

# بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف از آب سطحی

جمشید درایت<sup>۱</sup>

مقداد پیرصاحب<sup>۲</sup>

زینب جعفری مطلق<sup>۲</sup>

علی اکبر زینتی زاده<sup>۴</sup>

(دریافت ۹۲/۲/۱۵)

پذیرش ۹۲/۹/۲

## چکیده

انعقاد الکتریکی یک روش الکتروشیمیایی برای تصفیه آب و فاضلاب است. هدف از این تحقیق بررسی راندمان حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف از آب‌های سطحی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی بود. این تحقیق یک مطالعه توصیفی-مقطعی بود. نمونه‌های آب از آبگیر آب آشامیدنی سد سلیمان‌شاه سنقر تهیه شدند. فرایند انعقاد الکتریکی در یک راکتور از جنس پلکسی گلاس به صورت بسته و با الکترودهای آلومینیوم و آهن انجام شد. طراحی دوره‌های بارگذاری با استفاده از نرم‌افزار Design expert انجام شد. بعد از هر دوره، مقادیر فلز محلول ناشی از آزادسازی الکتروود آند با دستگاه ICP اندازه‌گیری شد و نتایج با مدل RSM مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که بالاترین راندمان حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف با استفاده از الکتروود آلومینیوم به ترتیب ۱۰۰ و ۸۹/۱ درصد است. همچنین با استفاده از الکتروود آهن، بالاترین راندمان حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف به ترتیب ۱۰۰ و ۷۶/۱ درصد به دست آمد. با این وصف مقادیر آزادسازی فلزات محلول آهن و آلومینیوم فراتر از سطح استانداردهای آب آشامیدنی بود. نتایج نشان داد که فرایند انعقاد الکتریکی روشی مؤثر در حذف عوامل میکروبی از آب‌های سطحی است. مقادیر فلز محلول در اثر انحلال الکتروود آند، حائز اهمیت بهداشتی است؛ بنابراین باید شرایط بهینه با توجه به غلظت مجاز فلز مذکور انتخاب شود.

**واژه‌های کلیدی:** انعقاد الکتریکی، آب‌های سطحی، کلیفرم، باکتری هتروتروف، سنقر

## Performance of Electrocoagulation Process in the Removal of Total Coliform and Heterotrophic Bacteria from Surface Water

J. Derayat<sup>1</sup>

M. Pirsahab<sup>2</sup>

Z. Jafari Motlagh<sup>3</sup>

A.A. Zinatizadeh<sup>4</sup>

(Received May 5, 2013 Accepted Nov. 23, 2013)

### Abstract

Electrocoagulation is an electrochemical method for the treatment of water and wastewater. The present cross-sectional study was designed to investigate the removal efficiency of total coliform and heterotrophic bacteria from surface water using the process. For this purpose, water samples were taken from the drinking water intake at Suleiman-Shahsonghur Dam. The electrocoagulation process was carried out in a Plexiglas reactor in the batch mode with Al and Fe used electrodes. The experiment design was carried out using the Design Expert Software (Stat-Ease Inc., Ver. 6.0.6). After each run, the values of metals dissolved due to anode electrode dissolution were measured using the Inductively Coupled Plasma (ICP) and the results were analyzed using the RSM model. Results revealed maximum removal efficiencies of 100% and 89.1% for total coliform and heterotrophic bacteria using the Al electrode, respectively. Also, maximum removal efficiencies using the Fe electrode for the same pollutants were 100% and 76.1%. The measurements clearly indicate that the quantities of Al and Fe released in water were higher than the recommended values. While the electrocoagulation process showed to be effective in removing microbial agents from surface waters, the high concentrations of dissolved metals due to the dissolution of the anode electrode seem to remain a health problem that requires optimal conditions to be determined for achieving standard concentrations of the dissolved metals.

**Keywords:** Electrocoagulation, Surface Waters, Coliform, Heterotrophic Bacteria, Sonqur.

1. Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah

2. Assoc. Prof. of Environmental Health Eng., Member of Health Research Center, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah

3. MSc Student, Member of Social Development and Health Promotion Research Center, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah (Corresponding Author) 09187188938 z.jafari1389@gamil.com

4. Assist. Prof. of Applied Chemistry, Dept. of Chemistry Razi University, Kermanshah

۱- استادیار گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه

۲- دانشیار گروه بهداشت محیط، عضو مرکز تحقیقات سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، عضو مرکز تحقیقات توسعه اجتماعی و ارتقاء سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه (نویسنده مسئول) ۰۹۱۸۷۱۸۸۹۳۸ z.jafari1389@gamil.com

۴- استادیار گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌های آب شیرین و مخزن سدها، منابع اصلی آب آشامیدنی در سراسر دنیا هستند [۱ و ۲]. نوع و میزان مواد موجود در آب‌های سطحی بستگی به مسیر عبور آب دارد [۳]. آب‌های سطحی در تماس مستقیم با اتمسفر، خاک و تخلیه آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای قرار می‌گیرند، به همین دلیل یک تغییر متناوب در کیفیت آن‌ها رخ داده و مواد زائد در مسیر انتقال به آب اضافه می‌شوند [۴]. در آب‌های سطحی، غلظت قابل توجهی از مواد معلق و کلوئیدی، مواد آلی و معدنی، میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها وجود دارد [۵]. در دنیا حدود ۸۰ درصد بیماری‌های واگیر از طریق آب آلوده منتقل می‌شود. در منابع آب، آلودگی به باکتری‌های کلیفرم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و گونه‌های بیماری‌زای آن موجب مشکلات بهداشتی متعددی می‌شود [۶].

برای تعیین کیفیت میکربی آب آشامیدنی از ارگانیسم‌های شاخص استفاده می‌شود [۷]. ارگانیسم‌های شاخص شامل /شیرشیاکلی، کلیفرم‌های گوارشی گرم‌پای، مجموع کلیفرم‌ها، استرپتوکوک گوارشی و کلستری‌دیم پرفرژنس است [۸]. معمول‌ترین روش برای آزمایش کیفیت بهداشتی باکتریولوژی آب آشامیدنی، روش آزمایش باکتری‌های کلیفرم /شیرشیاکلی است [۹]. مجموع کلیفرم‌ها به صورت باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی اختیاری، گرم منفی، میله‌ای شکل، فاقد اسپور، باکتری اکسیداز منفی که لاکتوز را در ۳۵ درجه سلسیوس با تولید اسید و گاز تخمیر می‌کند، معرفی شده‌اند. به طور معمول برای ردیابی کلیفرم‌ها در آب از روش‌های تخمیر چند لوله‌ای و فیلتر غشایی استفاده می‌شود. برای اطمینان از عدم حضور پاتوژن‌های روده‌ای، شمارش باکتری‌های هتروتروف به عنوان یک شاخص کیفیت میکربی خوب شناسایی شده است [۱۰]. روش متعارف برای حذف باکتری‌های کلیفرم، استفاده از فرایند انعقاد، ته‌نشینی و صافی شنی تند است. این روش مناسب برای جوامع روستایی کشورهای در حال توسعه نبوده، بنابراین روش‌های اقتصادی در مقیاس کوچک برای جوامع غیر متمرکز مورد نیاز است [۶]. انعقاد الکتریکی فرایند ناپایدار کردن مواد معلق، کلوئیدی و نیز آلاینده‌های محلول است [۱۱]. این فرایند شامل اکسیداسیون الکترولیتیک آند و تولید مواد منعقد کننده در محلول است. هنگامی که جریان مستقیم بین دو الکتروود به کار می‌رود از اکسیداسیون آند، یون‌های فلزی مانند  $Fe^{+2}$  و  $Al^{+3}$  آزاد می‌شوند که در تولید منعقد کننده شرکت می‌کنند [۱۲]. از این فرایند برای تصفیه آب آشامیدنی، فاضلاب شهری، زائدات نفت، فاضلاب نساجی، ذرات معلق، آب محتوی فلوراید و محلول‌های محتوی فلزات سنگین استفاده می‌شود [۱۳].

مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها در فرایند انعقاد الکتریکی شامل انعقاد، اکسیداسیون، کاهش، تجزیه، جذب، ته‌نشینی و شناورسازی است [۱۴]. مزیت‌های این روش، نیاز به تجهیزات ساده، سهولت کاربرد، تولید لجن کمتر، تولید آب با TDS کمتر در مقایسه با تصفیه شیمیایی و حذف کوچک‌ترین ذرات کلوئیدی است. همچنین در این روش از مواد شیمیایی استفاده نمی‌شود و مشکل خنثی‌سازی مواد شیمیایی اضافه شده و احتمال آلودگی ثانویه وجود ندارد. در مناطق روستایی که جریان برق در دسترس نیست، در صورتی که یک تابلوی خورشیدی به واحد متصل، باشد برای انجام فرایند کافی است [۱۵]. از جمله مطالعاتی که تاکنون در زمینه حذف آلودگی میکربی با فرایند انعقاد الکتریکی صورت گرفته می‌توان به مطالعه ربانی و همکاران در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد که بر روی مقایسه اثر فرایند الکتروشیمیایی و انعقاد با آلوم در حذف کدورت و باکتری‌های کلیفرم از آب آلوده دست‌ساز انجام گرفت. در این تحقیق، فرایند الکتروشیمیایی، کلیفرم‌های کل، کدورت و HPC را به ترتیب ۱۰۰، ۹۱/۰۵ و ۹۶/۳۱ درصد کاهش داد. فرایند الکتروشیمیایی در حذف کدورت و شاخص‌های باکتری شناسی کارآمدتر از انعقاد با آلوم گزارش شده است [۱۶]. در مطالعه قرنات و همکاران در سال ۲۰۰۸، کارایی انعقاد الکتریکی در فاضلاب مصنوعی آلوده به /شیرشیاکلی و دو نوع آب سطحی بررسی شده است. در این مطالعه از سه نوع الکتروود استفاده شده و نتایج حاکی از آن بوده است که الکتروود آلومینیوم بیشترین کارایی را در تخریب سلول‌های /شیرشیاکلی در مقایسه با الکتروودهای فولاد ضد زنگ و فولاد معمولی در این تحقیق فقط در مدت ۳۰ دقیقه انعقاد الکتریکی دارا بوده است همه سلول‌های /شیرشیاکلی از آب حذف شده‌اند [۱۷].

هدف از انجام این پژوهش بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف و یا کاهش عوامل باکتریایی با توجه به میزان فلز محلول ناشی از انحلال و آزادسازی آند بعد از فرایند انعقاد بوده است. به همین دلیل، حذف عوامل میکربی از آب سطحی سد سلیمان‌شاه سنقر با توجه به مقادیر باقیمانده فلز آند در نمونه تصفیه شده، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه یک مطالعه توصیفی-مقطعی بود که به صورت طرح پایلوت در آزمایشگاه میکروبیولوژی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه به انجام رسید. هدف از این پژوهش، تعیین میزان حذف مجموع کلیفرم‌ها، کلیفرم گوارشی و باکتری‌های هتروتروف از آب سطحی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی و اندازه‌گیری مقادیر فلزات محلول رها شده از آند بعد از فرایند انعقاد الکتریکی در آب تصفیه شده بود.

نمونه‌های آب از آبگیر آب آشامیدنی سد سلیمان‌شاه سنقر واقع در شمال شرقی استان کرمانشاه تهیه شدند. جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و انتقال نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل کتاب روش‌های استاندارد انجام شد [۱۸]. محل انجام کلیه آزمایش‌ها، آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه بود. در هر دوره آزمایش با توجه به دمای مورد آزمایش، دمای نمونه تنظیم شد. کلیه آزمایش‌ها در راکتور انعقاد الکتریکی از جنس پلاکسی گلاس مجهز به همزن و با حجم مفید سه لیتر به صورت بسته<sup>۱</sup> به انجام رسید. در این مطالعه در دو دوره از چهار الکتروود آلومینیوم به صورت صفحه‌ای با ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر و چهار الکتروود آهن به صورت میله‌ای با ابعاد ۳×۱ سانتی‌متر که به طور عمود در راکتور نصب شدند، استفاده شد. در همه آزمایش‌ها فاصله بین الکتروودها ثابت و ۳ سانتی‌متر بود. الکتروودها به طور مستقیم به یک منبع جریان الکتریکی تا ولتاژ ۴۰ ولت و آمپراژ ۵ آمپر با جریان مستقیم متصل شدند. شیوه اتصال الکتروودها به صورت دو قطبی سری بود. قبل از انجام هر آزمایش برای حذف ناخالصی از الکتروودها، سطح الکتروودها با کاغذ سمباده ساییده شدند و سپس در محلول HCl فرو برده شدند و بعد از آن با آب شسته شدند. همه آزمایش‌ها در pH طبیعی آب انجام گرفتند. آزمایش‌های فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط پتانسیل الکتریکی (۵ تا ۲۵ ولت)، فواصل زمانی (۲۰ تا ۶۰ دقیقه)، دور همزن (۲۰۰ تا ۴۰۰ دور در دقیقه) و دمای (۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس) با استفاده از دو نوع الکتروود آهن و آلومینیوم انجام شدند. بعد از ته‌نشینی فلوک‌های تشکیل شده نمونه تصفیه شده از نظر باکتری هتروتروف با استفاده از روش pour plate و مجموع کلیفرم‌ها و کلیفرم گوارشی با استفاده از روش تخمیر چند لوله‌ای مندرج در کتاب روش‌های استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت [۱۸]. همچنین مقادیر باقیمانده فلز آهن و آلومینیوم ناشی از آزادسازی الکتروود آهن با استفاده از دستگاه ICP اندازه‌گیری شد. طراحی دوره‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار Design expert با توجه به متغیرهای مورد مطالعه انجام شد و آزمایش‌ها در ۳۰ دوره انجام شدند. نتایج حاصل از این مطالعه به صورت میانگین درصد حذف با مدل<sup>۱</sup> RSM این نرم‌افزار مورد تحلیل قرار گرفت.

### ۳- نتایج

در جدول‌های ۱ و ۲ نتایج آزمایش‌های میکربی در دوره‌های طراحی بعد از تصفیه با فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکتروودهای آهن و آلومینیوم نشان داده شده است. نتایج حاصل از

حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری هتروتروف با استفاده از مدل RSM<sup>۲</sup> در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد و  $(P_{value} < 0/0001)$  به خوبی تفسیر شد، ولی نتایج حاصل از کلیفرم گوارشی با استفاده از مدل تحلیل نشد. نتایج آنالیز واریانس مدل برای حذف عوامل میکربی در جدول ۳ نشان داده شده است. متغیرها در مدل به صورت A, B, C, D به ترتیب پتانسیل الکتریکی، دما، دور همزن و زمان کدگذاری شدند. در جدول ۳ متغیرهایی که بیشترین اثر را بر حذف باکتری هتروتروف و مجموع کلیفرم‌ها دارند، نشان داده شده است. در جدول ۳ ضریب تعیین  $R^2$  نشان دهنده تناسب خوب مدل برای حذف عوامل میکربی است. در شکل‌های ۱ و ۲ اثر متغیرها بر راندمان حذف باکتری هتروتروف با استفاده از الکتروودهای آهن و آلومینیوم نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ اثر متغیرها در حذف مجموع کلیفرم‌ها با استفاده از الکتروودهای آهن و آلومینیوم ارائه شده است.

نتایج جدول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که در دور همزن و دمای بالاتر مقادیر فلز باقیمانده هر دو نوع الکتروود بیشتر است. حداکثر راندمان حذف باکتری هتروتروف و مجموع کلیفرم با استفاده از الکتروود آلومینیوم در پتانسیل الکتریکی ۲۵ ولت به ترتیب ۸۹/۱ و ۱۰۰ درصد به دست آمد. همچنین حداکثر راندمان حذف باکتری هتروتروف و مجموع کلیفرم با استفاده از الکتروود آهن در پتانسیل الکتریکی ۲۵ ولت به ترتیب ۷۶/۱ و ۱۰۰ درصد به دست آمد.

### ۴- بحث

۴-۱- بررسی تأثیر پتانسیل الکتریکی و دمای واکنش بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری هتروتروف

چگالی جریان، یکی از پارامترهای مهم در فرایند انعقاد الکتریکی است. چگالی جریان بر میزان تولید ماده منعقدکننده در اثر حل شدن آهن و تولید گاز هیدروژن و نیز راندمان تصفیه مؤثر است [۱۹] و [۲۰]. محققان دیگر گزارش کرده‌اند که چگالی جریان بر راندمان تصفیه با استفاده از این فرایند تأثیری ندارد [۲۱]. در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر پتانسیل الکتریکی بر حذف عوامل میکربی در فرایند انعقاد الکتریکی از آب سطحی، محدوده پتانسیل الکتریکی ۵ تا ۲۵ ولت استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی اثر پتانسیل الکتریکی بر حذف عوامل میکربی از آب سطحی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی نشان می‌دهد که پتانسیل الکتریکی بر حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف با استفاده از الکتروودهای آهن و آلومینیوم مؤثر است. به این ترتیب که با افزایش پتانسیل الکتریکی، درصد حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف

<sup>2</sup> Response Surface Methodology

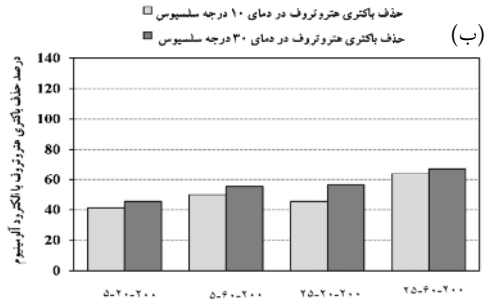
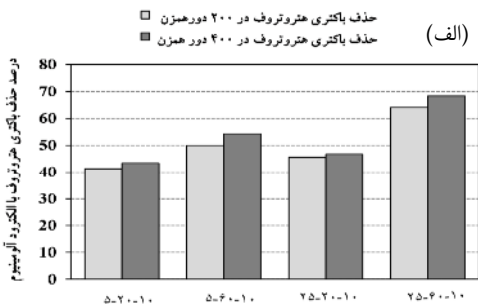
<sup>1</sup> Batch

جدول ۱- نتایج حذف عوامل میکربی از آب سطحی با استفاده از الکتروود آلومینیوم در فرایند انعقاد الکتریکی

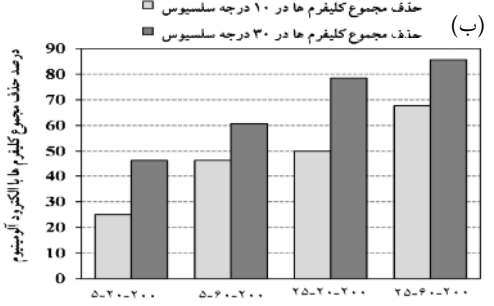
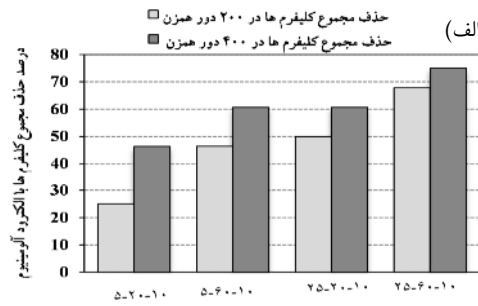
ردیف	دما (C)	دور همزن (rpm)	پتانسیل الکتریکی (Volt)	زمان (min)	حذف مجموع کلیفرم‌ها (%)	حذف کلیفرم گوارشی (%)	حذف باکتری هتروتروف (%)	کدورت (NTU)	باقیمانده آلومینیوم محلول (mg/L)
-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۶	-
۱		۲۰۰	۵	۲۰	۲۵	۰	۴۱/۳	۰/۴۶	۰/۱۳۸
۲				۶۰	۴۶/۴	۲۵	۵۰	۰/۴۴	۰/۲۹۴
۳		۴۰۰	۵	۲۰	۴۶/۴	۰	۴۳/۴	۰/۴۸	۰/۱۴۹
۴	۱۰			۶۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۴/۳	۰/۴۴	۰/۳۶۵
۵		۲۰۰	۲۵	۲۰	۵۰	۱۰۰	۴۵/۶	۰/۳۳	۰/۵۶۹
۶				۶۰	۶۷/۸	۱۰۰	۶۴/۱	۰/۱۸	۰/۶۸۲
۷		۴۰۰	۲۵	۲۰	۶۰/۷	۱۰۰	۴۶/۷	۰/۳۶	۰/۶۹۵
۸				۶۰	۷۵	۱۰۰	۶۸/۴	۰/۳۸	۰/۹۷۲
۹	۱۵	۳۰۰	۱۵	۴۰	۴۶/۴	۱۰۰	۵۲/۱	۰/۴۲	۰/۵۳۵
۱۰				۳۰	۵۰	۲۵	۵۱	۰/۳۵	۰/۴۵
۱۱	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۵/۴	۰/۳۸	۰/۴۷۹
۱۲				۵۰	۷۵	۱۰۰	۵۸/۶	۰/۴۳	۰/۷۲۱
۱۳	۲۰	۲۵۰	۱۵	۴۰	۵۰	۱۰۰	۵۵/۴	۰/۳۳	۰/۷
۱۴	۲۰	۳۵۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۶۱/۹	۰/۱۵	۰/۸۶۶
۱۵	۲۰	۳۰۰	۱۰	۴۰	۴۶/۴	۱۰۰	۵۸/۶	۰/۳۴	۰/۵۳۱
۱۶	۲۰	۳۰۰	۲۰	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۶۳	۰/۱۷	۰/۶۲۸
۱۷	۲۵	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۶۳	۰/۵۹	۰/۵۸۹
۱۸		۲۰۰	۵	۲۰	۴۶/۴	۰	۴۵/۶	۰/۲۵	۰/۳۰۲
۱۹				۶۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۵/۴	۰/۲۶	۰/۳۸۷
۲۰		۴۰۰	۵	۲۰	۵۰	۲۵	۴۷/۸	۰/۲۶	۰/۲۹۴
۲۱	۳۰			۶۰	۷۵	۱۰۰	۶۵/۲	۰/۲۸	۰/۵۰۳
۲۲		۲۰۰	۲۵	۲۰	۷۸/۵	۱۰۰	۵۶/۵	۰/۳۲	۰/۹۲۶
۲۳				۶۰	۸۵/۷	۱۰۰	۶۷/۳	۰/۲۴	۰/۸۵۷
۲۴		۴۰۰	۲۵	۲۰	۸۵/۷	۱۰۰	۷۷/۱	۰/۱۹	۱/۱۵۲
۲۵				۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۹/۱	۰/۱۸	۱/۶۴۲
۲۶	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۵/۴	۰/۳۸	۰/۴۷
۲۷	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۶/۵	۰/۳۹	۰/۴۷۱
۲۸	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۰/۷	۱۰۰	۵۲/۱	۰/۳۸	۰/۴۷۵
۲۹	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۵۰	۱۰۰	۵۸/۶	۰/۳۸	۰/۴۷۶
۳۰	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۵۰	۲۵	۵۵/۴	۰/۳۹	۰/۴۷۸

جدول ۲ - نتایج حذف عوامل میکروبی از آب سطحی با استفاده از الکتروود آهن در فرایند انعقاد الکتریکی

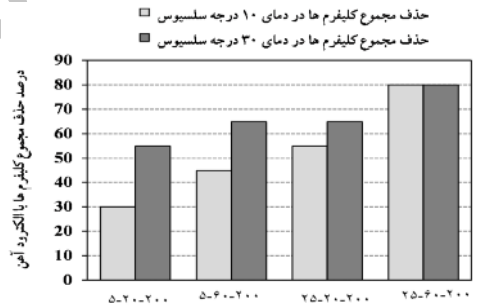
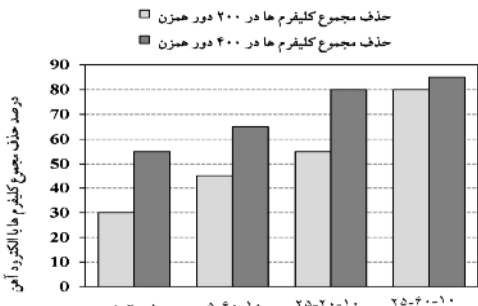
ردیف	دما (°C)	دوره‌مزن (rpm)	پتانسیل الکتریکی (Volt)	زمان (min)	حذف کلیفرم کل (%)	حذف کلیفرم گوارشی (%)	حذف باکتری هتروتروف (%)	کدورت (NTU)	باقیمانده آهن محلول (mg/L)
-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۵۸	-
۱		۲۰۰	۵	۲۰	۳۰	۰	۳۶/۹	۰/۵۸	۰/۲۳۷
۲				۶۰	۴۵	۰	۴۲/۸	۱/۱۱	۰/۳۸
۳		۴۰۰	۵	۲۰	۵۵	۰	۳۹/۲	۰/۵۶	۰/۲۴۸
۴	۱۰			۶۰	۶۵	۲۵	۴۸/۸	۱/۰۸	۰/۲۴۲
۵		۲۰۰	۲۵	۲۰	۵۵	۱۰۰	۴۶/۴	۲/۲۸	۰/۳۵۳
۶				۶۰	۸۰	۱۰۰	۶۰/۷	۳/۰۶	۰/۲۳۵
۷		۴۰۰	۲۵	۲۰	۸۰	۱۰۰	۴۸/۸	۱/۹	۰/۴۱۲
۸				۶۰	۸۵	۱۰۰	۶۶/۶	۶/۵	۰/۳۸۳
۹	۱۵	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۰	۱۰۰	۵۴/۷	۲/۸	۰/۳۲
۱۰				۳۰	۶۵	۲۵	۴۵/۲	۲/۵	۰/۲۲۳
۱۱	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۰	۱۰۰	۵۲/۳	۳/۵	۰/۳۳۲
۱۲				۵۰	۸۵	۱۰۰	۵۹/۵	۳/۶	۰/۲۷۵
۱۳	۲۰	۲۵۰	۱۵	۴۰	۵۵	۱۰۰	۵۱/۱	۳/۴۸	۰/۲۴۱
۱۴	۲۰	۳۵۰	۱۵	۴۰	۶۵	۱۰۰	۵۵/۹	۲/۸	۰/۳۶۱
۱۵	۲۰	۳۰۰	۱۰	۴۰	۵۵	۱۰۰	۴۸/۸	۱/۹۴	۰/۴۲۳
۱۶	۲۰	۳۰۰	۲۰	۴۰	۸۰	۱۰۰	۵۱/۱	۳/۲۳	۰/۴۵
۱۷	۲۵	۳۰۰	۱۵	۴۰	۶۵	۱۰۰	۵۹/۵	۴/۰۱	۰/۴۱۲
۱۸		۲۰۰	۵	۲۰	۵۵	۰	۴۲/۸	۰/۶	۰/۳۵
۱۹				۶۰	۶۵	۱۰۰	۵۳/۵	۱/۴۷	۰/۲۳۳
۲۰		۴۰۰	۵	۲۰	۶۵	۱۰۰	۴۱/۶	۰/۵۸	۰/۴۲۶
۲۱	۳۰			۶۰	۸۰	۱۰۰	۵۸/۳	۱/۱۸	۰/۲۷۶
۲۲		۲۰۰	۲۵	۲۰	۶۵	۲۵	۵۲/۳	۳/۴۶	۰/۴۰۲
۲۳				۶۰	۸۰	۱۰۰	۶۷/۸	۷/۳۴	۰/۳۱۸
۲۴		۴۰۰	۲۵	۲۰	۸۰	۱۰۰	۶۶/۶	۲/۷	۰/۴۱۲
۲۵				۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۶/۱	۹/۱۵	۰/۳۶۴
۲۶	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۰	۱۰۰	۵۲/۳	۳/۵	۰/۳۳۲
۲۷	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۰	۱۰۰	۵۴/۷	۳/۴	۰/۳۳۱
۲۸	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۰	۱۰۰	۴۸/۸	۳/۴۵	۰/۳۳۲
۲۹	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۵	۲۵	۵۳/۵	۳/۴۸	۰/۳۳۲
۳۰	۲۰	۳۰۰	۱۵	۴۰	۸۵	۲۵	۵۱/۱	۳/۵	۰/۳۳۰



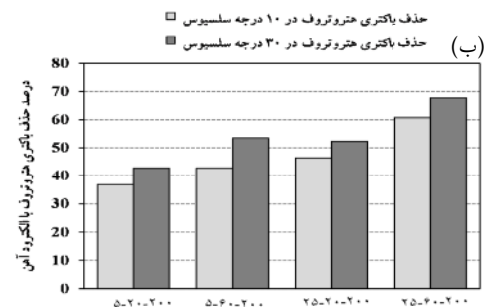
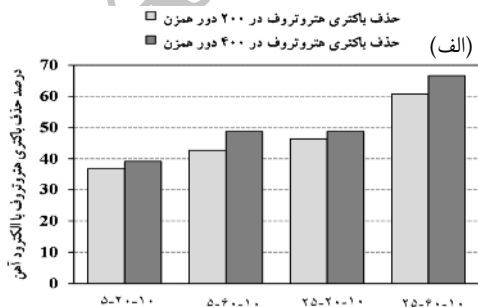
شکل ۱-الف) اثر پتانسیل الکتریکی، زمان و دمای واکنش بر راندمان حذف باکتری هتروتروف در دور همزن ثابت ۲۰۰ دور (ب) اثر دور همزن بر راندمان حذف باکتری هتروتروف با استفاده از الکتروود آلومینیوم



شکل ۲-الف) اثر پتانسیل الکتریکی، زمان و دمای واکنش بر راندمان حذف مجموع کلیرم ها در دور همزن ثابت ۲۰۰ دور (ب) اثر دور همزن بر راندمان حذف مجموع کلیرم ها با استفاده از الکتروود آلومینیوم



شکل ۳-الف) اثر پتانسیل الکتریکی، زمان و دمای واکنش بر راندمان حذف باکتری هتروتروف در دور همزن ثابت ۲۰۰ دور (ب) اثر دور همزن بر راندمان حذف باکتری هتروتروف با استفاده از الکتروود آهن



شکل ۴-الف) اثر پتانسیل الکتریکی، زمان و دمای واکنش بر راندمان حذف مجموع کلیرم ها در دور همزن ثابت ۲۰۰ دور (ب) اثر دور همزن بر راندمان حذف مجموع کلیرم ها با استفاده از الکتروود آهن

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس مدل برای حذف عوامل میکروبی بعد از فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکتروود آلومینیوم و آهن

نوع الکتروود	مدل	P-value	F-value	S.D.	R <sup>2</sup>	معادلات اصلاح شده بر اساس ترم‌های اصلی
الکتروود آلومینیوم	مدل 2 FI برای حذف باکتری هتروتروف	<0/0001	34/79	3/32	0/91	$Y_1=+57.06+6.91A+5.8 B+ 4.21C+6.88D +2.51AB+1.84 AC + 2.66 BC$
	مدل Quadratic_ برای حذف کلیفرم کل	<0/0001	43/4	4/88	0/91	$Y_2=+56.2+ 12.12A+ 9.52B+5.96C+8.55D +7.31D^2+ 2.68 AB$
الکتروود آهن	مدل Linear_ برای حذف باکتری هتروتروف	<0/0001	55/27	3/04	0/89	$Y_3=+52.88+ 7.43A + 4.32B + 2.74C + 6.49D$
	مدل Linear_ برای حذف کلیفرم کل	<0/0001	22/33	6/83	0/78	$Y_4=+73+ 9.55A+8.48C+9.09D$

قانون فارادی، چگالی جریان و زمان واکنش، اثر مستقیم در حل شدن فلز آند دارند [۲۲]. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که با افزایش دور همزن و زمان واکنش، راندمان حذف عوامل میکروبی با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم از آب سطحی افزایش می‌یابد. اثر زمان واکنش بر حذف باکتری‌های مورد مطالعه بیشتر از دور همزن است. افزایش دور همزن سبب شکسته شدن لخته‌ها و دوباره معلق شدن کدورت و باکتری‌ها می‌شود. بنابراین باید برای کاهش مصرف انرژی برای اختلاط، زمان ماند راکتور انعقاد و لخته‌سازی افزایش یابد. نتایج حاصل از مقادیر باقیمانده آهن و آلومینیوم محلول نشان داد که با افزایش دور همزن و زمان واکنش، مقدار باقیمانده آلومینیوم و آهن محلول افزایش می‌یابد. بنابراین دور همزن باید پایین نگه داشته شود تا سبب شکسته شدن لخته حاصله و رها سازی فلز نشود. بهتر است زمان واکنش در محدوده متوسط انتخاب شود تا سبب انحلال بیشتر فلز به دلیل زمان تماس طولانی نشود. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعه‌ای که توسط مدیر شهلا و همکاران بر روی حذف ۴- نیتروفلن از محلول‌های آبی با انعقاد الکتریکی انجام شد، مطابقت دارد؛ ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش دور همزن، راندمان حذف افزایش می‌یابد [۲۶].

۳-۴- بررسی میزان فلز محلول باقیمانده ناشی از آزاد سازی و انحلال الکتروود آند با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی و تعیین دوره آزمایش بهینه

نتایج حاصل از اندازه‌گیری فلز باقیمانده در هر دو نوع الکتروود نشان می‌دهد که با افزایش دما و پتانسیل الکتریکی، مقدار فلز محلول در اثر حل شدن آند در آب افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این سیستم مقداری از آهن و یا آلومینیوم به فلوک تبدیل نشده و به صورت محلول در سیستم باقی می‌ماند، ممکن است موجب ایجاد آلودگی ثانویه در اثر حضور بیش از حد مجاز این فلزات شود. استاندارد سازمان جهانی بهداشت<sup>۱</sup> برای آلومینیوم و

افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق با مطالعه ملکوتیان و همکاران در حذف سختی و نتایج مطالعه بذرافشان و همکاران در حذف کروم با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی مطابقت داشت [۲۲، ۲۳ و ۲۴]. با افزایش دما میزان حل شدن الکتروود آند بیشتر می‌شود و در نتیجه تشکیل فلوک در دمای بالا بهبود می‌یابد و همچنین جذب ذرات کلوئیدی از جمله باکتری‌ها بر سطح فلوک‌ها افزایش می‌یابد. به منظور بررسی راندمان تصفیه فرایند انعقاد الکتریکی در فصول مختلف سال، طراحی آزمایش‌ها در دماهای مختلف انجام شد و محدوده دمایی مورد مطالعه بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. با افزایش همزمان دما و پتانسیل الکتریکی، درصد حذف باکتری‌ها افزایش یافته است. اثر افزایش پتانسیل الکتریکی به ویژه در الکتروود آهن بیشتر از اثر افزایش دما بود. بنابراین فرایند انعقاد الکتریکی در هر دمایی در حذف باکتری‌ها تأثیرگذار است ولی در دمای پایین برای بالا بردن راندمان حذف، پتانسیل الکتریکی باید افزایش یابد. بر این اساس باید دما و پتانسیل الکتریکی، بهینه برای حذف باکتری‌ها با توجه به مقادیر فلز محلول در زیر سطح استاندارد آب آشامیدنی مورد توجه قرار گیرد. نتایج حاصل از باقیمانده آهن و آلومینیوم محلول نشان داد که با افزایش دما و پتانسیل الکتریکی، مقدار آزادسازی فلز آند در فرایند انعقاد الکتریکی افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق با مطالعه‌ای که وپسولین و همکاران بر روی بررسی اثر دما و pH روی حذف مواد آلی طبیعی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی انجام دادند، مطابقت داشت [۲۵]. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، میزان حلالیت آلومینیوم در آب افزایش می‌یابد.

۲-۴- بررسی تأثیر دور همزن و زمان واکنش بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری هتروتروف اختلاط، یکی از واحدهای مهم در تصفیه آب است. این واحد در طی تصفیه روی واکنش‌ها اثر می‌گذارد [۲۲]. با افزایش دور همزن تا حدی که سبب شکسته شدن لخته حاصله نشود، فلوک‌های تشکیل شده بهتر به هم چسبیده و ترسیب آنها آسان تر می‌شود [۲۶]. بر طبق

<sup>1</sup> World Health Organization (WHO)

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم در مدل RSM تحلیل شدند ولی نتایج حاصل از حذف کلیفرم گوارشی تحلیل نشد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که متغیرهای مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری بر حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف در هر دو الکتروود مورد استفاده، اثر می‌گذارند. حداکثر راندمان حذف باکتری‌های هتروتروف و مجموع کلیفرم‌ها با استفاده از الکتروود آلومینیوم به ترتیب ۸۹/۱ و ۱۰۰ درصد بود. همچنین حداکثر راندمان حذف باکتری‌های هتروتروف و مجموع کلیفرم‌ها با استفاده از الکتروود آهن به ترتیب ۷۶/۱ و ۱۰۰ درصد و راندمان حذف ۱۰۰ درصد برای کلیفرم گوارشی در هر دو نوع الکتروود به‌دست آمد. در این بررسی سطح الکتروود آهن برای تصفیه کمتر از الکتروود آلومینیوم بود زیرا کارایی الکتروود آهن در حذف باکتری‌های مورد مطالعه بیشتر از الکتروود آلومینیوم است. با توجه به تأثیر کمتر دور همزن و دمای واکنش بر راندمان حذف نسبت به پتانسیل الکتریکی و زمان واکنش، شرایط دمایی متغیر در طول سال و نیز سیستم‌های تصفیه مختلف آب با دوره‌های اختلاط سریع و فلوکولاسیون متغیر در طراحی فرایند انعقاد الکتریکی تأثیر کمتری بر کارایی سیستم انعقاد الکتریکی در حذف باکتری‌های مورد مطالعه دارد. با این وصف با توجه به کارایی متوسط به پایین فرایند انعقاد الکتریکی در حذف باکتری‌های هتروتروف و کلیفرم تا سطح استانداردهای فلز محلول باقیمانده در آب آشامیدنی، استفاده از این روش صرفاً برای حذف پاتوژن از آب آشامیدنی توجیه علمی و اقتصادی ندارد.

آهن در آب آشامیدنی به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر است. بنابراین در صورتی که از الکترودهای آهن و آلومینیوم برای تصفیه آب استفاده شود، باید مقدار فلز محلول باقیمانده در نمونه تصفیه شده اندازه‌گیری شود و با توجه به مقدار فلز محلول باقیمانده در آب، شرایط بهینه تصفیه انتخاب شود. با توجه به نتایج حاصله، دوره بهینه آزمایش برای حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف با استفاده از الکتروود آلومینیوم شامل پتانسیل الکتریکی ۵ ولت، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، سرعت اختلاط ۴۰۰ دور دقیقه و دمای واکنش ۱۰ درجه سلسیوس بود که در این شرایط، حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف به ترتیب ۴۶/۴ و ۴۳/۴ درصد و مقدار آلومینیوم محلول ۰/۱۴۹ میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد که کمتر از حد استاندارد ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر برای آب آشامیدنی است. همچنین دوره بهینه آزمایش برای حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف با استفاده از الکتروود آهن با توجه به دما و پتانسیل الکتریکی متفاوت خواهد بود به طوری که در پتانسیل الکتریکی ۲۵ ولت، زمان واکنش ۶۰ دقیقه، سرعت اختلاط ۲۰۰ دور در دقیقه و دمای واکنش ۱۰ درجه سلسیوس، حذف مجموع کلیفرم‌ها و باکتری‌های هتروتروف به ترتیب ۸۰ و ۶۰/۷ درصد و مقدار آهن محلول ۰/۲۳۵ میلی‌گرم در لیتر بود که کمتر از حد استاندارد ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر برای آب آشامیدنی است. بر این اساس و با توجه به میزان فلز باقیمانده تا حد استانداردهای رایج، درصد حذف باکتری‌های هتروتروف و کلیفرم‌های گوارشی توسط انعقاد الکتریکی کاهش یافته و استفاده از این روش را برای تصفیه آب آشامیدنی به‌ویژه با الکتروود آلومینیوم برای حذف باکتری‌های پاتوژن تا حد زیادی غیر قابل توجیه به‌نظر می‌رسد.

## ۶- مراجع

1. Matilainen, A., Gjessing, E., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A., and Sillanpää, M. (2011). "Review an overview of the methods used in the characterization of Natural Organic Matter (NOM) in relation to drinking water treatment." *Chemosphere*, 83, 1431-1442.
2. Sarkar, B., Venkateswralu, N., Nageswara Rao, R., Bhattacharjee, Ch., and Kale, V. (2007). "Treatment of pesticide contaminated surface water for production of potable water by a coagulation-adsorption-nanofiltration approach." *Desalination*, 212, 129-140.
3. Paykary, M., Mehrabani, A. (2008). *Book water treatment fundamental*, 3<sup>rd</sup> Ed., Danesh Ardakan Pub., Isfahan. (In Persian)
4. Lehr, J., and Keleey, J. (2005). *Ebook water encyclopedia surface and agricultural water*, Wiley-Interscience, N.Y.
5. Orecki, A., Tomaszewska, M., Karakulski, K., and Morawski, A.W. (2004). "Surface water treatment by nanofiltration method." *Desalination*, 162, 47-54.
6. Nemade, P., Kadam, A., and Shankar, H.S. (2009). "Removal of iron, arsenic and coliform bacteria from water by novel constructed soil filter system." *Ecological Engineering*, 35, 1152-1157.
7. Dunling, W., and Wanda, F. (2008). "Evaluation of media for simultaneous enumeration of total coliform and *Escherichia coli* in drinking water supplies by membrane filtration techniques." *J. of Environmental Sciences*, 20, 273-277.



8. Mukhopadhyay, Ch., Vishwanath, Sh., Eshwara, V., Shankaranarayana, Sh., and Sagir, A. (2012). "Microbial quality of well water from rural and urban households in Karnataka, India: A cross-sectional study." *J. of Infection and Public Health*, 5, 257-262.
9. Pitkänen, T., Paakkari, P., Miettinen, I., Heinonen-Tanski, H., Paulin, L., and Liisa Hänninen, M. (2007). "Comparison of media for enumeration of coliform bacteria and *Escherichia coli* in non disinfected water." *J. of Microbiological Methods*, 68, 522-529.
10. Schraft, H., and Watterworth, L.A. (2005). "Enumeration of heterotrophs, fecal coliforms and *Escherichia coli* in water: Comparison of 3Mk Petrifilmk plates with standard plating procedures." *J. of Microbiological Methods*. 60, 335-342.
11. Emamjomeh, M., and Sivakumar, M. (2009). "Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes." *J. of Environmental Management*, 90, 1663-1679.
12. Wan, W., Pepping, T., Banerji, T., Chaudhari, S., and Giammar, D. (2011). "Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by electrocoagulation." *Water Research*, 45, 384-392.
13. Comninellis, Ch., and Chen, G.U. (2010). *Ebook electrochemistry for the environment*, Spring Pub. New York.
14. Parga, J., Cocke, D., Valenzuela, J., Gomes, J., Kesmez, M., Irwin, G., Moreno, H., and Weir, M. (2005). "Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera M'xico." *J. of Hazardous Materials*, 124, 247-254.
15. Mollah Yousuf, A. M., Schennach, R., Parga, J.R., and Cocke, D. (2001). "Electrocoagulation (EC) science and applications." *J. of Hazardous Materials*, 84, 29-41.
16. Rabbani, D., Bigdeli, M., and Ghadami, F., (2012). "Comparing the effect of electrochemical process and alum coagulation in removing turbidity and coliform bacteria from the synthetic wastewater." *Feyz, J. of Kashan University of Medical Sciences*, 3, 273-281.
17. Ghernaout, D., Badis, A., Kellil, A., and Ghernaout, B. (2008). "Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters." *Desalination*, 219, 118-125.
18. APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20<sup>th</sup> Ed., USA.
19. Kobya, M., Ulu, F., Gebologlu, U., Demirbas, E., and Oncel S. M. (2011). "Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes." *Separation and Purification Technology*, 77, 283-293.
20. Ghosh, D., Solanki, H., and Purkait, M. K. (2008). "Removal of Fe(II) from tap water by electrocoagulation technique." *J. of Hazardous Materials*, 155, 135-143.
21. Kumar P., Chaudhari, S., Khilar, K., and Mahajan, S. (2004). "Removal of arsenic from water by electrocoagulation." *Chemosphere*, 55, 1245-1252.
22. Malakootian, M., Mansoorian, H.J., and Moosazadeh, M. (2010). "Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water." *Desalination*, 255, 67-71.
23. Bazrafshan, E., Mahvi A.H, Naseri S., and Mesdaghinia, A.R. (2008). "Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminum electrodes." *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 32, 59-66.
24. Mahvi, A.H., Bazrafshan, E., Mesdaghinia, A.R., Nasser, S., and Vaezi, F. (2007). "Chromium (Cr<sup>+6</sup>) removal from aqueous environments by electrocoagulation process using aluminum electrodes." *J. of Water and Wastewater*, 62, 28-34. (In Persian)
25. Vepsalainen, M., Ghiasvand, M., Selin, J, Pienimaa, J., Repo, E., Pulliainen, M., and Sillanpaa, M. (2009). "Investigations of the effects of temperature and initial sample pH on Natural Organic Matter (NOM) removal with electrocoagulation using response surface method (RSM)." *Separation and Purification Technology*, 69, 255-261.
26. Modirshahla, N., Behnajady, M.A, and Mohammadi-Aghdam, S. (2008). "Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation." *J. of Hazardous Materials*, 154, 778-786.