

# حذف نیترات از آب آشامیدنی به روش لخته سازی الکتریکی

سینا ثریایی، سید نظام الدین اشرفی زاده\*

آزمایشگاه تحقیقاتی فرایندهای پیشرفته جداسازی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

**چکیده:** نیترات یکی از آلودگی‌های مهم آب است که زندگی بشر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. روش لخته سازی الکتریکی یکی از روش‌های متداول برای حذف نیترات از آب است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش و طرح مرکب مرکزی، ۴۸ آزمایش در حالت‌های گوناگون از متغیرها که شامل غلظت اولیه نیترات در بازه ۱۰-۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، pH ۱۱-۵، فاصله الکترودها ۱۰-۲ سانتی‌متر، ولتاژ ۳۰-۵ ولت و زمان انجام فرایند ۱۲۰-۲۰ دقیقه می‌باشند انجام گرفت. جنس الکترودها آلومینیوم (آند) و آهن (کاتد) بوده و حجم راکتور برابر ۲ لیتر می‌باشد. بیش‌ترین درصد حذف نیترات در حالتی که غلظت اولیه = ۱۶ میلی‌گرم بر لیتر، pH = ۹/۳، فاصله الکترود = ۴ سانتی‌متر، ولتاژ = ۲۳ ولت و زمان الکترولیز = ۹۰ دقیقه بود، به دست آمد که بازده آن ۷۸٪ شد. سپس در نقاط بهینه، تأثیر نمک سدیم کلرید، دور همزن مکانیکی و تعداد الکترودها بررسی شد.

**واژگان کلیدی:** تصفیه آب، نیترات، لخته سازی الکتریکی، الکترود

**KEYWORDS:** Water purification, Nitrate, Electrocoagulation, Electrode

## مقدمه

نیترات هستند روی سطح خاک باقی بمانند و هنگام آبیاری، بارندگی یا ذوب شدن برف و یخ از خاک و صخره‌ها عبور کند و سرانجام به آب‌های زیر زمینی برسند. بالا بودن غلظت نیترات در آب‌های آشامیدنی از لحاظ بهداشتی زیان آور بوده و موجب بروز بیماری‌هایی مانند متهموگلوبینمیآ و سیانوسیس<sup>۳</sup> می‌شود، بنابراین میزان مجاز نیترات در آب آشامیدنی مطابق با سازمان جهانی بهداشت<sup>۴</sup> برابر ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر است [۱-۳].

نیترات به دلیل این که بدون بو و مزه است به سختی قابل تشخیص و حذف می‌باشد. بنابراین حذف آن هزینه بر و مشکل می‌باشد. روش‌های گوناگونی در طول سال‌های اخیر برای حذف نیترات از آب بررسی شده است که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به

امروزه با افزایش جمعیت و توسعه صنعت، آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز افزایش پیدا کرده و باعث به مخاطره افتادن زندگی بشر شده است. همان‌گونه که می‌دانید آب مایه حیات بشر است و حفظ آن از آلودگی‌های زیست‌محیطی اعم از فیزیکی یا شیمیایی امری ضروری است. یکی از آلودگی‌های موجود در آب، ترکیب‌های نیتروژنی می‌باشند که می‌توان از مهم‌ترین آن‌ها به نیترات و نیتريت اشاره کرد. گیاهان در طبیعت برای رشد به نیتروژن که منبع اصلی نیترات است نیازمند هستند و این ترکیب‌ها در کودهای شیمیایی که به خاک داده می‌شود، موجود می‌باشند. مشکل اصلی هنگامی رخ می‌دهد که کود داده شده به خاک بیش از اندازه باشد و این باعث می‌شود که کودهای اضافی که دارای

\* عهده‌دار مکاتبات

+Email: ashrafi@iust.ac.ir

(۱) Methemoglobinemia

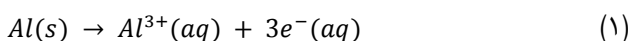
(۳) World health organization

(۲) Cyanosis

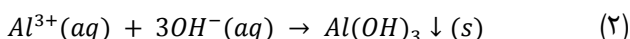
هیچ انباشتگی نیتريت کاهش یابد، درحالی که pH راکتور زیستی در حدود ۷ می‌باشد. با این حال، هنگامی که بی‌کربنات به فیلم زیستی عرضه شد، نیتريت به‌طور بحرانی انباشته شد، چون که تشکیل قلیایی باعث افزایش pH راکتور زیستی به ۹/۵ شد [۱۰،۳].

لخته سازی الکتریکی فرایندی است که در آن گونه‌های منعقد شده به وسیله اکسایش آند فلزی مانند آلومینیوم یا آهن، هنگام اعمال جریان الکتریکی، در محل تولید می‌شود. زیر جریان الکتریکی، آندهای آلومینیوم و آهن حل شده و یون‌های آلومینیوم<sup>۳+</sup> و آهن<sup>۲+</sup> تشکیل می‌شوند. هم‌زمان، گاز هیدروژن و یون‌های هیدروکسید بر روی کاتد آزاد می‌شوند. حرکت الکتروفورتیک<sup>۴</sup>، آنیون‌های هیدروکسید را به سمت آند حمل می‌کند، جایی که آنیون‌ها با کاتیون‌های فلزی جفت یونی تشکیل می‌دهند. تشکیل جفت یونی باعث تولید هیدروکسیدهای پلیمری آهن و آلومینیوم یعنی گونه‌های انعقادی می‌شود [۱۱].

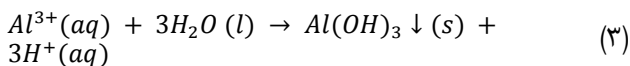
در سطح آند واکنش (۱) انجام می‌شود:



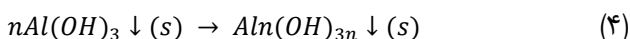
واکنش (۲) در محیط قلیایی رخ می‌دهد [۱۲]:



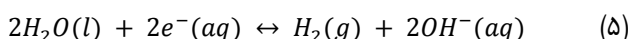
و در شرایط اسیدی واکنش (۳) صورت می‌گیرد [۱۲]:



آلومینیوم هیدروکسید نیز طبق واکنش زیر پلیمریزه می‌شود:

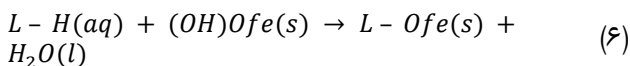


واکنش روی سطح کاتد که منجر به تولید گاز هیدروژن می‌شود:



آلاینده‌های موجود در آب توسط واکنش‌های شیمیایی و ته‌نشینی، یا با اتصال فیزیکی و شیمیایی هیدروکسیدهای فلز کلوئیدی تصفیه می‌شوند [۱۳].

واکنش ۶ شکل‌گیری سوسپانسیون‌های ژلاتینی هیدروکسید آهن را نشان می‌دهد که با تشکیل کمپلکس قادر به حذف آلاینده‌ها از پساب است. آلاینده‌ها به عنوان لیگاند طبیعی<sup>۷</sup> (L) عمل می‌کنند [۴].



فرایندهای کاتالیزتی، جذب سطحی، لخته سازی الکتریکی و زیستی اشاره کرد. در همین موضوع بارباس و همکاران<sup>۱</sup> گزارش کردند که با استفاده از فلزهای مس، پلاتین و پالادیوم با پشتیبان‌های گوناگون به بازده بالایی از حذف نیتريت دست یافتند [۴]. عبدالسلام و همکاران<sup>۲</sup> با استفاده از آهن نانو صفر ظرفیتی<sup>۳</sup> و در شرایط عملیاتی مشخص به ۹۰٪ حذف نیتريت دست یافتند. همچنین معتمدی و همکاران، نیز گزارش کردند که با استفاده از جاذب‌های نیکل و کبالت که هر دو با گرافن اکسید پوشش داده شده بودند به ترتیب به بازده ۸۳٪ و ۸۱٪ زیر pH برابر ۶/۹ و ۸ ساعت زمان فرایند دست یافتند [۶،۵]. مرادی و اشرفی‌زاده، نیز حذف نیتريت را به روش لخته سازی الکتریکی در ۳ ترکیب گوناگون از الکترودها بررسی کردند که بازده ۹۳٪ در حالت بهینه برای الکترودهای آهن و آلومینیوم به عنوان کاتد و آند به دست آمد [۷]. محمد آمارین و همکاران، با استفاده از الکترودهای آلومینیوم به بازده ۹۴/۴۱٪ دست یافتند. در این مطالعه نتیجه گرفتند که حذف نیتريت توسط لخته سازی الکتریکی می‌تواند با جذب در آلومینیوم اکسید و کاهش به نیتريت‌ها یا آمونیم به‌دست آید. همچنین مقدار قابل توجهی از فراورده‌های جانبی که شامل آمونیم و نیتريت می‌باشند، در طی فرایند لخته سازی الکتریکی تشکیل می‌شوند، با این وجود، افزودن کلر به محلول باعث کاهش تشکیل نیتريت و آمونیم می‌شود [۸]. عبدالعزیز و همکاران، نیز با استفاده از یک آند مارپیچی شکل آلومینیومی که به‌صورت افقی در محفظه قرار داده شده بود در حالی که سطح درونی آن نیز به عنوان یک خنک‌کننده برای کنترل دمای محفظه عمل می‌کرد، همچنین یک ورق آلومینیومی به عنوان کاتد که در زیر آند در پایین محفظه قرار گرفته بود تا حباب‌های هیدروژن تولید شده توسط کاتد، باعث بهبود شرایط اختلاط شود، پس از ۱۰۰ دقیقه به بازده ۱۰۰ درصد دست یافتند [۹]. همچنین برای روش زیستی، پارک و همکاران، غلظت‌های اولیه گوناگون نیتريت را در بازه بین ۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۲۰ تا ۴۹۲ میلی‌گرم بر لیتر را آزمایش کردند تا میزان کاهش نیتريت را بررسی کنند. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش غلظت اولیه نیتريت، حذف آن افزایش می‌یابد، درحالی که انباشتگی نیتريت مشهود بود. هو و همکاران، نیز ثابت کردند که با اعمال منبع کربن دی‌اکسید به سامانه، نیتريت می‌تواند به‌طور مؤثرتر با

(۱) Barrabés et al

(۳) Nano zerovalent iron

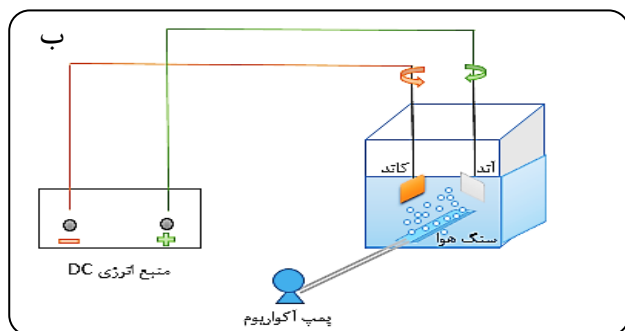
(۵) Fe<sub>2</sub><sup>+</sup>

(۷) Organic ligands

(۲) Abdulsalam et al

(۴) Al<sub>3</sub><sup>+</sup>

(۶) Electrophoretic



شکل ۱ - نمای واقعی (الف) و شمایی (ب) از سامانه آزمایشگاهی

اندازه‌های  $17 \times 17 \times 17$  سانتی‌متر ساخته شد. الکترودهای کاتد آهنی و آند آلومینیومی، در اندازه‌های  $9 \times 9$  سانتی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است که با توجه به طراحی آزمایش‌ها، در فاصله‌های گوناگون از همدیگر قرار داده شده‌اند. برای ایجاد جریان الکتریکی، از یک منبع انرژی (اسکورت،  $60.30$  تی دی) با ولتاژهایی در بازه  $0-30$  ولت استفاده شده است، همچنین یک پمپ آکواریوم (آکواتک مدل ۷۰۸) با توان ۳ وات و هوادهی  $3/5$  لیتر در دقیقه و سنگ هوا مستطیلی شکل در اندازه‌های  $3/5 \times 13/5$  سانتی‌متر برای هوادهی و اختلاط بهتر به کار گرفته شده است. پس از به دست آوردن حالت بهینه متغیرها، به جای پمپ آکواریوم از هم‌زن مکانیکی (استیرر الکتریکی دیجیتال اس تی ۱۴۸۰) در دوره‌های گوناگون برای هم‌زدن استفاده شد. pH معلول اولیه نیز با استفاده از دستگاه pH متر تنظیم شد.

محلول اولیه هر آزمایش از آب مقطر و سدیم نیترات (سیگما ۹۹٪) تشکیل یافته که برای تنظیم pH آن از سدیم هیدروکسید (مرک آلمان) و سولفوریک اسید (مرک آلمان) استفاده شده است. همچنین از نمک سدیم کلرید (مرک آلمان) نیز برای یافتن تأثیر آن در حالت بهینه استفاده شد.

نخست پیش از شروع آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش<sup>۹</sup> و طرح مرکب مرکزی<sup>۱۰</sup>، ۴۸ آزمایش در حالت‌های گوناگونی از متغیرهای مورد نظر که شامل غلظت اولیه نیترات، pH، فاصله الکترودها، ولتاژ اعمال شده و زمان انجام فرایند هستند، طراحی شد (جدول ۱). حجم آزمایش‌های انجام شده ۲ لیتر می‌باشد در حالی که مقدارهای نیترات مورد نیاز از سدیم نیترات تامین شده

پس از تصفیه الکتروشیمیایی، شناوری الکتریکی<sup>۱</sup>، ته نشینی و صافی برای حذف ذره‌های منعقد شده به کار می‌رود.

در نتیجه در فرایند انعقاد الکتریکی، روش بی‌ثبات سازی آلاینده‌ها، تعلیق ذره‌ها و شکستن تعلیق‌ها می‌تواند به صورت مقابل خلاصه شود: ۱. متراکم سازی دو لایه نفوذی اطراف گونه‌های باردار توسط یون‌هایی که با اکسایش آند تولید شده است. ۲. بار گونه‌های یونی موجود در آب توسط یون‌های مخالفی که توسط انحلال الکتروشیمیایی آند تولید شده، خنثی می‌شود. این یون‌های مخالف، دافعه الکترواستاتیک بین ذره‌ای را تا حدی که جاذبه وان در والس<sup>۲</sup> غالب باشد، کاهش می‌دهد، بنابراین باعث انعقاد می‌شود که سرانجام، ذره بدون بار ایجاد می‌شود. ۳. توده‌ای که در نتیجه انعقاد تشکیل شده، پوششی از لجن را ایجاد می‌کند و سرانجام ذره‌های کلوئیدی که هنوز در محیط آبی باقی مانده است را به دام می‌اندازد [۱۴].

در این پژوهش هدف، حذف نیترات از محلول آبی به روش لخته‌سازی الکتریکی با استفاده از الکترودهایی با جنس متفاوت است که در آن به بررسی تأثیر متغیرها در بازده که شامل غلظت اولیه  $(C_i)^3$ ، pH، فاصله الکترودها<sup>۴</sup> (ED)، ولتاژ اعمال شده<sup>۵</sup> (V)، زمان انجام فرایند<sup>۶</sup> (ET)، غلظت نمک، هم‌زدن و تعداد الکترودها می‌باشد، پرداخته شده است. همچنین، با استفاده از طراحی آزمایش انجام شده، برهمکنش‌های بین متغیرها بررسی شده است، در حالی که پمپ هوا برای هوادهی و اختلاط نیز به کار رفته است.

## بخش تجربی

برای انجام این پژوهش، یک آکواریوم از جنس شیشه در

(۱) Electroflotation

(۳) Initial Concentration

(۵) Voltage

(۷) Scott 6030 TD

(۹) Design expert

(۲) Van der Waal

(۴) Electrode Distance

(۶) Electrolysis Time

(۸) Digital electric stirrer ST 1480

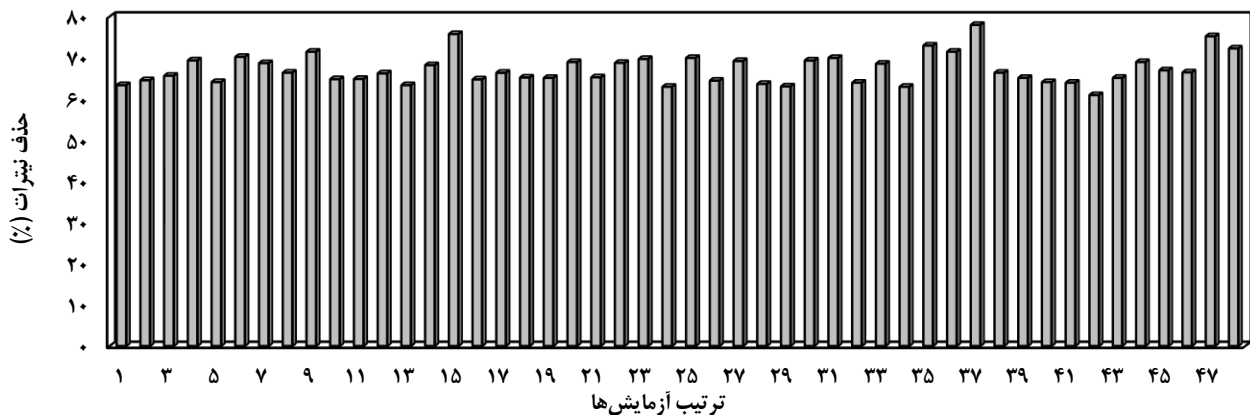
(۱۰) Central Composite Design

جدول ۱ - طراحی آزمایش و مقادیرهای آزمایش‌های انجام شده

رتیب	غلظت اولیه (میلی‌گرم بر لیتر)	pH	فاصله الکترودها (سانتی‌متر)	ولتاژ (ولت)	زمان انجام فرایند (دقیقه)	درصد حذف نیترات	$C_{\text{Energy}} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{mg NO}_3^- \text{ removed}} \right)$
۱	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۳/۴	$1/44 \times 10^{-4}$
۲	۲۴	۹/۳	۸	۱۲	۹۰	۶۴/۶	$5/80 \times 10^{-5}$
۳	۱۶	۶/۷	۸	۲۳	۹۰	۶۵/۶۸	$3/28 \times 10^{-4}$
۴	۲۰	۸	۲	۱۷/۵	۷۰	۶۹/۴	$3/07 \times 10^{-4}$
۵	۲۴	۶/۷	۴	۱۲	۹۰	۶۴/۱۶	$8/18 \times 10^{-5}$
۶	۲۴	۶/۷	۴	۲۳	۹۰	۷۰/۲۵	$3/27 \times 10^{-4}$
۷	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۸/۷۵	$1/29 \times 10^{-4}$
۸	۱۶	۶/۷	۴	۲۳	۵۰	۶۶/۴۳	$2/87 \times 10^{-4}$
۹	۱۶	۶/۷	۴	۱۲	۵۰	۷۱/۵	$6/09 \times 10^{-5}$
۱۰	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۴/۸۵	$1/40 \times 10^{-4}$
۱۱	۲۴	۶/۷	۴	۱۲	۵۰	۶۴/۹۱	$4/47 \times 10^{-5}$
۱۲	۲۰	۸	۶	۳۰	۷۰	۶۶/۲۵	$4/46 \times 10^{-4}$
۱۳	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۳/۴	$1/44 \times 10^{-4}$
۱۴	۲۰	۵	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۸/۲۵	$1/33 \times 10^{-4}$
۱۵	۲۴	۹/۳	۴	۲۳	۹۰	۷۵/۷۹	$3/03 \times 10^{-4}$
۱۶	۱۶	۹/۳	۴	۱۲	۵۰	۶۴/۸	$6/72 \times 10^{-5}$
۱۷	۱۶	۹/۳	۸	۲۳	۵۰	۶۶/۴	$1/79 \times 10^{-4}$
۱۸	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۵/۲۵	$1/4 \times 10^{-4}$
۱۹	۲۴	۶/۷	۸	۱۲	۹۰	۶۵/۱۶	$5/75 \times 10^{-5}$
۲۰	۱۶	۹/۳	۸	۱۲	۵۰	۶۹	$4/51 \times 10^{-5}$
۲۱	۲۴	۹/۳	۴	۲۳	۵۰	۶۵/۳	$1/94 \times 10^{-4}$
۲۲	۲۴	۹/۳	۴	۱۲	۹۰	۶۸/۸	$7/63 \times 10^{-5}$
۲۳	۲۰	۸	۱۰	۱۷/۵	۷۰	۶۹/۷۵	$8/73 \times 10^{-5}$
۲۴	۲۴	۹/۳	۴	۱۲	۵۰	۶۳	$4/61 \times 10^{-5}$
۲۵	۱۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۷۰	$2/61 \times 10^{-4}$
۲۶	۲۴	۶/۷	۸	۲۳	۹۰	۶۴/۵	$2/22 \times 10^{-4}$
۲۷	۱۶	۶/۷	۸	۱۲	۹۰	۶۹/۲۵	$8/12 \times 10^{-5}$
۲۸	۲۴	۹/۳	۸	۲۳	۵۰	۶۳/۷	$1/24 \times 10^{-4}$
۲۹	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۲۰	۶۳/۱	$4/11 \times 10^{-5}$
۳۰	۱۶	۶/۷	۸	۲۳	۵۰	۶۹/۳۷	$1/72 \times 10^{-4}$
۳۱	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۱۲۰	۷۰	$2/25 \times 10^{-4}$
۳۲	۲۴	۶/۷	۴	۲۳	۵۰	۶۴	$1/98 \times 10^{-4}$
۳۳	۱۶	۹/۳	۴	۲۳	۵۰	۶۸/۶	$2/78 \times 10^{-4}$
۳۴	۱۶	۶/۷	۴	۱۲	۹۰	۶۳	$1/25 \times 10^{-4}$
۳۵	۱۶	۶/۷	۴	۲۳	۹۰	۷۳	$4/72 \times 10^{-4}$
۳۶	۱۶	۹/۳	۸	۲۳	۹۰	۷۱/۵	$3/01 \times 10^{-4}$
۳۷	۱۶	۹/۳	۴	۲۳	۹۰	۷۸	$4/42 \times 10^{-4}$
۳۸	۲۴	۹/۳	۸	۲۳	۹۰	۶۶/۴۱	$2/16 \times 10^{-4}$
۳۹	۳۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۵/۱۶	$9/35 \times 10^{-5}$

ادامه جدول ۱ - طراحی آزمایش و مقادارهای آزمایش‌های انجام شده

ترتیب	غلظت اولیه (میلی گرم بر لیتر)	pH	فاصله الکترودها (سانتی متر)	ولتاژ (ولت)	زمان انجام فرایند (دقیقه)	درصد حذف نیترات	$C_{Energy} \left( \frac{kWh}{mg\ NO_3^- \text{ removed}} \right)$
۴۰	۲۰	۸	۶	۱۷/۵	۷۰	۶۴/۱۵	$1/42 \times 10^{-4}$
۴۱	۲۴	۹/۳	۸	۱۲	۵۰	۶۴	$3/24 \times 10^{-5}$
۴۲	۲۴	۶/۷	۸	۲۳	۵۰	۶۱	$1/30 \times 10^{-4}$
۴۳	۱۶	۹/۳	۸	۱۲	۹۰	۶۵/۱۸	$8/63 \times 10^{-5}$
۴۴	۱۶	۶/۷	۸	۱۲	۵۰	۶۹	$4/51 \times 10^{-5}$
۴۵	۲۴	۶/۷	۸	۱۲	۵۰	۶۷	$3/09 \times 10^{-5}$
۴۶	۲۰	۸	۶	۵	۷۰	۶۶/۵	$8/72 \times 10^{-6}$
۴۷	۲۰	۱۱	۶	۱۷/۵	۷۰	۷۵/۲۵	$1/21 \times 10^{-4}$
۴۸	۱۶	۹/۳	۴	۱۲	۹۰	۷۲/۳	$1/08 \times 10^{-4}$



شکل ۲ - نمودار درصد حذف نیترات برحسب ترتیب آزمایش‌ها

که  $C_{Energy}$  میزان انرژی مصرفی به ازای حجم محلول و  $V$  ولتاژ اعمال شده می‌باشد.

### نتیجه‌ها و بحث

شکل ۲ نمودار درصد حذف‌های نیترات بر اساس ترتیب آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل زیر مشخص است در بین ۴۸ آزمایش گوناگون انجام شده، بیش‌ترین درصد حذف نیترات در غلظت اولیه ۱۶ میلی‌گرم بر لیتر، pH برابر ۹/۳، فاصله الکترود برابر ۴ سانتی‌متر، ولتاژ ۲۳ ولت و ۹۰ دقیقه زمان انجام فرایند به‌دست آمد که در آن بازده ۷۸٪ شد.

سپس با انتخاب مدل مناسب در نرم‌افزار طراحی آزمایش، نتیجه‌ها و نمودارهای لازم به‌دست آمد.

و سپس با تنظیم مقادارهای سایر متغیرها در هر ۴۸ حالت، فرایند ادامه می‌یابد. پس از اتمام هر آزمایش، ۳۰ دقیقه به محلول فرصت داده شد تا لجن‌های تشکیل شده ته نشین شوند و سپس نمونه‌های لازم برداشته شود و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر<sup>(۱)</sup> در طول موج ۲۲۰ نانومتر مقدار جذب نمونه به‌دست می‌آید. مرحله بعدی از روی منحنی استاندارد و مقادارهای جذب به‌دست آمده، مقدار نهایی نیترات موجود در آب به‌دست می‌آید. معادله زیر نیز برای محاسبه درصد حذف نیترات استفاده شده است.

$$R(\%) = (1 - C_f/C_0) \times 100 \quad (7)$$

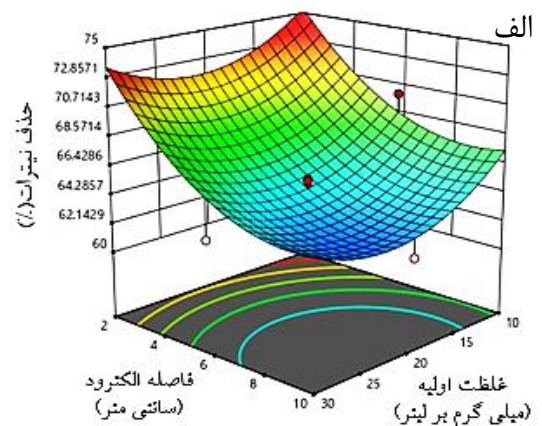
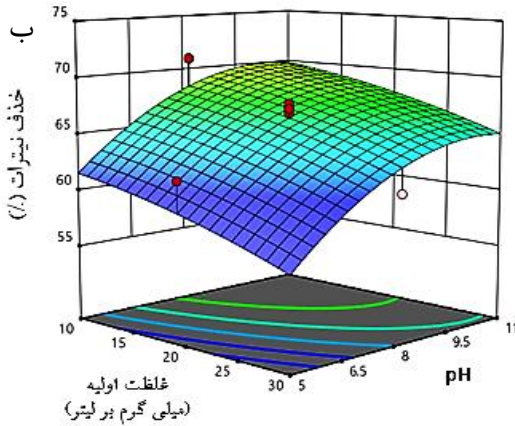
همچنین شایان ذکر است که مصرف انرژی برای هر آزمایش از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{Energy} (kWh/m^3) = \frac{V \times I \times ET}{U} \quad (8)$$

(1) Spectrophotometer

جدول ۲ - خلاصه‌ای از نتیجه‌های جدول ANOVA

مدل	P_value	انحراف معیار	متوسط	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Adjusted	R <sup>2</sup> Predicted
Quadratic	<۰/۰۰۰۱	۰/۷۳۵۸	۶۶/۶۴۰۰	۰/۹۷۱۵	۰/۹۵۰۴	۰/۹۰۴۷



شکل ۳ - نمودار سه بعدی برهمکنش بین غلظت اولیه نیترات با (الف) pH (فاصله الکترودها = ۴ سانتی‌متر، ولتاژ = ۱۷/۵ ولت و زمان فرایند = ۷۰ دقیقه)، (ب) فاصله الکترودها (pH = ۸، ولتاژ = ۱۷/۵ ولت و زمان فرایند = ۷۰ دقیقه)

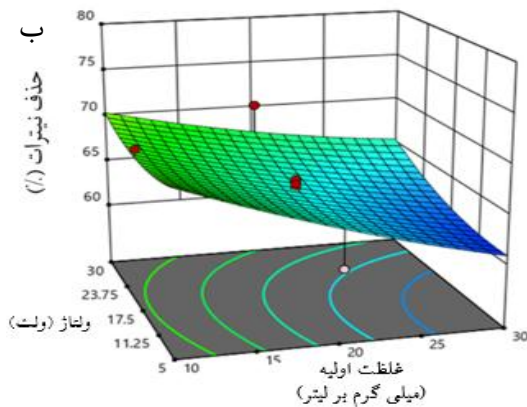
حذف نیترات می‌شود. با این حال، در مقادیرهای pH کمیابی بیشتر، سطح اکسید دارای بار منفی است و یون‌های نیترات موجود در محلول را جذب می‌کند. بنابراین، تولید گونه‌های منعقد شده و حذف نیترات کاهش می‌یابد [۱۶،۷]. هیدروکسیدها باعث بی‌ثبات‌سازی کلوئیدها می‌شوند و گونه‌های منعقد شده مؤثر در pH های اسیدی، خنثی و قلیایی کم تشکیل می‌شوند. وقتی که pH پایین است گونه‌های هیدروکسیدهای آلومینیوم حل شده نمی‌تواند به‌عنوان گونه‌های انعقادی استفاده کرد چون آن‌ها نمی‌توانند ظرفیت انعقادی مؤثر را فراهم کنند و نمی‌توانند ثابت بمانند. در محیط قلیایی بالاتر یون‌های هیدروکسوآلومینات<sup>۱</sup> تشکیل می‌شوند و این یون‌ها عملکرد انعقادی ضعیفی دارند [۱۹-۱۷].

برهمکنش بین غلظت اولیه و فاصله الکترودها از یکدیگر در این حالت نیز بازه غلظت اولیه ۱۰-۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و بازه فاصله بین الکترودها نیز ۲-۱۰ سانتی‌متر تعیین شد. شکل ۳-ب نمودار سه‌بعدی برهمکنش بین غلظت اولیه با فاصله الکترودها نشان می‌دهد که با کاهش فاصله الکترودها و کاهش غلظت اولیه نیترات بازه حذف نیترات افزایش می‌یابد. با توجه به این که ظرفیت جذب لخته‌ها محدود است و لخته‌ها قادر به حذف مقدار خاصی از نیترات هستند با افزایش غلظت اولیه

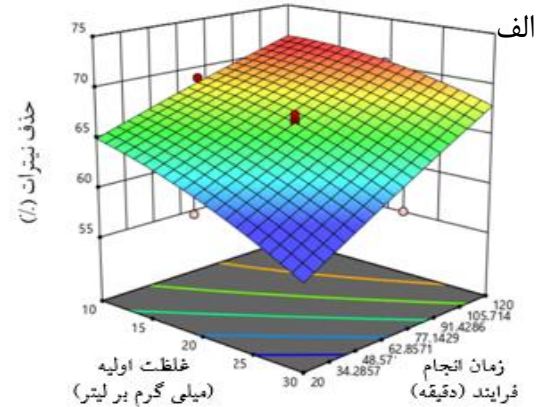
### برهمکنش بین غلظت اولیه و pH

برای بررسی این حالت آزمایش‌هایی در بازه ۳۰-۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برای غلظت اولیه نیترات و ۵-۱۱ برای pH اولیه محلول انجام گرفت و همان‌گونه که در نمودار سه‌بعدی که در شکل ۳-الف آورده شده است مشخص است که هر چه قدر غلظت اولیه کم‌تر بوده و به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نزدیک‌تر و pH قلیایی‌تر و نزدیک به ۹/۵ باشد بازه حذف نیترات افزایش می‌یابد. در حقیقت، فرایند انعقاد، یون‌های نیترات را به‌وسیله لخته‌های تشکیل شده حرکت داده و ترسیب می‌کند. یون‌های نیترات حذف مؤثرشان از آب را مدیون انباشتگی ذره‌های کلوئیدی آلومینیوم تولید شده در حین کنترل‌لیز است. این یون‌ها با کلوئیدهای تشکیل شده از لخته‌های ته‌نشین شده واکنش داده که می‌تواند به‌راحتی از محلول جدا شود. کاهش بازه حذف نیترات هنگام افزایش غلظت اولیه آن را می‌توان به عدم حضور لخته‌های اکسید آلومینیوم تشکیل شده در محلول نسبت داد و اکسیدهای آلومینیوم بیش‌تری برای کاهش غلظت‌های نیترات حل شده نیاز است. در نتیجه حذف نیترات توسط میزان اکسیدهای آلومینیوم تشکیل شده محدود می‌شود [۱۵]. همچنین در مقادیرهای بالای pH، لایه اکسید آلومینیوم غیرفعال که در مقادیرهای pH پایین تشکیل می‌شود، از بین می‌رود و منجر به افزایش سرعت انحلال آلومینیوم و در نتیجه

(۱) Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>



شکل ۴ - نمودار سه بعدی برهمکنش بین غلظت اولیه نیترات با (الف) ولتاژ (pH = ۸، فاصله الکترودها = ۶ سانتی متر و زمان فرایند = ۷۰ دقیقه)، (ب) زمان فرایند (pH = ۸، فاصله الکترودها = ۶ سانتی متر و ولتاژ = ۱۷/۵ ولت)



#### برهمکنش بین غلظت اولیه و زمان انجام فرایند

در این بخش نیز همچون حالت‌های پیش بازه ۱۰-۳۰ میلی گرم بر لیتر را برای غلظت اولیه و ۲۰-۱۲۰ دقیقه برای زمان انجام فرایند در نظر گرفته شد. در این حالت نیز مطابق انتظار با کم بودن غلظت اولیه نیترات و افزایش زمان انجام فرایند، بازده حذف نیترات افزایش می‌یابد. در مدت‌زمان بیش‌تر الکترولیز، کاتیون‌های فلزی و هیدروکسیدهای فلزی بیش‌تری تولید می‌شود. همچنین افزایش زمان فرایند باعث می‌شود که زمان تماس یون‌ها با گونه منعقد شده بیش‌تر شود. به عبارت دیگر، یون‌های هیدروکسید تولید شده در طی فرایند، گونه‌های انعقادی بیش‌تری را با یون‌های نیترات حل شده در محلول تشکیل می‌دهند، یعنی زمان کافی برای واکنش با یون‌های نیترات و تولید گونه‌های منعقد شده بیش‌تر دارند که این منجر به افزایش حذف یون‌های نیترات می‌شود [۲۴،۷].

#### حالت بهینه

با انجام همه حالت‌های آزمایش و به دست آوردن نتیجه‌ها و نمودارهای آن‌ها، اکنون می‌توان به نقاط بهینه متغیرها که توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش مشخص می‌شود دست یافت. جدول ۳ نشان دهنده حالت بهینه و مقدارهای درصد حذف برای حالت پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار و حالت تجربی به دست آمده از آزمایش می‌باشد. با توجه به مصرف انرژی  $\frac{kWh}{m^3}$  ۰/۳۴۸۶ که برای دستیابی به ۶۹/۲٪ حذف نیترات صرف شده است و مقایسه آن با سایر پژوهش‌های انجام شده که حتی توانسته‌اند درصد بالاتری از نیترات را حذف کنند، نشان می‌دهد در این پژوهش با صرف انرژی کم‌تر، درصد حذف مؤثرتری از نیترات به دست آمده است. جدول ۴ مقایسه درصد حذف و مصرف انرژی برخی از پژوهش‌های گذشته را نشان می‌دهد.

بازده کم می‌شود. افزون‌بر این، با افزایش غلظت اولیه، مقدار هیدروکسید آلومینیوم تولید شده برای لخته کردن غلظت بیش از حد آلاینده کافی نیست [۲۱،۲۰]. گزارش شده است که افزایش فاصله بین الکترودها باعث افزایش مقاومت الکتریکی در برابر جریان بین آند و کاتد می‌شود. با افزایش شکاف الکترودها، سرعت اختلاط سیال بین الکترودها نمی‌تواند لایه قطبش غلظت کافی را روی سطح الکترود ایجاد کند. این اثرها می‌تواند پتانسیل الکتریکی یا مقاومت الکترودها را افزایش دهد و سپس راندمان حذف نیترات کاهش یابد. به طور کلی، افزایش فضای الکترود منجر به مقاومت بالاتر، لایه غیرفعال ضخیم‌تر و بازده جریان پایین‌تر می‌شود [۲۲،۱۷].

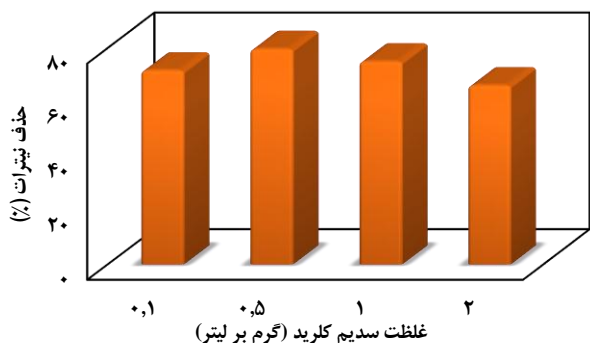
#### برهمکنش بین غلظت اولیه و ولتاژ اعمال شده

برای بررسی این حالت نیز بازه ۱۰-۳۰ میلی گرم بر لیتر برای غلظت اولیه نیترات و بازه ۵-۳۰ ولت نیز برای جریان الکتریکی منظور شد. همان‌گونه که از شکل ۴-الف مشخص است با افزایش میزان ولتاژ اعمالی درصد حذف بالاتر رفته در صورتی که همانند حالت‌های پیشین کاهش غلظت اولیه تأثیر مستقیمی در حذف داشته است. جریان الکتریکی یکی از اصلی‌ترین عامل‌هایی است که به‌طور مستقیم بر عملکرد انعقاد در طول فرایند لخته سازی الکتریکی تأثیر می‌گذارد. جریان به‌طور مستقیم مقدار منعقد شده، میزان تولید حباب را تعیین می‌کند و مقدار فلز حل شده، به شدت مقدار الکتریکی که از محلول الکترولیتی عبور می‌کند بستگی دارد. افزایش جریان می‌تواند سرعت حذف نیترات را بهبود بخشد. اما با افزایش جریان الکتریکی، انفعال و قطبش الکترود شدت می‌یابد و باعث مصرف زیاد انرژی می‌شود. همچنین با کاهش غلظت اولیه نیترات، مقدار یون‌های نیترات موجود در محلول برای حذف آن‌ها کم‌تر می‌شود [۲۳،۱۷].

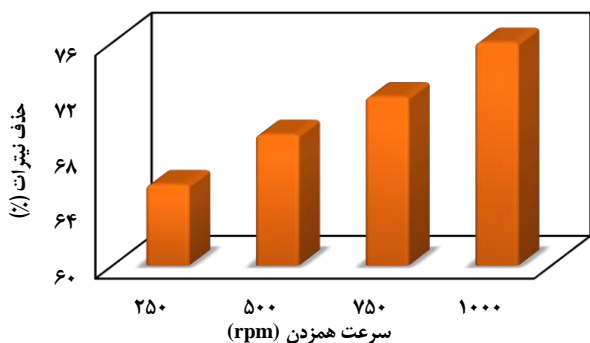


جدول ۳ - نقطه‌های بهینه پارامترها و نتیجه‌های به دست آمده

غلظت اولیه (میلی گرم بر لیتر)	pH	فاصله الکترود (سانتی متر)	ولتاژ (ولت)	زمان انجام فرایند (دقیقه)	مقدار پیش‌بینی شده حذف نیترات	مقدار به دست آمده از آزمایش
۱۶/۰	۹/۳	۴/۰	۱۲/۰	۵۰/۰	٪ ۷۰/۰	٪ ۶۹/۲



شکل ۵ - تأثیر نمک سدیم کلرید بر حذف نیترات در حالت بهینه



شکل ۶ - تأثیر سرعت هم‌زدن بر حذف نیترات در حالت بهینه

## تأثیر هم‌زدن مکانیکی در حذف نیترات

برای بررسی این حالت نیز پارامترهای اصلی در حالت بهینه نگاه داشته شد و از هم‌زدن مکانیکی به جای سنگ هوا استفاده شد. در دوره‌های گوناگون از هم‌زدن مکانیکی (۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ rpm) مشاهده شد که با افزایش سرعت هم‌زدن میزان حذف نیترات افزایش یافت (شکل ۶).

تلاطم برای انعقاد ضروری است زیرا باید لخته‌های کوچک برای بهبود انتقال جرم هم‌زده شوند و با یکدیگر تماس بگیرند تا بتوانند لخته‌های بزرگی تشکیل دهند. بدون هم‌زدن یا اختلاط، اثر لخته سازی کند و غیر قابل کنترل است. با این حال، هم‌زدن بیش از حد نیز می‌تواند با نیروی برشی زیاد به اندازه لخته‌ها و مقاومت لخته‌های اولیه تولید شده توسط انعقاد یون آلومینیوم همراه باشد و

جدول ۴ - مقایسه مصرف انرژی و درصد حذف پژوهش‌های پیشین

پژوهشگر	مصرف انرژی ( $\frac{kWh}{m^3}$ )	درصد حذف نیترات	مرجع
کرامتی و همکاران	۲۹/۱۶	۵۶	[۳۰]
آپشانکار و گوئل <sup>۱</sup>	۶/۳۳	۲۹/۲۳	[۳۱]
گازوانی و همکاران <sup>۲</sup>	۳/۴۶	۷۰	[۱۸]
امام جمعه و همکاران	۱۴۴/۱۵	۸۷/۹۵	[۳۲]
قنبری و همکاران	۲/۳۲	۸۱/۵	[۲۰]
عبدل عزیز و همکاران	۶	۷۲/۰۶	[۹]

پس از پیدا کردن نقاط بهینه، تأثیر غلظت نمک، هم‌زدن مکانیکی و تعداد الکترودها در حالت بهینه بررسی می‌شود.

## تأثیر نمک سدیم کلرید در حذف نیترات

برای بررسی تأثیر نمک سدیم کلرید آزمایش‌هایی در غلظت‌های گوناگون ۰/۱ گرم بر لیتر، ۰/۵ گرم بر لیتر، ۱ گرم بر لیتر و ۲ گرم بر لیتر از نمک در حالت بهینه انجام شد. شکل ۵ نشان می‌دهد که حضور نمک تا حدی تأثیر مثبتی در بازده حذف داشته و غلظت بیش‌تر آن بازده را کاهش داده است. الکترولیتی شدن محلول باعث می‌شود که عبور جریان بین الکترودها راحت‌تر صورت گیرد.

دلیل‌های دیگر این است که آنیون‌های  $Cl^-$  از سدیم کلرید می‌توانند لایه غیرفعال روی الکترودهای آلومینیوم را از بین ببرند و بنابراین میزان انحلال آندی فلز را افزایش می‌دهند، که منجر به تولید هیدروکسید آلومینیوم بیش‌تر می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، مقدار نمک حل‌شده باید مناسب باشد و بیش‌تر از آن مقدار مشخص، بازده عملیاتی کاهش می‌یابد. توضیح‌های بالا به این دلیل است که یون‌های کلر موجود در محلول دارای سدیم هیدروکسید، برخی ترکیب‌های ناپایدار مانند  $Al(OH)_2Cl$ ،  $Al(OH)Cl_2$  و  $AlCl_3$  را تشکیل می‌دهد. ترکیب‌های ناپایدار در نهایت به‌عنوان شکلی از  $AlCl_4$  در محلول با کلر اضافی حل می‌شوند. بنابراین، مقدار منعقد کننده‌های  $Al(OH)_3$  کاهش می‌یابد و در نتیجه بازده حذف کاهش می‌یابد [۲۶، ۲۵، ۲۰].

(۱) Apshankar and Goel

(۲) Ghazouani et al



نیترات و فاصله بین الکترودها با بازده حذف نیترات معادله عکس دارد به این صورت که با افزایش هر کدام از این پارامترها بازده حذف کاهش یافته و همچنین ولتاژ اعمال شده و زمان انجام فرایند معادله مستقیمی با بازده دارند. درحالی که برای pH یک نقطه بهینه در محیط بازی وجود دارد که در آن نقطه بازده، بیشترین خواهد بود. در بین ۴۸ آزمایش گوناگون انجام شده، بیشترین درصد حذف نیترات برای حالت زیر می باشد که بازده ۷۸٪ شد:

$C_i = 16$  میلی گرم بر لیتر،  $pH = 9/3$ ،  $ED = 4$  سانتی متر،  $V = 23$  ولت،  $ET = 90$  دقیقه. در حالی که بهترین نقطه بهینه برای آزمایش های اصلی به صورت زیر می باشد که توسط نرم افزار طراحی آزمایش ارایه شده است:

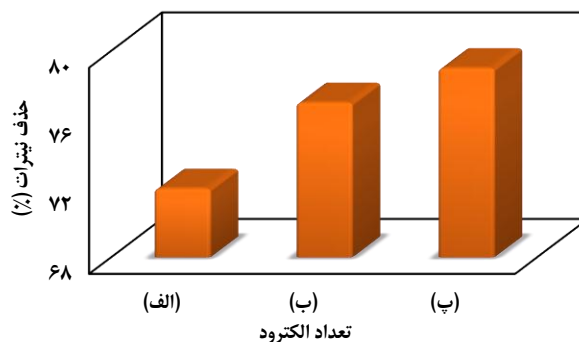
$C_i = 16$  میلی گرم بر لیتر،  $pH = 9/3$ ،  $ED = 4$  سانتی متر،  $V = 12$  ولت،  $ET = 50$  دقیقه، که در این حالت مقدار پیش بینی شده بازده توسط نرم افزار برابر ۷۰٪ و مقدار تجربی آن ۶۹/۲٪ است.

در حالت بهینه نیز تأثیر حضور نمک در محلول، همزن مکانیکی، تعداد الکترودها بررسی شد. حضور ۰/۵ گرم بر لیتر نمک سدیم کلرید یا سرعت هم زدن برابر ۱۰۰۰ rpm و یا وجود دو جفت الکترود، بیشترین تأثیر را در افزایش بازده داشته اند.

همچنین روش لخته سازی الکتریکی می تواند در مقیاس بزرگ به دلیل مصرف انرژی که دارد، هزینه بر باشد.

### قدردانی

از شورای پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران به دلیل حمایت مالی و معنوی در طول انجام این پژوهش بسیار قدردانی می شود.



شکل ۷ - تأثیر تعداد الکترودها (الف): ۱ کاتد و ۲ آنده، (ب): ۲ کاتد و ۱ آنده، (پ): ۲ کاتد و ۲ آنده بر حذف نیترات در حالت بهینه

لخته ها را می تواند به ذره های کوچک تقسیم کند و زنجیره های مولکولی به راحتی آسیب ببیند [۲۷].

### تأثیر تعداد الکترودها در حذف نیترات

برای پی بردن به تأثیر تعداد الکترودها در حذف نیترات مطابق با بررسی های پیشین آزمایش هایی در حالت بهینه و با تعداد الکترودهای گوناگون صورت گرفت. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می کنید با اضافه تر شدن تعداد الکترودها بازده فرایند افزایش محسوسی داشته است. قابل ذکر می باشد که در این حالت نیز آندها از جنس آلومینیوم، کاتدها از جنس آهن و همچنین اتصال ها به صورت تک قطبی<sup>۱</sup> موازی بوده اند.

همان گونه که می دانیم بین راندمان حذف و تعداد کل الکترودها معادله مستقیمی وجود دارد. بنابراین با افزایش تعداد الکترودها، سطح الکترودها افزایش یافته، یون های آلومینیوم بیش تری آزاد شده و توزیع تراکم گونه های انعقادی مؤثرتر خواهد بود که این می تواند انعقاد مربوطه را ایجاد کرده و حذف نیترات را بهبود بخشد درحالی که انرژی مصرفی ثابت است. همچنین وقتی که تعداد کاتد از آنده کم تر است به دلیل عدم تولید هیدروکسیدهای کافی توسط کاتد، بازده حذف در مقایسه با سایر حالت ها کم تر خواهد بود [۲۸، ۲۹].

### نتیجه گیری

فرایند لخته سازی الکتریکی برای حذف نیترات از محلول آبی با موفقیت اعمال شد. مشخص شد که راندمان حذف نیترات به غلظت اولیه نیترات، pH، فاصله بین الکترودها، ولتاژ اعمال شده و زمان انجام فرایند بستگی دارد. نتیجه ها نشان داد که غلظت اولیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

(۱) Monopolar

## مراجع

- [۱] ابراهیمی آ.، عرفانی م.، "بررسی کارایی روش‌های مختلف حذف بیولوژیکی مواد مغذی و مقایسه اقتصادی آن‌ها"، دومین کنفرانس ملی سازه - زلزله - ژئوتکنیک، بابلسر، مازندران، (۱۳۹۱).
- [۲] عالیقدری م.، حضرتی ص.، سخایی زاده ع.، سلیمان پور م.، "اندازه‌گیری غلظت نیترات در منابع تأمین کننده و شبکه توزیع آب آشامیدنی شهر اردبیل"، سلامت و بهداشت، **۲(۲):** ۶۹ تا ۷۵ (۱۳۹۰).
- [3] Ziouvelou A.-M., "Denitrification of Potable Water Using Electrochemical and Biological Processes" Thesis, University of Patras, Greece, (2018).
- [4] Barrabés N., Sá J., Catalytic Nitrate Removal from Water, Past, Present and Future Perspectives, *Applied Catalysis B: Environmental*, **104(1-2):** 1-5 (2011).
- [5] Salam M.A., Fageeh O., Al-Thabaiti S.A., Obaid A.Y., Removal of Nitrate Ions from Aqueous Solution Using Zero-Valent Iron Nanoparticles Supported on High Surface Area Nanographenes, *Journal of Molecular Liquids*, **212:** 708-715 (2015).
- [6] Motamedi E., Atouei M.T., Kassaei M., Comparison of Nitrate Removal from Water Via Graphene Oxide Coated Fe, Ni and Co Nanoparticles, *Materials Research Bulletin*, **54:** 34-40 (2014).
- [7] Moradi M., Ashrafizadeh S.N., Nitrate Removal from Tapwater by Means of Electrocoagulation-Flotation Process, *Separation Science and Technology*, **55(8):** 1577-1587 (2019).
- [8] Amarine M., Lekhlif B., Sinan M., El Rharras A., Echaabi J., Treatment of Nitrate-Rich Groundwater Using Electrocoagulation with Aluminum Anodes, *Groundwater for Sustainable Development*, **11:** 100371 (2020).
- [9] Abdel-Aziz M., El-Ashtouky E.Z., Zoromba M.S., Bassyouni M., Sedahmed G., Removal of Nitrates from Water by Electrocoagulation Using a Cell with Horizontally Oriented Al Serpentine Tube Anode, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **82:** 105-112 (2020).
- [10] Wang Z., Fei X., He S., Huang J., Zhou W., Comparison of Heterotrophic and Autotrophic Denitrification Processes for Treating Nitrate-Contaminated Surface Water, *Science of the Total Environment*, **579:** 1706-1714 (2017).
- [11] Pulkka S., Martikainen M., Bhatnagar A., Sillanpää M., Electrochemical Methods for the Removal of Anionic Contaminants from Water—a Review, *Separation and Purification Technology*, **132:** 252-271 (2014).
- [12] Emamjomeh M.M., Sivakumar M., Review of Pollutants Removed by Electrocoagulation and Electrocoagulation/Flotation Processes, *Journal of environmental management*, **90(5):** 1663-1679 (2009).
- [13] Liu H., Zhao X., Qu J., "Electrocoagulation in Water Treatment", Springer (2010).
- [14] Crittenden JC., Trussell RR., Hand DW., Howe KJ., Tchobanoglous G., "Principles and Design", John Wiley & Sons, (2005).

- [15] Tabash T.M., "Nitrate Removal from Groundwater Using Continuous Flow Electrocoagulation Reactor", Thesis, The Islamic University-Gaza, (2013).
- [16] Emamjomeh M., Sivakumar M., *Electrocoagulation (Ec) Technology for Nitrate Removal, Faculty of Engineering*, **1(1)**:1-8 (2005).
- [17] Xu D., Li Y., Yin L., Ji Y., Niu J., Yu Y., *Electrochemical Removal of Nitrate in Industrial Wastewater, Frontiers of environmental science & engineering*, **12(1)**: 9 (2018).
- [18] Ghazouani M., Bousselmi L., Akrou H., *Combined Electrocoagulation and Electrochemical Treatment on Bdd Electrodes for Simultaneous Removal of Nitrates and Phosphates, Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8(6)**: 104509 (2020).
- [19] Yao J., Mei Y., Yuan T., Chen J., Pan H., Wang J., *Electrochemical Removal of Nitrate from Wastewater with a Ti Cathode and Pt Anode for High Efficiency and N<sub>2</sub> Selectivity, Journal of Electroanalytical Chemistry*, **882**: 115019 (2021).
- [20] Ghanbari F., Moradi M., Mohseni-Bandpei A., Gohari F., Abkenar T.M., Aghayani E., *Simultaneous Application of Iron and Aluminum Anodes for Nitrate Removal: A Comprehensive Parametric Study, International Journal of Environmental Science and Technology*, **11(6)**: 1653-1660 (2014).
- [21] Hashemzadeh F., Behnejad M., Hassani A., *Investigation of the Performance of Electrocoagulation Process in the Simultaneous Elimination of Nitrate and Phosphate from Water, Journal of Water and Wastewater*, **31(5)**: 184-195 (2020).
- [22] Mohammadi A., Khadir A., Tehrani R.M., *Optimization of Nitrogen Removal from an Anaerobic Digester Effluent by Electrocoagulation Process, Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7(3)**: 103195 (2019).
- [23] Ebadi M., Asareh A., Jalilzadeh Yengejeh R., Hedayat N., *Investigation of Electro-Coagulation Process for Phosphate and Nitrate Removal from Sugarcane Wastewaters, Iranian Journal of Toxicology*, **15(1)**: 19-26 (2021).
- [24] Nariyan E., Sillanpää M., Wolkersdorfer C., *Uranium Removal from Pyhäsalmi/Finland Mine Water by Batch Electrocoagulation and Optimization with the Response Surface Methodology, Separation and Purification Technology*, **193**: 386-397 (2018).
- [25] Zhang S., Zhang J., Wang W., Li F., Cheng X., *Removal of Phosphate from Landscape Water Using an Electrocoagulation Process Powered Directly by Photovoltaic Solar Modules, Solar Energy Materials and Solar Cells*, **117**: 73-80 (2013).
- [26] Makover J., Hasson D., Semiat R., Shemer H., *Electrochemical Removal of Nitrate from High Salinity Waste Stream in a Continuous Flow Reactor, Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8(3)**: 103727 (2020).
- [27] Kim M.-K., Kim T., Kim T.-K., Joo S.-W., Zoh K.-D., *Degradation Mechanism of Perfluorooctanoic Acid (Pfoa) During Electrocoagulation Using Fe Electrode, Separation and Purification Technology*, **247**: 116911 (2020).

- [28] Palahouane B., Drouiche N., Aoudj S., Bensadok K., [Cost-Effective Electrocoagulation Process for the Remediation of Fluoride from Pretreated Photovoltaic Wastewater](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **22**: 127-131 (2015).
- [29] Cheballah K., Sahmoune A., Messaoudi K., Drouiche N., Lounici H., [Simultaneous Removal of Hexavalent Chromium and COD from Industrial Wastewater by Bipolar Electrocoagulation](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **96**: 94-99 (2015).
- [30] Karamati-Niaragh E., Moghaddam M.R.A., Emamjomeh M.M., Nazlabadi E., [Evaluation of Direct and Alternating Current on Nitrate Removal Using a Continuous Electrocoagulation Process: Economical and Environmental Approaches through RSM](#), *Journal of environmental management*, **230**: 245-254 (2019).
- [31] Apshankar K.R., Goel S., [Nitrate Removal from Drinking Water Using Direct Current or Solar Powered Electrocoagulation](#), *SN Applied Sciences*, **2(2)**: 304 (2020).
- [32] Emamjomeh M.M., Jamali H.A., Moradnia M., [Optimization of Nitrate Removal Efficiency and Energy Consumption Using a Batch Monopolar Electrocoagulation: Prediction by RSM Method](#), *Journal of Environmental Engineering*, **143(7)**: 04017022 (2017).