

# بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کروم (VI) با روش تاگوچی

مسعود اسدی حبیب<sup>۱</sup>      سید محمدرضا علوی مقدم<sup>۲</sup>  
مختار آرامی<sup>۳</sup>              سید حسین هاشمی<sup>۴</sup>

(دریافت ۸۹/۱/۱۰ پذیرش ۸۹/۷/۲۰)

## چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کروم (VI) با استفاده از روش طراحی آزمایش (تاگوچی) بود. در این خصوص از یک راکتور حاوی شش الکترود موازی استفاده شد. تأثیر هفت پارامتر شامل جنس الکترود، جریان الکتریکی، زمان واکنش، pH اولیه، ولتاژ اولیه، غلظت اولیه کروم و دور همزن (شدت اختلاط) در دو سطح مختلف در فرایند انعقاد الکتریکی بررسی شد و در این رابطه از روش طراحی آزمایش تاگوچی مدل "OA\_32" استفاده گردید. در بین این پارامترها، بیشترین تأثیر مربوط به پارامترهای شدت جریان الکتریکی و جنس الکترود و کمترین تأثیر مربوط به دور همزن بود. طبق نتایج این تحقیق، بیشترین میزان حذف کروم (۱۶۸/۳۳ میلی گرم در لیتر) در شرایط الکترود آهنی، جریان الکتریکی ۳ آمپر، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، pH اولیه ۴، ولتاژ اولیه ۶ ولت و غلظت اولیه کروم ۴۰۰ میلی گرم در لیتر و دور همزن صفر حاصل شد.

**واژه‌های کلیدی:** کروم شش ظرفیتی، انعقاد الکتریکی، بهینه سازی، روش تاگوچی

## Optimization of the Electrocoagulation Process for Removal of Cr(VI) Using Taguchi Method

Masoud Asadi Habib<sup>1</sup>      Seyed Mohammad Reza Alavi Moghaddam<sup>2</sup>  
Mokhtar Arami<sup>3</sup>              Seyed Hossein Hashemi<sup>4</sup>

(Received Apr. 9, 2010      Accepted Oct. 12, 2010)

### Abstract

The aim of this study was to optimize electrocoagulation process for removal of chromium (VI) using Taguchi method. An electrocoagulation reactor with six parallel electrodes was used in this study. For this purpose, effects of 7 parameters such as electrode material, electric current, time of reactions, initial pH, initial voltage, initial chromium concentration and rpm of impeller (agitation intensity) in two different levels were studied. Model of "OA\_32" of Taguchi experimental design method was used. Among the above-mentioned parameters, electric current and electrode material had highest effects and rpm of impeller had the lowest effect on the electrocoagulation performance. According to the obtained results, highest chromium removal (168.33 mg/L) observed in the following conditions: electric current=3A, time of reaction=20min, initial pH=4, initial voltage=6v, initial chromium concentration=400mg/L, rpm of impeller=0rpm and iron as electrode material

**Keywords:** Chromium (VI), Electrocoagulation, Optimization, Taguchi Method.

1. M.Sc. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran
2. Assoc. Prof. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 64543007 alavim@yahoo.com
3. Assoc. Prof. of Textile Eng., Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran
4. Assist. Prof., of Environmental Science Research Institute, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران  
(نویسنده مسئول) ۰۲۱) ۶۴۵۴۳۰۰۷ alavim@yahoo.com
- ۳- دانشیار دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران
- ۴- استادیار پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

## ۱- مقدمه

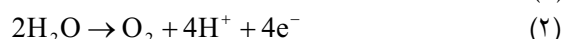
روش انعقاد الکتریکی روشی مؤثر و مطمئن است که می‌تواند به‌عنوان یک شیوه پاک و سالم در حذف برخی آلاینده‌های محیط زیستی به‌کار رود [۱-۳]. این فرایند بدون اضافه کردن هیچ نوع ماده شیمیایی عمل کرده و بنابراین میزان لجن تولیدی را کاهش می‌دهد [۴-۶]. خصوصیات مثبت روش انعقاد الکتریکی عبارت‌اند از: تطابق پذیری با شرایط مختلف، قابلیت انتخابگری، قابلیت تنظیم خودکار، سازگاری با شرایط زیست محیطی، تجهیزات ساده، زمان ماند پایین، بهره‌برداری آسان و نیز قابلیت تصفیه دامنه وسیعی از آلاینده‌ها [۷ و ۸].

به‌دلیل اهمیت روش انعقاد الکتریکی در سالهای اخیر مطالعات وسیعی در این زمینه انجام گرفته است که بخشی از این فعالیتها متعلق به ایران است [۲ و ۹-۱۵]. این در حالی است که مطالعات کمتری در خصوص به‌کارگیری روشهای طراحی آزمایش در حذف آلاینده‌های مختلف توسط فرایند انعقاد الکتریکی صورت پذیرفته است.

روابط کلی فرایند انعقاد الکتریکی به‌شرح زیر است [۲ و ۶ و ۹ و

۱۶ و

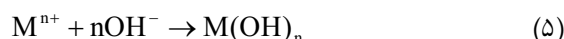
الف) در آند



ب) در کاتد



ج) واکنش یون‌های فلزی تولید شده در آند با یون‌های هیدروکسید تولید شده در کاتد و تولید هیدروکسید فلز



در این روابط M جنس فلز آند است. یون  $Al^{3+}$  با تیغه آلومینیومی و یون  $Fe^{2+}$  با تیغه آهنی ایجاد می‌گردد [۱۰ و ۱۷ و ۱۸]. آهن و آلومینیوم به‌دلیل قیمت مناسب و دسترسی آسان بیشترین استفاده در انعقاد الکتریکی را دارند [۱۸]. هیدروکسید فلزات مذکور باعث انعقاد و ایجاد لخته و در نتیجه حذف آلاینده مورد نظر می‌گردند [۱۷].

یکی از کاربردهای روش انعقاد الکتریکی حذف کروم از محیط‌های آبی است. فلز سنگین کروم به‌عنوان ماده‌ای سمی شناخته شده که دارای پتانسیل سرطان‌زایی است. کروم شش ظرفیتی توسط واحدهای مختلف صنعتی مانند صنایع آبکاری و پرداخت فلزات، تولید کرومات، دباغی‌ها و تولید کود شیمیایی وارد محیط زیست می‌شود [۱ و ۲]. ایران یکی از کشورهای است که در معرض آلودگی زیست محیطی توسط فلز کروم قرار دارد [۱۹-۲۱].

مطالعات زیادی در زمینه حذف کروم از محیط آبی به‌روش انعقاد الکتریکی صورت گرفته است که همگی نشانگر بازدهی بالای این روش هستند [۲، ۴، ۶ و ۱۰]. از طرفی مطالعات نشان می‌دهد که روش مورد بحث بازدهی بالایی در حذف سایر فلزات سنگین از جمله آرسنیک، مس، سرب، کادمیم، نیکل و نقره دارد [۳ و ۵-۷].

در این مطالعه از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. در این روش هر سیستم با پارامترهای مستقل و سطوح مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد و دارای کاربردهای فراوانی از علم شیمی تا مهندسی است [۱۸ و ۲۲]. به‌عبارتی دیگر، این روش مشخص کردن اثر پارامترهای مستقل و ارتباط بین متغیرها را ساده می‌کند [۲۳]. از فواید دیگر این روش می‌توان به حداقل بودن هزینه آزمایش‌ها، حداقل بودن تغییرات در مقادیر پاسخ و قابل کاربرد بودن نتایج در کارهای عملی اشاره کرد [۱۸].

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در بازدهی فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کروم (VI) بود. برای نیل به این هدف از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد.

## ۲- مواد و روشها

در این تحقیق راکتور آزمایش انعقاد الکتریکی از جنس پلکسی گلس<sup>۱</sup> به حجم مفید ۲۵۰۰ میلی‌لیتر و با ابعاد ۱۴۵×۱۵۰×۲۲۵ میلی‌متر ساخته شد. تیغه‌های مورد استفاده برای الکترودها از جنس آهن نرم ST-12 و آلومینیوم ۳۰۰۳ بود. ابعاد این تیغه‌ها ۳×۱۲۵×۵۵ میلی‌متر بوده و در هر آزمایش از شش الکترود به‌صورت موازی استفاده شد. فاصله بین تیغه‌ها در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲ سانتی‌متر تنظیم گردید. برای هم‌زدن محلول، از یک پروانه به‌طول ۱۱۰ و ارتفاع ۷ میلی‌متر از جنس فولاد ضد اسید و ضدزنگ ST\_316 استفاده شد. برای تأمین انرژی الکتریکی آزمایش‌ها از یک منبع تغذیه جریان برق مستقیم دیجیتالی<sup>۲</sup> استفاده شد که جریان الکتریکی را به‌صورت تک پله<sup>۳</sup> به تیغه‌ها می‌رساند. راکتور مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در کلیه آزمایش‌ها آب دوبار تقطیر به‌همراه نمک کلرید سدیم خالص (برای افزایش رسانایی محلول) به‌عنوان الکترولیت مورد استفاده قرار گرفت. محلول استوک کروم شش ظرفیتی با حل کردن مقدار معینی از پودر دی‌کرومات پتاسیم در آب دوبار تقطیر به‌دست آمد. علت استفاده از آب مقطر برای ساخت محلول کروم شش ظرفیتی بررسی حذف این فلز بدون تداخل سایر مواد بود که

<sup>1</sup> Plexi Glass

<sup>2</sup> Micro\_PW\_4053R

<sup>3</sup> Monopolar

که در این رابطه

$V$  ولتاژ بین دو الکترود بر حسب ولت،  $A$  سطح فعال الکترود بر حسب متر مربع،  $I$  شدت جریان الکتریکی بر حسب آمپر،  $d$  فاصله دو الکترود بر حسب متر،  $k$  ضریب هدایت الکتریکی ویژه محلول<sup>۲</sup> بر حسب میلی زیمنس بر متر است.

به علت ثابت بودن سطح و فاصله الکترودها، با حل کردن کلرید سدیم (بالا بردن هدایت الکتریکی ویژه محلول)، ولتاژ و شدت جریان الکتریکی به میزان مورد نظر تنظیم می‌شد. پس از تنظیم این دو پارامتر، شدت جریان الکتریکی که حساسیت بالایی دارد ثابت نگه داشته شده و به ولتاژ اجازه داده می‌شد که آزادانه با تغییر ماهیت محلول در طی انجام فرایند انعقاد الکتریکی تغییر نماید.

برای همگن شدن محلول نهایی به خصوص در آزمایش‌هایی که دور همزن صفر بود، ۵ دقیقه بعد از اتمام آزمایش، محلول داخل راکتور به مدت ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه به هم زده شد و نمونه‌های لازم برای آنالیز برداشته شد.

برای تشریح بهتر نتایج حاصل از این تحقیق، تأثیر هر پارامتر به ازای میزان حذف کروم در هر مرحله بر حسب میلی‌گرم در لیتر گزارش شد. مشابه این کار را در سایر تحقیقات نیز می‌توان مشاهده نمود [۱، ۴، ۶].

برای اندازه‌گیری کروم شش ظرفیتی از دستگاه اسپکتروفتومتر هج<sup>۳</sup> مدل DR 4000U طبق روش استاندارد متد استفاده شد. فیلتر کردن محلول نهایی آزمایش‌ها و ذخیره‌سازی نمونه‌ها نیز طبق روش‌های کتاب استاندارد متد انجام گرفت [۲۵].

در این تحقیق از روش طراحی آزمایش تاگوچی و مدل "OA\_32" استفاده شد. در جدول پیشنهادی این مدل برای ترکیب آزمایش‌ها، ۳۱ ستون برای اختصاص به پارامترهای مختلف وجود دارد که در این تحقیق، هفت ستون آن برای پارامترهای اصلی در نظر گرفته شد. همچنین به ازای هر دو پارامتر اصلی، ستونی اختصاص داده شد که تداخل بین آنها را نشان دهد. اما به دلیل محدودیت در اختصاص ستون برای تداخل‌ها، به ناچار در سه ستون، تداخل دو پارامتر به صورت مشترک قرار گرفت. شش ستون باقی‌مانده نیز به صورت ستون خطا در نظر گرفته شدند که نه پارامتری به آنها اختصاص یافت و نه اثر تداخلی در آنها ظاهر گردید. پس باید اثر این شش ستون در هنگام تحلیل نتایج صفر باشد که همین موضوع می‌تواند برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌ها استفاده شود.

پس از انجام ۳۲ آزمایش پیشنهادی توسط روش تاگوچی و تحلیل نتایج، شرایط بهینه حذف مشخص شد. برای مشخص



شکل ۱- راکتور انعقاد الکتریکی استفاده شده در این تحقیق

در برخی تحقیقات دیگر نیز از این روش استفاده شده است [۲، ۴، ۶ و ۱۰]. برای تنظیم pH از محلولهای اسیدسولفوریک و هیدروکسید سدیم در غلظتهای ۱ و ۰/۱ نرمال و برای اندازه‌گیری آن از دستگاه pH متر<sup>۱</sup> استفاده شد. کلیه آزمایش‌های این تحقیق در دمای محیط انجام شد.

در این تحقیق، تأثیر ۷ پارامتر مهم در فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کروم (VI) در نظر گرفته شد که سطوح انتخابی هر یک از آنها برای ارائه به روش تاگوچی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترها و سطوح انتخاب شده در این تحقیق

شماره	پارامتر	سطوح انتخابی	
		واحد	سطح ۱ / سطح ۲
۱	شدت جریان الکتریکی	A	۱ / ۳
۲	ولتاژ اولیه	V	۳ / ۶
۳	غلظت اولیه آلاینده	mg/L	۲۰۰ / ۴۰۰
۴	زمان واکنش	min	۱۰ / ۲۰
۵	جنس الکترود	-	Al (محیط اسیدی) / Fe (محیط قلیایی)
۶	pH اولیه	-	۴ / ۱۰
۷	تعداد دور همزن (شدت اختلاط)	rpm	۰ / ۱۰۰

برای تنظیم ولتاژ اولیه و شدت جریان الکتریکی از رابطه ۶ استفاده شد. طبق این رابطه در یک سلول الکتروشیمیایی، ولتاژ به شدت جریان الکتریکی، رسانایی محلول، فاصله و سطح الکترودها وابسته است [۱۶، ۱۷، ۲۴]

$$V = Id / Ak \quad (6)$$

<sup>۲</sup> Specific Conductivity of the Solution  
<sup>۳</sup> HACH

<sup>۱</sup> 340i/SET-WTW

شدن مقدار حداکثر حذف، آزمایش در شرایط بهینه (بیشینه) سه بار تکرار شد و میانگین این سه نتیجه در این تحقیق گزارش شد.

مشابه این کار را در سایر تحقیقات نیز می‌توان مشاهده نمود [۱، ۴ و ۶].

در این جدول ۲ میانگین حذف در ۳۲ مرحله برابر ۵۵/۵ میلی‌گرم در لیتر است که کمترین میزان حذف برابر ۵/۵ میلی‌گرم در لیتر در مرحله شانزدهم و بیشترین میزان در مرحله بیستم و برابر ۱۶۵ میلی‌گرم در لیتر است.

با تحلیل نتایج جدول ۲ طبق روش تاگوچی میزان اثر هر پارامتر به دست می‌آید که داده‌های مربوط به آن به صورت نزولی تنظیم و در شکل ۲ ارائه شده است.

همانطور که از شکل ۲ مشخص است از بین ۷ پارامتر اصلی،

### ۳- نتایج و بحث

پس از طراحی آزمایش‌ها در روش تاگوچی برای هفت پارامتر، ۳۲ مرحله آزمایش طبق ترکیب ارائه شده توسط مدل "OA\_32" به انجام رسید. در جدول ۲ مشخصات این آزمایش‌ها و نتیجه هر مرحله (آخرین ستون جدول) نشان داده شده است. برای تشریح بهتر نتایج حاصل از این تحقیق، تأثیر هر پارامتر به ازای میزان حذف کروم در هر مرحله بر حسب میلی‌گرم در لیتر گزارش شد.

جدول ۲- ترکیب آزمایش‌های پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی و نتایج حاصل

مرحله	جنس الکتروود	زمان واکنش (min)	جریان (A)	پارامترها			نتایج
				غلظت اولیه $Cr^{+6}$ (mg/L)	دور همزن (rpm)	ولتاژ اولیه (V)	
۱	Al	۱۰	۱	۲۰۰	.	۳	۶
۲	Al	۱۰	۱	۴۰۰	۱۰۰	۶	۱۴/۵
۳	Al	۱۰	۳	۲۰۰	.	۶	۱۸
۴	Al	۱۰	۳	۴۰۰	۱۰۰	۳	۵۲/۵
۵	Al	۱۰	۱	۲۰۰	۱۰۰	۳	۱۰
۶	Al	۱۰	۱	۴۰۰	.	۶	۲۰
۷	Al	۱۰	۳	۲۰۰	۱۰۰	۶	۴۰/۵
۸	Al	۱۰	۳	۴۰۰	.	۳	۱۸/۵
۹	Al	۲۰	۳	۲۰۰	.	۳	۴۷/۵
۱۰	Al	۲۰	۳	۴۰۰	۱۰۰	۶	۴۸
۱۱	Al	۲۰	۱	۲۰۰	.	۶	۹
۱۲	Al	۲۰	۱	۴۰۰	۱۰۰	۳	۴۱
۱۳	Al	۲۰	۳	۲۰۰	۱۰۰	۳	۲۶
۱۴	Al	۲۰	۳	۴۰۰	.	۶	۱۰۳/۵
۱۵	Al	۲۰	۱	۲۰۰	۱۰۰	۶	۳۷/۵
۱۶	Al	۲۰	۱	۴۰۰	.	۳	۵/۵
۱۷	Fe	۲۰	۱	۲۰۰	.	۳	۷۴/۵
۱۸	Fe	۲۰	۱	۴۰۰	۱۰۰	۶	۱۵
۱۹	Fe	۲۰	۳	۲۰۰	.	۶	۱۱۵/۵
۲۰	Fe	۲۰	۳	۴۰۰	۱۰۰	۳	۱۶۵
۲۱	Fe	۲۰	۱	۲۰۰	۱۰۰	۳	۴۲/۵
۲۲	Fe	۲۰	۱	۴۰۰	.	۶	۸۰
۲۳	Fe	۲۰	۳	۲۰۰	۱۰۰	۶	۱۴۵/۵
۲۴	Fe	۲۰	۳	۴۰۰	.	۳	۱۲۲/۵
۲۵	Fe	۱۰	۳	۲۰۰	.	۳	۱۰۱/۵
۲۶	Fe	۱۰	۳	۴۰۰	۱۰۰	۶	۷۲
۲۷	Fe	۱۰	۱	۲۰۰	.	۶	۲۸
۲۸	Fe	۱۰	۱	۴۰۰	۱۰۰	۳	۴۸
۲۹	Fe	۱۰	۳	۲۰۰	۱۰۰	۳	۷۳/۵
۳۰	Fe	۱۰	۳	۴۰۰	.	۶	۱۲۹
۳۱	Fe	۱۰	۱	۲۰۰	۱۰۰	۶	۴۹/۵
۳۲	Fe	۱۰	۱	۴۰۰	.	۳	۱۶

همانطور که از شکل ۳ مشخص است، الکترودهای آهنی میزان حذف بیشتری نسبت به الکترودهای آلومینیومی داشته‌اند. این نتیجه در سایر تحقیقات نیز حاصل شده است [۲، ۹، ۱۰]. در تحقیق انجام شده توسط بذرافشان و همکاران که بدون طراحی آزمایش صورت گرفته، بیشترین و کمترین میزان حذف کروم با تیغه آهنی به ترتیب ۱۰۰ و ۴۷/۴ درصد به دست آمده است که این مقادیر برای تیغه آلومینیومی به ترتیب برابر ۹۹/۹ و ۸/۸ درصد گزارش شده است [۲].

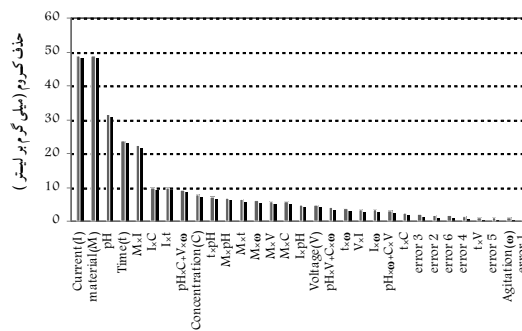
همچنین از شکل ۳ می‌توان دریافت که میزان حذف کروم در محیط اسیدی (pH=۴) بیشتر از محیط بازی (pH=۱۰) بوده است. این نتیجه نیز در سایر تحقیقات حاصل شده است [۲، ۱۰، ۱۴]. در تحقیق انجام شده توسط بذرافشان و همکاران که با سه سطح pH انجام شده است، بیشترین و کمترین میزان حذف کروم در محیط اسیدی (pH=۳) به ترتیب ۱۰۰ و ۲۱/۸ درصد به دست آمده است که این مقادیر برای محیط بازی (pH=۱۰) به ترتیب برابر ۹۹/۹۶ و ۸/۸ درصد بوده است [۲].

از طرفی نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش میزان جریان الکتریکی، زمان واکنش و غلظت اولیه آلاینده، میزان حذف بیشتری حاصل شده است؛ این نتایج را نیز در سایر تحقیقات می‌توان مشاهده نمود [۱، ۲، ۶، ۱۰].

با استفاده از شکل ۳ می‌توان با توجه به رفتار پارامترها در حذف کروم، مقدار هر پارامتر را در شرایط بهینه حذف (در این مطالعه) پیدا کرد. این شرایط عبارتند از: الکترودها از جنس آهن، جریان الکتریکی ۳ آمپر، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، pH اولیه برابر ۴، ولتاژ اولیه ۶ ولت، غلظت اولیه کروم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و دور همزن برابر صفر. با مشخص شدن شرایط بهینه حذف، برای رسیدن به حالت بهینه یعنی بیشترین مقدار حذف کروم شش ظرفیتی، سه بار متوالی آزمایش در این شرایط انجام شد. میانگین این سه عدد برابر ۱۶۸/۳۳ میلی‌گرم در لیتر با انحراف معیار و واریانس برابر ۱/۵۳ و ۲/۳۳ به دست آمد. این میزان حذف کروم از بیشترین عدد به دست آمده از آزمایش‌های اولیه در جدول ۲ (۱۶۵ میلی‌گرم بر لیتر) بیشتر بود که نشان دهنده بیشترین میزان حذف کروم شش ظرفیتی در این تحقیق است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بهینه‌سازی حذف کروم شش ظرفیتی به روش طراحی آزمایش تاگوچی (مدل "OA\_32") انجام شد و در آن ۷ پارامتر شامل جنس الکترودها، جریان الکتریکی، زمان واکنش، pH اولیه، ولتاژ اولیه، غلظت اولیه کروم و دور همزن (شدت اختلاط) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مهم‌ترین پارامترها در



پارامترهای اصلی، تداخل‌ها و ستون‌های خطا

شکل ۲- رتبه‌بندی پارامترها، تداخل‌ها و ستون‌های خطا در حذف  $Cr^{+6}$  در این تحقیق

بیشترین اثر به شدت جریان الکتریکی و پس از آن با اختلاف کمی به جنس الکترودها مربوط است. بعد از این دو پارامتر، pH اولیه و زمان واکنش قرار دارند و پارامترهای غلظت اولیه کروم و ولتاژ اولیه، اثرگذاری کمتری نسبت به پارامترهای مذکور نشان می‌دهند. همچنین میزان اثرگذاری دور همزن (شدت اختلاط) در مقایسه با سایر پارامترها ناچیز به نظر می‌رسد. موقعیت اثر ستون‌های خطا (error 1-6) در بین پارامترها نشان می‌دهد که آزمایش‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار بوده‌اند، طوری که اثر این ستون‌ها مقدار ناچیزی بوده و در محدوده انتهای رتبه‌بندی پارامترها قرار گرفتند. در شکل ۲ قدر مطلق اختلاف اثر دو سطح هر پارامتر نشان داده شده است که اهمیت آن را در کنار سایر پارامترها و نیز در مقایسه با مقادیر به دست آمده برای ستون‌های خطا نشان می‌دهد. اما برای مشخص شدن شرایط بهینه حذف باید میزان اثر هر دو سطح پارامترها در کنار هم معین باشد که این مقادیر بر حسب میزان حذف کروم (میلی‌گرم در لیتر) در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- میزان اثر دو سطح پارامترهای اصلی بر حسب میزان حذف کروم (میلی‌گرم در لیتر)

حذف آلاینده مذکور، شدت جریان الکتریکی و جنس الکترود و کم اهمیت‌ترین آنها دور همزن (شدت اختلاط) است. حذف کروم با افزایش پارامترهای جریان الکتریکی، زمان واکنش، غلظت اولیه کروم و ولتاژ اولیه افزایش یافت و این موضوع در مورد pH برعکس بود. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تاثیر تیغه‌های آهنی در حذف کروم بیشتر از آلومینیوم است. با انجام آزمایش‌های مشخص شده توسط طراحی آزمایش تاگوچی، شرایط بهینه (حداکثر حذف کروم بر حسب میلی‌گرم در لیتر) در این تحقیق مشخص شد که عبارت بود از: الکترودها از جنس آهن، جریان الکتریکی ۳ آمپر، زمان واکنش ۲۰ دقیقه، pH اولیه برابر ۴، ولتاژ اولیه ۶ ولت، غلظت اولیه کروم ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و دور همزن برابر صفر. با انجام آزمایش در این شرایط میزان حذف کروم ۱۶۸/۳۳ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد که از همه اعداد حاصل شده از آزمایش‌های مدل OA\_32 بیشتر بود و پیش‌بینی مدل را تأیید می‌نمود.

با در نظر گرفتن کلیه داده‌های حاصل از این تحقیق می‌توان دریافت که به‌کار بردن روش طراحی آزمایش تاگوچی قادر است

برای تشریح فرایند انعقاد الکتریکی با پارامترهای متفاوت به‌کار رود.

#### ۵- پیشنهاد

از آنجا که روشهای طراحی آزمایش با در نظر گرفتن همه شرایط و با دقت بالا به بررسی یک پدیده می‌پردازد، لذا ضروری است تحقیقات دیگری با در نظر گرفتن سطوح بیشتر برای پارامترهای مؤثر در انعقاد الکتریکی به‌کمک این روشها صورت پذیرد.

#### ۶- قدردانی

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌دلیل حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند. همچنین این کار علمی مرهون زحمات و راهنمایی‌های خانم‌ها مهندس مریم اکبری و مهندس لیدا عزالدین‌لو کارشناسان محترم آزمایشگاه محیط زیست و شیمی مصالح دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آقایان مهندس رضا قانی و دکتر علیرضا تهرانی بقا می‌باشد که از همه این همکاران محترم کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

#### ۷- مراجع

- 1- Mouedhena, G., Feki, M., Wery, M.P., and Ayedi, H.F. (2008). "Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process." *J. Hazardous Materials*, 150, 124-135.
- 2- 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. of Engineering and Environmental Science*, 32, 1-8.
- 3- Escobar, C., Soto-Salazar, C., and Toral, M. (2006). "Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater." *J. of Environmental Management*, 181 (4), 384-391.
- 4- Heidmann, I., and Calmano, W. (2008). "Removal of Cr (VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes." *J. Separation and Purification Technology*, 61(1), 15-21.
- 5- Gomes, J. A.G., Daida, P., Kesmez, M., Weir, M., Moreno, H., Parga, J. R, Irwin, G., Whinney, H., Grady, T., Peterson, E., and Cocke, D. L. (2007). "Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products." *J. Hazardous Materials*, 139(2), 220-231.
- 6- Heidmann, I., and Calmano, W. (2008). "Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation." *J. Hazardous Materials*, 152, 934-941.
- 7- Merzouk, B. (2008). "Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique. A case study." *J. of Hazardous Material*, 228(1-3), 245-254.
- 8- Meunier, N., Drogui, P., Montan'e, C., Hausler, R., Mercier, G., Franc, J., and Blais, O. (2006). "Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate." *J. Hazardous Materials*, 137, 581-590.
- 9- 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(1-3), 778-786.

- 10- Aber, S., Amani-Ghadim, A.R., and Mirzajani, V. (2009). "Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network." *J. Hazardous Materials*, 171(1-3), 484-490.
- 11- Jafarzadeh, N., and Daneshvar, N. (2006). "Treatment textile wastewater containing basic dyes by electrocoagulation process." *J. of Water and Wastewater*, 57, 22-29. (In Persian)
- 12- Kashefiol-Asl, M., Khosravi, M., Mardani, R., Seyyedi, K., and Khataei, A. (2005). "Investigation of treatment of yello basic 2 in wastewater by electrocoagulation." *J. of Enviornmental Sceinces and Tech.*, 26, 66-76. (In Persian)
- 13- Rahmani, A. R., and Samarghandi, M. R. (2009). "Elecrocoagulation treatment of color solution containing colored index Eriochrom Black T." *J. of Water and Wastewater*, 69, 52-58. (In Persian)
- 14- Mahvi, A. H., Bazrafshan, E., Mesdaghinia, A. R., Nasser, S., and Vaezi, F. (2007). "Chromium (C<sup>+6</sup>) removal from aqueous environments by electrocoagulation process using Aluminum electrodes." *J. of Water and Wastewater*, 62, 28-34. (In Persian)
- 15- Saeedi, M., and Khalvati Fahlyain, A. (2010). "COD production in effluent from soulthern Pars gas refinery using electrocoagulation." *J. of Water and Wastewater*, 73, 40-48. (In Persian)
- 16- Mollah. M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D. L. (2004). "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation." *J. Hazardous Materials*, 114(1-3), 199-210.
- 17- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., and Cocke, D. L. (2001). "Electrocoagulation (EC)- Science and applications." *J. Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- 18- Yildiz, Y. S. (2008). "Optimization of bomaplex red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes." *J. Hazardous Materials*, 153(1-2), 194-200.
- 19- Khorasani, N., Shaygan, J., and Karimi Shahri, N. (2005). "A Survey on heavy metal concentration in the upper sediment layers of Bandar Abbas coasts." *J. of Iranian Natural Resources*, 58 (4), 861-869.
- 20- Azad Shahraki, S., Ahmadi-Moghadam, A., Naseri, F., and Esmaeel Zadeh, A. (2007). "Study the accumulation of Co, Ni and Cr in artemisia aucheri around sarcheshme copper complex, Iran." *Tertiary Conf. of Practical geology and environment*, Azad Islamic University, Islamshahr. (In Persian)
- 21- Shapouri, V., Alavi Moghadam, M. R. M. R., and Ebadi, T. (2006). "A Laboratory study on stabilization solidification of sludge in electroplating industries. " 11<sup>th</sup> Cong. of Iranian National Chemical Eng., Tarbiat Modares Univeristy, Terhan, 85-94. (In Persian)
- 22- Roy, R. (1990). *A primer on the Taguchi method*, 1<sup>st</sup> Ed., Society of Manufacturing, Michigan.
- 23- Mohapatra, P. K. D., Maity, C., Rao, R. S., Pati, B. R., and Mondal, K. C. (2009). "Tannase production by bacillus licheniformis KBR6: Optimization of submerged culture conditions by Taguchi DOE methodology." *J. of Food Research International*, 42(4), 430-435.
- 24- Pretorius, W. A., Johannes, W. G., and Lempert, G. (1991). "Electrolytic Iron flocculant production with a bipolar electrode in series arrangement." *J. Water SA.*, 17(2), 133-138.
- 25- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., and Greenberg, A. E. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21<sup>st</sup> Ed., American Public Health Association, USA.