

Choosing the most suitable electrode for drinking water treatment by electrochemical process

Giti Kashi^{*1,2} , Negin Nayerloo³ 

1- Department of Environmental Health Engineering, Islamic Azad University, Tehran Medical Sciences Branch, Tehran, Iran

2- Water purification research center, Islamic Azad University, Tehran Medical Sciences Branch, Tehran, Iran

3- Student of Department of E-Learning Programing and Management in in Medical Sciences, Shahid Beheshti University of Medical Sciences and Health Services, Tehran, Iran

Abstract

Background and Aims: Electrochemical technology is an advanced oxidation processes (AOPs) in water treatment. Electrochemical efficiency is calculated based on consumed energy per kilogram of parameter removed that is the most important factor in electrochemical economics. The aim of this applied-analytical study is to choose the most suitable electrode for drinking water treatment by a batch electrochemical reactor with aluminum, copper, iron, and steel electrodes.

Materials and Methods: Samples of urban drinking water were introduced into an electrochemical reactor and the removal efficiency was studied as a function of time (5, 10, 20, and 40 min), electrode material (steel-iron, aluminium-aluminium, and copper-copper), and current density (0.01, 0.015, 0.02, and 0.03 mA/cm²). Electrochemical efficiency was calculated as consumed energy per Kilogram of removed parameter according to Faraday law. The concentration of sulfate, nitrate and calcium was determined according to 4500-SO₄²⁻ E, 4500NO₃⁻ B and 3500Ca B methods. Water samples were tested with ethical considerations according to the Helsinki guidelines

Results: Removal percentages of alkalinity, sulphate, nitrate, and calcium in 2 cm distance, current density 0.03 mA/cm², and contact time 20 min using steel-iron, aluminium-aluminium, and copper-copper electrodes were 44.3%, 35%, 26.3%, and 50.6%; 26%, 18%, 36.8%, and 40.7%; 32.8%, 33%, 32.6%, and 34/5%, respectively. The highest removal efficiencies of sulfate, nitrate and calcium were obtained by copper-copper (61.2%), aluminum-aluminum (66.3%) and steel-iron electrodes (58%), respectively.

Conclusion: The findings indicate that removal efficiency of calcium, nitrate, and sulphate is increased with increasing voltage and time. The best conditions for removal in three pair electrodes are obtained to be electrolysis time 40 min and voltage 30 volt.

Keywords: Electrochemical, Electrode material, Faraday law, Treatment, Urban drinking water

Please Cite this article as: Kashi G, Nayerloo N. Choosing the most suitable electrode for drinking water treatment by electrochemical process. Journal of Health in the Field. 2021; 9(1):68-79.

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, Islamic Azad University, Tehran Medical Sciences Branch, Tehran, Iran.

Email: g.kashi@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.22037/jhf.v9i1.34614>

Received: 31 May 2021

Accepted: 24 July 2021

انتخاب مناسب ترین الکتروود برای تصفیه آب آشامیدنی با فرآیند الکتروشیمیایی

گیتی کاشی^{۱،۲*}، نگین نیرلو^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران

۲- مرکز تحقیقات پالایش آب، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برنامه ریزی و مدیریت یادگیری الکترونیک در علوم پزشکی، دانشکده مدیریت و آموزش پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

زمینه و اهداف: فن آوری الکتروشیمی جزء فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته در تصفیه آب محسوب می شود. سودمندی سیستم الکتروشیمیایی برحسب انرژی مصرفی در کیلوگرم ماده حذف شده محاسبه می شود که مهم ترین عامل اقتصاد الکتروشیمیایی محسوب می شود. هدف این تحقیق کاربردی-تحلیلی انتخاب مناسب ترین الکتروود برای تصفیه آب آشامیدنی توسط راکتور ناپیوسته الکتروشیمیایی با الکترودهای استیل، آلومینیوم، آهن و مس است.

مواد و روش ها: نمونه آب آشامیدنی شهری وارد راکتور ناپیوسته الکتروشیمیایی شد و کارایی حذف در حالت مختلف متغیرهای زمان (۵-۴۰ دقیقه)، جنس الکترودها (استیل-آهن، آلومینیوم-آلومینیوم و مس-مس) و چگالی جریان (۰/۳-۰/۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع) مورد بررسی قرار گرفت. سودمندی سیستم الکتروشیمیایی براساس قانون فارادی برحسب انرژی مصرفی در کیلوگرم ماده حذف شده محاسبه گردید. تعیین غلظت سولفات، نیتрат و کلسیم طبق روش های Ca^{2+} B ۳۵۰۰ و NO_3^- B ۴۵۰۰، SO_4^{2-} E ۴۵۰۰، NO_3^- B ۴۵۰۰ و Ca^{2+} B ۳۵۰۰ انجام گرفت. نمونه های آب با رعایت ملاحظات اخلاقی براساس دستورالعمل هلسینکی آزمایش گردیدند.

یافته ها: درصد حذف کلیاتیت، سولفات، نیترات و کلسیم در فاصله ۲ سانتی متر و مدت ۲۰ دقیقه در چگالی جریان ۰/۰۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع در الکترودهای استیل-آهن برحسب درصد به ترتیب ۴۴/۳، ۳۵، ۲۶/۳ و ۵۰/۶، در الکترودهای آلومینیوم-آلومینیوم به ترتیب ۲۶، ۱۸، ۳۶/۸ و ۴۰/۷ و در الکترودهای مس-مس ۳۲/۸، ۳۳، ۳۲/۶ و ۳۴/۵ به دست آمد. بیش ترین حذف سولفات، نیترات و کلسیم به ترتیب با الکترودهای مس-مس (۶۱/۲ درصد)، آلومینیوم-آلومینیوم (۶۶/۳ درصد) و استیل-آهن (۵۸ درصد) به دست آمد.

نتیجه گیری: یافته ها نشان دادند که میزان حذف کلسیم، نیترات و سولفات از آب آشامیدنی با افزایش چگالی جریان و زمان افزایش می یابند. بهترین حذف کلسیم، نیترات و سولفات از آب آشامیدنی در سه سیستم الکتروشیمیایی بررسی شده مدت زمان ۴۰ دقیقه و چگالی جریان ۰/۰۲ به دست آمد.

کلید واژه ها: آب آشامیدنی شهری، الکتروشیمیایی، تصفیه، جنس الکتروود، قانون فارادی

* نویسنده مسئول: ایران، تهران، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط.

Email: g.kashi@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۵

مقدمه

فناوری الکتروشیمی، واحد امیدبخش، کارآمد، ایمن و پاک در تصفیه آب است که تغییرات شیمیایی در اثر واکنش‌های انتقال الکترون اتفاق می‌افتند [۱]. فناوری‌های الکتروشیمیایی، به عنوان روش دوست‌دار محیط زیست، جزء فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته محسوب می‌شوند [۲]. عوامل موثر بر عملکرد فرآیند الکتروشیمیایی شامل چگالی جریان، pH و هدایت الکتریکی هستند [۳]. چگالی جریان و جنس آند مصرفی از جمله مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده هزینه عملیاتی و راندمان حذف فرآیند تصفیه الکتروشیمیایی محسوب می‌شوند [۴]. تولید لجن کم، زمان تصفیه کوتاه، تنوع، راندمان زیاد انرژی، آرایش ساده رآکتور و عدم نیاز به تصفیه نهایی شیمیایی از جمله مزایای حذف به روش الکتروشیمیایی هستند [۵]. تصفیه الکترواکسیداسیون مستقیم آندی ناشی از انتقال الکترون‌ها در سطح الکترواد آند می‌باشد. عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی و تولید آلاینده‌های ثانویه کم‌تر از جمله مزایای الکترواکسیداسیون مستقیم هستند [۶]. رادیکال هیدروکسیل و اکسیژن به علت پتانسیل اکسیداسیون زیاد $2/8$ ولت [دارای نیمه‌عمر کوتاه می‌باشند و به اکسیدکننده‌های دیگر از قبیل هیدروکسید، پراکسید هیدروژن، ازن و اکسیژن تجزیه و ترکیبات آلی را اکسید می‌کنند] الکترواکسیداسیون مستقیم الکترواکسیداسیون غیرمستقیم آندی با استفاده از اکسیدان‌های تولید شده نظیر کلر، اسید هیپوکلرو و پراکسید هیدروژن/ازون دور از سطح الکترواد اتفاق می‌افتد [۷]. اکسیدکننده‌های اولیه [اکسیژن و کلر] و ثانویه [پراکسید هیدروژن، ازن، دی اکسید کلر] که از واپاشی رادیکال‌های تولیدشده دارای نیمه عمر طولانی دور از الکترواد تشکیل می‌شوند به فرآیند الکترواکسیداسیون غیرمستقیم ادامه می‌دهند [۸]. میزان حذف یا انحلال یون‌ها در سیستم الکتروشیمی توسط قانون فارادی توصیف می‌شود. مقدار کمی ماده تولید شده در الکترواد و مقدار کمی بار الکتریکی

عبوری با قانون فارادی ارتباط دارد [۹]. بسیاری از محققان در مورد عملکرد الکتروشیمیایی در حذف آلاینده‌ها از آب تحقیق نموده‌اند. برای مثال لی و مین در سال ۲۰۲۰ بر روی گوگردزدایی با فرآیند الکتروشیمی در سیستم اکسید کربن-سیلیس-آلومینا تحقیق نموده و متوجه شدند که مکانیسم گوگردزدایی ناشی از اکسیداسیون سولفید به گوگرد صفر است [۱۰]. کاشی در سال ۲۰۱۵ بر حذف سولفات توسط الکتروشیمیایی تحقیق نموده و متوجه شد که الکترواد روی-مس به عنوان بهترین الکترواد می‌تواند آنیون سولفات را از آب آشامیدنی جدا کند [۱۱]. یائو و همکاران در سال ۲۰۱۹ بر حذف نیترات از آب زیرزمینی توسط الکترواکسیداسیون غیرمستقیم با استفاده از الکترواد تیانیوم تحقیق نموده و متوجه شدند که چگالی جریان و pH موثرترین عوامل در حذف نیترات هستند [۱۲]. فقدان آب آشامیدنی سالم، کیفیت ضعیف منابع آب آشامیدنی سطحی و زیرزمینی ناشی از تخلیه پساب‌های تصفیه نشده و مصرف آب آلوده به ترکیبات آلی و معدنی شیمیایی سلامت افراد را تهدید می‌کند [۱۳]. تحقیق حاضر با توجه به نیاز حیاتی انسان به آب سالم فاقد ریسک بهداشتی، عدم حذف نیترات به عنوان استاندارد اولیه هنگام تصفیه متداول آب آشامیدنی در تصفیه‌خانه آب، ضرورت تحقق استانداردهای سخت‌گیرانه کیفیت آب آشامیدنی در نقطه مصرف و راه‌اندازی روش جدید تصفیه آب در نقطه مصرف در کشور صورت پذیرفت. کاربرد الکتروادهای ترکیبی و محاسبه هزینه الکتروشیمیایی به شکلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته در منابع دیگر گزارش نشده است. بنابراین هدف در این تحقیق کاربردی-تحلیلی انتخاب مناسب‌ترین الکترواد برای تصفیه آب آشامیدنی توسط راکتور ناپیوسته الکتروشیمیایی با الکتروادهای استیل، آلومینیوم، آهن و مس است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های آب از شبکه توزیع آب آشامیدنی تهران تهیه شد (جدول ۱). الکترودها پس از تمیز کردن با محلول دترجنت و آب، شستشو با آب مقطر توزین، خشک و در راکتور ناپیوسته تک قطبی قرار گرفتند [۱۴]. ظرف شیشه‌ای ۳۶۰ میلی‌لیتر (۶*۶*۱۰ سانتی‌متر)، حجم آب ۲۰۰ میلی‌لیتر، الکترودهای استیل، آهن، آلومینیوم و مس دارای مساحت موثر ۳۶ سانتی‌متر مربع، فاصله الکترودها از کف ۱ سانتی‌متر و فاصله الکترودها دو سانتی‌متر بود. منبع برق جریان مستقیم [ایران جهش، ساخت ایران] دارای توان الکتریکی بیشینه ۶۰ وات و همزن مغناطیسی با شدت ۱۰۰ دور بر دقیقه (مدل Aika، ساخت آلمان) برای یکنواخت نمودن نمونه آب بهره‌برداری گردید (شکل ۱). تمام آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه سانتی‌گراد) انجام شد [۱۵]. آزمایش‌ها ۳ بار تکرار و مقدار متوسط آن‌ها گزارش گردید. برای ارزیابی تاثیر جریان مستقیم بر فرایند حذف، نمونه‌ها در زمان واکنش (۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و در چگالی جریان‌های مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد نمونه‌های مورد بررسی با توجه به روش فاکتوریل ۳۲۴ نمونه به دست آمد. آزمایش‌های به عمل آمده شامل pH، حرارت، پتانسیل اکسایش و کاهش، سختی کلسیم، قلیائیت، وزن الکترودها و اکسیژن محلول نمونه‌ها بودند. اندازه‌گیری غلظت متغیرهای سختی کلسیم، قلیائیت و اکسیژن محلول پس از صاف کردن توسط کاغذ صافی واتمن ساخت کشور انگلستان با اندازه ۰/۴۵ میکرون با روش کمپلکسومتری (3500-Ca B)، تیتراسیون (2320 B) و الکتروکسیژن متر (4500-O G) مطابق دستورالعمل‌های کتاب روش‌های استاندارد انجام گرفت. اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش و کاهش (ORP)، pH و دما توسط pH/ORP متر (Hack، آمریکا) انجام شد (4500-H⁺ B و 2580 B). اندازه‌گیری وزن الکترودها با ترازوی

دیجیتالی انجام گرفت (Hack، آمریکا). اندازه‌گیری نیترات و سولفات توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Hach، DR 5000، آمریکا) انجام گرفت (4500-NO₃⁻ B در طول موج ۲۲۰ و ۲۷۵ نانومتر و 3500-SO₄²⁻ B در طول موج ۴۲۰ نانومتر) [۱۶]. راندمان حذف به وسیله رابطه [۱] محاسبه شد [۱۷]:

$$\text{Removal (\%)} = \left(1 - \frac{C_t}{C_{t_0}}\right) \times 100 \quad (1)$$

که: C_t و C_{t_0} به ترتیب غلظت پس از برقراری جریان در زمان t و در زمان ۰ است.

هزینه فرایند الکتروشیمیایی به وسیله الکتروکود مصرفی و انرژی الکتریکی مصرفی تعیین شد. هزینه بهره‌برداری سیستم الکتروشیمیایی برحسب ریال کیلووات ساعت بر کیلوگرم آلاینده حذفی از رابطه [۲] محاسبه شد [۱۸]:

$$\text{Operational cost} = C_{\text{energy}} + C_{\text{electrod}} \quad (2)$$

که: C_{energy} و C_{electrod} هزینه‌های انرژی الکتریکی مصرفی و الکتروکود مصرفی آند برحسب ریال بر کیلوگرم آلاینده حذفی است. مقدار انرژی مصرفی به وسیله رابطه [۳] محاسبه شد [۱۹]:

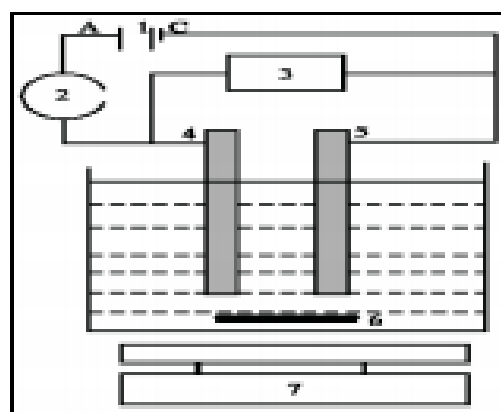
$$EE \left(\frac{kWh}{kg \text{ Parameter removed}} \right) = \frac{VIt \times 1000}{60 \times (C_{t_0} - C_t)} \quad (3)$$

V ولتاژ الکتریکی برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر، t زمان برحسب دقیقه، C_{t_0} غلظت پس از برقراری جریان در زمان ۰ و در زمان t است.

طراحی آزمایشات حذف با مدل تاگوچی (۴ متغیر طراحی با ۳ سطح) انجام شد. نتایج آزمایشات حذف با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۱ در اختلاف سطح معناداری ($P \text{ value} \leq 0/05$) مورد آنالیز قرار گرفت.

یافته‌ها

جدول ۲ اثر متغیرهای زمان، چگالی جریان و جنس الکترود بر میزان حذف پارامترهای آب آشامیدنی شهری به روش الکتروشیمیایی را نشان می‌دهند. همان‌طوری که در جدول مشاهده می‌شود کارایی فرآیند حذف در شرایط بهینه الکتروشیمیایی (pH معادل ۷/۱۴، فاصله ۲ سانتی‌متر، زمان ۲۰ دقیقه و چگالی جریان ۰/۰۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) با افزایش چگالی جریان و مدت زمان افزایش می‌یابد. کارایی فرآیند حذف سولفات، نیترات و کلسیم در شرایط بهینه الکتروشیمیایی به ترتیب در الکترودهای استیل-آهن، آلومینیوم-آلومینیوم و استیل-آهن بیش از دو الکترود دیگر است. تغییرات pH، پتانسیل اکسایش و کاهش و حرارت در زمان ۴۰ دقیقه و چگالی جریان ۰/۰۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در الکترودهای استیل-آهن به ترتیب ۱/۱۱ واحد، ۸۴۷ میلی‌ولت و ۷ درجه سانتی‌گراد، در الکترودهای آلومینیوم-آلومینیوم به ترتیب ۲/۵۶ واحد، ۶۹۲ میلی‌ولت و ۹/۶ درجه سانتی‌گراد و در الکترودهای مس-مس به ترتیب ۲/۴۰ واحد، ۴۲۵ میلی‌ولت و ۵/۷ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. نمودار ۱ سطح اهمیت متغیرهای طراحی راکتور براساس مدل طراحی آزمایشات باروش تاگوچی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح شماتیک راکتور ناپیوسته الکتروشیمیایی تک قطبی (۱- منبع تغذیه ۲- آمپر ۳- ولتاژ ۴- الکترود قطب منفی کاتد ۵- الکترود قطب مثبت آنود ۶- میله مغناطیسی ۷- همزن مغناطیسی)

Figure1- Schematic diagram of a unipolar electrochemical discontinuous reactor

جدول ۱ - مقادیر متوسط غلظت ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب شهری

Table1- Mean values of concentration of physicochemical properties of urban water

متغیر	واحد	مقدار	
		میانگین	انحراف معیار
پتانسیل اکسایش و کاهش	mV	۲۷۹	۰/۰۸
دما	C°	۱۹/۸	۰/۲۴
اکسیژن محلول	mg/l	۸/۰۵	۰/۴
نیترات	mg as N/l	۹/۵	۰/۵۷
pH	-	۷/۱۴	۰/۳۲
قلیائیت	mg as CaCO ₃ /l	۱۲۲	۰/۶۵
سولفات	mg/l	۹۳/۸	۰/۶
کلسیم	mg as CaCO ₃ /l	۱۶۲	۰/۱۶

جدول ۲- اثر جریان مستقیم در حذف عوامل فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی شهری

Table2- The effect of direct current on the removal of physical and chemical agents of urban drinking water

چگالی جریان [mA/cm ²]	عامل فیزیکی و شیمیایی	جنس الکترود											
		استیل-آهن				آلومینیوم-آلومینیوم				مس-مس			
		زمان [min]				زمان [min]				زمان [min]			
		۵	۱۰	۲۰	۴۰	۵	۱۰	۲۰	۴۰	۵	۱۰	۲۰	۴۰
۰/۰۱	پتانسیل اکسایش و کاهش	۴۶	۵	-۱۶۲	-۳۲۹	۳۲	-۳۳	-۱۲۶	-۲۵۰	۵۷	۳۸	-۱۶	-۶۰
	pH	۷/۲۸	۷/۶۶	۷/۷۲	۷/۷۸	۷/۲۶	۷/۳۲	۷/۴۸	۷/۶۹	۷/۲۷	۷/۵۵	۷/۶۸	۷/۷۱
	دما	۱۹/۹	۲۰/۴	۲۰/۵	۲۰/۶	۱۹/۹	۲۰/۰	۲۰/۹	۲۲/۰	۱۹/۹	۲۰/۰	۲۰/۱	۲۰/۵
	اکسیژن محلول	۴/۶۶	۴/۶۹	۴/۷۶	۴/۸۰	۴/۴۶	۳/۴۸	۳/۳۲	۲/۷۵	۴/۵۶	۴/۳۷	۳/۷۱	۳/۴۸
	قلیائیت	۱۱۶	۱۱۰	۹۰	۶۸	۱۱۶	۱۱۶	۱۱۶	۱۱۶	۱۱۶	۱۰۶	۱۰۰	۹۰
	سولفات	۸۲/۵	۸۲/۵	۷۹/۰	۷۶/۰	۸۲/۵	۸۲/۵	۸۲/۵	۸۲/۵	۸۲/۲	۷۸/۱	۷۵/۰	۷۲/۸
	نیترات	۹/۳	۹/۰	۸/۸	۸/۲	۹/۰	۸/۹	۸/۹	۷/۴	۹/۲	۹/۰	۸/۸	۷/۸
	کلسیم	۱۵۴	۱۴۴	۱۱۶	۹۰	۱۵۴	۱۴۳	۱۲۴	۱۰۰	۱۵۴	۱۵۰	۱۴۴	۱۳۴
	اختلاف وزن الکترود	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵
۰/۰۲	پتانسیل اکسایش و کاهش	-۲۳	-۱۵۴	-۴۳۶	-۴۸۸	-۳۲	-۳۳	-۱۲۶	-۲۵۰	-۳	-۴۳	-۸۴	-۱۱۰
	pH	۷/۴	۷/۵۷	۷/۷۸	۸/۰۹	۸/۱۰	۸/۲۶	۸/۶۶	۸/۶۶	۷/۵۰	۸/۱۰	۸/۳۱	۸/۶۷
	دما	۲۰/۴	۲۰/۷	۲۱/۴	۲۳/۵	۲۱/۴	۲۲/۹	۲۳/۹	۲۴/۵	۲۰/۴	۲۱/۰	۲۱/۴	۲۲/۲
	اکسیژن محلول	۵/۲۵	۶/۴۵	۶/۴۷	۷/۲	۳/۴۰	۲/۳۲	۲/۰۳	۱/۸۹	۴/۳۳	۳/۷۳	۳/۰۵	۲/۷۹
	قلیائیت	۱۱۰	۱۰۶	۸۶	۷۰	۱۱۰	۱۰۸	۱۰۵	۱۰۲	۱۱۴	۱۰۴	۸۲	۷۶
	سولفات	۸۰/۹	۸۷/۷	۶۶/۰	۶۲/۶	۸۲/۵	۸۲/۵	۸۲/۵	۸۲/۵	۷۲/۸	۷۱/۸	۶۸/۱	۴۷/۰
	نیترات	۹/۰	۸/۵	۸/۱	۷/۵	۸/۷	۸/۰	۶/۹	۴/۶	۸/۹	۸/۳	۷/۳	۶/۵
	کلسیم	۱۴۲	۱۳۰	۱۲۲	۱۱۰	۱۱۰	۱۰۴	۱۰۰	۷۴	۱۵۴	۱۴۰	۱۰۸	۹۸
	اختلاف وزن الکترود	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۸
۰/۰۳	پتانسیل اکسایش و کاهش	-۱۸۱	-۴۴۱	-۵۵۹	-۵۶۸	-۹۰	-۱۶۳	-۲۹۸	-۴۱۳	-۱۵	-۶۵	-۱۰۷	-۱۴۶
	pH	۷/۴۸	۷/۵۹	۸/۰۷	۸/۲۵	۸/۶۳	۹/۰۹	۹/۳۱	۹/۷۰	۷/۹۲	۸/۵۰	۹/۰۱	۹/۵۴
	دما	۲۲/۶	۲۳/۷	۲۵/۷	۲۶/۸	۲۲/۲	۲۳/۷	۲۶/۵	۲۹/۴	۲۰/۷	۲۱	۲۳/۱	۲۵/۵
	اکسیژن محلول	۶/۳	۶/۷۹	۵/۰	۹/۰۸	۳/۲۲	۱/۸۹	۱/۶۹	۱/۵۵	۴/۰۷	۳/۷۲	۳/۰۳	۲/۷۴
	قلیائیت	۱۱۰	۹۶	۶۸	۵۸	۱۰۴	۱۰۰	۹۰	۵۰	۱۱۲	۱۰۰	۸۲	۷۲
	سولفات	۷۲/۹	۶۷/۱	۶۰/۵	۵۴	۸۷/۷	۸۰/۶	۷۶/۸	۷۱/۰	۷۸/۱	۶۶/۹	۶۲/۴	۳۶/۴
	نیترات	۸/۵	۷/۸	۷/۰	۶/۳	۸/۷	۷/۵	۶/۰	۳/۲	۸/۶	۷/۶	۶/۴	۵/۶
	کلسیم	۱۴۰	۱۱۶	۸۰	۶۸	۱۰۴	۱۰۲	۹۶	۷۴	۱۵۴	۱۳۶	۱۰۶	۸۸
	اختلاف وزن الکترود	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۳۳

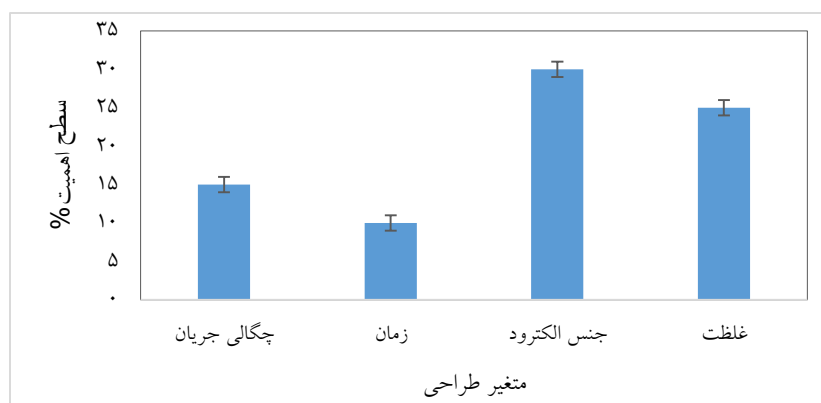
می‌دهد. کاهش وزن الکترود و هزینه الکترود مصرفی با افزایش چگالی جریان و زمان افزایش می‌یابد. جدول ۴ مقایسه آماری غلظت نیترات، سولفات و سختی کلسیم و متغیرهای چگالی جریان، زمان و جنس الکترود را نشان می‌دهد.

جدول ۳ هزینه انرژی برحسب ریال کیلووات ساعت بر کیلوگرم آلاینده حذفی و الکترود مصرفی استیل-آهن، آلومینیوم-آلومینیوم و مس-مس برحسب ریال در کیلوگرم را در شرایط بهینه الکتروشیمیایی (pH معادل ۷/۱۴، فاصله ۲ سانتی‌متر، زمان ۲۰ دقیقه و چگالی جریان ۰/۰۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) نشان

جدول ۳- میانگین هزینه فرآیند الکتروشیمیایی (الکترود مصرفی و انرژی الکتریکی مصرفی) آب شهری برای حذف عوامل شیمیایی آب آشامیدنی در زمان ۲۰ دقیقه، چگالی جریان 0.02 mA/cm^2 و الکترودهای مختلف

Table3- The mean cost of electrochemical process [consumed electrode and consumed electrical energy] of urban water to remove chemical agents of drinking water in 20 minutes, current density of 0.02 mA/cm^2 and different electrodes

عامل شیمیایی	جنس الکترود				
	استیل -آهن		آلومینیوم -آلومینیوم		مس-مس
	هزینه [ریال]				
	انرژی [KWh/kg]	الکترود [ریال بر کیلوگرم]	انرژی [KWh/kg]	الکترود [ریال بر کیلوگرم]	انرژی [KWh/kg]
	μ±S.D.	μ±S.D.	μ±S.D.	μ±S.D.	μ±S.D.
فلئائیت	۱۸۱۲±۰/۸۱	۳/۳ ± ۰/۰۶	۱۶۱۰ ± ۰/۱۶	۶/۶ ± ۰/۰۳	۲۳۱۹ ± ۰/۷۳
سولفات	۲۹۱۳ ±۰/۰۴	۳/۳ ± ۰/۰۶	۵۰۸۶ ± ۰/۲۴	۶/۶ ± ۰/۰۳	۲۰۲۰ ± ۰/۸۱
نیترات	۳۶۲۳۴ ± ۲/۰۴	۳/۳ ± ۰/۰۶	۱۸۴۰۵ ± ۰/۶	۶/۶ ± ۰/۰۳	۲۹۷۳۱ ± ۱/۲۲
کلسیم	۱۲۳۳ ± ۰/۳۲	۳/۳ ± ۰/۰۶	۱۳۱۸ ± ۰/۰۸	۶/۶ ± ۰/۰۳	۱۵۶۷ ± ۰/۸۹



نمودار ۱- متغیر طراحی و سطح اهمیت در طراحی آزمایشات (مدل تاگوچی)

Graph 1- Design variables and the level of importance in designing experiments [Taghuchi experimental design]

شرایط بهینه انرژی مصرفی ۰/۷۴۲ کیلووات ساعت بر مترمکعب، را به ترتیب ۸۸/۹ و ۹۱/۸ درصد در رآکتور الکتروشیمیایی دارای الکترودهای استیل کربن اعلام کردند [۲۲]. در این مطالعه؟؟ گستره هزینه انرژی مصرفی ۳۶۲۳۴-۱۲۳۳ کیلووات ساعت بر کیلوگرم آلاینده حذف شده (۵/۵۷۱-۰/۰۲۱ کیلووات ساعت بر مترمکعب) مشاهده شد. گستره انرژی مصرفی مزبور در رآکتور الکتروشیمیایی با الکترودهای مختلف با گستره مرجع (۵۸-۰/۰۰۲) اعلام شده همخوانی دارد. انرژی مصرفی در رآکتور الکتروشیمی با مقطع استوانه کم تر از مقطع مستطیل از سوی ناپلز-آرماتا و همکاران در سال ۲۰۲۱ اعلام شده است و افزودن الکترولیت سولفات سدیم برای کاهش انرژی مصرفی از سوی کارشیا-گومز و ۲۰۱۴ پیشنهاد شده است [۲۳، ۲۴]. می توان نتیجه گیری نمود کاهش هزینه رآکتور الکتروشیمیایی وابسته به جریان الکتریکی، زمان و جنس الکتروند مصرفی است و پیش بینی می شود که انتخاب بهینه متغیرهای مزبور به کاهش چگالی جریان مورد نیاز برای فرآیند منجر می شود. پیش آزمونها نشان دادند که رسوب الکتروند با تغییر قطبیت آن کاهش می یابد. کاشی متوسط کاهش وزن آند مصرفی از ۲ به ۲۲ میلی گرم را با افزایش چگالی جریان از ۱ به ۸ میلی آمپر بر سانتی متر مربع در سیستم الکتروشیمیایی برای حذف سولفات در سال ۲۰۱۵ اعلام نمود [۲۵]. افزایش چگالی جریان از ۰/۰۱ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و زمان از ۵ دقیقه به ۰/۰۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و ۴۰ دقیقه به کاهش گستره ثابت میزان تجزیه از ۰/۹۳ (سرعت نیمه واکنش ۰/۷۴ دقیقه) به ۰/۳۳ (سرعت نیمه واکنش ۱/۲ دقیقه) بر دقیقه منجر می شود. زهو و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان دادند افزایش چگالی جریان از ۲ به ۱۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع به کاهش ثابت میزان تجزیه استاودین از ۰/۲۷ به ۰/۰۵ منجر می شود [۲۶]. افزایش کاهش وزن الکتروند و تولید حباب های گاز اکسیژن و هیدروژن تولید شده به ترتیب در سطح آند و کاتد

جدول ۴- مقایسه آماری غلظت نترات، سولفات و سختی

کلسیم با متغیرهای مورد بررسی

Table4- Statistical comparison of nitrate, sulfate and calcium hardness concentration with the studied variables

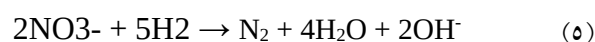
متغیر	R ²	ANOVA [P-Value]	F
چگالی جریان	۰/۸۰۹	[*S] ۰/۰۰۱	۲۷/۵
زمان	۰/۶۱۶	[S] ۰/۰۰۱	۱۸/۷
جنس	۰/۹۹۱	[S] ۰/۰۰۱	۵۳/۸

* ارتباط آماری میان متغیرهای مورد بررسی معنادار است

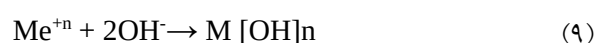
بحث

جنس الکتروند در حذف و کاهش عوامل فیزیکی و شیمیایی از آب آشامیدنی تاثیر دارد. افزایش چگالی جریان و زمان به افزایش کارایی حذف نترات، سولفات، کلسیم و قلیائیت از آب آشامیدنی شهری در الکترودهای استیل-آهن، آلومینیوم-آلومینیوم و مس-مس منجر می شود. افزایش چگالی جریان و زمان به علت تولید سریع تر فرآورده ناشی از الکتروشیمیایی نظیر هیدروژن در کاتد و افزایش شرایط احیاء کنندگی به افزایش کارایی حذف منجر می شود. پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان دادند افزایش زمان از ۰ به ۱۸۰ دقیقه به افزایش راندمان حذف ۱ گرم در لیتر کروم از ۰ به ۸۶/۴۵ درصد منجر می شود [۲۰]. افزایش چگالی جریان به افزایش راندمان حذف متغیرها منجر شده است. استیتر و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان دادند افزایش چگالی جریان از ۱۰ به ۲۵ میلی آمپر بر سانتی متر مربع به افزایش حذف رنگ آمارانت از ۳۰ به ۵۰ درصد در سیستم الکتروشیمیایی با استفاده از الکتروند پورن داپ شده با نقره منجر می شود [۲۱]. هزینه های فرایند مطابق قانون فارادی بررسی شد و مشخص گردید که هزینه های فرایند الکتروشیمیایی با افزایش مصرف انرژی الکتریکی و انحلال فلز زیاد می شود. مویاس و همکاران در سال ۲۰۱۹ راندمان حذف هر مون های آلزاستون استوفینید و استرادیول انانتات را در

با افزایش چگالی جریان در نمونه آب مشاهده شد. آمبولودی و همکاران در سال ۲۰۱۳ افزایش تولید گاز اکسیژن در سطح آند را با افزایش چگالی جریان در حذف داروی ایوبروفن در سیستم الکتروشیمیایی گزارش کردند [۲۷]. کاهش غلظت نیترات در چگالی جریان صفر میلی آمپر بر سانتی متر مربع رخ نداده است و بنابراین مکانیسم تجزیه ناشی از جذب و هیدرولیز متفی است. پیش آزمون ها نشان دادند که غلظت گاز نیتروژن هنگام الکتروشیمیایی به علت الکترون های اهدایی زیاده تر افزایش یافته است. چوهان و سریواستاوا در سال ۲۰۲۱ مطالعه ای بر تجزیه نیترات به صورت احیای کاتدی با استفاده از الکتروکاتولیز آلومینیوم-تیتانیوم/اکسیدرویدروم انجام دادند [۲۸]. بنابراین مکانیسم تجزیه نیترات به صورت احیای کاتدی تولید آنیون هیدروکسید و تولید گاز هیدروژن و مصرف هیدروژن تولیدی برای دنیتریفیکاسیون و احیای کاتدی نیترات پیشنهاد می شود (رابطه ۴ و ۵):

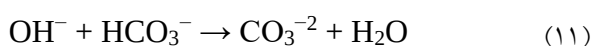


مکانیسم حذف سولفات ناشی از جذب و ترسیب می باشد. این یافته با تحقیق انجام شده توسط حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مورد حذف سولفات با الکتروکاتولیز آهن همخوانی دارد [۲۹]. بنابراین مکانیسم حذف سولفات به صورت اکسایش آندی فلز همراه تولید اکسیژن و احیای کاتدی همراه تولید گاز هیدروژن و هیدروکسید فلزی پیشنهاد می شود (رابطه ۶-۹):



مکانیسم حذف کلسیم ناشی از قلیائیت زیاد و ترسیب کربنات کلسیم می باشد [۳۰]. بنابراین مکانیسم حذف کلسیم به صورت

احیای کاتدی تولید آنیون هیدروکسید همراه تولید گاز هیدروژن، تبدیل بی کربنات به کربنات به علت قلیائیت زیاد و ترسیب کلسیم به صورت کربنات کلسیم در نزدیکی کاتد پیشنهاد می شود (رابطه ۴، ۱۰، ۱۱ و ۱۲):



افزایش حرارت از ۱۹/۸ به ۲۹/۲۹ درجه سانتی گراد با افزایش چگالی جریان از ۰ به ۰/۰۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع به کاهش راندمان حذف منجر می شود و وابسته به جنس الکتروکاتولیز می باشد. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ افزایش دما از ۲۵/۳ به ۴۶/۴ درجه سانتی گراد با افزایش چگالی جریان از ۵ به ۳۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع را گزارش نمودند [۳۱]. افزایش pH از ۷/۱۹ به ۹/۵۴ با افزایش چگالی جریان از ۰ به ۰/۰۳ میلی آمپر بر سانتی متر مربع در فرآیند الکتروشیمی وابسته به جنس الکتروکاتولیز و چگالی جریان است و ناشی از آزاد شدن دی اکسید کربن و تولید هیدروژن در کاتد است. آجی و همکاران در سال ۲۰۱۹ افزایش pH را هنگام کاربرد الکتروکاتولیز آهن بیش از الکتروکاتولیز آلومینیوم با افزایش چگالی جریان نشان دادند [۳۲]. بررسی و مقایسه کارایی حذف همزمان عوامل فیزیکی و شیمیایی از آب آشامیدنی شهری در سه سیستم الکتروشیمیایی در شرایط بهینه الکتروشیمیایی (چگالی جریان ۰/۰۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، زمان ۲۰ دقیقه، فاصله ۲ سانتی متر بین الکتروکاتولیزها و نیاز آبی ۴۰ لیتر در روز برای خانواده چهار نفری برای شرب و پخت و پز) نشان می دهد که بیشترین حذف نیترات (۶۶/۳ درصد) (کمترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم (کمترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) و کمترین حذف نیترات (۳۳/۷ درصد) (بیشترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار

الکترودهای ترکیبی، ارایه مکانیسم، شناسایی سطح اهمیت متغیرهای تأثیرگذار بر راندمان حذف و بررسی و مقایسه همزمان ثابت میزان تجزیه متغیرها از جمله نقطه قوت و نوآوری تحقیق محسوب می‌شود. عدم بررسی راندمان حذف فرآیند الکتروشیمیایی در حضور متغیرهای شیمیایی دیگر کیفیت آب از قبیل منیزیم، سدیم و پتاسیم و فسفات از جمله محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود؛ بنابراین برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود اثر تداخل این متغیرها بر راندمان حذف و اثر تشدیدکنندگی رآکتور الکتروشیمیایی ناپیوسته با انواع الکترودهای دیگر نیز بررسی گردد.

نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت، صنعتی شدن و شهرنشینی از جمله عوامل کاهش کیفیت آب محسوب می‌شوند [۳۴]. فرایند الکتروشیمی بدون استفاده از مواد شیمیایی به عنوان فرایند پاک و دوستدار محیط محسوب می‌شود [۳۵]. بررسی و مقایسه کارایی حذف همزمان عوامل فیزیکی و شیمیایی از آب آشامیدنی شهری در سه سیستم الکتروشیمیایی در شرایط بهینه الکتروشیمیایی [چگالی جریان ۰/۰۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، زمان ۲۰ دقیقه، فاصله ۲ سانتی‌متر بین الکترودها و نیاز آبی ۴۰ لیتر در روز برای خانواده چهار نفری برای شرب و پخت و پز نشان می‌دهد که بیش‌ترین حذف نیترات (کم‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم و کم‌ترین حذف نیترات (بیش‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم استیل-آهن مشاهده می‌شود. بیش‌ترین حذف سولفات (کم‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم مس-مس و کم‌ترین حذف (بیش‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم مشاهده می‌شود. بیش‌ترین حذف کلسیم (کم‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم استیل-آهن و کم‌ترین حذف (بیش‌ترین هزینه انرژی مصرفی) در سیستم مس-مس مشاهده می‌شود. بیش‌ترین تولید اکسیژن در سیستم استیل-آهن مشاهده می‌شود. بیش‌ترین

نفری) در سیستم استیل-آهن مشاهده می‌شود. بیش‌ترین حذف سولفات (۶۱/۲ درصد) (کم‌ترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) در سیستم مس-مس و کم‌ترین حذف (۲۴/۳ درصد) (بیش‌ترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم مشاهده می‌شود. بیش‌ترین حذف کلسیم (۵۸/۰ درصد) (کم‌ترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) در سیستم استیل-آهن و کم‌ترین حذف (۴۵/۷ درصد) (بیش‌ترین هزینه انرژی مصرفی برحسب ریال برای خانواده چهار نفری) در سیستم مس-مس مشاهده می‌شود. بیش‌ترین تولید اکسیژن (۹/۰۸ میلی گرم بر لیتر) در سیستم استیل-آهن مشاهده می‌شود. بیش‌ترین افزایش حرارت (۲۹/۴ درجه سانتی‌گراد) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم و کم‌ترین افزایش حرارت (۲۵/۵ درجه سانتی‌گراد) در سیستم مس-مس مشاهده می‌شود. بیش‌ترین افزایش pH (۹/۷۰) در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم و کم‌ترین افزایش pH (۸/۲۵) در سیستم استیل-آهن مشاهده می‌شود. بیش‌ترین کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش (۵۶۸ - میلی ولت) در سیستم استیل-آهن و کم‌ترین کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش (۱۴۶ -) در سیستم مس-مس مشاهده می‌شود. متغیر اصلی تأثیرگذار بر راندمان حذف براساس مدل طراحی آزمایشات با روش تاگوچی را می‌توان به جنس الکتروود (۳۰٪) نسبت داد. شرایط بهینه رآکتور الکتروشیمیایی برای کمینه مصرف انرژی و بیشینه حذف نیترات، سولفات و سختی کلسیم با مدل طراحی آزمایشات چگالی جریان ۰/۰۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان ۲۰ دقیقه می‌باشد. ویرندرا و همکاران در سال ۲۰۱۵ شرایط بهینه حذف فلوراید براساس کمینه مصرف انرژی و بیشینه حذف را زمان ۲۰ دقیقه، چگالی جریان ۰/۰۰۶۴ آمپر بر سانتی‌متر مربع و فاصله الکتروود ۱/۲ سانتی‌متر اعلام نمودند [۳۳]. نتایج مدل طراحی آزمایشات با روش تاگوچی با نتایج آنالیز آماری (SPSS) مطابقت دارند. بررسی هزینه فرآیند، کاربرد

نقطه مصرف، کنترل آلودگی آب در نقطه مصرف و بهبود کیفیت آب مصرفی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه با عنوان بررسی راندمان حذف عوامل فیزیکی و شیمیایی با استفاده از روش الکتروشیمیایی در سال ۹۸-۹۹ می باشد. نویسندگان مقاله از حمایت آزمایشگاهی گروه مهندسی بهداشت محیط و مرکز تحقیقات پالایش آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم پزشکی تهران تشکر و قدردانی می نمایند.

References

- 1- Malinovic B, Pavlovic M, Bunic S. Treatment of copper cyanide wastewaters in electrochemical batch reactor with stainless steel electrodes. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 2014; 15(4):1574-1582.
- 2- Martinez-Huitle CA. Environment-friendly electrochemical processes. *Materials* 2021; 14(6):1548. doi.org/10.3390/ma14061548.
- 3- Kashi G, Nasehi N. Fluoride removal from drinking water using the combination of electro and chemical coagulation processes. *Journal of Health in the Field* 2014; 2(2):43-52 (In Persian).
- 4- Ghimire U, Jang M, Jung SP, Park D, Park SJ, Yu H, oh S. Electrochemical removal of ammonium nitrogen and COD of domestic wastewater using platinum coated titanium as an anode electrode. *Energies* 2019; 12(5):883.
- 5- Kashi G. Optimization of electrochemical process for phenanthrene removal from aqueous medium by Taguchi. *Toxicological & Environmental Chemistry* 2017; 99(5-6):772-82.
- 6- Särkkä H, Bhatnagar A, Sillanpää M. Recent developments of electro-oxidation in water treatment—a review. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2015; 754:46-56.

- افزایش حرارت در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم و کم ترین افزایش حرارت در سیستم مس-مس مشاهده می شود. بیش ترین افزایش pH در سیستم آلومینیوم-آلومینیوم و کم ترین افزایش pH در سیستم استیل-آهن مشاهده می شود. بیش ترین کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش در سیستم استیل-آهن و کم ترین کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش در سیستم مس-مس مشاهده می شود. نتایج این پژوهش بیان کننده این است که کارایی حذف فرآیند الکتروشیمیایی عمدتاً وابسته به متغیرهای بهره برداری از قبیل pH، چگالی جریان، جنس الکترود و زمان است. شرایط بهینه بهره برداری از رآکتور ناپیوسته الکتروشیمیایی نک قطبی چگالی جریان ۰/۰۲ میلی آمپر بر سانتی متر مربع، زمان ۲۰ دقیقه، فاصله ۲ سانتی متر بین الکترودها و pH معادل ۷/۱۴ برای تصفیه آب در
- 7- Bergmann M, Koparal A, Iourtchouk T. Electrochemical advanced oxidation processes, formation of halogenate and perhalogenate species: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2014; 44(4):348-90.
 - 8- Barrera-Díaz C, Canizares P, Fernández F, Natividad R, Rodrigo MA. Electrochemical advanced oxidation processes: an overview of the current applications to actual industrial effluents. *Journal of the Mexican Chemical Society* 2014; 58(3):256-75.
 - 9- Melaku S, Gebeyehu Z, Dabke RB. Feasibility of using an electrolysis cell for quantification of the electrolytic products of water from gravimetric measurement. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 2018. doi.org/10.1155/2018/2681796.
 - 10- Lee SH, Min DJ. A Novel electrochemical process for desulfurization in the CaO-SiO₂-Al₂O₃ system. *Materials* 2020; 13(11):2478. doi.org/10.3390/ma13112478.
 - 11- Kashi G, Hydarian N. Optimization electrophotocatalytic removal of sulfanilamide from aqueous water by Taguchi model. *Journal of Mathematics* 2019; 6(10):50-3.
 - 12- Yao F, Yang Q, Zhong Y, Shu X, Chen F, Sun J, et al. Indirect electrochemical reduction of nitrate in water using zero-valent titanium anode: Factors,

- kinetics, and mechanism. *Water Research* 2019; 157:191-200.
- 13- Procházka P, Hönig V, Maitah M, Pljučarská I, Kleindienst J. Evaluation of water scarcity in selected countries of the Middle East. *Water* 2018; 10(10):1482. doi.org/10.3390/w10101482.
- 14- Alinnejad Sh, Kashi G, Khezri Sm, Mashinchian A. Removal of Fluoride from Drinking Water Using an Electrocoagulation Reactor, Batch Experiments. *Safety Promotion and Injury Prevention* 2014;2(1):47-54 (In Persian).
- 15- Kashi G, Potkee M. Investigation Electro-photocatalytic Removal of Acetaminophen from Drinking Water. *Safety Promotion and Injury Prevention* 2016; 4(3):175-184 (In Persian).
- 16- Baird R, Eaton A, Rice E, Bridgewater L. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association, United State of America; 2017.
- 17- Giti K, Narges J. Optimization electrophotocatalytic removal of acid red 18 from drinking water by the Taguchi model. *Bulgarian Chemical Communications* 2015; 47:179-86.
- 18- Elabbas S, Ouazzani N, Mandi L, Berrekhis F, Perdicakis M, Pontvianne S, et al. Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials* 2016; 319:69-77.
- 19- AlJaberi FY. Operating cost analysis of a concentric aluminum tubes electrodes electrocoagulation reactor. *Heliyon* 2019; 5(8):e02307. doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02307.
- 20- Peng H, Leng Y, Guo J. Electrochemical removal of chromium [VI] from wastewater. *Applied Sciences* 2019; 9(6):1156.
- 21- Steter JR, Barros WR, Lanza MR, Motheo AJ. Electrochemical and sonoelectrochemical processes applied to amaranth dye degradation. *Chemosphere* 2014; 117:200-07.
- 22- Morais RL, Garcia LF, Thomaz DV, Lobón GS, Rodrigues MF, Vaz BG, et al. Electrochemical removal of algestone acetophenide and estradiol enanthate in real industrial wastewater. *International Journal of Electrochemical Sciences* 2019; 14:5856-67.
- 23- Nápoles-Armenta J, Vidales-Contreras JA, Leyva-Soto LA, Meza-Escalante ER, Díaz-Tenorio LM, García-Gómez C, et al. The Influence of the Configuration of Two Electrochemical Reactors on the Process of Removing Atrazine from Water. *Sustainability* 2021; 13(9):5267.
- 24- García-Gómez C, Drogui P, Zaviska F, Seyhi B, Gortáres-Moroyoqui P, Buelna G, et al. Experimental design methodology applied to electrochemical oxidation of carbamazepine using Ti/PbO₂ and Ti/BDD electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2014; 732:1-10.
- 25- Kashi G. Optimization of electrochemical process for removing sulphate from drinking water by Taguchi model. *International Journal of Current Research* 2015; 7(6):17409-14.
- 26- Zhou C, Wang Y, Chen J, Niu J. Porous Ti/SnO₂-Sb anode as reactive electrochemical membrane for removing trace antiretroviral drug stavudine from wastewater. *Environment international* 2019; 133:105157. doi.org/10.1016/j.envint.2019.105157.
- 27- Ambuludi SL, Panizza M, Oturan N, Özcan A, Oturan MA. Kinetic behavior of anti-inflammatory drug ibuprofen in aqueous medium during its degradation by electrochemical advanced oxidation. *Environmental Science and Pollution Research* 2013; 20(4):2381-89.
- 28- Chauhan R, Srivastava VC. Superior reduction of nitrate with simultaneous oxidation of intermediates and enhanced nitrogen gas selectivity via novel electrochemical treatment. *Process Safety and Environmental Protection* 2021; 147:245-58.
- 29- Hossini H, Rezaee A, Shirmardi M, Naeimabadi A. Sulfate removal from wastewater using electrocoagulation process: evaluation of effective parameters and costs. *Journal of North Khorasan University of Medical Sciences* 2015; 6(4):787-96 (In persian).
- 30- Resan Kalash K, N Ghazi I, A Abdul-Majeed M. Hardness removal from drinking water using electrochemical cell. *Engineering and Technology Journal* 2015; 33(1):78-89.
- 31- Huang W, Li M, Zhang B, Feng C, Lei X, Xu B. Influence of operating conditions on electrochemical reduction of nitrate in groundwater. *Water Environment Research* 2013; 85(3):224-31.

- 32- Prasetyanigrum A, Jos B, Dharmawan Ym Praptyana IR. The effect of pH and current density on electro-coagulation process for degradation of chromium in plating industrial wastewater. *Journal of Physics: Conference Series* 2019; 1295(1):012064. doi.org/10.1088/1742-6596/1295/1/012064.
- 33- Jadhao VK, Kodape S, Junghare K. Optimization of electrocoagulation process for fluoride removal: a blending approach using gypsum plaster rich wastewater. *Sustainable Environment Research* 2019; 29(1):1-9.
- 34- Ebrahimi E, Asadi H, Farhangi MB, Ashrafzadeh A. Assessment of Spatio-temporal variations in contamination, sediment and water quality index in Pasikhan River, Guilan Province. *Journal of Health in the Field* 2020; 8(1):32-50 (In Persian).
- 35- Samarghandi MR, Shahbazi Z, Bahadori R, Mehralipour J, Miveh ZA. The survey of Ultrasound–Electrocoagulation process in removal of Ciprofloxacin from aqueous through central composite design. *Journal of Health in the Field* 2018; 6(1):9-19 (In Persian).