

امکان سنجی حذف کروم (VI) از محلول آبی به روش انعقاد الکتریکی به صورت دوقطبی آلومینیوم-آلومینیوم

عباس رضایی^۱

هوشیار حسینی^۲

رضا درویشی چشمه سلتانی^۳

حسین معصوم بیگی^۴

(دریافت ۹۰/۷/۱۰ پذیرش ۹۰/۱۱/۵)

(دریافت ۹۰/۷/۱۰ پذیرش ۹۰/۱۱/۵)

چکیده

این تحقیق با هدف مطالعه حذف الکتروشیمیایی کروم (VI) از محلول آبی با استفاده از سیستم الکترودی دو قطبی طراحی و انجام شد. فرایند الکتروکواگولاسیون از جمله تکنولوژی‌هایی است که اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. این روش با توجه به مزایای آن از قبیل راندمان بالا، عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی، حجم کم لجن تولیدی، قابلیت کنترل فرایند در شرایط مورد نظر و سهولت بهره‌برداری و حفظ و نگهداری در نظر گرفته شد. ابتدا شرایط بهینه برای حذف الکتروشیمیایی تعیین گردید و سپس روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی فاکتورهای اصلی نظیر اثر دانسیته جریان، غلظت اولیه کروم و pH استفاده شد. حذف ۱۱۷ میلی‌گرم در لیتر کروم (VI) با کارایی بیش از ۹۰ درصد در pH اسیدی ۴/۵ و دانسیته جریان ۱۱/۷۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در مدت ۵۰ دقیقه توسط فرایند انعقاد الکتریکی انجام شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فرایند انعقاد الکتریکی یک تکنولوژی کارآمد و با پتانسیل بالا برای جداسازی و حذف غلظتهای بالای کروم است.

واژه‌های کلیدی: الکتروشیمیایی، سیستم الکترودی دو قطبی، کروم (VI)

Feasibility of Cr (VI) Removal from Aqueous Solution Using Electrochemical Bipolar Aluminum Electrodes

Abbas Rezaee¹
Hossein Masoumbaigi³

Hooshyar Hosseini²
Reza Darvishi Cheshmeh Soltani⁴

(Received Oct. 2, 2011

Accepted Jan. 25, 2012)

Abstract

Electrocoagulation is one of the technologies which have been considered by many researchers in recent years. This process has many advantages including high efficiency, no need to chemical addition, low sludge production, capability of process control, easy to operation and maintenance. Bipolar electrodes system is one of the electrocoagulation techniques which can be used for increasing the process efficiency and better distribution of the electric current. The aim of this study was to remove hexavalent chromium from aqueous solution by electrocoagulation technique. Response surface methodology (RSM) was used to optimize the parameters involving in the process, and the effect of current density, initial chromium concentration and pH on the process were investigated. At optimal conditions, for the highest chromium removal (>90%), the optimum initial chromium, reaction time, current density and pH were found to be 117 mg/L, 50 min, 11.75 mA cm⁻² and 4.5, respectively. It can be stated that electrocoagulation is an efficient technique for separation and removing high chromium concentration from aqueous solutions.

Keywords: Electrocoagulation, Bipolar Electrodes Systems, Chromium (VI).

1. Assoc. Prof., Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 82883575 rezaee@modares.ac.ir

2. M.Sc. Student of Environmental Health Eng., Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

3. Assist. prof. of Military Health Research Center, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran

4. Ph.D. Student of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

۱- دانشیار، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (نویسنده مسئول) rezaee@modares.ac.ir (۰۲۱) ۸۲۸۸۳۵۷۵

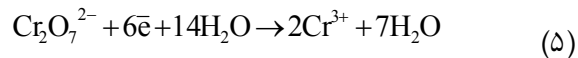
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار مرکز تحقیقات بهداشت نظامی، دانشگاه علوم پزشکی بقیه ا... تهران

۴- دانشجوی دکترای تخصصی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۱- مقدمه

داخلی کم به راحتی جریان را از خود عبور داده و پتانسیل اکسیداسیون- احیا را کاهش می دهد [۶].



فرایندهای انعقاد الکتریکی به دو فرم تک قطبی و دو قطبی بهره برداری می گردند که کاربرد هر کدام در شرایط خاصی صورت می گیرد. در استفاده از سیستم دو قطبی افزایش راندمان، ایجاد و توزیع بهتر دانسیته جریان و کاهش زمان احیای کروم گزارش شده است [۱۰ و ۱۱]. در سیستم های بی پلار به دلیل توزیع بهتر جریان در الکترولیت و مزایای آن، شرایط بهتری برای احیا فراهم می گردد. از این رو نیاز به اختلاط را کاهش می دهد. این تحقیق با هدف مطالعه حذف الکترودشیمیایی کروم (VI) از محلول آبی با استفاده از سیستم الکترودی دو قطبی طراحی و انجام شد.

۲- روش کار

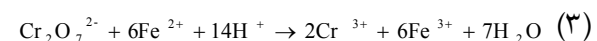
۲-۱- تهیه محلول ذخیره کروم و مشخصات راکتور
تهیه محلول ذخیره کروم به روشهای استاندارد و با انحلال ۱/۱۴۱ گرم در لیتر از پودر خشک دی کرومات پتاسیم $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ در آب مقطر دو بار تقطیر انجام شد. سنجش کروم به روش اسپکتروفوتومتری و در طول موج ۵۳۰ نانومتر، با استفاده از معرّف ۱ و ۵ دی فنیسل کاربازید $[\text{CO}(\text{NH}_2)_6\text{H}_5]_2$ انجام شد. به منظور تنظیم pH در محدوده ۲-۲/۵ از اسیدکلریدریک و سود یک مولار استفاده گردید [۱۲].

برای انجام آزمایش های انعقاد الکتریکی از یک بشر ۱۰۰۰ میلی لیتری به عنوان راکتور ناپیوسته استفاده گردید. برای تأمین جریان الکتریسیته مورد نظر از منبع تغذیه مدل TEK-8051 استفاده شد. در این سیستم از ۴ الکترود آلومینیوم به صورت بی پلار در اندازه های $۱۵ \times ۶ \times ۰/۲$ سانتی متر استفاده گردید (شکل ۱). در این فرایند آندهای کمکی (قریانی) به قطب آند و کاتد دستگاه متصل نمی شوند و به صورت آزاد می باشند. ناخالصی سطح الکترودها قبل از استفاده در راکتور به وسیله سنباده تمیز و سپس با اسید سولفوریک ۶ نرمال و آب مقطر شستشو داده شد. برای ایجاد شرایط یکنواخت در کل الکترولیت از دستگاه مگنت استریر مدل آلفا HS-860^۲ استفاده شد. در انجام تمام آزمایش های به منظور ایجاد جریان مناسب در الکترولیت، از NaCl ۰/۰۱ درصد استفاده شد.

کروم در بسیاری از صنایع به ویژه آبکاری، چرمسازی و دباغی، کنسروسازی، رنگسازی و چوب به عنوان نگهدارنده کاربرد دارد. کروم شش ظرفیتی در آبهای زیرزمینی معمولاً به صورت آنیون های کرومات CrO_4^{2-} ، بیکرومات HCrO_4^- و دی کرومات $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ یافت می شود. این ترکیبات، سمی بوده و باعث آسیب مخاط بینی، آسم، التهاب پوست، سرگیجه، زخم معده، تشنج و آسیب های کلیه می گردد. همچنین تجمع آن در بافت های حیوانی و گیاهی می تواند سبب بروز مخاطرات جدی گردد [۴-۱]. به منظور احیاء و حذف کروم از فاز آبی روشهای بسیاری مانند روشهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی گزارش شده اند که از این دسته می توان به اسمز معکوس، تبادل یون، الکترودیالیز، ترسیب شیمیایی و جذب اشاره نمود [۴ و ۵]. فرایند انعقاد الکتریکی به لحاظ داشتن ویژگی هایی همچون وسعت عمل برای تصفیه انواع پسابهای صنعتی، طراحی ساده سیستم، هزینه کم راه اندازی و بهره برداری، عدم نیاز به مواد شیمیایی خاص و تولید لجن جانبی اندک به عنوان یکی از تأثیرگذارترین روشهای تصفیه معرفی شده است [۵ و ۶]. از دیگر مزایای انعقاد الکتریکی در مقایسه با روشهای سنتی، تولید لجنی با قابلیت ته نشینی مناسب و دارای فعالیت بالا است [۷ و ۸]. با توجه به ویژگی های خاص هر الکترود در احیای کروم (VI)، واکنش کلی در آند (واکنش ۱) و کاتد (واکنش ۲) راکتور به صورت زیر اتفاق می افتد [۵-۹].



نتایج تحقیقات انجام شده نشان دهنده موفقیت الکترودهای آهن و آلومینیوم در احیای کروم است. که اساس واکنش های آنها مطابق روابط ۱ و ۲ می باشد. در سیستم های الکترودشیمیایی، جنس الکترودها نقش اساسی در فرایند احیا دارند و استفاده از الکترودهای آهن در احیای کروم به عنوان مؤثرترین ماده گزارش شده است زیرا در تعادل الکترودشیمیایی یون های آهن به عنوان عامل احیا کننده^۱ عمل می نمایند



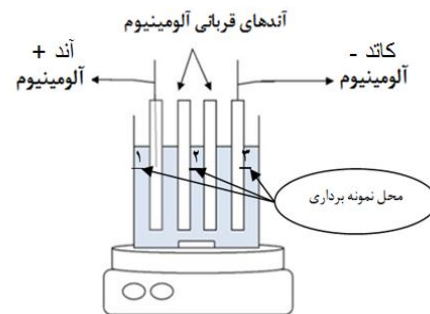
واکنش های ۴ و ۵ حذف کروم از پساب با استفاده از الکترودهای آلومینیوم را نشان می دهد. آلومینیوم به عنوان آند در فرایند الکترودکواگولاسیون به راحتی تولید کمپلکس های منومریک، پلیمریک و آمورف می نماید که سبب ترسیب و احیای دی کرومات می گردد. الکترود آلومینیوم به علت مقاومت

^۱ Reductants

^۲ Alfa, HS-860

۲-۲- نمونه برداری

نمونه برداری در این فرایند به صورت نمونه های ترکیبی و با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه انجام گرفت. به منظور فراهم سازی نمونه یکنواخت از همزن مغناطیسی استفاده شد. در هر بار نمونه برداری ۱۰ میلی لیتر از سه نقطه ناحیه آندی، کاتدی و بین الکترودها گرفته شده و قبل از آنالیز ترکیب شدند (محل مشخص شده در شکل ۱).



شکل ۱- طرح راکتور الکتروشیمیایی

۲-۳- طراحی آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ^۱

به منظور بررسی اثرات سه متغیر غلظت کروم (VI)، شدت جریان و pH، آزمایش هایی بر اساس روش RSM طراحی و انجام شد و نتایج به کمک نرم افزار Design - Expert 7.0 مورد بررسی قرار گرفت. روش سطح پاسخ مجموعه ای از روشهای آماری و ریاضیاتی مفید برای مدل سازی و تحلیل مسائلی است که پاسخ مورد نظر تابعی از چندین متغیر است. هدف از به کارگیری این روش بهینه نمودن پاسخ است. اولین گام، یافتن یک تابع تقریبی مناسب بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. این تابع تقریبی معمولاً یک چند جمله ای از متغیرهای مستقل است [۱۳ و ۱۴].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (6)$$

که در آن

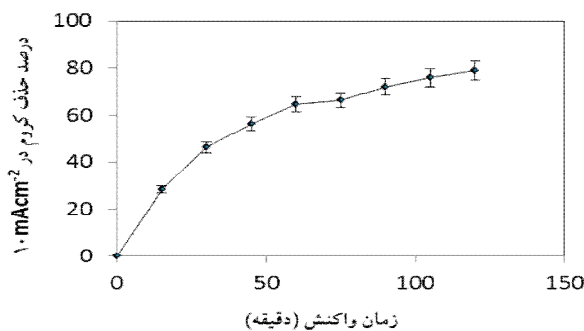
y مقدار پاسخ، β_i ضرایب رگرسیون و ϵ مقدار خطا را نشان می دهد. به منظور تخمین عوامل در چند جمله ای های تقریبی از روش کمترین مربعات^۲ استفاده می شود. طراحی مرکب مرکزی یا CCD مشهورترین نوع طراحی استفاده شده برای پردازش این مدل است. CCD شامل 2^k فاکتوریل (یا کسری از فاکتوریل)، $2k$ آزمایش محوری و n_c آزمایش مرکزی است. آزمایش های با سه متغیر اصلی مورد نظر شامل میزان دانسیته جریان در محدوده ۲ تا ۲۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، کروم

اولیه در محدوده غلظت ۵۰ تا ۱۵۰ میلی گرم در لیتر و pH در محدوده ۳ تا ۹، انجام شد.

۳- یافته ها

۳-۱- تعیین زمان بهینه

برای انجام آزمایش ها به روش سطح پاسخ، در قدم اول باید زمان بهینه تعیین شود. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد زمانی که ۵۰ درصد کروم از پساب با دانسیته جریان ۱۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر حذف گردد، زمان بهینه است و آن زمان ۴۰ تا ۶۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش اتفاق می افتد (شکل ۲). در این آزمایش میانگین زمان ۵۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه (T_{50}) برای عمل انعقاد الکتریکی انتخاب گردید. بسیاری از محققان برای بهینه سازی پتانسیل اعمال شده و کاهش مقاومت داخلی الکترولیت، نمک هایی مانند NaCl، KCl، سنگ فسفات و خاکستر را پیشنهاد کرده اند. استفاده از NaCl در اکثر موارد نتایج بهتری را نشان داده است. جریان عبور در محیط آبی مثل پساب در اثر مهاجرت یون ها به طرف الکترود با بار مخالف رخ می دهد. NaCl به دلیل شعاع کمتر سدیم و کلر نسبت به دیگر یون ها نظیر پتاسیم، کربنات یا نیترات سرعت یونش و تحرک بیشتری داشته و در نتیجه جریان بیشتری از پساب عبور می کند و با افزایش جریان عبوری، سرعت انحلال آندی بالاتر می رود که آن نیز به نوبه خود بر کارایی بیشتر فرایند و کاهش ولتاژ اعمال شده تأثیر گذار است. از طرفی دیگر تولید گونه های اسیدی نظیر اسید کلریدریک و هیپوکلرید بر مطلوبیت شرایط احیا می افزایند.



شکل ۲- راندمان حذف کروم با غلظت متوسط ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و دانسیته ۱۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع

۳-۲- بازده تغییرات عوامل مؤثر

بر اساس روش سطح پاسخ، بازده تغییرات هر یک از متغیرهای دانسیته جریان، کروم اولیه و pH برای انجام آزمایش های الکتروشیمی محاسبه شد (جدول ۱). آزمایش های طرح شده و نتایج آن ها با توجه به محدوده تغییر هر کدام از سه عامل مورد بررسی در جدول ۲ نمایش داده شده است. بر اساس این جدول

¹ Response Surface Methodology

² Least Square

جدول ۱- بازه تغییرات فاکتورهای مؤثر

High axial (+α = +2)	High factorial (+1)	Low factorial (-1)	Low axial (-α = -2)	واحد	متغیر
۹	۷/۸	۴/۲	۳	-	pH = x ₁
۲۰	۱۶	۶	۲	mAcm ⁻²	جریان = x ₂
۱۵۰	۱۳۰	۷۰	۵۰	mg/L	Cr = x ₃

جدول ۲- نتایج آماری

p-value	F-Value	میانگین مربعات	منبع
۰/۰۰۰۱ <	۲۴/۸۳	۷۲۵/۲۵	مدل
۰/۰۰۲۵	۱۴/۴۳	۴۲۱/۴۱	x ₁
۰/۰۰۰۱ <	۱۲۷/۳۹	۳۷۲۰/۳۸	x ₂
۰/۰۱۰۴	۹/۱۹	۲۶۸/۴۲	x ₃
۰/۶۵۵۲	۰/۲۱	۶/۱۳	x ₁ x ₃
۰/۰۳۲۳	۵/۸۶	۱۷۱/۱۳	x ₂ x ₃
۰/۰۶۹۵	۳/۹۷	۱۱۶/۰۳	x ₁ ^۲
۰/۰۰۲۸	۱۳/۹۹	۴۱۶/۶	x ₂ ^۲
۰/۰۱۳۶	۹/۱	۴۲/۴۶	Lack of Fit

جدول ۳- خلاصه نتایج آماری

مدل	R-Squared	انحراف استاندارد	میانگین
۰/۹۳۵۵	۰/۸۹۷۷	۵/۴۰۴۱	۸۴/۸
	Adj R-Squared		
	C.V. %		

$$+ ۴/۶۲۵x_2x_3 - ۲/۸۲۳۵۱x_1^2 - ۵/۲۹۸۳۹x_2^2$$

۴- بحث

۴-۱- بهینه‌سازی و تحلیل دیگرام‌ها

شکل ۳ دیگرام‌های دو بعدی حذف کروم با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم دو قطبی در pH برابر ۶ و زمان ۵۰ دقیقه را نشان می‌دهد. شکل ۳- الف رابطه بین غلظت ورودی (۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و دانسیته جریان اعمال شده با توجه به راندمان حذف را نشان می‌دهد. در غلظت متوسط ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر راندمان ۴۷ تا ۱۰۰ درصد برای جریان ۲ تا ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع تعیین گردیده است که نشان دهنده میزان حذف بیشتر کروم به واسطه ایجاد کمپلکس‌های احیاکننده بیشتر در جریان اعمالی بالاتر است. لاکشیمی پاتیراج و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸ گزارش کردند که میزان تبدیل کروم شش به کرومیت (کروم نامحلول) در دانسیته جریان‌های بالاتر، سریع‌تر صورت می‌گیرد و این واقعیت در این نمودار مشاهده می‌گردد [۱]. کروم در غلظت متوسط ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و دانسیته جریان ۱۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع با راندمان حدود ۹۲ درصد از

برای سه فاکتور مورد نظر ۲۰ آزمایش به دست می‌آید. محدوده عملیاتی برای هر کدام از آنها انتخاب و به نرم افزار داده شد.

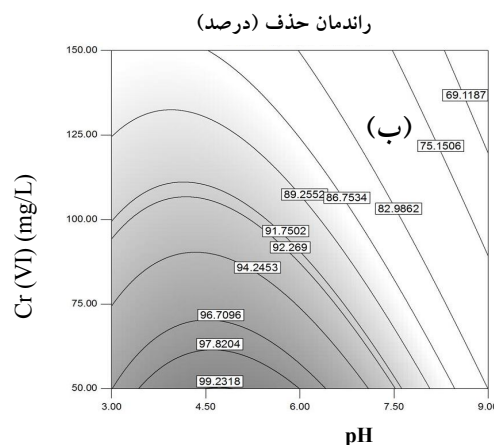
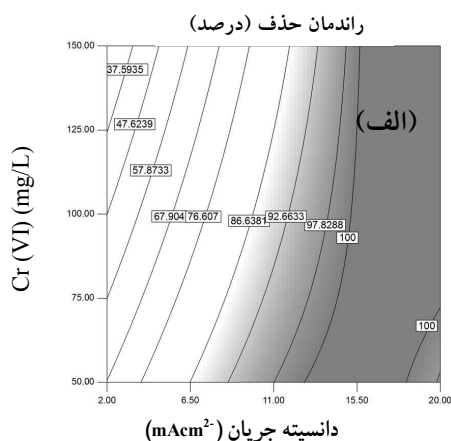
۳-۳- مدل حذف کروم

از لحاظ آماری با توجه به مقادیر p-value به دست آمده در جدول ۲ مدل تعریف شده برای حذف الکتروشیمیایی کروم معنی دار بوده (۰/۰۵ < ۰/۰۰۰۱) و ضریب اطمینان ۹۵ درصد توسط مدل حذف کروم فراهم شده است. در این جدول فاکتورهای اصلی، برهمکنش آن‌ها و مقادیر p-value و F-Value آنها مشاهده می‌گردد. خلاصه نتایج آماری مدل حذف کروم نظیر ضریب همبستگی، میانگین، ضریب تغییرات و دیگر مقادیر در جدول ۳ فراهم شده‌اند. با توجه به داده‌های خروجی از مدل برهمکنش تغییرات غلظت با pHx₁ (x₃) معنی دار نبود. بزرگ بودن میزان ضریب همبستگی حاکی از این مطلب است که مدل به دست آمده قادر به توصیف رفتار حذف کروم در این شرایط است (R²=۰/۹۳۵). رابطه ۷ مدل کد شده برای حذف کروم را نشان می‌دهد:

$$\text{Chromium Removal Model} = \quad (۷)$$

$$۵/۵۵۴۹۲ + ۳۴/۳۴۵۹۸x_1 + ۱۶/۵۰۵۵۱x_2 - ۴/۴۳۳۳۱x_3 - ۰/۸۷۵x_1x_3$$

¹ Lakshimipathikaj et al.



شکل ۳- دیگرام‌های دو بعدی حذف الکتروشیمیایی کروم با غلظت اولیه ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر و در زمان ۵۰ دقیقه ($T_{50}=50 \text{ min}$)

جدول ۴- مقادیر پارامترها در حالت بهینه و مقایسه مقدار مدل با مقدار آزمایشگاهی

درصد حذف کروم در شرایط آزمایشگاهی	درصد حذف کروم بر اساس مدل	pH	دانسیتة جریان (mA cm^{-2})	زمان (min)	Cr (IV) (mg/L)
۸۶/۳	۹۲/۹	۴/۵	۱۱/۷۵	۵۰	۱۱۷/۵

فراهم شده در شرایط بهینه ۹۱ درصد ارزیابی گردید [۱۶]. بهترین منطقه برای حذف کروم در مقادیر قابل توجه ناحیه تیره رنگ است. در زمان بهینه و دانسیته جریان ۱۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع هر چه pH محلول به ۴/۵ نزدیک‌تر گردد، راندمان افزایش می‌یابد. از این رو می‌توان pH برابر ۴/۵ را به عنوان pH بهینه در حذف کروم در نظر گرفت. رانا و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۴ راندمان حذفی کروم شش ظرفیتی را بیش از ۹۸ درصد در شرایط بهینه گزارش داده‌اند. راندمان بالای این محققان در pH بین ۲ تا ۷ حاصل شده است [۸]. بنابراین نتایج حاصل از مدل حذف الکتروشیمیایی کروم با نتایج حاصل از تحقیقات مذکور همخوانی دارد. به منظور تأیید رفتار مدل با شرایط آزمایشگاهی، شرایط بهینه به دست آمده در جدول ۴ گزارش شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، شرایط آزمایشگاهی با مدل هم‌خوانی بسیار خوبی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد فرایند انعقاد الکتریکی از جمله روشهای کارآمد و با پتانسیل قابل توجه برای حذف کروم با غلظت بالا است. حذف الکتروشیمیایی کروم بر پایه روش آماری پاسخ سطح، نشان داد که شرایط بهینه حذف کروم به وسیله فرایند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم دو قطبی در pH برابر ۴/۵ و دانسیته جریان ۱۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در زمان واکنش ۵۰ دقیقه محقق می‌شود. در نتیجه کروم با غلظت متوسط ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر با راندمان بیش از ۹۰ درصد از فاز آبی جدا گردید.

پساب جدا شده و می‌توان آن را به عنوان شرایط بهینه در نظر گرفت. همچنین راندمان جداسازی کروم در غلظت ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در دانسیته جریان ثابت ۱۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به ترتیب حدود ۹۷/۸۲ و ۸۶/۶ درصد بود. از این رو در دانسیته جریان برابر، راندمان‌های بالاتری در زمان بهینه (T_{50}) برای غلظتهای کمتر کروم قابل انتظار است. قسمت‌های تیره رنگ در شکل، ناحیه بهینه برای حذف کروم در فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودهای آلومینیوم را نشان می‌دهد. شکل ۳- ب اثر دو فاکتور pH و غلظت اولیه کروم همراه با راندمان حذف در دانسیته جریان ثابت ۱۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع را نشان می‌دهد. در این شکل، راندمان حذف فراهم شده برای غلظتهای ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در pH های ۳، ۴/۵، ۶، ۷/۵ و ۹ مشاهده می‌گردد. با توجه به رفتار الکتروشیمیایی این دو فاکتور می‌توان گفت که pH اسیدی شرایط مناسب‌تری را برای احیای کروم فراهم می‌کنند. به طوری که در یک غلظت ثابت، هر چه شرایط pH محیط به طرف قلیایی جابجا گردد، راندمان حذف روندی نزولی پیدا می‌کند. گولدر و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۷ در بررسی حذف الکتروشیمیایی کروم سه ظرفیتی دریافتند که بیشترین حذف کروم سه ظرفیتی در دانسیته جریان‌های بالاتر و pH های بالاتر رخ می‌دهد [۱۵]. شرایط بهینه از مدل حذف الکتروشیمیایی کروم در مطالعات زاروئل^۲ در سال ۲۰۰۸ به صورت pH برابر ۴/۲۳، پتانسیل ۹/۱۷ ولت، زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۲۷/۵ درجه سلسیوس بود. حداکثر راندمان حذف کروم

¹ Golder et al.

² Zaroual et al.

³ Rana et al.

- 1- Lakshmiathiraj, P., Bhaskar, R.G., Raviatul, B. M., Parvathy S., and Prabhakar, S. (2008). "Removal of Cr (VI) by electrochemical reduction." *Sep. Purif Techol.*, 60, 96-102.
- 2- Rezaee, A., Hossini, H., Masoumbeigi, H., and Darvishi Cheshma Soltani, R. (2011). "Simultaneous removal of hexavalent chromium and nitrate from wastewater using electrocoagulation method." *IJESD*, 2, 294-298.
- 3- Golder, A. K., Samanta, A. N., and Ray, S. (2011). "Removal of chromium and organic pollutants from industrial chrome tanning effluents by electrocoagulation." *Chemical Engineering and Technology*, 34, 775-783.
- 4- Chaudhary, A., Goswami, N., and Grimes, S. (2003). "Electrolytic removal of hexavalent chromium from aqueous solutions." *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 78, 877-883.
- 5- Riahi Samani, M., Borghai, S.M., Olad, A., and Chaichi, M.J. (2011). "Adsorption of chromium from aqueous solution using polyaniline." *J. of Water and Wastewater*, 79, 2-9. (In Persian)
- 6- Mouedhena, G., Fekia, M., Petris-Wery, M. De., Ayedi, H.F. (2009). "Electrochemical removal of Cr(VI) from aqueous media using iron and aluminum as electrode materials. Towards a better understanding of the involved phenomena." *J. Hazard. Mater.*, 168, 983-991.
- 7- Takdastan, A., Azimi, A.A., and Salari, Zh. (2011). "The use of electrocoagulation process for removal of turbidity, COD, detergent and phosphorus from carwash effluent." *J. of Water and Wastewater*, 79, 15-19. (In Persian)
- 8- Rana, P., Mohan, N., and Rajagopal, C. (2004). "Electrochemical removal of chromium from wastewater by using carbon aerogel electrodes." *Water Res.*, 38, 2811-2820.
- 9- Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, G. R., and Cocke D. L. (2001). "Electrocoagulation (EC) science and Application." *J. Hazard. Mater.*, 84, 29-41.
- 10- Ghosh, D., Medhi, C.R., and Purkait, M.K. (2008). "Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections." *Chemosphere*, 73, 1393-1400.
- 11- Mameri, N., Yeddou, A.R., Lounici, H., Belhocine, D., Grib, H., and Bariou, B. (1998). "Defluoridation of septentrional Sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrode." *Water Res.*, 32, 604-612.
- 12- APHA. AWWA. WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Washington D.C.
- 13- Sahu, J.N., Acharya, J., and Meikap, B.C. (2009). "Response surface modeling and optimization of chromium(VI) removal from aqueous solution using Tamarind wood activated carbon in batch process." *J. of Hazardous Materials*, 172(2-3), 818-825.
- 14- Olmez, T. (2009). "The optimization of Cr(VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology." *J. of Hazardous Materials*, 162 (2-3), 1371-1378.
- 15- Golder, A. K., Samanta, A. N., and Ray, S. (2007). "Removal of trivalent chromium by electrocoagulation." *Separation and Purification Technology*, 53, 33-41.
- 16- Zaroual, Z., Chaair, H. Essadki, A.H., El Ass, K., and Azzi, M. (2009). "Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design." *Chemical Engineering Journal*, 148, 488-495.