعقدکننده موثر مانند $Al(OH)_2^+$ و $Al(OH)_3$ بیشتر می باشد، این امر منجر به افزایش کارایی فرایند گردیده است. در

تحقیقی که تیر و همکاران روی حذف نفت از فاضلاب، توسط انعقاد الکتریکی انجام دادند، مشخص شد که در pH ۶ و ۷ راندمان فرآیند حداکثر می‌باشد (۱۷). در تحقیقی دیگر که توسط زو و همکاران، روی تصفیه فاضلاب‌های روغنی رستوران‌ها به وسیله فرآیند انعقاد الکتریکی انجام دادند، بهترین راندمان حذف در pH خنثی بدست آمد و در شرایط قلیایی راندمان کاهش پیدا کرد (۱۸).

نتیجه گیری

روش انعقاد الکتریکی، یک روش بسیار مناسب برای تصفیه انواع پساب محسوب می‌گردد. این روش در بسیاری از موارد دارای راندمان‌های بسیار خوب در حذف آلاینده می‌باشد. این راندمان‌ها در بهترین حالات به میزان ۹۹ درصد و یا بیشتر رسیده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد انعقاد الکتریکی در حذف کدورت با الکتروآلومینیم و آهن وابستگی بسیار زیادی به مقدار جریان و زمان ماند دارد. هر چند مقدار کدورت اولیه رابطه عکسی با راندمان حذف کدورت در این تحقیق داشت. همچنین حذف

کدورت بوسیله انعقاد الکتریکی با الکتروآلومینیم در زمان ماند ۳۰ دقیقه و مقدار جریان ۹/۵۴ میلی‌آمپر بر سانتی متر مربع و مقدار کدورت NTU ۳۲۰ برابر با ۹۵/۱۲ درصد به دست آمد. حذف کدورت بوسیله انعقاد الکتریکی با الکتروآهن در زمان ماند ۳۰ دقیقه و مقدار جریان ۱۳/۳۳ میلی‌آمپر بر سانتی متر مربع و مقدار کدورت NTU ۳۲۰ برابر با ۸۷/۴ درصد بود. لازم به ذکر است که این فرایند نیاز به انرژی بالایی دارد که از معایب مهم آن به حساب می‌آید، اما در مقابل محاسن زیاد فرایند الکتروکواگولاسیون می‌توان از این عیب چشم پوشی نمود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح با عنوان «بررسی سیستم جریان پیوسته انعقاد الکتریکی- شناورسازی الکتریکی برای حذف کدورت از پساب فرآیند صاف سازی تصفیه خانه آب تهرانپارس» با کد پروژه ۸۲۶۸ است که با حمایت کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی به اجرا در آمده است.

References

- 1-Bustamante J, Pacios F, Díaz-Delgado R, Aragonés D. Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images. Journal of environmental management. 2009; 90 (7): 2219-25.
- 2-Annadurai G, Sung SS, Lee DJ. Floc characteristics and removal of turbidity and humic acid from high-turbidity storm water. Journal of environmental engineering. 2003; 129 (6): 571-575.
- 3-Sadeddin K, Naser A, Firas A. Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant. Desalination. 2011; 268 (1): 204-207.
- 4-Sarkhosh M, Atafar Z, Ahmadi E, Nazari S, Fakhri Y, Rezaei S, Mohseni SM, Saghi MH, Torkashvand M. Treatment of Electroplating Cr (VI) for Reduction Cr (VI) by Electrocoagulation in Continuous Operation. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2016;5(4):615-25.
- 5-Kherfan S, Alnaif N, Alloush F. Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant. Desalination. 2011; 268: 204-207
- 6-Sava A, Kopal S, Ulker Bakir Ogutveren. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. Journal of hazardous materials. 2002; 89 (1): 83-94.
- 7-Imran A, Tabrez A, Mohd A. Removal of arsenic from water by electrocoagulation and electro dialysis techniques. Separation & Purification Reviews. 2011; 40 (1): 25-42.
- 8-Hu CY, Lo SL, Kuan WH, Lee YD. Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation-flotation. Water Research. 2005; 39 (5): 895-901.

- 9-Ching-Yao H, Shang-Lien L, Wen-Hui K, Yu-De L. Treatment of high fluoride-content wastewater by continuous electrocoagulation-flotation system with bipolar aluminum electrodes. *Separation and Purification Technology*. 2008; 60 (1): 1-5.
- 10-Sheikhmohammadi A, Mohseni SM, Godini H, Sardar M, Abtahi M, Mahdavi S, Rezaei S, Dahaghin Z, Atafar Z, Almasian M, Sarkhosh M. Application of graphene oxide modified with 8-hydroxyquinoline for the adsorption of Cr (VI) from wastewater: Optimization, kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. *Journal of Molecular Liquids*. 2017 Mar 1.
- 11-Lee PC, Gau SH, Song CC. Particle removal of high-turbidity reservoir water by electro-aggregation. *J. Environmental Engineering and Management*. 2007; 17 (6): 371-375.
- 12- Inoussa Z, Maiga AH, Wethe J, Valentin G, Leclerc J, Patermotle G, Lopicque F. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. *J. Hazardous Materials*. 2009; 169: 70-76.
- 13- Majlesi M, Mohseny SM, Sardar M, Golmohammadi S, Sheikhmohammadi A. Improvement of aqueous nitrate removal by using continuous electrocoagulation/electroflotation unit with vertical monopolar electrodes. *Sustainable Environment Research*. 2016 Nov 30;26(6):287-90.
- 14-Gholami, Mitra, et al. "Nano polyamidoamine-G7 dendrimer synthesis and assessment the antibacterial effect in vitro." *Tehran University Medical Journal TUMS Publications* 74.1 (2016): 25-35.
- 15- Salarian AA, Hami Z, Mirzaei N, Mohseni SM, Asadi A, Bahrami H, Vosoughi M, Alinejad A, Zare MR. N-doped TiO₂ nanosheets for photocatalytic degradation and mineralization of diazinon under simulated solar irradiation: Optimization and modeling using a response surface methodology. *Journal of Molecular Liquids*. 2016 Aug 31;220:183-91.
- 16- Keshmirizadeh E, Lalavi F, Hemmati M. Treatment of Turbid Wastewater by Means of Clean Electrochemical Technology: Investigation of the New Operational Parameters. *Journal of Applied Chemical Research*. 2011; 17: 15-27
- 17- Mohamed T, Nadji Moulai M. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. *Journal of hazardous materials*. 2008; 158 (1): 107-115.
- 18- Bandpei, Anoushiravan Mohseni, et al. "Optimization of arsenite removal by adsorption onto organically modified montmorillonite clay: Experimental & theoretical approaches." *Korean Journal of Chemical Engineering*: 1-8.