

Introducing and Evaluating a New Model of Rotary Reactor in Nitrate Removal from Aqueous Environments by Electrocoagulation Method

Riahi S^{*1}, Ayyoubzadeh S.A², Samadi-Boroujeni H³, Moussavi Gh⁴

1. Ph.D. Student, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Dept. of Water Engineering, Shahrekord Univ., Chahmahal Bakhtiari, Iran

4. Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* *Corresponding author.* Tel: +989120801399, Fax: +982148292578, E-mail: saleh.riahi@ut.ac.ir

Received: Feb 19, 2019 Accepted: Oct 22, 2019

ABSTRACT

Background & objectives: Nitrate contamination of drinking water is a common problem in many parts of the world that poses a serious threat to public health and environment. In this research, the performance of a new rotary electrocoagulation reactor model for removal of nitrate in presence or absence of turbidity has been investigated.

Methods: In this study, aluminum and iron electrodes were analyzed in parallel and monopolar arrangement. At each test time, a sample of 370 liters was prepared and the effects of operating parameters such as initial nitrate concentration, current density, annular reactor speed, optimum time, electrode materials and presence of turbidity on nitrate removal were evaluated.

Results: The results indicated that the optimum utilization parameters were material of aluminum electrode, current density of 22.8 A/m^2 , annular reactor speed of 13.3 rpm and optimum time of 90 min, under which removal efficiency was 95.7%. The presence of turbidity has decreasing effect on nitrate removal and at nitrate concentration of 225 mg and with increasing in turbidity, the removal efficiency decreased from 81% to 48%. For aluminum electrode, the consumed energy in optimum utilization condition was 0.74 kWh/m^3 .

Conclusion: The results of this study showed that the introduced batch rotary reactor model was able to remove the high nitrate content from aquatic environments with ease of use and this model is recommended to be used for drinking water treatment plants.

Keywords: Electrocoagulation; Nitrate; Turbidity; Pollution Treatment; Batch Rotary Reactor Model

معرفی و ارزیابی مدل جدید راکتور دوار در حذف نیترات از محیط‌های آبی با استفاده از روش انعقادالکتریکی

صالح ریاحی^{۱*}، سید علی ایوب‌زاده^۲، حسین صمدی بروجنی^۳، سید غلام‌رضا موسوی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۴. استاد گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۹۱۲۰۸۰۱۳۹۹ فکس: ۰۲۱۴۸۲۹۲۵۷۸ ایمیل: saleh.riahi@ut.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: حذف نیترات از منابع آب شرب یکی از مشکلات رایج در بسیاری از نقاط جهان بوده که به عنوان تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست محسوب می‌گردد. در این پژوهش عملکرد مدل جدید راکتور دوار با استفاده از روش انعقاد الکتریکی در رابطه با حذف نیترات در شرایط حضور و عدم حضور کدورت، مورد ارزیابی قرار گرفته است. **روش کار:** در این تحقیق دو الکتروود آلومینیوم و آهن به صورت موازی و چیدمان تک قطبی مورد بررسی قرار گرفت. در هر بار آزمایش نمونه‌ای به حجم ۳۷۰ لیتر تهیه شده و پارامترهای بهره‌برداری از جمله غلظت اولیه نیترات، دانسیته جریان، سرعت چرخش راکتور، زمان بهینه، و اثر حضور کدورت در جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. **یافته‌ها:** نتایج این تحقیق نشان داد که پارامترهای بهینه بهره‌برداری شامل جنس الکتروود آلومینیومی، زمان بهینه ۹۰ دقیقه، سرعت چرخش ۸/۲ rpm، شدت جریان $22/8 A/m^2$ ، و فاصله الکتروود ۳ سانتی‌متر می‌باشد. بر این اساس بالاترین میزان حذف نیترات در شرایط بهینه برابر با ۹۵/۷ درصد برآورد گردید. افزایش میزان کدورت جریان موجب کاهش راندمان حذف نیترات گردیده، به طوری که برای غلظت اولیه نیترات ۲۲۵ میلی‌گرم، راندمان حذف نیترات با افزایش کدورت از ۸۱ به ۴۸ درصد کاهش یافت. میزان انرژی مصرفی در شرایط بهینه برابر با $0/74 kWh/m^3$ بدست آمد. **نتیجه‌گیری:** نتایج این تحقیق نشان داد که مدل راکتور دوار ناپیوسته معرفی شده ضمن سهولت کاربری قادر به حذف بالای نیترات جریان یافته از محیط‌های آبی بوده و کاربرد این مدل جهت استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب شرب توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: انعقاد الکتریکی، نیترات، کدورت، تصفیه آلاینده، مدل راکتور دوار ناپیوسته

پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

دریافت: ۹۷/۱۱/۳۰

مقدمه

آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی به نیترات (NO_3^-)، یکی از جدی‌ترین معضلات در ارتباط با سلامت و محیط زیست می‌باشد. استفاده گسترده از سموم کشاورزی و تولید روزافزون فاضلاب‌های

انسانی، حیوانی و صنعتی، موجب افزایش غلظت نیترات در منابع آب گردیده است (۱،۲). بر اساس معیارهای سلامت معرفی شده توسط سازمان بهداشت جهانی، حداکثر میزان مجاز غلظت نیترات و نیتريت در منابع آب شرب، برابر ۵۰ میلی‌گرم بر

لیتر غلظت NO_3 و ۳ میلی گرم بر لیتر غلظت NO_2 ارائه شده است (۳).

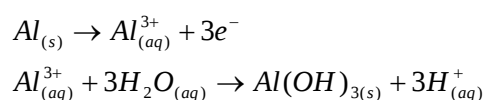
روش انعقاد الکتریکی یکی از روش‌های تصفیه فیزیکی-شیمیایی است که با انحلال الکتروود آند، لخته‌سازی و در نهایت حذف آلاینده‌ها موجب افزایش کیفیت آب می‌گردد (۴). این روش طی دهه‌های اخیر به عنوان فرایندی موثر در حذف محدوده وسیعی از آلاینده‌ها از جمله فاضلاب‌های روغنی (۵)، نساجی‌ها (۶)، صنایع (۷)، فلزات سنگین (۸)، فسفات (۹) و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود فقدان یک رویکرد سیستماتیک در رابطه با طراحی راکتور مورد استفاده در این روش، اجرای آن را با محدودیت مواجه کرده است (۱۰).

روش انعقاد الکتریکی یکی از روش‌های تصفیه نیتрат می‌باشد، که با تبدیل یون‌های نیترات به نیتريت و سرانجام به گاز نیتروژن موجب حذف آن می‌گردد (۱۱). زمانی که الکتروودها آهن و آلومینیوم به عنوان آند مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیترات با جذب به سطوح هیدروکسید فلز آزاد شده از الکتروودها، از محیط جریان حذف می‌گردد (۱۲، ۴).

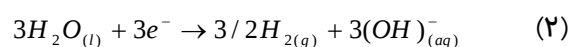
در روش انعقاد و شناورسازی الکتریکی هنگامی که یک پتانسیل از منبع تغذیه خارجی به کار گرفته می‌شود، مواد آند تحت اکسایش قرار گرفته و مواد کاتدی با رسوب فلزات عنصری تحت کاهش یا تقلیل قرار می‌گیرند. به عنوان مثال واکنش‌های الکتروشیمیایی با فلز آلومینیوم به عنوان الکتروود به شرح زیر خلاصه می‌شود (۱۳).

در آند:

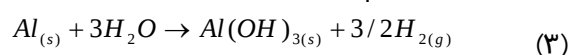
(۱)



در کاتد:



و به طور کل داریم:



انحلال الکترولیتی آند آلومینیوم در طول واکنش بالا تولید گونه‌های مونومری و پلیمری می‌نماید، مانند Al^{3+} و OH^{-} که به $\text{Al}(\text{OH})_3$ تبدیل شده است. لخته‌های $\text{Al}(\text{OH})_3$ دارای سطح موثر بالایی بوده و با جذب ذرات نیترات و به دام انداختن آنها موجب حذف نیترات از محیط می‌گردند (۱۴).

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه حذف نیترات با استفاده از روش انعقاد الکتریکی می‌توان به تحقیق انجام شده توسط رضوی و همکاران اشاره کرد، در این تحقیق حذف همزمان فسفات، نیترات و COD از پساب رختشوی‌خانه با استفاده از الکتروود آهنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین کارایی حذف آلاینده‌ها در pH برابر ۷، فاصله الکتروودها برابر با ۱۰ میلیمتر و همچنین شدت جریان الکتریکی برابر با ۱۲ میلی آمپر بر سانتی مترمربع بدست می‌آید (۱۵). در تحقیق انجام شده توسط سیدمحمدی و همکاران، حذف نیترات از محیط‌های آبی با استفاده از فرایندهای الکتروکواگولاسیون و الکتروفتون و با به کارگیری الکتروود آهنی در مقیاس آزمایشگاهی به حجم یک لیتر مورد ارزیابی قرار گرفت. در شرایط بهینه بهره‌برداری ۸۸ درصد نیترات در زمان ۶۰ دقیقه در فرایند الکتروکواگولاسیون حذف گردید (۱۶). در تحقیق انجام شده توسط حسینی و همکاران با استفاده از روش سطح پاسخ کارایی روش انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن الکترولیت کمکی NaCl، راندمان حذف بالاتری برای نیترات بدست آمد (۱۷).

با توجه به این که یکی از مهمترین وظایف مدل راکتور در فرایند انعقاد الکتریکی، کاهش ضریب مقاومت داخلی الکتروودها به منظور افزایش عملکرد جریان الکتریسته بوده و این بیشترین نقش را در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از این روش دارد (۱۸)، مدل راکتور دوار مورد استفاده در این تحقیق این امکان را فراهم می‌سازد که با بهبود پارامترهای آشفتگی در عین حال که موجب کاهش ضریب مقاومت داخلی

الکترودها می‌شود، انتقال جرمی از این فضا را نیز افزایش می‌دهد و به واسطه چرخش ایجاد شده تمامی ذرات سیال، رسوب و همچنین آلاینده، در مدل به صورت همگن با الکترودها در تماس قرار گرفته و مجموعه بواسطه عدم تاثیر عواملی همچون پره‌های پمپ و لوله‌های بازگشت، راندمان حذف بالاتری فراهم نماید. این مدل برای اولین بار در موسسه تکنولوژی ماساچوست (MIT) به منظور ته‌نشینی رسوبات چسبنده در سال ۱۹۶۳ طراحی و مورد استفاده قرار گرفت (۱۹).

بخش عمده مطالعات گذشته، کارایی روش انعقاد الکتریکی را در راکتورهایی با مقیاس کوچک مورد بررسی قرار داده‌اند، هدف از تحقیق حاضر شناسایی پتانسیل استفاده از روش انعقاد الکتریکی در حذف نیترات از محیط‌های آبی با استفاده از معرفی مدل مطالعاتی دوار می‌باشد. در این تحقیق از الکترودهای متفاوتی با جنس آلومینیوم و آهن استفاده شده است تا عملکرد روش انعقاد الکتریکی با استفاده از این الکترودها مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت بر اساس نتایج آزمایشگاهی مقادیر پارامترهای بهره‌برداری بهینه شده از جمله دانسیته جریان، زمان تصفیه، سرعت چرخش و غلظت اولیه نیترات بدست آمده است. همچنین اثر وجود کدورت بر روی حذف نیترات با استفاده از روش انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

روش کار

راکتور دوار و تجهیزات آزمایشگاهی

مطالعه حاضر یک مطالعه آزمایشگاهی است که به صورت طرح پایلوت و در یک سیستم راکتور دوار ناپیوسته انجام پذیرفت. مدل فیزیکی راکتور و مدل صفحات الکتروود در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه مذکور از جنس فولاد و پلکسی‌گلاس تشکیل شده و شامل دو قسمت می‌باشد، یک کانال حلقوی و یک رینگ حلقه‌ای در داخل کانال به گونه‌ای که

مکانیزم حرکتی هر دو قسمت این دستگاه از یکدیگر جدا بوده و هر کدام از آنها می‌تواند در جهت عقربه‌های ساعت یا عکس عقربه‌های ساعت حرکت کند. چرخش همزمان آنها در جهت عکس یکدیگر باعث به وجود آمدن یک جریان آشفته می‌شود با انتخاب سرعت چرخش مناسب برای کانال و رینگ تاثیر جریانات ثانویه در ته‌نشینی حذف شده است و این امر موجب می‌شود ته‌نشینی یکنواختی در بستر کانال بوجود آید. قطر متوسط راکتور ۴/۷ متر، عرض کانال ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۴۷ سانتی‌متر می‌باشد. این مجموعه آزمایشگاهی جدید دیگر تحت تاثیر عواملی همچون پره‌های پمپ، لوله‌های بازگشت و غیره نمی‌باشد (۲۰). تعداد ۶ الکتروود از جنس‌های آلومینیوم و آهن، با ابعاد $30\text{cm} \times 15\text{cm} \times 0.2\text{cm}$ در فاصله ۳ سانتی‌متری از یکدیگر و در عمق ۶ سانتی‌متری جریان (حجم کل نمونه ۳۷۰ لیتر) با اتصال تک قطبی و چیدمان موازی داخل راکتور قرار گرفته‌اند.

آماده‌سازی نمونه و فرآیند آزمایشات

در تمامی مراحل آزمایشات، از پتاسیم نیترات (KNO_3 ، شرکت مرک) به منظور تهیه غلظت‌های مورد نظر نیترات، استفاده گردیده شد. جهت انجام آزمایشات کدورت، رسوبات از سرشاخه‌های کارون شمالی (بستر خشک مخزن سدخاکی پیربلوط واقع در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرکرد) جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید. رسوبات حاوی ۶۴ درصد رس کائولینیت و ۳۶ درصد سیلت می‌باشند. پیش از انجام هر آزمایش نیترات، نمونه‌ها از کاغذ صافی (شماره ۴۲) عبور کرده و ذرات معلق از نمونه‌ها جدا گردید.

به منظور بررسی تاثیر عوامل مختلف در کارایی فرایند انعقاد الکتریکی آزمایشات برای مقادیر متفاوتی از غلظت اولیه نیترات، شدت جریان، سرعت چرخش راکتور، زمان واکنش، و کدورت جریان انجام گرفت. تجهیزات استفاده شده در این آزمایش شامل مدل

فیزیکی، مجموعه الکترودها، دستگاه اسپکتروفتومتر (Hach- DR 3900)، دستگاه کدورت سنج (AL250T-IR) مطابق با روش استاندارد ۲۱۳۰ (۲۱)، و مبدل جریان الکتریسیته (GPS 3303) می باشد.

شکل ۱. مدل راکتور دوار به همراه محل قرارگیری الکترودها (۱: مدل راکتور دوار، ۲: حلقه داخل کانال، ۳: صفحات الکتروود آلومینیومی، ۴: مبدل جریان الکتریکی، ۵: چیدمان صفحات الکترودها، ۶: کانورتور برای چرخش کانال و حلقه)



همچنین مقادیر pH در ابتدا و انتهای آزمایشات با استفاده از دستگاه pH متر (370JENWAY) و هدایت الکتریکی با دستگاه (470JENWAY) مطابق با روش استاندارد ۲۵۱۰ (۲۱)، اندازه گیری شد. در هر بار آزمایش مخزن راکتور با ارتفاع جریان ۲۵ سانتی متر (حجم معادل ۳۷۷ لیتر) از نمونه مورد نظر پر گردید. نمونه از سه عمق متفاوت راکتور برداشت

شده و در هر بار نتایج حاصل از میانگین دو تکرار بدست آمد. پس از پایان هر دوره آزمایش الکترودها به مدت یک دقیقه در اسید کلریدریک تمیز و با سمباده نرم تمیز گردیده شدند. کلیه آزمایشات در دمای محیط آزمایشگاه ($23 \pm 3^{\circ}\text{C}$) و فشار اتمسفر انجام پذیرفت. مشخصات نمونه های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات پارامترهای مورد بررسی

پارامتر	واحد	گستره
pH	غلظت یون هیدروژن	۷/۴
هدایت الکتریکی	میکروزیمنس بر سانتی متر	۲۳۲-۲۷۱
دما	درجه سانتی گراد	۲۳±۳
شدت جریان	آمپر بر متر مربع	۲۲/۱۸-۳/۹-۸/۴-۳/۸
سرعت چرخش	دور در دقیقه	۸/۵-۲/۲-۷/۰-۳/۷
غلظت اولیه نیترات (NO_3^-)	میلی گرم بر لیتر	۲۲۵-۱۲۵-۵۰-۲۵
کدورت	نفلومتری	۱۲۰-۲۴۰-۴۲۰
زمان واکنش	دقیقه	۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰

ترسیم نمودارها و تحلیل‌های آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel-2013 انجام گردید. همچنین به منظور انجام تحلیل‌ها، راندمان حذف کدورت به کمک معادله ۴ به دست آمده است.

(۴)

$$RE(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

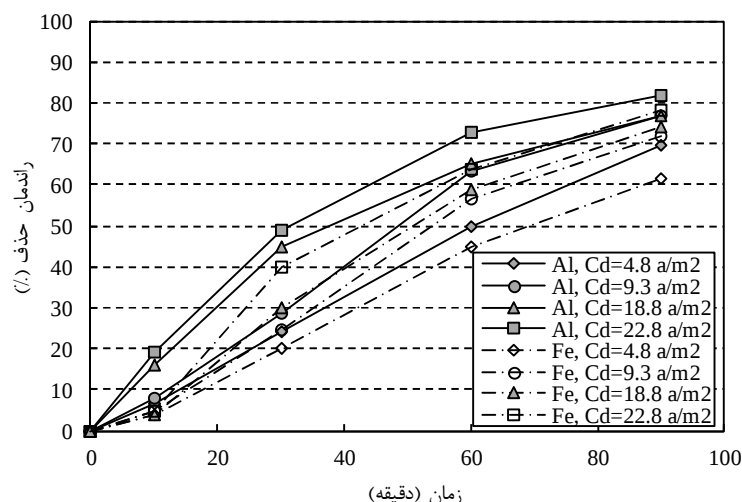
که در این رابطه C_0 و C_t به ترتیب، غلظت نیترات یا کدورت در زمان اولیه واکنش و در زمان t می‌باشد.

یافته‌ها

اثر دانسیته جریان بر روی عملکرد سیستم

دانسیته جریان به عنوان مهمترین پارامتر در بهره‌برداری از روش انعقاد الکتریکی به منظور حذف

نیترات محسوب می‌گردد (۲۲،۲۳). به منظور بررسی اثر دانسیته جریان بر روی حذف کدورت، میزان دانسیته جریان در چهار سطح ($4/8A/m^2$ ، $9/3A/m^2$ ، $18/8A/m^2$ و $22/8A/m^2$) با استفاده از دستگاه مولد جریان ایجاد گردید. با ثابت در نظر گرفتن الکتروود، و میزان غلظت اولیه نیترات ۱۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه راندمان حذف افزایش یافت. با توجه به شکل ۲ می‌توان بیان نمود که با افزایش دانسیته جریان از $4/8A/m^2$ تا $22/8A/m^2$ راندمان حذف نیترات در زمان ۹۰ دقیقه برای الکتروود آلومینیومی از $69/6\%$ تا $81/6\%$ درصد و برای الکتروود آهنی از $61/6\%$ تا $78/4\%$ درصد افزایش یافت.

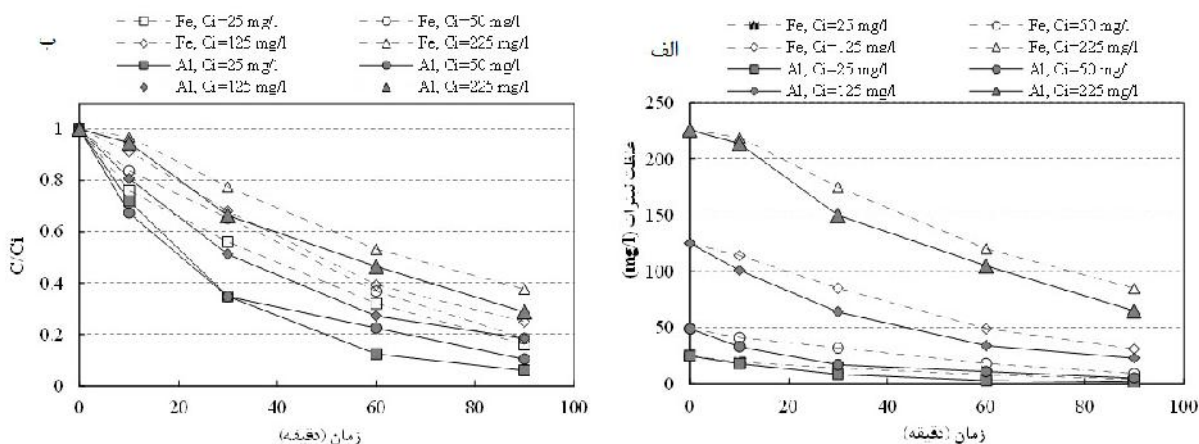


شکل ۲. اثر دانسیته جریان بر روی حذف نیترات (غلظت اولیه نیترات ۱۲۵ mg/l، $\omega=1.8$ rpm)

اثر غلظت اولیه نیترات

تأثیر ۴ غلظت اولیه نیترات (۲۵، ۵۰، ۱۲۵، ۲۲۵ mg/l) بر روی راندمان حذف روش انعقاد الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج برای دانسیته جریان $22/8A/m^2$ و سرعت چرخش $1/8$ rpm در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳ (الف) با افزایش میزان غلظت اولیه نیترات، راندمان حذف کاهش می‌یابد. در شکل ۳ (ب)، نسبت غلظت نیترات

به غلظت اولیه نیترات (C/C_i) نشان داده شده است، بر این اساس مشخص است که ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به بیشترین نسبت (C/C_i) و مربوط به الکتروود آهنی با غلظت اولیه نیترات ۲۲۵ mg/l و بهترین عملکرد مربوط به الکتروود آلومینیومی با غلظت اولیه نیترات ۲۵ mg/l بوده است.

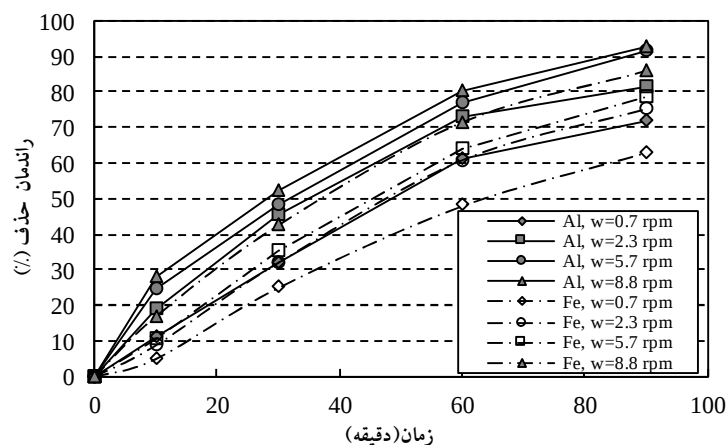


شکل ۳. الف) تاثیر غلظت اولیه نیترات بر روی راندمان حذف، ب) نسبت C/C_0 در مقابل زمان برای مقادیر غلظت اولیه متفاوت (دانشیته $22/8 \text{ A/m}^2$ و سرعت چرخش $1/8 \text{ rpm}$)

اثر سرعت چرخش راکتور

اثر اصلی سرعت چرخش راکتور در انتقال موثر فولکوله‌های ایجاد شده، در اثر انحلال یون‌های الکتروود و تولید مواد منعقدکننده می‌باشد. این امر موجب ارتباط بیشتر ذرات تشکیل شده با یکدیگر شده و موجب می‌شود که محلول یکنواختی تشکیل گردد. چرخش راکتور همچنین موجب ایجاد یکنواختی در شرایط pH و دمای جریان می‌گردد. pH جریان در

زمان بررسی عملکرد سرعت چرخش راکتور برابر pH آب شهر و معادل با $7/4$ و شدت جریان معادل با $22/8 \text{ A/m}^2$ ، غلظت اولیه نیترات برابر 125 mg/l و سرعت چرخش برابر $0/7, 2/3, 5/7, 8/8 \text{ rpm}$ در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۴ می‌توان بیان نمود که بیشترین راندمان حذف در سرعت چرخش راکتور معادل با $8/8$ دور در دقیقه بدست آمد.



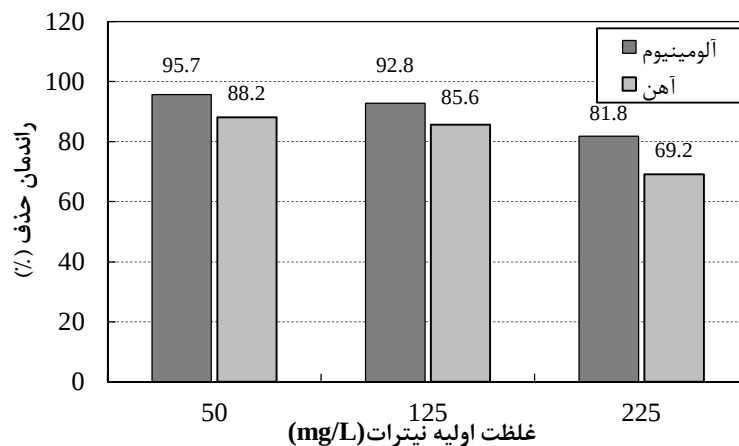
شکل ۴. تغییرات راندمان حذف در مقابل زمان، به ازای سرعت‌های متفاوت چرخش راکتور (غلظت اولیه نیترات 125 mg/l ، دانشیته جریان $22/8 \text{ A/m}^2$)

اثر جنس الکترودها

جنس الکترودهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع آهن و آلومینیوم بود. در شکل ۵ اثر جنس الکترودها بر راندمان حذف کدورت جریان نشان داده شده است. با توجه به این نمودار در شرایط بهینه

بهره‌برداری شامل دانشیته جریان $22/8 \text{ A/m}^2$ ، سرعت چرخش $8/8 \text{ rpm}$ ، زمان واکنش ۹۰ دقیقه راندمان حذف نیترات توسط الکتروود آلومینیومی به میزان بیشتری نسبت به آهنی بوده است. حداکثر راندمان حذف نیترات برای الکترودهای آلومینیومی و

آهنی در غلظت اولیه نیترات 125 mg/l به ترتیب برابر $95/7$ و $88/2$ درصد بدست آمد.

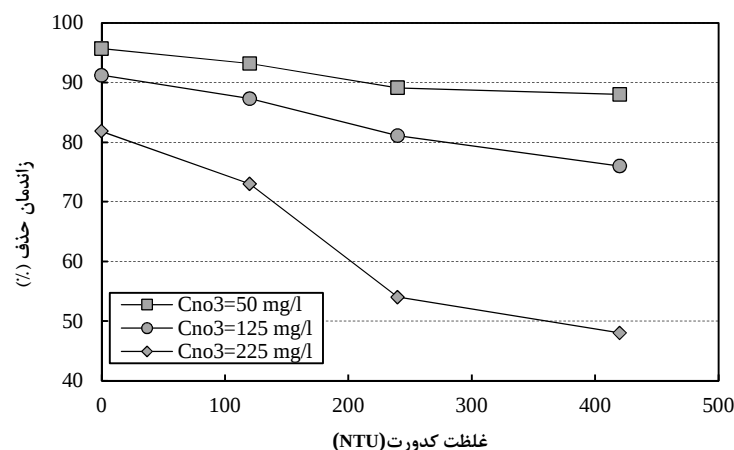


شکل ۵. مقایسه کارایی الکتروکاتالیز آلومینیومی و الکتروکاتالیز آهنی در حذف نیترات

اثر وجود کدورت در جریان

کدورت یک پارامتر فیزیکی و نیترات یک پارامتر شیمیایی بوده و در بیشتر مواقع به صورت همزمان در محیط‌های آبی حضور دارند. در مطالعات پیشین گزارش شده است که حضور همزمان آنیون‌ها در فرایند انعقاد اثرگذار می‌باشد (۲۴،۲۵). در شکل ۶ تغییرات راندمان حذف نیترات در مقابل غلظت کدورت جریان برای مقادیر غلظت اولیه نیترات متفاوت نشان داده شده است. نتایج نشان داد که

افزایش غلظت کدورت جریان موجب کاهش کارایی راندمان حذف نیترات گردیده و در تمامی غلظت‌های اولیه نیترات موجب کاهش راندمان حذف گردید. بیشترین میزان کاهش عملکرد در غلظت اولیه نیترات 225 mg/l و اعمال بیشترین غلظت کدورت 420 نفلومتری مشاهده گردید، که راندمان از میزان ۸۱ به ۴۸ درصد کاهش یافت.



شکل ۶. تاثیر مقادیر متفاوت کدورت بر روی راندمان حذف نیترات (الکتروکاتالیز آلومینیومی، دانسیته جریان $22/8 \text{ A/m}^2$ ، سرعت چرخش $8/2 \text{ rpm}$ و زمان 90 دقیقه)

انرژی مصرفی

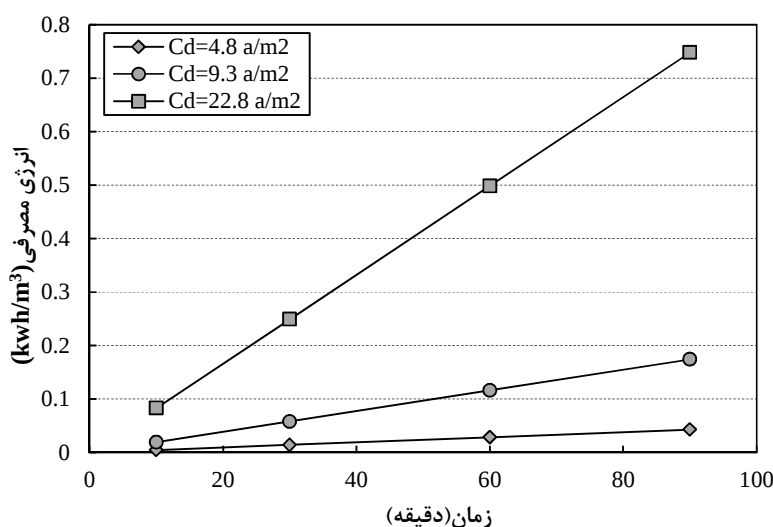
یکی از پارامترهای موثر در بررسی روش انعقاد الکتریکی، انرژی مصرفی می‌باشد. بر اساس معادله ۶

هرچه زمان واکنش و شدت جریان بیشتر باشد، انرژی مصرفی نیز افزایش می‌یابد.

$$EN_C = \frac{ItU}{V} \quad (۶)$$

در این معادله EN_C میزان انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت بر متر مکعب، I جریان اعمال شده بر حسب آمپر، t زمان الکترولیز بر حسب ساعت، U ولتاژ اعمال شده بر حسب ولت، و V حجم

محلول بر حسب متر مکعب می‌باشد (۱۴). مطابق با شکل ۷، افزایش دانسیته جریان و زمان واکنش موجب افزایش انرژی مصرفی گردیده و در شرایط بهینه بهره‌برداری این تحقیق میزان انرژی مصرفی برابر $۰/۷۴ \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد.



شکل ۷. تغییرات انرژی مصرفی در مقابل زمان برای مقادیر متفاوت دانسیته جریان (الکتروکد آلومینیومی، غلظت اولیه نیترات ۲۲۵ mg/l و سرعت چرخش $۸/۲ \text{ rpm}$)

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که دانسیته جریان رابطه مستقیمی با کارایی مدل معرفی شده دارد، به طوری که با افزایش دانسیته جریان راندمان حذف نیترات افزایش یافت. کاهش نیترات احتمالاً به علت افزایش تولید هیدروژن از طریق الکتروکاتد (۲۶)، و افزایش مواد منعقدکننده و هیدروکسید فلز تولیدی در دانسیته‌های بیشتر جریان می‌باشد (۲،۲۷). نتایج تحقیق حاضر با تحقیق انجام شده توسط صفری و همکاران (۱)، و الشازلی و همکاران (۱۴) مشابه بوده است. مشاهده شده است که با افزایش دانسیته جریان میزان تولیدات لجن و میزان الکتروکد مصرفی افزایش می‌یابد (۲).

نتایج نشان داد که افزایش غلظت اولیه نیترات موجب کاهش راندمان حذف نیترات گردیده و این با نتایج مطالعات امام‌جمعه و همکاران (۲۸)، لین و همکاران

(۲۹) و کوپرال و همکاران (۳۰) همخوانی داشته است. محتمل‌ترین دلیل این اثرگذاری را می‌توان این‌گونه بیان نمود که در فرایند انعقاد الکتریکی متناسب با افزایش مقدار آلاینده‌ها به میزان بیشتری آزادسازی ماده منعقدکننده نیاز است. از طرفی با توجه به ثابت بودن شرایط محیطی و میزان انرژی و به تبع آن ماده منعقدکننده تولیدشده، با افزایش غلظت اولیه نیترات راندمان حذف کاهش می‌یابد. در طول ۹۰ دقیقه آزمایش بالاترین میزان حذف نیترات برای الکتروکد آلومینیومی و در غلظت اولیه ۲۵ mg/l برابر ۹۴ درصد، و کمترین میزان برابر $۶۲/۴$ درصد برای الکتروکد آهنی در غلظت اولیه نیترات ۲۲۵ mg/l بدست آمد.

نتایج بررسی میزان سرعت بهینه چرخش برای مدل پیشنهادی، نشان داد زمانی که سرعت از $۰/۷$ تا $۸/۲$ دور در دقیقه افزایش می‌یابد، برخورد فکوله‌های

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میزان حذف نیترات با استفاده از روش انعقاد الکتریکی در یک راکتور دوار ناپیوسته، با آرایش تک قطبی الکترودهای آلومینیومی و آهنی مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر پارامترهای بهره‌برداری شامل دانسیته جریان، زمان واکنش، سرعت چرخش راکتور، غلظت اولیه نیترات، نوع الکتروود مورد استفاده و حضور کدورت در جریان بر روی حذف نیترات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که راندمان حذف نیترات با افزایش میزان دانسیته جریان، سرعت چرخش راکتور و زمان واکنش افزایش یافته، در حالی که افزایش غلظت اولیه نیترات و حضور کدورت در جریان موجب کاهش راندمان حذف نیترات گردید. نتایج دیگر نشان داد که در شرایط بهینه بهره‌برداری بالاترین میزان راندمان حذف برابر ۹۵/۷ درصد طی ۹۰ دقیقه زمان واکنش، دانسیته جریان $18/8 \text{ A/m}^2$ ، سرعت چرخش $8/2 \text{ rpm}$ و در غلظت اولیه نیترات 125 mg/l برای الکتروود آلومینیومی می‌باشد. همچنین در این شرایط انرژی مصرفی برابر با $0/74 \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که راکتور انعقاد الکتریکی دوار با آرایش تک قطبی الکترودهای آلومینیومی، در حذف نیترات از محیط کارایی موثری داشته است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام پذیرفته و نویسندگان مقاله حاضر از مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد برای حمایت از این تحقیق جهت انجام آزمایشات تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تشکیل شده با یکدیگر افزایش یافته و بالاترین راندمان حذف را ایجاد می‌کند. این سرعت شرایط را به گونه‌ای فراهم آورده که علی‌رغم همگن شدن نمونه و افزایش برخورد یون‌های انعقادی با ذرات کلوئیدی، امکان ته‌نشینی همگن برای ذرات فولکوله شده نیز فراهم گردد.

نتایج مقایسه کارایی دو الکتروود آلومینیوم و آهن در شکل ۵ نشان داده شده است. در رابطه با الکتروود آلومینیوم هدایت الکتریکی بیشتر از الکتروود آهنی بوده که موجب تشکیل لخته‌های بزرگتر می‌گردد، و از طرف دیگر هیدروکسیدهای فلزی آلومینیوم نسبت به هیدروکسیدهای آهن پایدارتر بوده و قدرت جذب بالاتری دارد (۳۱). نتایج تحقیق حاضر مشابه با نتایج تحقیق مجلسی و همکاران (۳۲) نشان داد که الکتروود آلومینیومی انتخاب مناسب‌تری خواهد بود، به طوری که در غلظت اولیه نیترات 125 mg/l راندمان حذف ۹۵/۷ درصد را بدست می‌دهد. همچنین نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق ملکوتیان و همکاران (۲۷) در تضاد بوده است.

نتایج حضور کدورت در زمان حذف نیترات نشان داد که با افزایش غلظت کدورت جریان، کارایی راندمان حذف نیترات کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان کاهش عملکرد در غلظت اولیه نیترات 225 mg/l و اعمال بیشترین غلظت کدورت 420 نفلومتری مشاهده گردید، که راندمان از میزان ۸۱ به ۴۸ درصد کاهش یافت. در حقیقت حضور ذرات کلوئیدی کدورت با بار منفی موجب ایجاد شرایط رقابتی گردیده و موجب کاهش عملکرد حذف نیترات می‌گردد (۱۲). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که مدل پیشنهادی در شرایط بهره‌برداری بهینه میزان انرژی مصرفی پایینی داشته است به گونه‌ای که این میزان مصرف برابر با $0/74 \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد.

References

- 1- Safari M, Rezaee A, Ayati B, Jonidi-Jafari A. Simultaneous removal of nitrate and its intermediates by use of bipolar electrochemistry. *Research on Chemical Intermediates*. 2015; 41(3):1365-72.
- 2- Kumar NS, Goel S. Factor's influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 173(1-3):528-33.
- 3- Malakootian M, Yousefi N, Fatehizadeh A. Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2011; 8(1): 107-14.
- 4- Lacasa E, Cañizares P, Sáez C, Fernández FJ, Rodrigo MA. Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. 2011; 171(3): 1012-7.
- 5- Hmidi K, Ksentini I, Mansour LB. Treatment of olive-pomace oil refinery wastewater using combined coagulation-electroflotation process. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2017; 39(5): 275-80.
- 6- Kobya M, Gengec E, Demirbas E. Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing*. 2016; 101: 87-100.
- 7- García-García A, Martínez-Miranda V, Martínez-Cienfuegos IG, Almazán-Sánchez PT, Castañeda-Juárez M, Linares-Hernández I. Industrial wastewater treatment by electrocoagulation–electrooxidation processes powered by solar cells. *Fuel*. 2015; 149: 46-54.
- 8- Bazrafshan E, Mohammadi L, Ansari-Moghaddam A, Mahvi AH. Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process—a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2015; 13(1): 74.
- 9- Akyeva SC, Berkelieva LK, Evzhanov KN. Wastewater treatment of phosphate ions by the electro dialysis method. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2008; 30(4): 246-50.
- 10- Peter H, Geoffrey B, Cynthia M. The future of EC as a localized water treatment technology. *Chemosphere*. 2005; 9: 335-67.
- 11- Mook WT, Chakrabarti MH, Aroua MK, Khan GM, Ali BS, Islam MS, Hassan MA. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: a review. *Desalination*. 2012; 285:1-3.
- 12- Ghanbari F, Moradi M, Mohseni-Bandpei A, Gohari F, Abkenar TM, Aghayani E. Simultaneous application of iron and aluminum anodes for nitrate removal: a comprehensive parametric study. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014; 11(6): 1653-60.
- 13- Mollah MY, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2001; 84(1): 29-41.
- 14- El-Shazly AH, Al-Zahrani AA, Al-Shahrani SS. Improvement of NO₃-removal from wastewater by using batch electrocoagulation unit with vertical monopolar aluminum electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011; 6: 4141-9.
- 15- Razavi M, saeidi M, Komasi M. Assessment of Electrocoagulation Method for Simultaneous Removal of Phosphate, Nitrate and COD by Fe Electrodes from Laundry Wastewater. *Jornal of Environmental Health Engineering*. 2013; 1 (1) :56-66 (Persian).
- 16- Seid Mohammadi A, Mehralipour j, Shabanlo A, Roshanaie G, Barafrashtehpour M. Comparing the Electrocoagulation and Electro-Fenton Processes for Removing Nitrate in Aqueous Solution for Fe Electrodes. *Journal of Mazandaran University Medical Science*. 2013; 23(104):57-67 (Persian).
- 17- Hossini H, Rezaee A. Optimization of nitrate reduction by electrocoagulation using response surface methodology. *Health Scope*. 2014; 3(3).
- 18- Mollah M.Y.A, Morkovsky P, Gomes J.A.G, et all. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *J. Hazard. Mater.* 2004;114: 199-210.
- 19- Partheniades E. Cohesive sediments in open channels: erosion, transport and deposition. Butterworth-Heinemann; 2009.
- 20- Huang J, Hilldale RC, Greimann BP. Cohesive sediment transport. Erosion and sedimentation manual. 2006: 4-1.

- 21- Federation WE, American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA). Washington, DC, USA. 2005.
- 22- Li M, Feng C, Zhang Z, Chen R, Xue Q, Gao C, Sugiura N. Optimization of process parameters for electrochemical nitrate removal using Box–Behnken design. *Electrochimica Acta*. 2010; 56(1): 265-70.
- 23- Vasudevan S, Epron F, Lakshmi J, Ravichandran S, Mohan S, Sozhan G. Removal of NO₃–from drinking water by electrocoagulation–an alternate approach. *Clean–Soil, Air, Water*. 2010; 38(3): 225-9.
- 24- Ge F, Zhu L. Effects of coexisting anions on removal of bromide in drinking water by coagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 151(2-3): 676-81.
- 25- Hu CY, Lo SL, Kuan WH. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Research*. 2003; 37(18): 4513-23.
- 26- Li M, Feng C, Zhang Z, Lei X, Chen R, Yang Y, Sugiura N. Simultaneous reduction of nitrate and oxidation of by-products using electrochemical method. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 171(1-3): 724-30.
- 27- Malakootian M, Yousefi N, Fatehizadeh A. Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2011; 8(1): 107-14.
- 28- Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *J Environ Manag*. 2009; 90(5): 1663-79.
- 29- Lin SH, Wu CL. Electrochemical removal of nitrite and ammonia for aquaculture. *Water Research*. 1996; 30(3): 715-21.
- 30- Koparal AS, Ögütveren ÜB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2002; 89(1): 83-94.
- 31- Khandegar V, Saroha AK. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent–a review. *Journal of Environmental Management*. 2013; 128:949-963.
- 32- Majlesi M, Mohseny SM, Sardar M, Golmohammadi S, Sheikhmohammadi A. Improvement of aqueous nitrate removal by using continuous electrocoagulation/electroflotation unit with vertical monopolar electrodes. *Sustainable Environment Research*. 2016; 26(6): 287-90.