

Original article

Effect of Operating Parameters on the Active Chlorine Production in Bipolar Electrochlorination Cell with Titanium and Platinum/Titanium Anode Electrodes using Box-Behnken Method

Samaneh Dehghan¹
Yousef Dadban Shahamat^{2*}
Fariba Ziarati³

- 1- Assistant Professor, Department of Environmental Health, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
- 2- Associate Professor, Environmental Health Research Center, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran
- 3- BSc student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

*Corresponding author: Yousef Dadban Shahamat, Environmental Health Research Center, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

Email: dr.udadban@goums.ac.ir

Received: 30 November 2021

Accepted: 06 February 2022

ABSTRACT

Introduction and purpose: Today, chlorine and its compounds are the most popular elements employed for disinfecting water and wastewater due to their flexibility, cost-efficiency, and ease of use. This research aimed to optimally produce active chlorine by the electrochlorination method using titanium and platinum/titanium electrodes.

Methods: This experimental study was conducted in a batch flow of an electro-chlorination cell. The experimental design was performed using the Box Behnken method with a sample size of 34 experiments. The production of active chlorine was evaluated and compared on various operating factors, including current density (10-60 A/dm²), sodium chloride concentration (50-250 g/L), reaction time (5-120 min), and two types of anode electrodes of titanium and platinum/titanium and 316 cathode steel.

Results: The results showed all four operating parameters had a significant effect on the active chlorine production and the highest effectiveness was related to electrolysis time, followed by current density, sodium chloride concentration, and anode electrode in descending order. The optimal operating conditions provided by the model for chlorine production included the electrolysis time of 120 min, current density of 60 A/dm², concentration of sodium chloride of 187 g/L, and type of platinum/titanium anode electrode and 316 cathode steel electrode, which resulted in active chlorine of 65.95 g/L.

Conclusion: This method can be used as an effective method to produce chlorine to disinfect water and wastewater in treatment plants, and if replaced with gas chlorination systems, the safety problems of chlorine gas capsules will be solved.

Keywords: Anode electrode, Bipolar, Box Behnken design, Electro-chlorination, Water

► **Citation:** Dehghan S, Dadban Shahamat Y, Ziarati F. Effect of Operating Parameters on the Active Chlorine Production in Bipolar Electrochlorination Cell with Titanium and Platinum/Titanium Anode Electrodes Using Box-Behnken Method. Journal of Health Research in Community. Spring 2022;8(1): 1-15.

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر پارامترهای بهره‌برداری بر فرایند تولید کلر فعال در سلول الکتروکلریناسیون با چینش دوقطبی الکترودهای تیتانیوم و پلاتین/تیتانیوم به روش طراحی باکس بنکن

چکیده

سمانه دهقان^۱یوسف دادبان شهامت^{۲*}فریبا زیارتی^۲

مقدمه و هدف: امروزه استفاده از کلر و ترکیبات آن از نظر سهولت کاربری، انعطاف‌پذیری و هزینه کم محبوبیت زیادی در فرایند گندزدایی آب و پساب دارد. هدف از این تحقیق تولید بهینه کلر به روش الکتروکلریناسیون با استفاده از الکترودهای تیتانیوم و پلاتین/تیتانیوم است.

روش کار: مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی است که در یک سلول الکتروکلریناسیون با جریان منقطع انجام شد. طراحی آزمایش به روش باکس بنکن با حجم نمونه ۳۴ آزمایش انجام شد. فاکتور بهره‌برداری شامل دانسیته جریان (۶۰-۱۰ آمپر بر دسی متر مربع)، غلظت کلرید سدیم (۲۵۰-۵۰ گرم بر لیتر)، زمان واکنش (۱۲۰-۵ دقیقه) و دو نوع جنس الکتروود آند تیتانیوم و پلاتین/تیتانیوم و کاتد استیل ۳۱۶ بر راندمان تولید کلر فعال تولیدی بررسی و مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد تأثیر هر چهار پارامتر بهره‌برداری بر فرایند تولید کلر فعال مؤثر و معنی‌دار بود و بیشترین تأثیر آن‌ها به ترتیب شامل زمان الکتروولیز، دانسیته جریان، غلظت کلرید سدیم و نوع الکتروود آند است. شرایط بهینه بهره‌برداری ارائه شده در مدل برای تولید کلر شامل زمان الکتروولیز ۱۲۰ دقیقه، دانسیته جریان ۶۰ آمپر بر دسی متر مربع، غلظت کلرید سدیم ۱۸۷ گرم بر لیتر و نوع الکتروود آند پلاتین/تیتانیوم و الکتروود کاتد استیل ۳۱۶ است که مقدار کلر ۶۵/۹۵ گرم بر لیتر به دست آمد.

نتیجه‌گیری: این روش می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای تولید کلر به‌منظور گندزدایی آب و پساب در تصفیه‌خانه‌ها استفاده شود و در صورت جایگزینی با سیستم‌های کلرزنی گازی، مشکلات ایمنی کپسول‌های گاز کلر نیز مرتفع می‌شود.

کلمات کلیدی: آب، الکتروکلریناسیون، الکتروود آند، باکس بنکن، دو قطبی

۱. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. دانشیار، مرکز تحقیقات بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران

* نویسنده مسئول: یوسف دادبان شهامت، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران

Email: dr.udadban@goums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

◀ **استناد:** دهقان، سمانه؛ دادبان شهامت، یوسف؛ زیارتی، فریبا. بررسی تأثیر پارامترهای بهره‌برداری بر فرایند تولید کلر فعال در سلول الکتروکلریناسیون با چینش دوقطبی الکترودهای تیتانیوم و پلاتین/تیتانیوم به روش طراحی باکس بنکن. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، بهار ۱۴۰۱؛ ۸(۱): ۱۵-۱.

مقدمه

با افزایش آگاهی جوامع از خطرات جبران‌ناپذیر آلودگی محیط‌زیست در تخلیه پساب‌ها و مواد آلاینده به طبیعت، قوانین

آن است [۷۸]. از آنجاکه نشت این گاز از کپسول‌های حاوی گاز بسیار خطرناک است و خطر مسمومیت گسترده و انفجار به همراه دارد، لذا روش استفاده از تولید کلر در محل با استفاده از الکتروکلریناسیون مورد توجه قرار گرفته است.

اخیراً مطالعات زیادی در خصوص استفاده از فرایندهای الکتروشیمیایی برای تصفیه آب و فاضلاب انجام شده است. در این راستا به‌طور خاص تحقیقاتی نیز در خصوص استفاده از انواع الکترودها برای کاربرد در سلول الکتروشیمیایی در گندزدایی و تجزیه ترکیبات آلی آب انجام شده است [۹-۱۲]. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان داده است میکروارگانسیم‌ها را می‌توان با الکتروشیمیایی یا از طریق گونه‌های شیمیایی بسیار فعال مانند رادیکال‌های آزاد و یون‌های دیگر (OH، O، HO، CL_۲، OCl⁻) غیرفعال کرد. میدان‌های الکتریکی برای سلول‌ها مضر هستند، اما تحقیقات نشان داده‌اند مرگ با اختلال در دیواره سلولی رخ نمی‌دهد [۱۳، ۱۴].

همچنین بعضی از مطالعات نشان دادند غیرفعال‌سازی در درجه اول با توجه به خواص گندزدایی ترکیبات اکسیژن فعال تولید شده در الکترودهاست. این ترکیبات اکسیژن به کاهش تشکیل محصولات جانبی گندزدایی ناخواسته مانند THM کمک می‌کند که در طول گندزدایی با دُز کلر متداول تشکیل شده‌اند [۱۳]. غیرفعال‌سازی مستقیم شامل جذب الکتریکی باکتری‌ها در سطح الکتروود و تخریب آن است، به‌طوریکه غیرفعال کردن باکتری‌ها و سلول‌های مخمر هم به‌وسیله الکتروشیمیایی مستند شده است [۱۵]. از مزایای دیگر این روش می‌توان به مصرف نشدن انرژی زیاد برای تولید گندزدا، پرتابل بودن سیستم، کم‌حجم و مقرون‌به‌صرفه بودن برای کاربرد در اجتماعات کوچک و تک‌خانواری و در پکیج‌های تصفیه آب اشاره کرد. همچنین مشکلات کلرزنی متداول از قبیل انفجار و شارژ کپسول‌های گاز کلر، مسمومیت و نگهداری کلر به‌عنوان ماده خطرناک در محل نیز رفع می‌شود [۱۶، ۱۷].

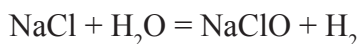
حفاظت از محیط‌زیست در دو دهه اخیر بسیار جدی و سخت‌تر شده است [۱]. بر اساس برآورد سازمان جهانی بهداشت سالیانه ۱/۸ میلیون نفر در جهان و بیشتر در کشورهای درحال توسعه بر اثر بیماری‌های اسهالی می‌میرند [۲]. از این رو، بزرگ‌ترین خطر برای سلامت انسان از طریق آب، آلودگی میکروبی منابع آب است [۳]. بسیاری از روش‌های گندزدایی فیزیکی مانند اسمز معکوس و روش‌های شیمیایی نظیر کلرزنی، پرتو فرابنفش و کاتالیزورهای مختلف برای از بین بردن میکروارگانسیم‌های بیماری‌زا از آب و پساب فاضلاب استفاده می‌شوند. روش‌های مذکور مشکلات بهداشتی نظیر تولید محصولات جانبی گندزدایی و همچنین مسائل فنی و اقتصادی به همراه دارند؛ برای مثال، روش ازرن‌زی مزایایی دارد، ولی مشکلاتی نیز در اثر واکنش ازرن با برمید ایجاد می‌شود [۳، ۴]. همچنین ازرن مصرفی به دلیل ناپایدار بودن باید در محل تولید شود. مصرف ازرن با دُز کمتر ممکن است به‌طور مؤثر قادر به غیرفعال‌سازی بعضی از ویروس‌ها، هاگ‌ها و کیست‌ها نباشد و در نهایت گاز خروجی از تماس‌دهنده معمولاً حاوی ازرن با غلظت بیش از ۱ گرم بر مترمکعب است که قبل از رها شدن به محیط باید از بین برود [۵]. همچنین روش گندزدایی با اشعه UV مزایای چون زمان تماس کوتاه دارد، ولی معایبی نیز دارد؛ مثلاً نیاز به تصفیه کامل آب قبل از استفاده از UV، ناتوانی در حذف طعم، بو و رنگ و عدم ایجاد باقی‌مانده‌ای و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و انرژی الکتریکی زیاد است. درحالی‌که در این روش اسپورها، کیست‌ها و ویروس‌ها حساسیت کمتری دارند [۵].

به این ترتیب با افزایش شیوع بیماری‌های عفونی از طریق آب و مصارف مجدد پساب‌ها و گسترش میکروارگانسیم‌های بیماری‌زای مقاوم در برابر عوامل گندزدا، به استفاده از روش‌های نوین مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای گندزدایی آب و پساب نیاز است [۶]. در بین این روش‌ها، محبوب‌ترین روش برای گندزدایی آب در تصفیه‌خانه‌های کشور از نظر سهولت کاربری، انعطاف‌پذیری و هزینه کم، استفاده از کلر و ترکیبات

معادله ۳:



معادله ۴: تولید هیپوکلریت

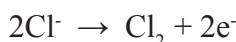


به طور اختصاصی تر، برای تولید محلول گندزدای حاوی کلر فعال انواع مختلفی از سلول‌های الکترولیز از جمله غشایی و بدون غشا نوع تک قطبی و نوع دوقطبی استفاده می‌شود. در سلول غشایی یک غشای تعویض یونی در بین الکترودهای آند و کاتد قرار گرفته است. این غشا قادر است آنیون‌ها را از خود عبور دهد و آن‌ها را به سمت آند هدایت کند. در این سلول‌ها یون‌های کلرید به وسیله غشا به سمت آند می‌رود و یون‌های سدیم در سمت کاتد باقی می‌ماند [۲۲، ۲۳]. ساختار سل بدون غشا همانند سل غشایی است، با این تفاوت که در آن غشا وجود ندارد؛ بنابراین، یک ورودی آب و نمک و یک خروجی محصولات دارد. در این حالت محصولات سمت آند و کاتد با یکدیگر مخلوط هستند و از خروجی سل خارج می‌شوند. این نوع سلول می‌تواند در انواع تک قطبی و دوقطبی استفاده شود. در حالتی که سلول‌ها به صورت موازی چیده شده و اختلاف پتانسیل یکسان در هر جفت آند-کاتد داشته باشند، چپش تک قطبی است. جریان

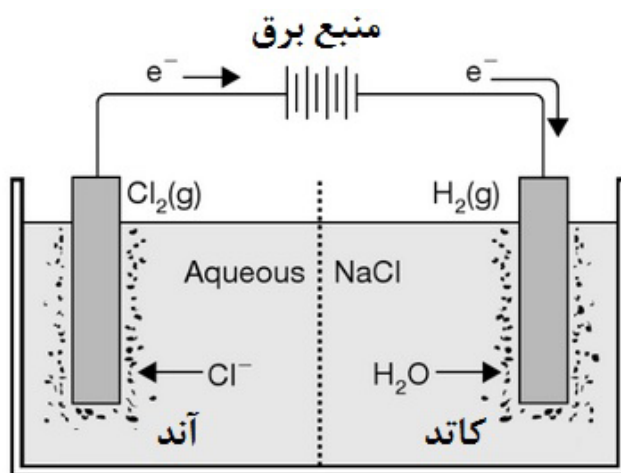
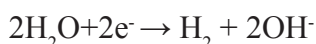
به طور کلی در دنیا تحقیقات مختلف مستمري در خصوص تعیین شرایط بهینه بهره‌برداری از قبیل سنتز و کاربرد انواع الکترودها، غلظت الکترولیت، زمان واکنش، pH، دانسیته جریان، دمای راکتور سلول، فاصله الکترودها، نوع چپش آن‌ها و نسبت سطح آند به کاتد بر راندمان فرایندهای الکتروشیمیایی انجام شده است (۱۲، ۱۸-۲۰) که با سنتز الکترودهای جدید این اطلاعات کامل تر و به روز تر می‌شود. به طور کلی در ادبیات فنی به مجموع اسید هیپوکلرو و آنیون هیپوکلریت «کلر فعال» گفته می‌شود [۱۲، ۲۰-۱۸]. در این مطالعه نیز از این شاخص برای سنجش کلر تولیدی استفاده شده است. اساس عملکرد سلول الکتروکلریناسیون بر الکترولیز کلرید سدیم و آب استوار است. در این فرایند مطابق شکل ۱، آنیون‌ها به سمت آند و کاتیون‌ها به سمت کاتد می‌روند و واکنش‌های مربوطه در ذیل انجام می‌شود [۲۱]:

واکنش‌هایی که در آند اتفاق می‌افتد:

معادله ۱: تولید کلر آزاد در الکترولیز و واکنش‌هایی که در کاتد اتفاق می‌افتد:



معادله ۲: تولید یون هیدروژن در الکترولیز و واکنش‌های شیمیایی فرایند:



شکل ۱. یک سلول الکتروکلرولایزر

این مطالعه بررسی ساخت سلول الکتروکلریناسیون با الکترودهای مختلف و تعیین تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر بهره‌برداری در راکتور با چینش دوقطبی به روش طراحی آزمایش‌های باکس بنکن است.

روش کار

مطالعه حاضر یک مطالعه تجربی با رویکرد کاربردی است که در یک راکتور با جریان منقطع در آزمایشگاه آب‌وفاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی گلستان انجام شد. در این مطالعه در مرحله اول به منظور تعیین شرایط بهینه پارامترهای بهره‌برداری بر تولید کلر فعال، راکتور با چینش دوقطبی الکتروده به حجم ۵۰۰ سی‌سی طراحی و مطابق شکل ۲ ساخته شد.

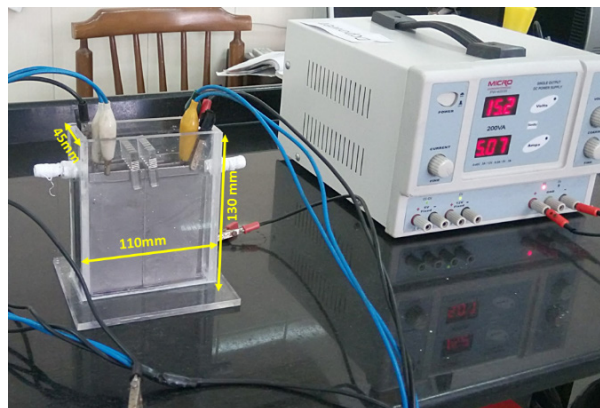
مواد شیمیایی استفاده‌شده

تمام مواد و محلول‌های شیمیایی استفاده‌شده در این پژوهش شامل یدید پتاسیم، کلرید سدیم، اسید سولفوریک، هیدروکسید سدیم و تیوسولفات سدیم درجه خلوص آزمایشگاهی داشتند و از شرکت مرک تهیه شدند. الکترودهای استیل ۳۱۶ و تیتانیوم

کل سلول برابر جمع جریان هر جفت الکتروده و ولتاژ برابر ولتاژ یک جفت الکتروده است. در صورتی که در چینش دوقطبی، فقط الکتروده اول و آخر به جریان برق متصل می‌شوند. قطب الکترودهای دیگر متضاد قطبی است که در مقابل آن‌هاست و ولتاژ هر جفت الکتروده، بخشی از کل ولتاژ سلول است [۲۲، ۲۳]. الکتروده پلاتین در برابر انحلال مقاومت دارد؛ نه تنها به دلیل جایگاه خود در سری گالوانیکی به‌عنوان یک فلز نجیب، بلکه به دلیل آن که یک سطح نازک رسانا را تشکیل می‌دهد. سرعت انحلال آند پلاتین در آب شور بسیار کم است. قیمت زیاد پلاتین در ترکیب با نرخ بسیار کم آن در پوشش منجر به آن شده است که در درجه اول به‌عنوان یک فیلم نازک آبکاری روی فلزات ارزان‌تر استفاده شود. پلاتین معمولاً بیشتر به فلز بستر با آبکاری پوشش داده می‌شود. این لایه‌های نازک پلاتین سبب افزایش عمر عملیاتی می‌شوند [۲۴]. لذا در این تحقیق با پوشش روی الکتروده تیتانیوم به‌عنوان آند استفاده شد. در این مطالعه با توجه به انحصاری بودن ساخت انواع سلول‌ها و الکترودهای مخصوص تولید کلر و سایر گندزداها، انجام تحقیقات جامع در کشور مورد نیاز است. لذا نیاز است مطالعات جامعی در خصوص الکتروده، مدل‌سازی و تعیین شرایط بهینه تحقیق و ساخت آن انجام شود. هدف از انجام



ب



الف

شکل ۲. (الف) نمای پایلوت راکتور سلول الکتروکلریناتور؛ (ب) نحوه چینش دوقطبی الکترودها در سلول

استفاده شده نیز با درصد خلوص ۹۹ درصد ساخت کشور روسیه از شرکت آلیاژهای صنعتی تهیه شد که ساختار شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

مشخصات راکتور

به منظور ساخت بدنه اصلی راکتور از ورقه‌های پلکسی در ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شد. حجم مفید راکتور با ابعاد طول×عرض×ارتفاع به ترتیب ۱۱۰×۴۵×۱۳۰ میلی‌متر، ۵۰۰ میلی‌لیتر به دست آمد که در آن الکترودها با ابعاد ۱۰۰×۳۰ میلی‌متر در چهار ردیف و به فاصله ۰/۵ سانتی‌متر از یکدیگر مطابق شکل ۲ مستقر شدند. منبع تغذیه برق مستقیم (Direct Current: DC) بود که از ترانس مبدل مدل میکرو PW۴۰۵۱۹ ساخت ایران استفاده شد.

در این تحقیق از دو نوع الکتروود تیتانیوم و پلاتین پوشش شده روی تیتانیوم ساخته شده به روش ترسیب آبرکاری با استفاده از اسید کلروپلاتینیک به عنوان آنود استفاده شد [۲۴، ۲۵]. در هر دو حالت از الکتروود استیل ۳۱۶ به عنوان کاتد استفاده شد.

انجام آزمایش‌ها به روش باکس بنکن

انجام آزمایش به روش باکس بنکن (Box-Behnken)

پس از اعمال شرایط مختلف بهره‌برداری متغیرهای مستقل در زمان‌های خواسته شده توسط مدل نسبت به نمونه‌برداری از راکتور اقدام شد و کلر فعال آن از روش رنگ‌سنجی با معرف DPD (N, N'-diethyl-p-phenylenediamine) با عنوان Cl-۴۵۰۰ موجود در کتاب استاندارد متد استفاده شد؛ سپس با اجرای مدل در نرم‌افزار شرایط بهینه بهره‌برداری و گراف‌های مربوط به آن بر پایه اهداف مدنظر استخراج شد [۲۶].

مطابق فرمول $N = 2k(k-1) + C_0$ ، تعداد کل ۳۴ آزمایش

جدول ۲: دامنه و کدهای مربوط به متغیرهای مستقل (Xi) و پاسخ (Y) استفاده شده در طراحی آزمایش باکس بنکن

حد بالا (+۱)	حد متوسط (۰)	حد پایین (-۱)	واحد	کد	پارامترهای بهره‌برداری
۶۰	۳۵	۱۰	آمپر بر دسی‌متر مربع	X_1	دانشیته جریان
۲۵۰	۱۵۰	۵۰	گرم بر لیتر	X_2	غلظت الکتروولیت
۱۲۰	۶۲/۵	۵	دقیقه	X_3	زمان واکنش
				X_4	نوع الکتروود آنود
				Y	پاسخ
			مقدار کلر فعال تولید شده در نوبت هر آزمایش		

جدول ۱: مشخصات ترکیب عناصر الکتروودهای استفاده شده در سلول الکتروولیز

نوع الکتروود	استیل ۳۱۶	تیتانیوم
نوع عناصر شیمیایی الکتروود	درصد عناصر	درصد عناصر
Fe	۶۹/۵	-
Ni	۱۰/۴۶	۰/۰۳
MO	۲/۰۹	-
Mn	۱/۰۱	-
Cr	۱۶/۶۵	-
Ti	-	۹۹/۱۴
Si	-	۰/۲۱
درصد خلوص	۹۹/۷۱	۹۹/۳۸

خطی بین فاکتورهای x_i و x_j است [۲۸].

یافته‌ها

آزمایش‌های الکتروکلریناسیون در راستای تولید کلر فعال

در این مطالعه ۳۴ آزمایش همراه با پاسخ‌ها با طراحی BBD در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد تولید کلر فعال از ۲ تا ۶۸ گرم بر لیتر متغیر بود.

که دارای ۵ آزمایش تکراری برای نقطه مرکزی است، تعیین شد. در این فرمول k تعداد فاکتورها و C_0 نقاط مرکزی است و مدل درجه دوم طراحی باکس بنکن با معادله ۵ تعریف می‌شود (۲۷).

معادله ۵:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

در این معادله β_0 : مقدار ثابت؛ β_i : شیب یا اثر خطی فاکتور x_i ؛ β_{ii} : اثر درجه دوم فاکتور x_i و β_{ij} : اثر برهم‌کنش خطی به

جدول ۳: طراحی آزمایش فرایند با استفاده از طرح BBD به همراه پاسخ تولید کلر فعال

(Y) کلر فعال تولیدی		(D) نوع آند	(C) زمان الکترولیز	(B) غلظت NaCl	(A) دانسیته جریان	شماره آزمایش	(Y) کلر فعال تولیدی		(D) نوع آند	(C) زمان الکترولیز	(B) غلظت NaCl	(A) دانسیته جریان	شماره آزمایش
واقعی	پیش‌بینی		دقیقه	گرم بر لیتر	آمپر بر دسی‌متر مربع		واقعی	پیش‌بینی		دقیقه	گرم بر لیتر	آمپر بر دسی‌متر مربع	
۹/۴	۱۰	Ti/Pt	۶۲/۵	۵۰	۱۰	۱۸	۶/۷	۵	Ti	۶۲/۵	۵۰	۱۰	۱
۲۳/۱	۲۲	Ti/Pt	۶۲/۵	۵۰	۶۰	۱۹	۱۶/۲	۱۵	Ti	۶۲/۵	۵۰	۶۰	۲
۱۴/۶	۱۶	Ti/Pt	۶۲/۵	۲۵۰	۱۰	۲۰	۱۰/۱	۱۱	Ti	۶۲/۵	۲۵۰	۱۰	۳
۳۴/۹	۴۰	Ti/Pt	۶۲/۵	۲۵۰	۶۰	۲۱	۳۰/۶	۳۱	Ti	۶۲/۵	۲۵۰	۶۰	۴
۱۹/۳	۱۵	Ti/Pt	۵	۱۵۰	۱۰	۲۲	۱۹/۲	۱۶	Ti	۵	۱۵۰	۱۰	۵
۲۳/۳	۲۰	Ti/Pt	۵	۱۵۰	۶۰	۲۳	۱۹/۰	۱۶	Ti	۵	۱۵۰	۶۰	۶
۲۹/۴	۳۲	Ti/Pt	۱۲۰	۱۵۰	۱۰	۲۴	۲۳/۳	۲۶	Ti	۱۲۰	۱۵۰	۱۰	۷
۶۳/۹	۶۸	Ti/Pt	۱۲۰	۱۵۰	۶۰	۲۵	۵۲/۵	۵۶	Ti	۱۲۰	۱۵۰	۶۰	۸
-۱/۳	۲/۲	Ti/Pt	۵	۵۰	۳۵	۲۶	-۲/۶	۲/۵	Ti	۵	۵۰	۳۵	۹
۴/۱	۷/۲	Ti/Pt	۵	۲۵۰	۳۵	۲۷	۱/۰	۳/۲	Ti	۵	۲۵۰	۳۵	۱۰
۱۸/۸	۱۶	Ti/Pt	۱۲۰	۵۰	۳۵	۲۸	۱۰/۴	۸	Ti	۱۲۰	۵۰	۳۵	۱۱
۳۴/۹	۳۰	Ti/Pt	۱۲۰	۲۵۰	۳۵	۲۹	۲۴/۷	۲۱	Ti	۱۲۰	۲۵۰	۳۵	۱۲
۳۰/۹	۳۱	Ti/Pt	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۳۰	۲۵/۱	۲۵	Ti	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۱۳
۳۰/۹	۳۱	Ti/Pt	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۳۱	۲۵/۱	۲۵	Ti	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۱۴
۳۰/۹	۳۱	Ti/Pt	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۳۲	۲۵/۱	۲۵	Ti	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۱۵
۳۰/۹	۳۱	Ti/Pt	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۳۳	۲۵/۱	۲۵	Ti	۶۲/۵	۱۵۰	۳۵	۱۶
۳۰/۹	۳۱	Ti/Pt	۶۲/۵	۱۵۰	۳۰	۳۴	۲۵/۱	۲۵	Ti	۶۲/۵	۱۵۰	۳۰	۱۷

نتایج تحلیل واریانس یک طرفه و اعتبارسنجی مدل آماری تحلیل واریانس روند تولید کلر فعال سطح معنی داری تأثیر پارامترهای اصلی و برهم کنش‌های آنها و همچنین ضرایب آماری برازش مدل درجه دوم باکس بنکن در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تأثیر هر چهار پارامتر زمان الکترولیز، دانسیته جریان، غلظت کلرید سدیم و نوع الکترود بر فرایند تولید کلر فعال مؤثر و معنی دار است ($P < 0.0001$). این

در حالی است که برهم کنش بین این پارامترها (از جمله AB، AC، BC، CD) و توان دوم این پارامترها (از جمله A^2 ، B^2) نیز معنی دار است ($P < 0.05$). مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۴، در مدل انتخابی تولید کلر فعال مقدار R^2 معادل ۰/۹۶۸؛ R^2 تنظیم شده با مقدار ۰/۹۴۸ و همچنین R^2 پیش‌بینی شده ۰/۸۵ است. مقدار Adeq Precision، نسبت سیگنال به نویز را اندازه گیری می‌کند که در این تحلیل ۳۲/۰۵ است. با کاربرد این مدل برای ترسیم فضای طرح

جدول ۴: تحلیل واریانس روند تولید کلر فعال و ضرایب آماری برازش مدل درجه دوم باکس بنکن

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره فیشر	P
مدل	۵/۶۴۲۶	۱۳	۴۹۴/۳۴	۴۷/۲۶	< ۰/۰۰۰۱
دانسیته جریان A-	۱۱۷۳/۱	۱	۱۱۷۳/۰۶	۱۱۲/۱۴	< ۰/۰۰۰۱
B-NaCl غلظت	۳۸۷/۱۱	۱	۳۸۷/۱۱	۳۷/۰۰	< ۰/۰۰۰۱
زمان C-	۱۹۱۱/۹	۱	۱۹۱۱/۸۸	۱۸۲/۷۶	< ۰/۰۰۰۱
نوع آند D-	۲۸۰/۷۴	۱	۲۸۰/۷۴	۲۶/۸۴	< ۰/۰۰۰۱
AB	۶۰/۵۰	۱	۶۰/۵۰	۵/۷۸	۰/۰۲۶
AC	۴۶۵/۱۳	۱	۴۶۵/۱۳	۴۴/۴۶	< ۰/۰۰۰۱
AD	۱۸/۰۶	۱	۱۸/۰۶	۱/۷۳	۰/۲۰۳۷
BC	۵۶/۷۱	۱	۵۶/۷۱	۵/۴۲	۰/۰۳۰۵
BD	۳/۳۳	۱	۳/۳۳	۰/۳۲	۰/۵۷۸۹
CD	۵۰/۰۶	۱	۵۰/۰۶	۴/۷۸	۰/۰۴۰۸
A^2	۲۳۷/۱	۱	۲۳۷/۱۱	۲۲/۶۷	< ۰/۰۰۰۱
B^2	۱۷۸۴/۳	۱	۱۷۸۴/۲۹	۱۷۰/۵۶	< ۰/۰۰۰۱
C^2	۴۰/۰۷	۱	۴۰/۰۷	۳/۸۳	۰/۰۶۴۴
Residual	۲۰۹/۲۲	۲۰	۱۰/۴۶		
Lack of Fit	۲۰۹/۲۲	۱۲	۱۷/۴۴		
Pure Error	.	۸	.		
Cor Total	۶۶۳۵/۷	۳۳			
R^2	۰/۹۶۸		Std. Dev.	۳/۲۳	
Adj. R^2	۰/۹۴۸		Mean	۲۲/۶۲	
Predic. R^2	۰/۸۵۸		C.V. %	۱۴/۳۰	
Adeq Preci.	۳۲/۰۵				

سطح معنی داری $P < 0.05$ است.

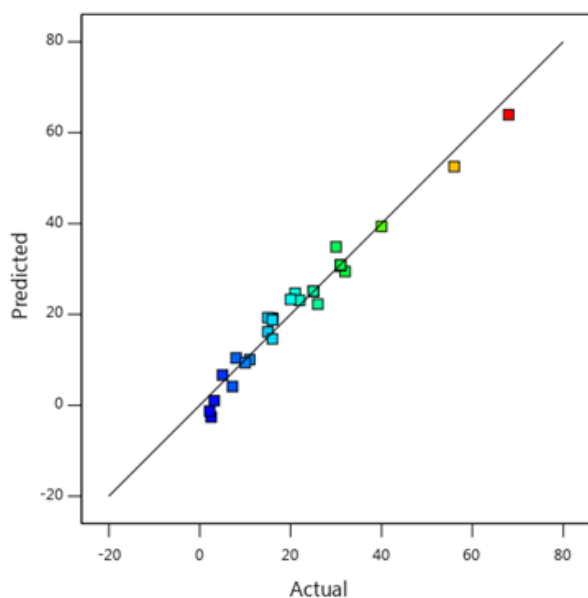
کلرید سدیم و نوع الکتروود آند است.

تأثیر پارامترهای بهره‌برداری بر فرایند تولید کلر فعال اثر دانسیته جریان

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳، در شرایط میانگین سایر پارامترها با افزایش چگالی جریان در الکتروود آندی تیتانیوم از ۱۰ به ۶۰ آمپر بر دسی متر مربع، مقدار تولید کلر نیز ۲/۲ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکتروود آندی پلاتین / تیتانیوم این افزایش ۲/۱ برابر است. به طوری که تأثیر این پارامتر در جدول تحلیل واریانس یک طرفه (جدول ۴) نیز معنی دار گزارش شده است. نتایج شکل ۵ نشان دهنده تأثیر مقدار دانسیته جریان و غلظت الکتروولیت نمک طعام بر مقدار تولید کلر فعال است.

اثر غلظت اولیه الکتروولیت نمک طعام

تأثیر این پارامتر در جدول تحلیل واریانس یک طرفه (جدول ۴) معنی دار گزارش شده است. این رابطه مستقیم بین این پارامتر و

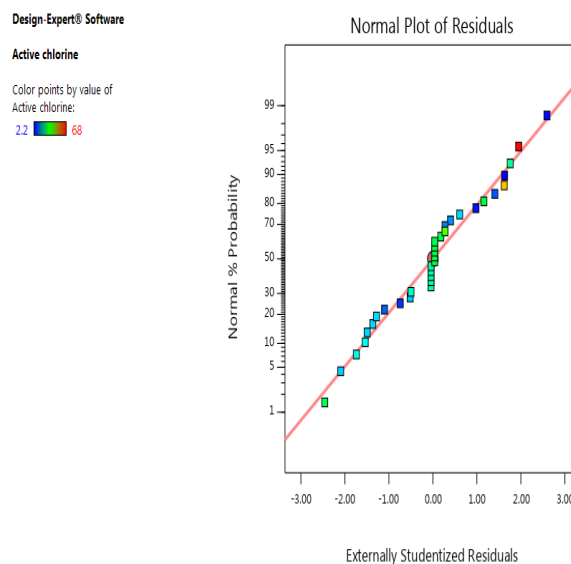


شکل ۴: همبستگی خطی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی مدل در تولید کلر فعال

معادله رگرسیونی درجه دوم فرایند برای تولید کلر فعال به ازای هر دو نوع الکتروود آند تیتانیوم و پلاتین / تیتانیوم مطابق با جدول ۵ به دست آمد.

شکل ۳ توزیع نرمال باقی مانده‌های استاندارد را برای استخراج اولیه تحلیل‌ها نشان می‌دهد. باقی مانده‌ها یک توزیع نرمال را دنبال می‌کنند و نقاط به دنبال یک خط مستقیم هستند که نشان دهنده این است که مدل‌ها و داده‌های تجربی معتبر و قابل اعتماد هستند و از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند.

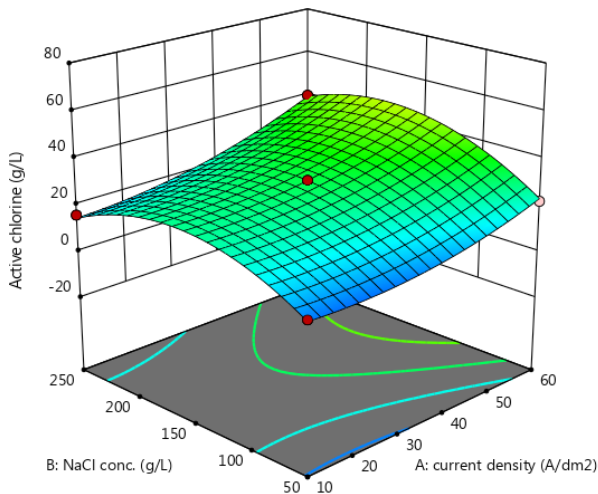
همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر واقعی پاسخ داده‌های تجربی برای یک اجرای خاص و مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده با توابع تقریبی تقریباً یکسان هستند و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی مشابه است که نشان دهنده اعتبار بالای مدل و تناسب آن با داده‌های آزمایشی است. مقدار F موجود در آزمون آنوای موجود در جدول ۴ و همچنین ضریب فرمول تولید کار فعال ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد بیشترین تأثیر پارامترهای بهره‌برداری بر میزان تولید کلر به ترتیب شامل زمان الکتروولیز، دانسیته جریان، غلظت



شکل ۳: توزیع نرمال باقی مانده‌های استاندارد در تولید کلر فعال

جدول ۵: معادله مدل تولید کلر فعال به ازای هر دو نوع الکترود آند

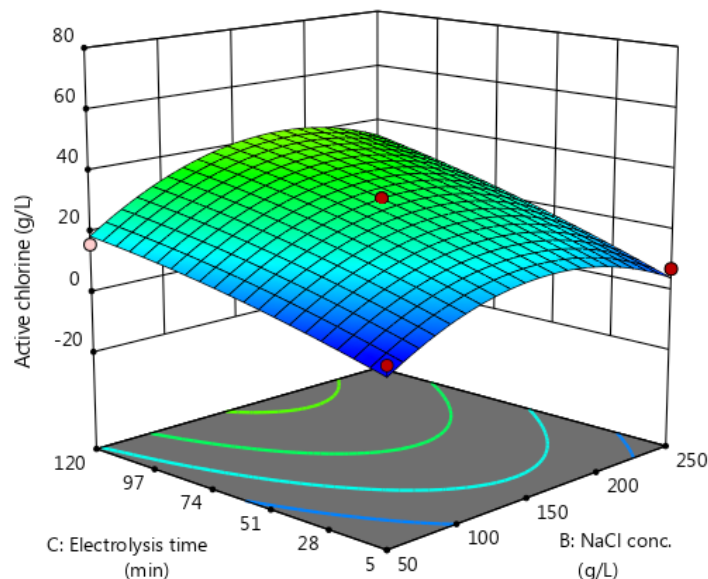
مقدار کلر فعال (گرم بر لیتر)	
الکترود آند پلاتین / تیتانیوم	الکترود آند تیتانیوم
-۷/۶۷۷	-۵/۲۴
دانسیته جریان	دانسیته جریان
-۰/۷۰۶	-۰/۷۹
غلظت NaCl	غلظت NaCl
۰/۴۲۳	۰/۴۱
زمان	زمان
۰/۰۴۸	-۰/۰۱۳
دانسیته جریان *	دانسیته جریان NaCl *
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
غلظت NaCl	غلظت NaCl
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
دانسیته جریان * زمان	دانسیته جریان * زمان
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵
غلظت NaCl * زمان	غلظت NaCl * زمان
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵
دانسیته جریان ^۲	دانسیته جریان ^۲
-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸
غلظت NaCl ^۲	غلظت NaCl ^۲
-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱



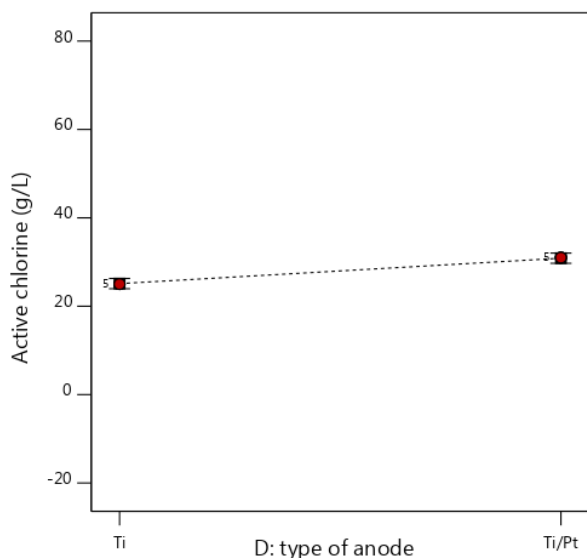
شکل ۵: تأثیر دانسیته جریان و غلظت الکترولیت نمک طعام بر مقدار تولید کلر فعال؛ الکترود آند پلاتین/تیتانیوم، زمان ۶۲/۵ دقیقه و کاتد استیل ۳۱۶

نیز ۲/۶ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکترود آندی پلاتین / تیتانیوم این افزایش ۱/۸ برابر است. شکل ۶ نشان دهنده تأثیر مقدار زمان فرایند الکترولیز و غلظت الکترولیت نمک طعام بر مقدار تولید کلر فعال است.

راندمان فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به دست آمده است [۱۲]. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳، در شرایط میانگین سایر پارامترها با افزایش غلظت الکترولیت نمک طعام در الکترود آندی تیتانیوم از ۵۰ به ۲۵۰ گرم بر لیتر، مقدار تولید کلر



شکل ۶: تأثیر زمان فرایند الکترولیز و غلظت الکترولیت نمک طعام بر مقدار تولید کلر فعال؛ الکترود آند پلاتین/تیتانیوم، دانسیته جریان ۳۵ آمپر بر دسی متر مربع و کاتد استیل ۳۱۶



شکل ۸: مقایسه مقدار کلر فعال تولیدی دو الکترود آندی تیتانیوم و پلاتین / تیتانیوم در شرایط نقطه مرکزی؛ دانسیته جریان ۳۵ آمپر بر دسی متر مربع، غلظت کلرید سدیم ۱۵۰ گرم بر لیتر و زمان فرایند ۶۲ دقیقه

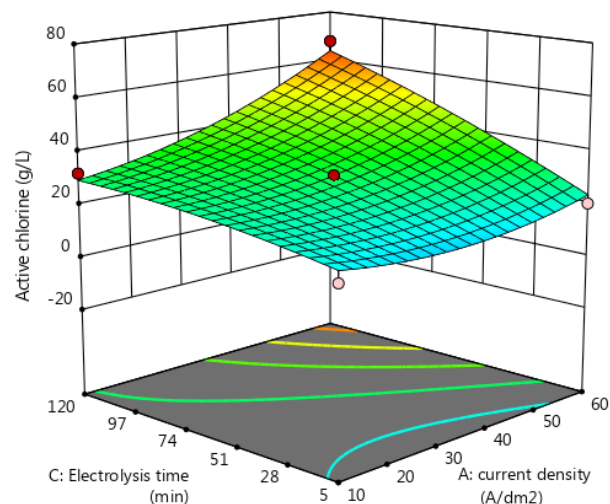
الکترودهای آندی پلاتین/تیتانیوم با ۳۱ گرم بر لیتر راندمان بیشتری (حدود ۶ درصد) نسبت به الکترودهای آندی تیتانیومی با مقدار کلر فعال ۲۵ گرم بر لیتر نشان دادند.

تعیین شرایط بهینه در تولید الکتروشیمیایی کلر فعال

با توجه به نتایج، شرایط بهینه بهره‌برداری ارائه شده با مدل برای تولید کلر شامل زمان الکترولیز ۱۲۰ دقیقه، دانسیته جریان ۶۰ آمپر بر دسی متر مربع، غلظت کلرید سدیم ۱۸۷ گرم بر لیتر و نوع الکترود آند پلاتین/تیتانیوم و الکترود کاتد استیل ۳۱۶ است که مقدار کلر ۶۵/۹۵ گرم بر لیتر با درجه مطلوبیت ۰/۹۷ به دست آمد.

بحث و نتیجه گیری

نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد تأثیر هر چهار پارامتر زمان الکترولیز، دانسیته جریان، غلظت کلرید سدیم و نوع الکترود بر فرایند تولید کلر فعال مؤثر و معنی‌دار است. با توجه به مطالعات



شکل ۷: تأثیر زمان فرایند الکترولیز و دانسیته جریان بر مقدار تولید کلر فعال؛ الکترود آند پلاتین/تیتانیوم، غلظت الکترولیت نمک طعام ۱۵۰ گرم بر لیتر و کاتد استیل ۳۱۶

اثر زمان الکترولیز

تأثیر این پارامتر در جدول تحلیل واریانس یک طرفه (جدول ۴) معنی‌دار گزارش شده است. این رابطه مستقیم بین زمان الکترولیز و راندمان فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به دست آمده است [۱۲]. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳، در شرایط میانگین سایر پارامترها با افزایش زمان فرایند الکترولیز در الکترود آندی تیتانیوم از ۵ به ۱۲۰ دقیقه، مقدار تولید کلر نیز ۳/۵ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکترود آندی پلاتین/تیتانیوم این افزایش ۳/۴ برابر است. شکل ۷ نشان‌دهنده تأثیر زمان فرایند الکترولیز و مقدار دانسیته جریان بر مقدار تولید کلر فعال است.

اثر نوع الکترود آند

در این تحقیق میزان تولید کلر در دو نوع الکترود آندی تیتانیومی و پلاتین/تیتانیوم با الکترود کاتدی استیل ۳۱۶ مقایسه و بررسی شد. نتایج جدول تحلیل واریانس یک طرفه (جدول ۴) تأثیر این پارامتر را معنی‌دار نشان داد، به طوری که در شکل ۸،

انجام شده، برای سازگاری مناسب یک مدل، ضریب همبستگی باید حداقل ۰/۸ باشد [۲۹]. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۴، ضریب فقدان برازش مدل (lack of fit) در جدول ۴ معنی دار شده که ممکن است به علت وجود برخی تغییرات سیستماتیک پیش‌بینی نشده در مدل فرضی باشد. در بسیاری از تحقیقات مشابه علت معنادار بودن ضریب فقدان برازش همین مورد بوده است. البته برخی مطالعات تعداد زیاد متغیرها و یا تعداد خیلی کم متغیرها را ذکر کرده‌اند [۳۰، ۳۱]. در مدل انتخابی تولید کلر فعال مقدار R^2 معادل ۰/۹۶۸ در سازگاری مناسبی با R^2 تنظیم شده با مقدار ۰/۹۴۸ است. همچنین R^2 پیش‌بینی شده با مقدار ۰/۸۵ در تطابق کامل با R^2 تعدیل شده با مقدار ۰/۹۴ است؛ تفاوت این دو کمتر از حد مجاز ۰/۲ است. نسبت سیگنال به نویز بزرگ‌تر از ۴ نشانه مطلوبیت مدل انتخابی است. نسبت به‌دست آمده در این تحلیل ۳۲/۰۵ نشان‌دهنده سیگنال کافی است و این بدین معنی است که از این مدل می‌توان برای حرکت در فضای طراحی استفاده کرد.

اثر دانسیته جریان

در بیشتر مطالعات الکتروشیمی به اثر دانسیته جریان بر فرایند انتقال جرم در الکترودها اشاره شده است [۳۲]. با توجه به قوانین الکترولیز فارادی، مواد تولید شده در آند متناسب با کل بار الکتریکی است که از طریق آن عبور می‌کند و این مفهوم چگالی جریان را در برمی‌گیرد [۳۳]. نتایج این تحقیق نشان داده است تأثیر این پارامتر معنی دار است و با افزایش چگالی جریان در الکتروود آندی تیتانیوم از ۱۰ به ۶۰ آمپر بر دسی متر مربع، مقدار تولید کلر نیز ۲/۲ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکتروود آندی پلاتین/تیتانیوم این افزایش ۲/۱ برابر است. این نتایج مطبق بر یافته‌های سایر تحقیقات است، به طوری که در بیشتر مطالعات با افزایش دانسیته جریان، مکانیسم فرایند با سرعت و شدت بیشتری انجام می‌شود [۳۴-۳۶]. این رابطه مستقیم بین این پارامتر و راندمان

فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به‌دست آمده است [۳۲].
اثر غلظت اولیه الکترولیت نمک طعام
در بیشتر مطالعات الکتروشیمیایی با افزایش مقدار غلظت الکترولیت، میزان فرایند الکتروشیمیایی با شدت بیشتری انجام می‌شود [۱۲، ۳۴]. نتایج نشان داد در شرایط میانگین سایر پارامترها با افزایش غلظت الکترولیت نمک طعام در الکتروود آندی تیتانیوم از ۵۰ به ۲۵۰ گرم بر لیتر، مقدار تولید کلر نیز ۲/۶ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکتروود آندی پلاتین/تیتانیوم این افزایش ۱/۸ برابر است. این نتایج منطبق بر نتایج سایر تحقیقات است. به طوری که رابطه مستقیم بین این پارامتر و راندمان فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به‌دست آمده است [۱۲، ۳۶].

اثر زمان الکترولیز

در بیشتر مطالعات با زمان الکترولیز، میزان فرایند با سرعت و شدت بیشتری انجام می‌شود [۱۲، ۳۷]. تأثیر این پارامتر در جدول تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۴) معنی دار گزارش شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در شرایط میانگین سایر پارامترها با افزایش زمان فرایند الکترولیز در الکتروود آندی تیتانیوم از ۵ به ۱۲۰ دقیقه، مقدار تولید کلر نیز ۳/۵ برابر افزایش یافت. این در حالی بود که در الکتروود آندی پلاتین/تیتانیوم این افزایش ۳/۴ برابر است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم زمان فرایند الکترولیز و مقدار دانسیته جریان بر مقدار تولید کلر فعال است. این رابطه مستقیم بین زمان الکترولیز و راندمان فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به‌دست آمده است [۱۲، ۳۶].

اثر نوع الکتروود آند

به منظور افزایش راندمان فرایند الکتروشیمیایی به‌طور کلی تاکنون انواع مختلفی از الکترودها در تحقیقات استفاده شده است. در این تحقیق میزان تولید کلر در دو نوع الکتروود آندی تیتانیومی و پلاتین/تیتانیوم با الکتروود کاتدی استیل ۳۱۶ مقایسه و بررسی شد.

آند پلاتین/تیتانیوم و الکتروود کاتد استیل ۳۱۶ است که مقدار کلر ۶۵/۹۵ گرم بر لیتر با درجه مطلوبیت ۰/۹۷ به دست آمد. شرایط بهینه بهره‌برداری ارائه شده برای حصول بهترین راندمان تولید کلر فعال نشان داد مدل BBD همراه با توابع مطلوبیت به‌طور قابل ملاحظه‌ای برای بهینه‌سازی طراحی آزمایش‌ها در تولید کلر فعال در فرایند الکتروشیمیایی با این الکتروودها استفاده می‌شود. این در حالی است که در مقالات مشابه با الکتروود روتنیوم پوشانده شده بر تیتانیوم در شرایط سطح ۲۴ سانتی‌متر مربع، فاصله الکتروود ۰/۵ سانتی‌متر، دانسیته جریان ۳۵ آمپر بر دسی‌متر مربع، غلظت نمک طعام ۳ مولار و زمان ۲ ساعت مقدار کلر فعال ۶۵/۶۷ گرم بر لیتر به دست آمد [۱۲]. البته در بعضی تحقیقات با الکتروود الماس پوشانده شده بر بور (BBD) شرایط بهینه برای تولید کلر فعال اسیدی گزارش شد و در شرایط قلیایی شرایط به سمت تولید رادیکال‌های هیدروکسیل پیش می‌رود [۴۰].

با توجه به نتایج به دست آمده این روش می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای تولید کلر به‌منظور گندزدایی آب و پساب در تصفیه‌خانه‌ها استفاده شود و در صورت جایگزینی با سیستم‌های کلرزنی گازی، مشکلات خطرناک نشت گاز یا خطر انفجار کپسول‌های گاز کلر نیز مرتفع می‌شود.

قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی با عنوان «بررسی عوامل مؤثر بر کارایی الکتروکلریناسیون با الکتروودهای مختلف در تولید کلر جهت گندزدایی آب» با کد ۹۴۰۶۰۳۱۳۱ مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی گلستان و کد اخلاق IR.GOUMS.۱۳۹۴.۱۵۷ انجام شده است. نویسندگان از همکاری و حمایت آن معاونت کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نتایج نشان داده است تأثیر این پارامتر معنی‌دار است؛ به‌طوری‌که الکتروودهای آندی پلاتین/تیتانیوم با ۳۱ گرم بر لیتر، راندمان بیشتری (حدود ۶ درصد) نسبت به الکتروودهای آندی تیتانیومی با مقدار کلر فعال ۲۵ گرم بر لیتر نشان دادند. پلاتین فلز متداول استفاده شده در آندهاست. در آند پلاتین یک فیلم نازک رسانا به صورت چند لایه اتمی ضخیم روی سطح فلز است که به خودی خود هم رسانا و هم بدون واکنش است. الکتروود پلاتین در برابر انحلال مقاومت دارد که این نه تنها به دلیل جایگاه آن در سری گالوانیکی به‌عنوان یک فلز نجیب است، بلکه به این دلیل است که یک فیلم سطح نازک رسانا کنش‌پذیر را تشکیل می‌دهد؛ به‌طوری‌که سرعت انحلال آند پلاتین در آب دریا حدود 2×10^{-6} (کیلوگرم/کیلوآمپر ساعت) است.

قیمت زیاد پلاتین در ترکیب با نرخ بسیار کم آن در پوشش منجر شده است در درجه اول به‌عنوان یک فیلم نازک آبکاری روی فلزات ارزان‌تر استفاده شود. مقرون‌به‌صرفه‌ترین ترکیب مؤثر اعمال شده با پلاتین، تیتانیوم بوده است [۳۸]. مطالعات بیشتری در خصوص سنتز نانوذرات پلاتین روی تیتانیوم انجام شده است که سبب افزایش فعالیت الکتروشیمیایی و پایداری بیشتر الکتروودها در محیط خورنده شد [۹]. از طرفی رابطه بین نوع الکتروود و راندمان فرایند الکتروشیمیایی در سایر مطالعات نیز به دست آمده است [۳۴، ۳۹]. به‌طوری‌که در مقایسه بعضی از فرایندهای الکترواکسیداسیون الکتروودهای ترکیب با الماس راندمان‌های بیشتری نسبت به سایر الکتروودها داشتند [۳۹].

تعیین شرایط بهینه در تولید الکتروشیمیایی کلر فعال

با توجه به نتایج، شرایط بهینه بهره‌برداری ارائه شده در مدل برای تولید کلر شامل زمان الکتروولیز ۱۲۰ دقیقه، دانسیته جریان ۶۰ آمپر بر دسی‌متر مربع، غلظت کلرید سدیم ۱۸۷ گرم بر لیتر و نوع الکتروود

References

1. Delnavaz M, Ayati B, Ganjidoust H. Reaction Kinetics of Aniline Synthetic Wastewater Treatment by Moving Bed Biofilm Reactor. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2009;2(1):76-87. (In Persian).
2. Organization WH. Water, Sanitation and Hygiene Links to Health, Facts and Figures—updated November 2004. Geneva: WHO; 2004.
3. Mthombeni NH, Mpenyana-Monyatsi L, Onyango MS, Momba MN. Breakthrough analysis for water disinfection using silver nanoparticles coated resin beads in fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*. 2012; 217-218:133-40.
4. Hou Y, Chu W, Ma M. Carbonaceous and nitrogenous disinfection by-product formation in the surface and ground water treatment plants using Yellow River as water source. *Journal of Environmental Science*. 2012; 24(7):1204-9.
5. Metcalf I, Eddy H. *Wastewater engineering: treatment and reuse*; 2003.
6. Xia H, Cui B, Zhou J, Zhang L, Zhang J, Guo X, et al. Synthesis and characterization of Fe₃O₄/C Ag nanocomposites and their antibacterial performance. *Applied Surface Science*. 2011;257(22):9397-402.
7. Aymonier C, Schlotterbeck U, Antonietti L, Zacharias P, Thomann R, Tiller JC, et al. Hybrids of silver nanoparticles with amphiphilic hyperbranched macromolecules exhibiting antimicrobial properties. *Chemical Communications*. 2002; 24:3018-9.
8. Dadban Shahamat Y, Roshanak RK, Ali ZM, Ali B, Dariush Z. Disinfection of Effluent Using Catalytic Ozonation Process and Economical Comparison with Chlorination. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2016;26(140):103-14. (in Persian).
9. Rasmi K, Vanithakumari S, George R, Mallika C, Mudali UK. Development and performance evaluation of nano platinum coated titanium electrode for application in nitric acid medium. *Materials Chemistry and Physics*. 2015;151:133-9.
10. Pulido ME. Evaluation of an electro-disinfection technology as an alternative to chlorination of municipal wastewater effluents; 2005.
11. Ghernaout D, Naceur MW, Aouabed A. On the dependence of chlorine by-products generated species formation of the electrode material and applied charge during electrochemical water treatment. *Desalination*. 2011;270(1-3):9-22.
12. Khelifa A, Moulay S, Hannane F, Benslimene S, Hecini M. Application of an experimental design method to study the performance of electrochlorination cells. *Desalination*. 2004;160(1):91-8.
13. Drees KP, Abbaszadegan M, Maier RM. Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage. *Water Research*. 2003;37(10):2291-300.
14. Allen M, Soike K. Sterilization by electrohydraulic treatment. *Science*. 1966; 154(3745):155-7.
15. Matsunaga T, Nakasono S, Kitajima Y, Horiguchi K. Electrochemical disinfection of bacteria in drinking water using activated carbon fibers. *Biotechnology & Bioengineering*. 1994;43(5):429-33.
16. Bradford WL. *The Differences between On-Site Generated Mixed-Oxidant Solution and Sodium Hypochlorite* Albuquerque, USA: MIOX Corporation; 2011.
17. Li X, Diao H, Fan F, Gu J, Ding F, Tong A. Electrochemical wastewater disinfection: Identification of its principal germicidal actions. *Journal of Environmental Engineering*. 2004;130(10):1217-21.
18. Li M, Feng C, Hu W, Zhang Z, Sugiura N. Electrochemical degradation of phenol using electrodes of Ti/RuO₂-Pt and Ti/IrO₂-Pt. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;162(1):455-62.
19. Lin H, Ji X, Chen Q, Zhou Y, Banks CE, Wu K. Mesoporous-TiO₂ nanoparticles based carbon paste electrodes exhibit enhanced electrochemical sensitivity for phenols. *Electrochemistry Communications*. 2009;11(10):1990-5.
20. Lipp L, Pletcher D. The preparation and characterization of tin dioxide coated titanium electrodes. *Electrochimica Acta*. 1997;42(7):1091-9.
21. Corporation BV. *White's Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*: Wiley; 2010.
22. Choi Y, Byun S-H, Jang H-J, Kim S-E, Choi Y-j. Comparison of disinfectants for drinking water: chlorine gas vs. on-site generated chlorine. *Environmental Engineering Research*. 2022;27.
23. Badruzzaman M, Oppenheimer J, Adham S, Kumar M. Innovative beneficial reuse of reverse osmosis concentrate using bipolar membrane electrodialysis and electrochlorination processes. *Journal of Membrane Science*. 2009; 326(2):392-9.
24. Rasmi K, Vanithakumari S, George R, Mudali UK. *Synthesis and Characterization of Nanostructured*

- Platinum Coated Titanium as Electrode Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(5):1673-9.
25. Zambrano J, Park H, Min B. Enhancing electrochemical degradation of phenol at optimum pH condition with a Pt/Ti anode electrode. *Environmental Technology*. 2020; 41(24):3248-59.
26. Eaton AD, Franson MAH, Association AWW, Federation WE. *Standard methods for the examination of water & wastewater: American Public Health Association*; 2005.
27. Tripathi P, Srivastava VC, Kumar A. Optimization of an azo dye batch adsorption parameters using Box-Behnken design. *Desalination* 2009;249(3):1273-9.
28. Ferreira SLC, Bruns RE, Ferreira HS, Matos GD, David JM, Brandão GC, et al. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*. 2007;597(2):179-86.
29. Myers R, Montgomery D, Anderson-Cook C. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons; 2009.
30. Sadeghi-Kiakhani M, Arami M, Gharanjig K. Application of Chitosan-Dendrimer PPI Hybrid in Direct Dyes Removal: Optimization by RSM, Kinetic and Isotherm Studies. *Journal of Color Science and Technology*. 2013;6(4):355-368.
31. Abou Oualid H, Abdellaoui Y, Laabd M, El Ouardi M, Brahmi Y, Iazza M, et al. Eco-efficient green seaweed *Codium decortatum* biosorbent for textile dyes: characterization, mechanism, recyclability, and RSM optimization. *ACS Omega*. 2020;5(35):22192-22207.
32. Nanseu-Njiki CP, Tchamango SR, Ngom PC, Darchen A, Ngameni E. Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;168(2-3):1430-6.
33. Moosavirad SM, Hasanzadeh-Sablouei A. Removal of Cadmium from the Leaching Solution Using Electrocoagulation. *Environment and Water Engineering*. 2020;6(4):415-29.
34. Choi J, Shim S, Yoon J. Design and operating parameters affecting an electrochlorination system. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013;19(1):215-9.
35. López-Maldonado JT, Rivera FF, Castañeda-Zaldívar F. Numerical and experimental evaluation of the general performance in a modular electrochemical reactor and its feasibility for electro-chlorination purposes: Effect of the different electrode assembly configurations. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022;177:45-55.
36. Un UT, Altay U, Koparal AS, Ogutveren UB. Complete treatment of olive mill wastewaters by electrooxidation. *Chemical Engineering Journal*. 2008; 139(3):445-52.
37. Moosavirad SM, Hasanzadeh-Sablouei A. Removal of Arsenic from Pregnant Leaching Solution Using Electrochemical Coagulation Method. *Journal Of Metallurgical and Materials Engineering*. 2021;32(2):95-114.
38. Rajeshwar K, Ibanez JG. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and applications in pollution sensors and abatement*: Elsevier; 1997.
39. Ukundimana Z, Omwene PI, Gengec E, Can OT, Kobya M. Electrooxidation as post treatment of ultrafiltration effluent in a landfill leachate MBR treatment plant: Effects of BDD, Pt and DSA anode types. *Electrochim Acta*. 2018;286:252-63.
40. Mostafa E, Reinsberg P, Garcia-Segura S, Baltruschat H. Chlorine species evolution during electrochlorination on boron-doped diamond anodes: In-situ electrogeneration of Cl₂, Cl₂O and ClO₂. *Electrochimica Acta*. 2018; 281:831-40.