

Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using electrocoagulation: Study of the effect of thioglycolic acid

Reyhaneh Akbari¹, Amir Adibzadeh^{1,2}, Abbas Rezaee^{1,*}

1. Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Department of Environmental Health Engineering, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of thioglycolic acid on the coagulation process used in the removal of hexavalent chromium. Experiments were conducted in a 250-ml batch reactor. Steel electrodes with monopore arrangement were used as anode and cathode ($\times 1 \times 4 \times 5 \times 5$ cm) for electrical coagulation. The effect of effective operating indicators such as pH (3-9), concentrations of thioglycolic acid (0.03-0.1 ml), inductive flow rate (25- 200 mA), initial concentrations of chromium 25 mg / L) and the amount of supporting electrolyte (25-25 mg / L) were evaluated. No significant difference was found between the removal efficiency of chromium at different pH values by addition of thioglycolic acid, and in all cases, the removal efficiency was 100%. However, the initial pH 3 was chosen as optimal pH due to the final pH 7 after the reaction and no need to neutralize. With increasing concentration of thioglycolic acid, the removal efficiency of chromium increased by 30 minutes. In the concentration of 0.05 thioglycolic acid, less sludge was produced. The use of 200 mA current intensity showed the highest removal efficiency of chromium. By reducing the density of the flow, we have a decrease in the removal efficiency. Based on the results obtained from this study, it can be concluded that the use of Thioglycolic Acid in the coagulation process can have a significant effect on the removal of hexavalent chromium.

Review History

Received: Jun 11, 2025

Accepted: Apr 26, 2025

Keywords

Chromium

Electrocoagulation

Thioglycolic acid

Wastewater

* Corresponding Author Email: rezaee@modares.ac.ir



حذف کروم شش ظرفیتی از محیطهای آبی با استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون: مطالعه اثر اسید تیوگلیکولیک

ریحانه اکبری^۱، امیر ادیب زاده^{۱، ۲}، عباس رضایی*

۱. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج).

چکیده

تاریخچه داوری

هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر اسید تیوگلیکولیک در فرآیند انعقاد الکتریکی مورد استفاده در حذف کروم شش ظرفیتی می باشد. آزمایشات در یک رآکتور ۲۵۰ میلی لیتری بصورت ناپیوسته انجام شد. الکترودهای استیل با آرایش مونوپلار به عنوان آنود و کاتد در ابعاد (۵×۴×۱ سانتیمتر) جهت انعقاد الکتریکی استفاده گردید. اثر شاخصهای تأثیر گذار عملیاتی نظیر pH (۹-۳)، غلظت های اسید تیوگلیکولیک (۰/۱ - ۰/۳ میلی لیتر)، میزان جریان القائی (۲۵-۲۰۰ میلی آمپر)، غلظت های اولیه کروم شش ظرفیتی (۲۵-۲۰۰ میلی گرم در لیتر) و مقدار الکترولیت (۲۵-۱۰۰ میلی گرم در لیتر) مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزودن اسید تیوگلیکولیک تفاوت معنی داری بین راندمان حذف کروم در pH های مختلف مشاهده نگردید و در تمام موارد راندمان حذف ۱۰۰ درصد مشاهده می شد. با این وجود، pH اولیه ۳ به دلیل اخذ pH نهایی ۷ پس از انجام واکنش و عدم نیاز به خنثی سازی، به عنوان pH بهینه انتخاب گردید. با افزایش غلظت اسید تیوگلیکولیک در زمان ۳۰ دقیقه راندمان حذف کروم افزایش می یافت. استفاده از شدت جریان ۲۰۰ میلی آمپر راندمان حذف کروم شش ظرفیتی بیشتری را نشان می داد و با کاهش دانسیته جریان کاهش راندمان حذف را شاهد بودیم. اسید تیوگلیکولیک بدلیل خاصیت احیاء کنندگی بالا می تواند فرآیندهای احیاء الکتروشیمیائی را ارتقاء دهد. بر مبنای نتایج اخذ شده از این مطالعه می توان نتیجه گیری نمود که استفاده از اسید تیوگلیکولیک در فرآیند انعقاد الکتریکی می تواند در حذف کروم شش ظرفیتی اثر معنی داری را داشته باشد.

کلمات کلیدی

کروم
انعقاد الکتریکی
اسید تیوگلیکولیک

فاضلاب

۱- مقدمه

آلیاژی، صنایع کود سازی وجود دارد [Pradhan et al., 2017]. کروم به شکل سه و شش ظرفیتی در محیط زیست یافت می شود که کروم شش ظرفیتی ۵۰۰ برابر سمی تر از کروم سه ظرفیتی می باشد [Un et al., 2017]. مواجهه با کروم شش ظرفیتی باعث مشکلات بهداشتی بسیاری از جمله تهوع، استفراغ، اسهال شدید، خونریزی داخلی، درماتیت، آسیب کبد و کلیه را به دنبال دارد [Hossini et al., 2022]. سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا به

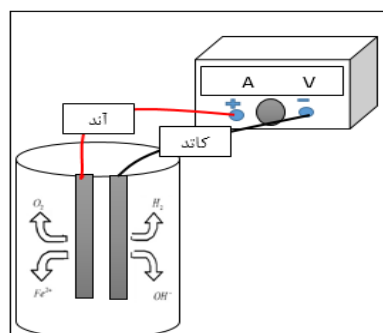
فلزات سنگین یکی از آلاینده های مطرح در جوامع انسانی با سمیت بالا و سرطان زایی می باشند. سمیت زیاد این مواد حتی در غلظت های کم، نگرانی های زیادی را در ارتباط با این آلاینده ها ایجاد کرده است [Parida L., 2022; Coradduzza et al., 2024]. یکی از مهم ترین و پرکاربرد ترین فلزات سنگین، کروم می باشد که در پساب صنایع مختلفی از جمله دباغی، آبکاری، ذوب فلزات، صنعت

* رایانامه نویسنده مسئول: rezaee@modares.ac.ir

کربنیک می باشد که در صنایع مختلف آرایشی و بهداشتی مصارف بسیار گسترده ای دارد. همچنین در ساخت محیطهای کشت میکروبی، صنایع چرم و صنایع پلاستیک کاربرد دارد. شکل صنعتی آن از نظر اقتصادی کاملاً جهت استفاده در فرآیندهای الکتروکاتالیزور قابل توجهی می باشد. اسید تیوگلیکولیک بدلیل خاصیت احیاء کنندگی بالا می تواند فرآیندهای احیاء الکتروشیمیایی را ارتقاء دهد. سایر ترکیبات تیول دار واجد خاصیت احیاء کنندگی می توانند گزینه های مشابه اسید تیوگلیکولیک باشند ولی این ترکیب احیاء کننده بسیار مطلوبی است و در رقابت با مواد مشابه از راندمان بالاتری برخوردار هست [Liu et al., 2021]. در دو سر ملکول اسید تیوگلیکولیک، دو عامل HS و OH حضور دارد. این ملکول کوچک و دارای ساختار متراکم مناسبی است. بدلیل ایجاد پیوند هیدروژنی بسیار محکم، این ملکول قادر به باند شدن با یونهای فلزی را دارد. برخی از محققین معتقدند که با نشان دادن این ملکول بر روی جاذب هایی مانند سیلیکاژل می توان ظرفیت این جاذبها را در حذف عناصر سنگین مانند نیکل، مس، روی، کادمیوم، جیوه و سرب افزایش داد [Soliman et al., 2002]. هدف از انجام این تحقیق، مطالعه اثر اسید تیوگلیکولیک بعنوان یک عامل ارتقاء دهنده شرایط احیایی در حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از فرآیند الکتروکاتالیزور می باشد.

۲- مواد و روش ها

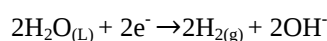
این تحقیق یک مطالعه تجربی بود که در آزمایشگاه گروه مهندسی بهداشت محیط دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید. آزمایشات در یک رآکتور ۲۵۰ میلی لیتری بصورت ناپیوسته صورت گرفت. برای انعقاد الکتریکی از الکترود های آهن به عنوان آند و کاتد با ابعاد $5 \times 4 \times 1$ سانتیمتر (بصورت مونوپلار استفاده شد (شکل ۱).



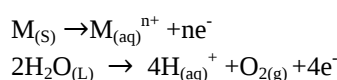
شکل ۱: طرح شماتیک راکتور الکتروکاتالیزور

منظور کاهش مشکلات ناشی از کروم، حداکثر غلظت مجاز این آلاینده را 0.05 و 0.1 میلی گرم در لیتر به ترتیب برای کروم شش و سه ظرفیتی تعیین نموده اند [Mouedhen et al., 2009]. کاهش غلظت کروم در پساب صنایع امری ضروری به شمار می آید. متداول ترین روش های حذف کروم شامل رسوب شیمیایی [HU et al., 2021]، جذب [Moges et al., 2022]، فرآیندهای بیولوژیکی [Sharma et al., 2022]، تبادل یون [Kocaoba et al., 2022]، جذب بیولوژیک [Rosca et al., 2023] و جداسازی غشایی [Ahmadzadeh et al., 2019] است که اغلب دارای معایبی نظیر راندمان پایین، نیاز به انرژی بالا، نیاز به مواد شیمیایی خاص، تولید مقادیر زیاد لجن و مشکلات مرتبط به دفع لجن دارای آلاینده می باشند [Kerur et al., 2021]. در حال حاضر تحقیقات زیادی جهت استفاده از روش های نوین و جایگزین در حذف کروم صورت گرفته که از مهم ترین آنها می توان به استفاده از روش الکتروکاتالیزور (انعقاد الکتریکی) اشاره کرد [Hojabari et al., 2024]. فرآیند انعقاد الکتریکی دارای مزایای متعددی است که مهم ترین آنها اجتناب از افزودن مواد شیمیایی، بازدهی انرژی، سازگاری با محیط زیست، راهبری آسان و سادگی بهره برداری، مقرون به صرفه بودن، سرعت بالا، زمان ماند کوتاه جهت حذف آلاینده، کاهش تولید لجن به دلیل کم آب بودن لجن تولیدی می باشد [Gabisa and Ratanatamskul 2024]. فرآیند الکتروکاتالیزور شامل واکنش های فیزیکی و شیمیایی زیادی است. آلومینیوم یا آهن به وسیله فرآیند الکترولیز حل شده و انواع مختلفی از مواد منعقد کننده و هیدروکسیدها را تشکیل می دهد که موجب ناپایداری و انعقاد ذرات معلق یا ترسیب و جذب آلاینده های محلول می شود. واکنش های اصلی الکتروشیمیایی که در آند و کاتد اتفاق می افتد بصورت زیر خلاصه شده است:

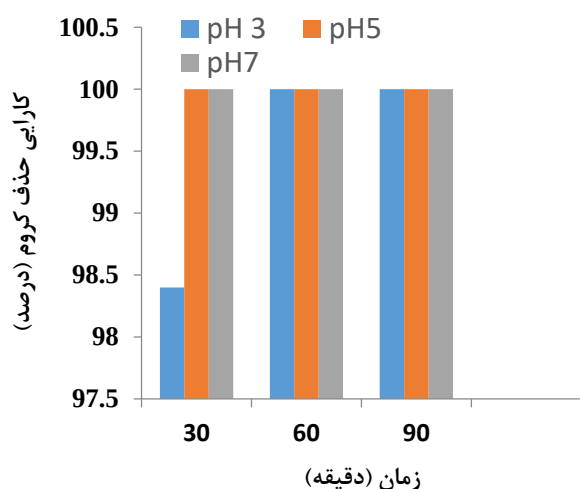
در کاتد:



و در آند:



در این مطالعه اثر فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف کروم شش ظرفیتی در حضور اسید تیوگلیکولیک بررسی گردید. TA یک ترکیب آلی با فرمول $\text{HSCH}_2\text{CO}_2\text{H}$ است که به آن اسید مرکاپتونیک نیز می گویند. این ماده واجد گروههای تیول و اسی



شکل ۲: نمودار تاثیر pH بر روی حذف کروم شش ظرفیتی در فرایند الکتروشیمی

۳- نتایج و بحث

فرآیند الکتروکواگولاسیون توسط پارامترهای عملیاتی مختلفی نظیر pH اولیه، غلظت آلاینده ها، دانسیته جریان اعمالی و اثر حمایت کننده الکترولیتی تحت تاثیر قرار می گیرد.

۳-۱- تاثیر pH بر روی حذف کروم شش ظرفیتی

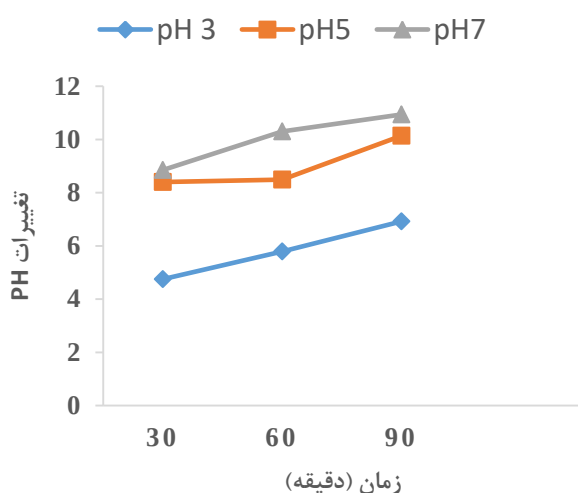
در این مطالعه با تغییر در pH (۳، ۵، ۷) در غلظت های ثابت کروم (۱۰۰ mg/l)، اسید تیوگلیکولیک (۰/۱ ml)، شدت جریان ۱۰۰ mA و میزان حمایت کننده الکترولیتی NaCl ۵۰ mg/l، راندمان حذف کروم در زمان های مختلف بررسی شد (شکل ۲). در مجموع با افزودن اسید تیوگلیکولیک تفاوت چندانی بین راندمان حذف کروم در pH های مختلف مشاهده نگردید و راندمان حذف در pH های مختلف ۱۰۰٪ اخذ گردید.

مقادیر افزایش pH محلول در طول فرآیند الکتروشیمی در تمام آزمایش ها که با شرایط مشابه به منظور تعیین pH بهینه انجام گردیدند (شکل ۳).

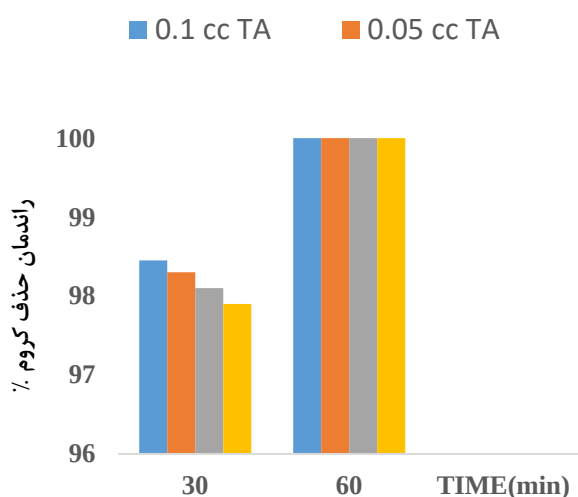
در پایان فرآیند الکتروشیمی پس از گذشت ۹۰ دقیقه در آزمایش هایی که با pH اولیه ۳ انجام شد و میزان افزایش pH تا ۷ مشاهده گردید. در pH اولیه ۳ بعد از ۴۵ دقیقه از شروع واکنش رسوبات هیدروکسید کروم ایجاد گردید که نسبت به pH های بالاتر با تاخیر همراه بود. حداکثر افزایش pH، در pH اولیه ۵ و ۷

محلول ذخیره کروم شش ظرفیتی ۱۰۰۰ mg/l با استفاده از حل کردن دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) محصول شرکت مرک در آب مقطر تهیه گردید. سپس محلول های استاندارد برای آزمایشات با استفاده از رقیق نمودن محلول ذخیره در غلظت های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلیگرم بر لیتر تهیه شد. سنجش کروم به روش اسپکتوفتومتری (Raylight UV 9200, USA) و در طول موج ۵۴۰ نانومتر با استفاده از معرف ۵۱ دی فنیل کاربازید طبق روش استاندارد آزمایش های آب و فاضلاب انجام شد (۲۶). به منظور تنظیم pH در محدوده ۲/۵ - ۲ از اسید فسفریک (ساخت شرکت مرک) استفاده گردید. برای تامین جریان الکتریسته مورد نظر از منبع تغذیه مدل TEK-8051 استفاده شد. بعد از هر بار آزمایش سطح الکترودها با سمباده تمیز و با اسید سولفوریک یک مولار و آب شستشو گردید. در کلیه آزمایش ها نمک کلرید سدیم (برای افزایش رسانایی محلول) به عنوان حمایت کننده الکترولیتی استفاده شد. فاصله بین دو الکترود در همه آزمایش ها ثابت و برابر ۱ cm تنظیم گردید.

در این مطالعه اثر pH (۳، ۵، ۷)، غلظت های اسید تیوگلیکولیک (۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵ و ۰/۱ ml) (شرکت مرک)، میزان جریان (۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی آمپر)، غلظت های اولیه کروم شش ظرفیتی (۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلیگرم بر لیتر) و مقدار الکترولیت (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلیگرم در لیتر) مورد بررسی قرار گرفت. pH نمونه ها با استفاده از محلول های اسید فسفریک و سود یک نرمال توسط pH متر پرتابل (Testr 30) تنظیم گردید. نمونه برداری در این فرآیند در فاصله زمانی ۳۰ دقیقه ای به مدت ۹۰ دقیقه صورت پذیرفت. در هر بار نمونه برداری ۲۰ میلی لیتر از محتویات راکتور برداشته و پس از صافسازی به منظور حذف لخته های تشکیل شده، آنالیز مورد نظر روی آن صورت پذیرفت. در این تحقیق تحلیل های آماری بر مبنای ارزیابی های گروه های شاهد - تست مطابق با آزمونهای student T-test انجام شد. در این روش بطور معمول با فاصله اطمینان ۹۵٪ گروه های شاهد و تست مورد مقایسه قرار می گیرند. جهت حصول اطمینان از نتایج حاصله، آزمایشات سه بار تکرار شده و میانگین و انحراف معیار حاصله محاسبه می گردید.



شکل ۳: نمودار افزایش pH محلول در طول فرآیند الکتروشیمیایی



شکل ۴: نمودار تاثیر غلظت اسید تیوگلیکولیک اسید بر روی حذف کروم شش ظرفیتی (غلظت کروم: ۱۰۰ mg/L، شدت جریان ۱۰۰ mA، pH ۳، ۵۰ mg/L NaCl)

۳-۲- تاثیر غلظت تیوگلیکولیک اسید بر حذف کروم شش ظرفیتی

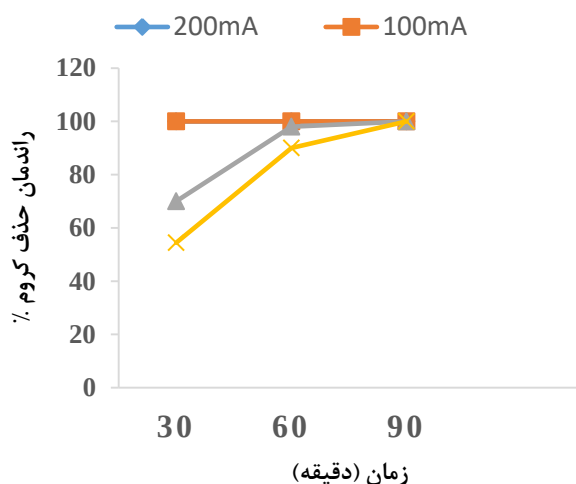
در این مطالعه با تغییر در غلظت اسید تیوگلیکولیک (۰/۰۳ ml، ۰/۰۴، ۰/۰۵ و ۰/۱) و غلظت ثابت ۱۰۰ mg/l کروم، pH اولیه ۳، ۱۰۰ mA شدت جریان و میزان ۵۰ mg/l NaCl راندمان حذف کروم در زمان‌های مختلف بررسی شد (شکل ۴).

همان طور که در نمودار ۴ مشاهده می شود با افزایش غلظت تیوگلیکولیک اسید در زمان ۳۰ دقیقه راندمان حذف کروم افزایش می یابد. در غلظت ۰/۰۴ و ۰/۰۵ نسبت به دیگر غلظت ها تراکم لجن بهتر بود و حجم لجن نسبت به مابقی کمتر بود.

واکنش بین اسید تیوگلیکولیک و کروم سه ظرفیتی را اولین بار

بود که معمولاً تا حدود ۱۰ و ۱۱ افزایش یافت. ترسیب هیدروکسیدهای کروم در این pH ها تقریباً ۲۰ دقیقه پس از شروع واکنش بود. در مجموع pH اولیه ۳ به دلیل آنکه pH نهایی اش پس از انجام فرآیند تصفیه به ۷ رسیده و نیاز به خشتی سازی نبوده به عنوان pH بهینه انتخاب گردید.

pH اثر قابل توجهی در راندمان فرآیند الکتروکواگولاسیون دارد. علاوه بر این تغییرات pH در طول فرآیند وابسته به جنس آند و مقدار pH اولیه در زمان تصفیه محلول دارد. افزایش pH در pH اولیه کمتر از ۷ به متصاعد شدن گاز هیدروژن و تولید یون OH کاتد بستگی دارد [Dermentzis et al., 2011]. در محیط های قلیایی (pH > 8) pH نهایی به دلیل تولید یون OH در کاتد که بوسیله یون Fe^{3+} برای تشکیل فлак $Fe(OH)_3$ مصرف می شود به طور قابل توجهی تغییر نمی کند. اما در شرایطی که الکترودهای مورد استفاده از نوع آهن باشد pH نهایی همواره بزرگتر از pH اولیه خواهد بود [Koby et al., 2003]. در مطالعه حاضر اثر pH در حذف کروم شش ظرفیتی در pH اولیه ۳، ۵ و ۷ با غلظت ثابت Cr^{6+} ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، ۵۰ mg/l الکترولیت، جریان ۱۰۰ میلی آمپر و ۰/۱ cc تیوگلیکولیک اسید مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه و همچنین مطالعات دیگر انجام یافته در زمینه حذف کروم شش نشان می دهد که در pH اولیه اسیدی، احیای Cr^{6+} به Cr^{3+} تقویت می شود. طی مطالعاتی که اسچلوتمن و همکاران (۲۰۰۱) بر روی حذف کروم با ترکیبات آهن انجام دادند، گزارش نمودند که فرآیند حذف کروم شش ظرفیتی در محدوده ۷/۱۶ - ۴ pH بهتر و سریعتر از pH های بالاتر رخ می دهد [Schlautman et al., 2001]. در مطالعات زاروآل و همکاران (۲۰۰۹) حداکثر راندمان حذف کروم به کمک مدل حذف الکتروشیمیایی کروم در شرایط بهینه و pH ۲۳ / ۴ برابر ۹۱٪ گزارش گردید [Zaroual et al., 2009] با توجه به راندمان آزمایشات انجام شده در هر سه pH راندمان ۱۰۰ درصد حذف کروم اتفاق افتاد. ولی در نهایت pH= ۳ به عنوان بهینه در نظر گرفته شد، چون با افزایش زمان الکتروکواگولاسیون، افزایش pH در محلول روی داد. فقط در pH= ۳ بعد از انجام واکنش pH نهایی به ۷ رسید که دیگر نیاز به خشتی سازی بعد از اتمام واکنش نبود، اما در مابقی pH نهایی به ۱۰ الی ۱۱ افزایش یافت.



شکل ۵: نمودار تاثیر شدت جریان های مختلف بر روی حذف کروم شش ظرفیتی

در مطالعه حاضر اثر شدت جریان در حذف کروم شش ظرفیتی در جریان های (۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۲۵) mA و pH اولیه ۳، غلظت ثابت Cr^{6+} ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، ۵۰ mg/l الکترولیت و غلظت ثابت ml ۰/۰۴ اسید تیوگلیکولیک مورد مطالعه قرار گرفت.

با توجه به عملکرد دانسیته جریان اعمالی (شکل ۵) می توان دریافت که با افزایش جریان راندمان های بیشتری به دست می آید. در مطالعه حاضر بالاترین جریان اعمالی معادل ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی آمپر توانست سریعترین تصفیه با ۱۰۰ درصد کاهش در غلظت یون کروم شش ظرفیتی را در طی مدت زمان واکنش ۳۰ دقیقه حاصل نماید و از طرفی پایین ترین راندمان حذف کروم شش ظرفیتی در جریان ۲۵ میلی آمپر بدست آمد. البته این روند افزایش راندمان با افزایش جریان الکتریکی در مطالعات دیگر نیز مشاهده شد. به عنوان مثال گاو و همکاران (۲۰۰۵) مشاهده کردند که با افزایش دانسیته جریان مقدار کمپلکس رها شده و الکترون آزاد شده افزایش یافته و راندمان بالاتری را به واسطه افزایش سرعت واکنش، مقدار بالاتر الکترون و ماده منعقد کننده به همراه دارد که با مطالعه حاضر همخوانی دارد [Gao et al., 2005].

۳-۴- تاثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بر روی کارایی حذف

در این مطالعه با تغییر در غلظت کروم شش ظرفیتی (۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۲۵) mg/l در pH=۳، شدت جریان ۱۰۰ mA، غلظت ثابت ml ۰/۰۴ اسید تیوگلیکولیک و میزان ۵۰ mg/l نمک

Mayer گزارش نمود. کروم سه ظرفیتی به سادگی با اسید تیوگلیکولیک زمانی که دما تا ۶۰ درجه افزایش یابد، واکنش می دهد. اما در عمل چنین دمايي در رآكتور الكتروشیمیایی وجود ندارد و در صورتی که بخواهیم دمای رآكتور را به این میزان افزایش دهیم، انرژی زیادی مورد نیاز می باشد. عامل تأثیرگذار دیگر در واکنش بین کروم و اسید تیوگلیکولیک، pH است. در pH ۷-۱۰ یک کمپلکس با فرمول $\text{Cr}(\text{SCH}_2\text{COO})_3^{3-}$ تشکیل می شود. زمانی که pH به زیر ۴ برسد تشکیل کمپلکس به شکل $\text{Cr}(\text{SCH}_2\text{COO})_2^-$ صورت می گیرد. در pH های کمتر از ۴ واکنش بین اسید تیوگلیکولیک و کروم سه ظرفیتی از رابطه زیر پیروی می نماید:



از آنجایی که واکنش اسید تیوگلیکولیک طی فرآیند انعقاد الکتریکی اتفاق می افتد، در طی فرآیند با افزایش pH به دلیل یون OH^- به نظر می رسد هر سه شکل کمپلکس کروم و اسید تیوگلیکولیک را شاهد باشیم. از آنجایی که pH بهینه در این مطالعه ۳ بدست آمد بنابراین در ابتدا کمپلکس به شکل $\text{Cr}(\text{SCH}_2\text{COO})_2^-$ بوده ولی در طی واکنش به $\text{Cr}(\text{SCH}_2\text{COO})_3^{3-}$ نزدیک می شود. با توجه به نتایج بدست آمده اینطور استنباط می گردد که کروم ابتدا با اسید تیوگلیکولیک واکنش داده و کمپلکس باردار آنیونی آن به راحتی وارد واکنش انعقاد الکتریکی با یون های مثبت می شود و راندمان حذف کامل در زمان کوتاهی حاصل می شود.

۳-۳- تاثیر شدت جریان های مختلف بر روی حذف کروم شش ظرفیتی

در این مطالعه با تغییر در شدت جریان (۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۲۵) mA و غلظت ثابت ۱۰۰ mg/l کروم، pH اولیه ۳، غلظت ثابت ml ۰/۰۴ اسید تیوگلیکولیک و میزان ۵۰ mg/l نمک NaCl راندمان حذف کروم در زمان های مختلف بررسی شد (شکل ۵).

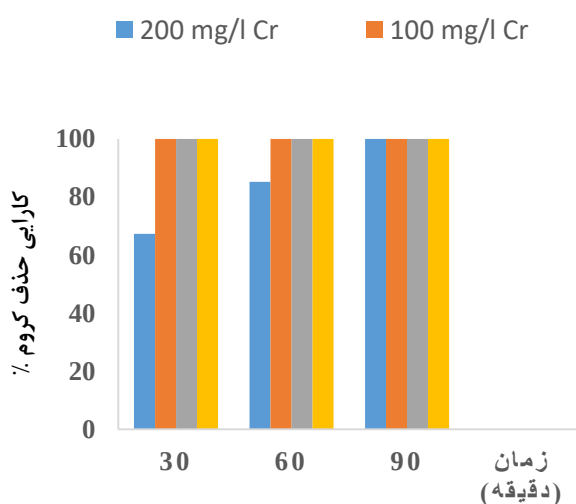
در شدت جریان ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی آمپر راندمان حذف کروم شش ظرفیتی بالاتری در بهره برداری حاصل می شود و با اعمال جریان پایین تر میزان حذف کاهش می یابد.

شدت جریان اعمالی یکی از مهمترین پارامترهایی است که به طور مستقیم بر عملکرد فرآیند و هزینه های بهره برداری تاثیر می گذارد. شدت جریان اعمالی نه تنها بر سرعت و اندازه حباب ها تاثیر می گذارد بلکه بر میزان حذف آلاینده ها اثر معنی داری دارد.

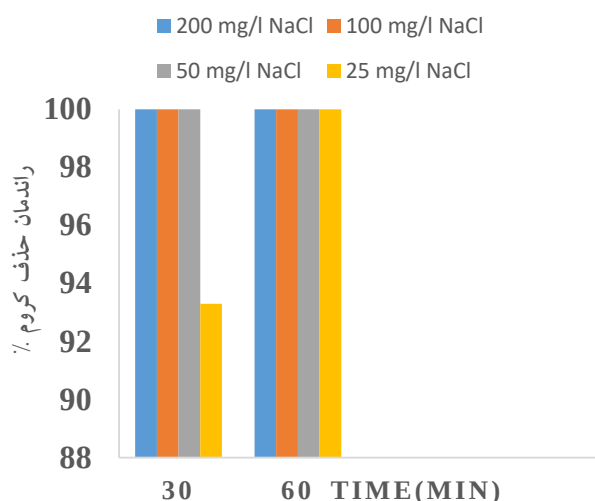
۳-۵- تاثیر غلظت حمایت کننده الکترولیتی بر روی حذف

کروم شش ظرفیتی

با تغییر در غلظت حمایت کننده الکترولیتی (100 mg/l NaCl) -
 $75-50-25$ در $\text{pH}=3$ ، شدت جریان 100 mA ، غلظت mg/l
 100 کروم و غلظت ثابت 0.04 ml اسید تیوگلیکولیک، راندمان
 حذف کروم در زمان‌های مختلف بررسی شد. همان طور که در
 شکل ۷ مشخص است کمترین غلظتی که راندمان 100 درصد
 حاصل می شود 50 mg/l می باشد و این غلظت به عنوان غلظت



نمودار ۶: تاثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بر کارایی حذف
 (شدت جریان 100 mA ، $\text{pH}=3$ ، غلظت اسید تیوگلیکولیک 0.04 cc/250cc ،
 NaCl : 50 mg/l)



شکل ۷: نمودار تاثیر غلظت حمایت کننده الکترولیتی بر روی حذف کروم شش
 ظرفیتی (غلظت کروم: 100 mg/L ، شدت جریان 100 mA ، $\text{pH}=3$ ، غلظت اسید
 تیوگلیکولیک 0.04 cc/250cc)

NaCl راندمان حذف کروم در زمان‌های مختلف بررسی شد (شکل
 ۶). در غلظت های پایین تر از 200 در زمان 30 دقیقه با شرایط
 فوق راندمان 100 درصد حذف کروم بدست آمد و در غلظت 200
 میلی گرم بر لیتر کروم در زمان 90 دقیقه راندمان 100 حاصل شد
 (شکل ۶).

راندمان حذف آلاینده با افزایش غلظت ورودی برای یک
 دانسیته جریان ثابت کاهش می یابد که این مسئله ناشی از این
 هست که تعداد فلاک های هیدروکسید فلزی که تشکیل می گردد
 ممکن است برای رسوب تعداد بیشتری از ملکول های آلاینده در
 غلظت های بالا ناکافی باشد [Khandegar et al.2013]. در مطالعه
 حاضر، آزمایش ها بر روی محلول های سنتتیک کروم با غلظت
 های اولیه کروم شش ظرفیتی ($200-100-50-25 \text{ mg/l}$)، pH
 اولیه 3 ، شدت جریان 100 mA ، 50 mg/l الکترولیت و غلظت
 ثابت 0.04 ml اسید تیوگلیکولیک مورد مطالعه قرار گرفت.
 در غلظت های ورودی پایین تر از 200 میلی گرم بر لیتر در زمان
 30 دقیقه راندمان حذف کروم شش ظرفیتی در مقدار ماکزیمم خود
 راندمان 100 درصد قرار دارد، در حالیکه غلظت 200 میلی گرم بر
 لیتر بعد از گذشت 90 دقیقه به راندمان 100 درصد رسید. با توجه
 به نتایج مشاهده می گردد اگر غلظت اولیه آلاینده افزایش یابد،
 زمان مورد نیاز انجام فرآیند نیز افزایش می یابد. در مطالعات
 لاکشمپیتراج و همکاران (2005) روند حذف کروم با توجه به
 غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی مورد ارزیابی قرار گرفت
 [Lakshmipathiraj et al., 2005]. آنها گزارش کردند با افزایش
 غلظت کروم از 100 تا 600 میلی گرم بر لیتر جهت حذف 100
 درصدی کروم نیاز به زمان های بیشتری است و در یک زمان برابر،
 راندمان حذف غلظت های پایین تر بیشتر می باشد. در مطالعه ای
 که توسط Zewail و همکاران (2014) به منظور حذف کروم سه و
 شش ظرفیتی با استفاده از الکتروود آهن صورت پذیرفت مشاهده
 گردید با افزایش توام غلظت کروم سه و شش ظرفیتی از 100 به
 300 ppm راندمان حذف به ترتیب از $98/97$ درصد به $93/9$ و از
 80 درصد به $34/4$ به ترتیب کاهش یافت [Zewail et al., 2011].
 بر همین اساس غلظت 100 میلی گرم بر لیتر کروم به عنوان غلظت
 بهینه انتخاب گردید.

مقابل در حضور غلظت های بالای ۱g/l نمک NaCl حالیت یون های کروم سه ظرفیتی افزایش می یابد و این امر احتمالاً در کاهش راندمان حذف کربن کل تاثیر منفی می گذارد.

۴-۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر مشخص شد که روش انعقاد الکتریکی با حضور اسید تیوگلیکولیک یک کاندیدای خوب برای حذف کروم شش ظرفیتی می باشد. همچنین می توان نتیجه گرفت که حضور اسید تیوگلیکولیک، سرعت واکنش را افزایش داده و در زمان کوتاهیتری به راندمان بالایی می توان دست یافت. همچنین محققین پیشنهاد می کنند اثر این فرآیند برای سایر عناصر سنگین که در فاضلاب صنایع مختلف حضور دارند نیز در مطالعات بعدی مورد ارزیابی قرار گیرد.

تشکر و قدر دانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد (رشته مهندسی بهداشت محیط) دانشکده پزشکی دانشگاه تربیت مدرس می باشد. نویسندگان مقاله لازم می دانند از دانشگاه تربیت مدرس که در اجرای این پروژه مساعدت نموده اند، تشکر و قدردانی نمایند.

References

- Ahmazadeh S, Yoosefian M, Rezayi M, 2019, Comprehensive experimental and theoretical investigations on chromium (III) trace detection in biological and environmental samples using polymeric membrane sensor. *Int J Environ Anal Chem*, 101, 1461–1476. [10.1080/03067319.2019.1685664](https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1685664)
- Coradduzza D, Congiargiu A, Azara E, 2024, Heavy metals in biological samples of cancer patients: a systematic literature review. *Biometals* 37, pp: 803–817. [10.1007/s10534-024-00583-4](https://doi.org/10.1007/s10534-024-00583-4)
- Daneshvar N, Khataee A, Ghadim AA, Rasoulifard M, (2007, Decolorization of CI Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC), *J Hazard Mater*, 148, pp:566-72. [10.1016/j.jhazmat.2007.03.028](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.028)
- Dermentzis K., Christoforidis A., Valsamidou E., Lazaridou A., Kokkinos N., 2011, Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by electrocoagulation with iron electrodes. *Global Nest J*, 13, pp:412-8.
- Gabisa EW, Ratanatamskul C, 2024, Effects of operating conditions on removal of microplastics (PET, PP, PS) from wastewater by electrocoagulation systems and

بهینه انتخاب گردید. از مباحث مورد توجه در راهبری فرآیندهای الکتروکواگولاسیون میزان مصرف انرژی الکتریکی می باشد. در این زمینه بسیاری از محققان با بهینه سازی میزان پتانسیل اعمال شده و کاهش مقاومت داخلی الکترولیت با استفاده از نمک هایی چون NaCl، KCl، سنگ فسفات و خاکستر سعی در حل مشکل داشته اند. محققانی نظیر دانشور (۲۰۰۷) اضافه شدن یون کلراید، سولفات و نترات را جهت افزایش هدایت الکتریکی پیشنهاد نموده اند [Daneshvar et al., 2007].

الکترولیت مورد استفاده در این مطالعه کلرید سدیم (NaCl) بود و در غلظت های (۱۰۰-۷۵-۵۰-۲۵) mg/l در pH=۳، شدت جریان ۱۰۰ mA، غلظت ۱۰۰ mg/l کروم و غلظت ثابت ۰/۰۴ ml اسید تیوگلیکولیک به راکتور اضافه گردید. افزایش نمک NaCl هدایت الکتریکی محلول را افزایش داده و از غیر فعال شدن آنند جلوگیری به عمل می آورد. یون های کلر فرآیند انحلال الکتروود را با استفاده از پدیده خوردگی حفره ای تسریع می کنند که این پدیده یک نوع خوردگی موضعی ناشی از غلظت کلرید بالا در محلول است. بنابراین حضور NaCl با افزایش مواد منعقد کننده در دسترس راندمان حذف کروم شش ظرفیتی را افزایش می دهد. در

kinetics of chromium removal in the presence of microplastics, *J Water Process Eng*, 61, pp: 105313. [10.1016/j.jwpe.2024.105313](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105313)

Gao P, Chen X, Shen F, Chen G, 2005, Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter. *Sep. Purif. Technol*, 43, pp:117-23. [10.1016/j.seppur.2004.10.008](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.10.008)

Hojabri S, Rajic L, Zhao Y, Alshawabkeh AN, 2024, Simulation of hexavalent chromium removal by electrocoagulation using iron anode in flow-through reactor, *J Hazard Mater*, 476, pp:135195. [10.1016/j.jhazmat.2024.135195](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135195)

Hossini H, Shafie B, Niri AD, 2022, A comprehensive review on human health effects of chromium: insights on induced toxicity. *Environ Sci Pollut Res* 29, pp: 70686–70705. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22705-6>

Hu B, Zhang C, Yang M, Liu Q, Wang M, Wang X, 2021, A clean metallurgical process for vanadium precipitation from chromium-containing vanadate solution, *Hydrometallurgy* 205, pp: 105742. [10.1016/j.hydromet.2021.105742](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105742)

Kerur SS, Bandekar S, Ratnamala, GM, Hegde PG, 2021, Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review, *Mater Today* 42.

- pp:1112-1121. [10.1016/j.matpr.2020.12.492](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.492)
- Khandegar V, Saroha AK, 2013, Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent–A review, *J Environ Manag*, 128, pp:949-63. [10.1016/j.jenvman.2013.06.043](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043)
- Kobya M, Can OT, Bayramoglu M, 2003, Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J Hazard Mater*, 100, pp:163-78. [10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X)
- Kocaoba, S., Cetin, G. & Akcin, G, 2022, Chromium removal from tannery wastewaters with a strong cation exchange resin and species analysis of chromium by MINEQL+. *Sci Rep*, 12, 9618. [10.1038/s41598-022-14423-3](https://doi.org/10.1038/s41598-022-14423-3)
- Lakshmipathiraj P, Raju GB, Basariya MR, Parvathy S, Prabhakar S (2008) Removal of Cr (VI) by electrochemical reduction. *Sep Purif Technol* 60,pp:96-102. [10.1016/j.seppur.2007.07.053](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.053)
- Liu C, Yu X, Ma C, Guo Y, Deng T, 2021, Selective recovery of strontium from oilfield water by ion-imprinted alginate microspheres modified with thioglycolic acid, *Chem Eng J*, 410, pp: 128267. [10.1016/j.cej.2020.128267](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128267)
- Moges A, Nkambule TTI, Fito J, 2022, The application of GO-Fe3O4 nanocomposite for chromium adsorption from tannery industry wastewater, *J Environ Manag*, 305, 114369. [10.1016/j.jenvman.2021.114369](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114369).
- Mouedhen G, Feki M, De Petris-Wery M, Ayedi HF, 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, pp: 983-991. [10.1016/j.jhazmat.2009.02.117](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.117)
- Muñoz M, Aller A, Littlejohn D, 2014, The bonding of heavy metals on nitric acid-etched coal fly ashes functionalized with 2-mercaptoethanol or thioglycolic acid. *Mater Chem Physics*, 143, pp:1469-80. [10.1016/j.matchemphys.2013.12.002](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.12.002)
- Parida L, Patel TN, 2022, Systemic impact of heavy metals and their role in cancer development: a review. *Environ Monit Assess* 195, pp:766-779. [10.1007/s10661-023-11399-z](https://doi.org/10.1007/s10661-023-11399-z)
- Pradhan D., Beharisukla L., Sawyer M., Rahman K.S.M, 2017, Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: A review. *J Ind Eng Chem* 55, pp: 1-20. [10.1016/j.jiec.2017.06.040](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.040)
- Roşca, M., Silva, B., Tavares, T., & Gavrilescu, M., 2023, Biosorption of Hexavalent Chromium by *Bacillus megaterium* and *Rhodotorula* sp. Inactivated Biomass. *Processes*, 11, 179. [10.3390/pr11010179](https://doi.org/10.3390/pr11010179)
- Schlautman MA, Han I, 2001, Effects of pH and dissolved oxygen on the reduction of hexavalent chromium by dissolved ferrous iron in poorly buffered aqueous systems. *Water Res*, 35, pp:1534-46. [10.1016/S0043-1354\(00\)00408-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00408-5)
- Sharma, P., Singh, S. P., Parakh, S. K., Tong, Y. W., 2022, Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. *Bioengineered*, 13, pp: 4923–4938. [10.1080/21655979.2022.2037273](https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273)
- Soliman EM, Mahmoud ME, Ahmed SA, 2002, Reactivity of thioglycolic acid physically and chemically bound to silica gel as new selective solid phase extractors for removal of heavy metal ions from natural water samples. *Int J Environ Anal Chem*, 82, pp:403-13. [10.1080/03067310290007831](https://doi.org/10.1080/03067310290007831)
- Un UT, Onpeker U.S., Ozel E, 2017, The treatment of chromium containing wastewater using electrocoagulation and the production of ceramic pigments from the resulting sludge. *J Environ Manag* 200, pp:196-203. [10.1016/j.jenvman.2017.05.075](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.075)
- Zaroual Z, Chaair H, Essadki A, El Ass K, Azzi M, 2009, Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design. *Chem Eng J*, 148, pp:488-95. [10.1016/j.cej.2008.09.040](https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.09.040)
- Zewail T, Yousef N, 2014, Chromium ions (Cr⁶⁺ & Cr³⁺) removal from synthetic wastewater by electrocoagulation using vertical expanded Fe anode. *J Electroanalytical Chem*, 735, pp:123-8. [10.1016/j.jelechem.2014.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2014.09.002)