

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.5, pp: 184-195

# Investigation of the Performance of Electrocoagulation Process in the Simultaneous Elimination of Nitrate and Phosphate from Water

F. Hashemzadeh<sup>1</sup>, M. Behnejad<sup>2</sup>, A. H. Hassani<sup>3</sup>

1. PhD Student in Environmental Engineering (Water and Wastewater), Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Corresponding Author) farzadhashemzadeh91@gmail.com

2. PhD Student in Environmental Engineering (Water and Wastewater), Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Prof., Dept. of Environmental Engineering (Water and Wastewater), Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received Oct. 12, 2019 Accepted Feb. 13, 2020)

## To cite this article:

Hashemzadeh, F., Behnejad, M., Hassani, A. H. 2020. "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. Doi: 10.22093/wwj.2020.204492.2936. (In Persian)

## Abstract

Nitrate and phosphate are of specific importance among different water pollutants due to their effect on aquatic ecosystems and disrupting their balance. The electrocoagulation process has been recognized as a novel method that has recently been employed for the removal of nitrate and phosphate. Therefore, the present study was aimed at investigating the efficiency of simultaneous removal of nitrate and phosphate from water through an electrical coagulation process. This experimental study was performed with an experimental scale as a pilot. The pilot was made of Plexiglas with the volume of 5.4 liters associated with a DC power supply. Parameters of the reaction time (5-90 min), pH of water (3-9), the concentration of nitrate and phosphate (1-50 mg/l), electrode materials (iron, aluminum, and steel), the distance between electrodes (1-10 cm), and the current's voltage (5-40 V) have been investigated in this research. The effect of each parameter was also examined on the amount of nitrate and phosphate removal. Obtained results were then analyzed to determine the efficiency of nitrate and phosphate removal in the form of comparable diagrams. Results of current experiments represented the optimal parameters including the reaction time of 60 min, pH of 7, initial concentration of 10 mg/l, electrodes of iron-iron, with the distance of 5 cm, and input voltage of 30 V. The removal efficiency of nitrate and phosphate under optimal condition was reported 95 and 45%, respectively, as the maximum removal rates. The present study has introduced the electrocoagulation process as a reliable and flexible way to purify water resources from nitrate and phosphate.

**Keywords:** Electrical Coagulation, Nitrate, Phosphate, Water and Wastewater Treatment.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۵، صفحه: ۱۹۵-۱۸۴

## بررسی عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در حذف هم‌زمان نیترات و فسفات از آب

فرزاد هاشم‌زاده<sup>۱</sup>، محسن بهنژاد<sup>۲</sup>، امیرحسام حسنی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط‌زیست گرایش آب و فاضلاب، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران  
 (نویسنده مسئول) farzadhashemzadeh91@gmail.com  
 ۲- دانشجوی دکترای مهندسی محیط‌زیست گرایش آب و فاضلاب، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران  
 ۳- استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۸۷/۲۰ پذیرش ۹۸۷/۲۴)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:  
 هاشم‌زاده، ف.، بهنژاد، م.، حسنی، ا. ح.، ۱۳۹۹، "بررسی عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در حذف هم‌زمان نیترات و فسفات از آب" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۵)، ۱۹۵-۱۸۴.  
 Doi: 10.22093/wwj.2020.204492.2936

### چکیده

در میان آلاینده‌های مختلف آب، نیترات و فسفات به دلیل تأثیر در اکوسیستم‌های آبی و برهم زدن تعادل آنها اهمیت ویژه‌ای دارند. امروزه فرایندهای مختلفی برای حذف نیترات و فسفات وجود دارد که یکی از این روش‌ها، انعقاد الکتریکی (الکتروکواگولاسیون) است. هدف از این پژوهش بررسی کارایی حذف هم‌زمان نیترات و فسفات از آب توسط فرایند انعقاد الکتریکی است. این پژوهش یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که به شکل پایلوت انجام شد. پایلوت از جنس پلکسی گلاس با حجم ۵/۴ لیتر به همراه یک منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) استفاده شد. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش شامل زمان واکنش (۵ تا ۹۰ دقیقه)، pH آب (۳ تا ۹)، غلظت نیترات و فسفات (۱ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، جنس الکترودها (آهن، آلومینیوم و استیل)، فاصله بین الکترودها (۱ تا ۱۰ سانتی‌متر) و ولتاژ جریان (۵ تا ۴۰ ولت) بود و مقدار تأثیر هر یک از پارامترها بر مقدار حذف فسفات و نیترات بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام شده از این پژوهش نشان داد که زمان واکنش ۶۰ دقیقه، pH برابر ۷، غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، جنس الکترودها آهن-آهن، فاصله بین الکترودها ۵ سانتی‌متر و ولتاژ ورودی ۳۰ ولت به عنوان پارامترهای بهینه مشخص شده‌اند. کارایی حذف فسفات و نیترات در شرایط بهینه به ترتیب ۹۵ و ۴۵ درصد گزارش شده است که بیشترین مقدار درصد حذف است. این پژوهش نشان داد که فرایند الکتروکواگولاسیون می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد و قابل‌انعطاف به منظور تصفیه نیترات و فسفات از منابع آبی استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** انعقاد الکتریکی، نیترات، فسفات، تصفیه آب و فاضلاب

### ۱- مقدمه

آب اشاره کرد، بنابراین حذف نیترات از آب و فاضلاب نیز اهمیت زیادی دارد (Vasudevan and Oturan, 2014).  
 به منظور حذف و پاکسازی نیترات و فسفات از آب، روش‌های گوناگونی پیشنهاد شد که از جمله این روش‌ها می‌توان به تکنیک‌هایی مانند اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون، جذب سطحی و

آلودگی نیترات و فسفات در آب‌های سطحی و زیرزمینی یک مشکل مهم و روبه‌رشد در همه جهان است. افزایش غلظت نیترات در آب خصوصاً در آب‌های زیرزمینی، سبب شیوع بیماری‌های ناشی از افزایش نیترات می‌شود که از آن جمله می‌توان به سندرم بلو بی بی و سرطان معده ناشی از تشکیل ترکیبات نیتروزآمین در

جریان فاضلاب حل شده نام برد که نیاز به تعویض مرتب دارد. یک لایه اکسید ممکن است بر روی کاتد تشکیل شود که منجر به افت کارایی واحد فرایند انعقاد الکتریکی شود. همچنین هیدروکسیدهای ژلاتینی شکل تولیدی در فرایند، ممکن است گاهی تمایل به انحلال داشته باشند (Hashim et al., 2019).

در فرایند الکتروکواگولاسیون، مبنای کار بر اصول الکتروشیمیایی پایه‌گذاری شده است و عبارت است از تجزیه فلز از آند به شکل یون‌های هیدروکسید و تشکیل گاز هیدروژن در کاتد (Vik et al., 1984).

فرایند انعقاد الکتریکی شامل ناپایداری ذرات معلق، کلوئیدی و محلول در یک محیط آبی با استفاده از جریان الکتریکی است که طی آن ذرات با کاهش بار سطحی بر نیروی واندروالس بین خود غلبه کرده و تولید لخته می‌کند (Şengil, 2006).

در این روش اغلب از آلومینیوم و آهن به عنوان الکترود استفاده می‌شود که با عبور جریان مستقیم از الکترود آند (الکتروود قربانی شونده) این الکترود خورده شده و کاتیون‌های منعقدکننده را برای انجام واکنش‌های تصفیه به محلول وارد می‌کند. از این رو در این روش نیازی به استفاده از مواد شیمیایی به عنوان منعقدکننده نیست (Ricordel et al., 2010).

کاتیون‌های با بار زیاد، ذرات کلوئیدی را به وسیله تشکیل کمپلکس‌های پلی هیدروکسید چند ظرفیتی ناپایدار می‌کنند. این کمپلکس‌ها، خاصیت جذب سطحی زیادی برای تشکیل توده با آلاینده‌ها دارند.

حرکت دورانی گاز هیدروژن، کمکی برای اختلاط و لخته‌سازی است. وقتی لخته تولید می‌شود، در نتیجه تولید گاز الکترولیتی، آلاینده‌ها در لایه کف<sup>۲</sup> لخته در سطح مایع حذف می‌شوند.

همچنین هیدرولیز کاتیون‌ها در آب، سبب تشکیل هیدروکسید همراه با گونه‌های غالب متناسب با pH محلول می‌شود. در مجموع واکنش‌های متقابل بین گونه‌ها به طرق مختلفی در محلول انجام می‌شوند که در نهایت حذف آلاینده‌ها روش‌های مختلفی به همراه دارد. یکی از این روش‌ها مهاجرت یون‌های تولیدی به سمت یک الکترود با بار الکتریکی مخالف (الکتروفورزیس) و تشکیل فلوک به دلیل خنثی‌سازی بار بوده است. تشکیل رسوب کاتیون (یون

تصفیه بیولوژیکی اشاره کرد. در حال حاضر روش‌های امیدوار کننده‌ای بر اساس تکنولوژی فرایندهای الکتروشیمیایی و کواگولاسیون برای حذف نیترات و فسفات در آب در حال توسعه است (Aoudj et al., 2010).

الکتروکواگولاسیون در حقیقت زیرمجموعه‌ای از کواگولاسیون است. اتفاقی که در این قسمت رخ می‌دهد، کاملاً مشابه با انعقاد شیمیایی است، ولی با این تفاوت که منبع تأمین منعقدکننده‌ها در اینجا الکترودها هستند و تا زمانی که جریان برق از داخل محلول الکترولیت که همان آب است عبور نکند، واکنش‌های اکسایش و کاهش انجام نمی‌شود. الکتروکواگولاسیون به عنوان روشی مناسب برای تصفیه آب و طیف وسیعی از انواع فاضلاب‌ها شامل فلزات سنگین، رنگ، تولیدات پتروشیمی، ویروس، باکتری، آفت‌کش‌ها، آرسنیک، MTBE<sup>۱</sup>، سیانید، BOD، COD، جامدات معلق، تصفیه فاضلاب شهری، صنعتی و تجاری برای مثال تصفیه فاضلاب لبنیات شناخته شده است (Holt et al., 1999).

الکتروکواگولاسیون که آن را به اختصار EC می‌نامند، نخستین بار توسط نیام و همکاران به منظور تصفیه فاضلاب کشتی‌ها در سال ۱۹۰۶ استفاده شد (Ni'am et al., 2007).

فناوری انعقاد الکتریکی یک گزینه مناسب به جای استفاده از یون‌های فلزی یا ترکیبات پلیمری و پلی‌الکترولیت‌ها برای شکست امولسیون‌ها و سوسپانسیون‌های پایدار محسوب می‌شود. در مواردی کاهش ۹۵ تا ۹۹ درصد آلاینده‌های موجود در فاضلاب صنعتی و پالایشگاه‌ها و واحدهای پردازش مواد غذایی، مس، سرب، نیکل و روی از طریق استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی گزارش شده است.

معمولاً پژوهش‌های تجربی انجام شده پیرامون فرایند انعقاد الکتریکی برای تعیین امکان حذف آلاینده و یا تعیین پارامترهای بهره‌برداری بوده است. این پروسه در میان فرایندهای حذف با سرعت زیاد محسوب می‌شود که نیازمند زمان ماند کم است (Aoudj et al., 2015).

در کنار مزایای فرایند الکتروکواگولاسیون، معایبی نیز وجود دارد که در زمان بهره‌برداری باید مورد توجه قرار گیرد که از جمله آن می‌توان به الکترودهای قربانی در نتیجه عمل اکسیداسیون در

<sup>2</sup> Flocc-Foam

<sup>1</sup> Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE)

درصد رسید (Jeong et al., 2014).

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز در پژوهشی به بررسی کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون توسط اکترودهای آهن و آلومینیوم در حذف BOD و COD از پساب کارواش پرداختند. در این پژوهش مقدار غلظت اولیه BOD و COD، pH، زمان تماس و ولتاژ اعمال شده به عنوان پارامترهای مورد آزمایش بودند. نتایج نشان داد که فرایند الکتروکواگولاسیون عملکرد خوبی در pH خنثی و ولتاژ ۳۰ در حذف مواد آلی از پساب کارواش دارد (Mohammadi et al., 2017b).

ایردمز و همکاران در سال ۲۰۰۶ تأثیر pH و اثرات غلظت اولیه فسفات و شدت جریان را بر مقدار حذف فسفات از فاضلاب توسط الکتروکواگولاسیون با الکترودهای آهنی بررسی کردند. در این آزمایش‌ها نتایج نشان داد که افزایش غلظت اولیه فسفات، نرخ حذف را کاهش می‌دهد. لیکن مصرف انرژی به دلیل افزایش هدایت الکتریکی آب، کمتر می‌شود. همچنین اثرات متغیرهای سیستم بر pH ثابت آنالیز شد. در نتایج حاصله از این آزمایش‌ها دیده شد که pH بهینه سیستم برابر ۷ بود (İrdemez et al., 2006).

ریگوردل و همکاران در سال ۲۰۱۰ طی پژوهشی تحت شرایط جریان مداوم، حذف دو آلاینده نیترات و آرسنیک انجام شد. بیشترین کارایی حذف ۸۴ درصد برای نیترات در ولتاژ ۲۵، ۷۵ درصد برای آرسنیک در ولتاژ ۲۰ ولت بود (Ricordel et al., 2010).

این پژوهش با هدف کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف هم‌زمان نیترات و فسفات از محیط‌های آبی با استفاده از الکترودهایی از جنس آهن، آلومینیم و استیل و تعیین پارامترهای بهینه از جمله مدت زمان تماس، غلظت اولیه نیترات و فسفات، ولتاژ ورودی و جنس الکترودهای مورد آزمایش انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش مدت زمان تماس، فاصله بین الکترودها، غلظت اولیه نیترات و فسفات، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی و pH به عنوان متغیرهای مورد بررسی در نظر گرفته شدند.

پایلوت مورد استفاده در فرایند الکتروکواگولاسیون در مقیاس آزمایشگاهی با حجم ۵/۴ لیتر با طول ۲۰، عرض ۱۵، ارتفاع ۱۸ و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر از جنس پلاکسی گلاس بود و از

هیدروکسید OH<sup>-</sup> با آلاینده‌ها) و واکنش کاتیون فلزی با یون OH<sup>-</sup> رسوب هیدروکسید را تشکیل می‌دهد که خاصیت جذب سطحی زیادی دارند، بنابراین به آلاینده‌ها متصل شده (پل زنی) که این مکانیسم نقش مهمی را در حذف ترکیبات آلی محلول ایفا می‌کند. از طرف دیگر هیدروکسیدها ساختارهای شبکه‌ای شکل را تشکیل می‌دهند و آلاینده‌ها را از میان مایع جمع می‌کنند (انعقاد جارویی). همچنین آلاینده‌ها با سمیت کمتر اکسید شده و توسط شناورسازی الکتریکی و چسبندگی به حباب‌ها حذف خواهند شد (Holt et al., 1999).

پژوهش‌ها در زمینه کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف آلاینده‌های مختلف از آب و پساب در چند سال اخیر افزایش یافته است. قنبری و همکاران در سال ۲۰۱۴ کاربرد راکتور الکتروشیمیایی در حذف نیترات از آب آشامیدنی شهر گچساران بررسی کردند که نتایج نشان داد مقدار حذف نیترات با افزایش دانسیته جریان و زمان ماند و کاهش pH افزایش پیدا می‌کند. تولید نیتريت به عنوان ترکیب واسطه نیز از مشکلات این روش است. در این پژوهش بهترین شرایط برای حذف نیترات pH=5، در زمان ۱۲۰ دقیقه و ولتاژ ۳۰ ولت به دست آمد (Ghanbari et al., 2014).

محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز در پژوهشی به بررسی کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف کدورت و مواد آلی از پساب کارواش پرداختند. متغیرهای مورد پژوهش شامل pH، ولتاژ، پتانسیل الکتریکی و زمان تماس بودند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقدار حذف کدورت با الکتروکواگولاسیون در pH=7 و ولتاژهای ۱۰ و ۳۰ ولت به ترتیب برابر با ۷۵ و ۹۹/۵۹ درصد بوده است. همچنین مقدار حذف COD با الکتروکواگولاسیون در pH=3 و در ولتاژهای ۱۰ و ۳۰ ولت به ترتیب ۶۷ و ۹۴ درصد گزارش شد (Mohammadi et al., 2017a).

جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ نیز کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف فسفات از محلول‌های آبی را در شهر تهران بررسی کردند. نتایج حاصله از آزمایش نشان داد که با افزایش ولتاژ اولیه از ۱۰ به ۴۰ ولت در pH=7 و در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه کارایی حذف از ۱۵ درصد به بیش از ۸۰ درصد افزایش می‌یابد و همچنین در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و در ولتاژ ثابت ۲۰ ولت در pH=7 کارایی حذف به بیشترین مقدار خود یعنی ۹۵

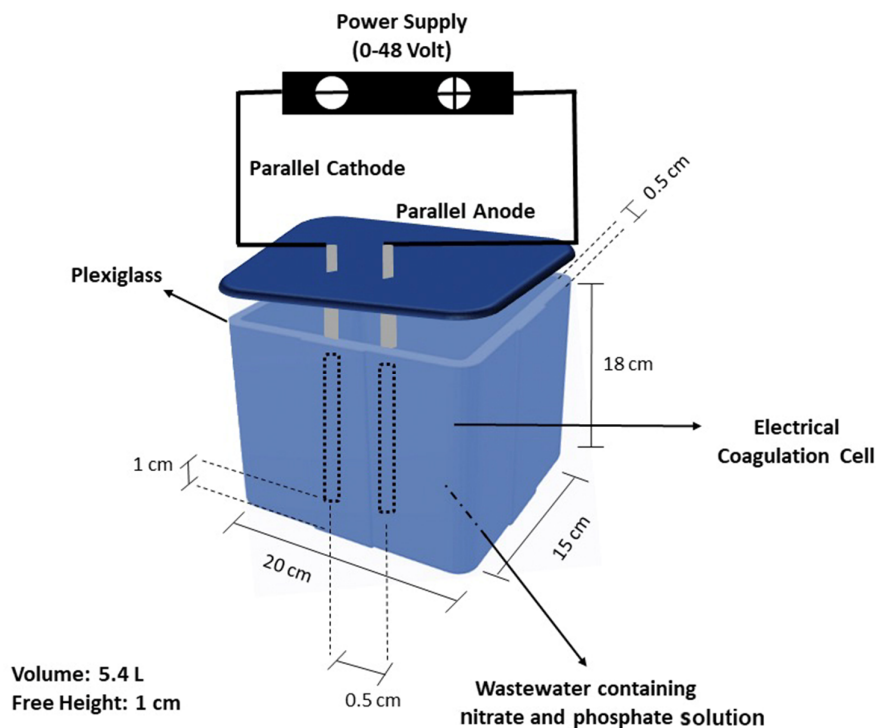


Fig. 1. The schematic electrocoagulation pilot used in this study

شکل ۱- شماتیک پایلوت اکتروکوآگولاسیون استفاده شده در این پژوهش

متاوانادات آمونیوم، معرف مولیبدات آمونیوم، هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال ساخت شرکت هچ<sup>۱</sup>، اسید کلریدریک غلیظ ۶۵ درصد و اسید سولفوریک رقیق ۰/۵ نرمال ساخت شرکت مرک<sup>۲</sup> در این پژوهش استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های آب در هر مرحله از پژوهش از نمک‌های نیترات سدیم ( $\text{NaNO}_3$ ) و پتاسیم منو دی هیدروژن فسفات ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) استفاده شد که متناسب با غلظت‌های مورد نظر نیترات و فسفات در آب، از نمک‌های فوق توزین شده و با آب مقطر به حجم رسانده شد.

در گام اول برای بررسی اثر زمان واکنش بر عملکرد فرایند اکتروکوآگولاسیون نمونه‌های آب با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات و فسفات و در زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه واکنش انجام و اقدام به نمونه‌برداری از پایلوت برای تعیین زمان بهینه حذف نیترات و فسفات شد. در مرحله بعد پس از تعیین زمان بهینه واکنش، به بررسی اثر pH بر عملکرد

الکترودهای از جنس آهن، آلومینیم و استیل با طول ۱۵، عرض ۱۵ و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شد. فاصله محل قرارگیری الکترودها از یکدیگر در بدنه پایلوت برابر ۰/۵ سانتی‌متر و فاصله الکترودها از کف پایلوت ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. اختلاط آب به کمک دستگاه همزن مغناطیسی که قابل تنظیم در دورهای مختلف بود با سرعت ثابت ۳۰۰ rpm انجام شد. در شکل ۱، شماتیک پایلوت الکتروکوآگولاسیون نشان داده شده است.

کلیه آزمایش‌ها این پژوهش در محل آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشگاه علوم و تحقیقات تهران در سال ۹۷-۱۳۹۶ و بر اساس دستورالعمل‌های ذکر شده در کتاب استاندارد متد چاپ سال ۲۰۰۵ انجام شد. سپس داده‌های حاصل از این پژوهش بر اساس علت و معلول به صورت نمودار با نرم‌افزار Excel با یکدیگر مقایسه و آنالیز شدند.

در طی انجام فرایند الکتروکوآگولاسیون و تعیین غلظت نیترات و فسفات قبل و بعد از فرایند استفاده شد. مواد شیمیایی شامل نمک نیترات سدیم، نمک مونو پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات، معرف

<sup>1</sup> Hach

<sup>2</sup> Merck

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن

$C_0$  غلظت اولیه و  $C_e$  غلظت نهایی نیترات و فسفات در محلول است.

### ۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر مدت زمان واکنش بر کارایی حذف نیترات و فسفات مطالعات در شرایط یکسان از لحاظ جنس و فاصله بین الکترودها، غلظت اولیه نیترات و فسفات و ولتاژ قرار گرفت و در زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه نمونه برداری انجام شد. شکل ۲ بررسی اثر مدت زمان واکنش بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر pH بر کارایی حذف نیترات و فسفات آزمایش در شرایط یکسان از لحاظ جنس و فاصله بین الکترودها، زمان واکنش و غلظت اولیه قرار گرفت و با pHهای ۳، ۵، ۷ و ۹ نمونه برداری انجام شد. شکل ۳ بررسی اثر pH بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر غلظت اولیه بر کارایی حذف نیترات و فسفات مطالعات در شرایط یکسان از لحاظ جنس و فاصله بین الکترودها، زمان واکنش و ولتاژ قرار گرفت و با غلظت‌های اولیه ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات و فسفات نمونه برداری انجام شد. شکل ۴ بررسی اثر غلظت اولیه بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می‌دهد.

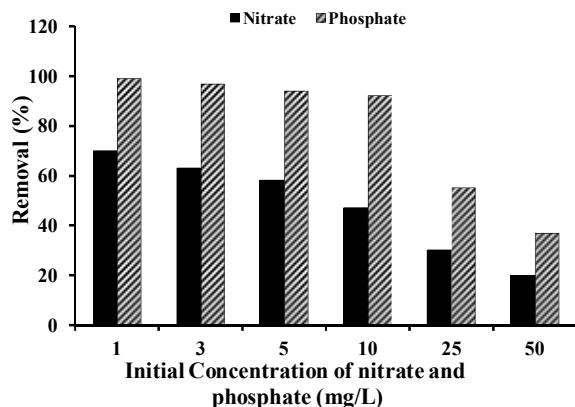
برای بررسی اثر جنس الکترود بر کارایی حذف نیترات و فسفات مطالعات در شرایط یکسان از لحاظ زمان واکنش، غلظت اولیه، فاصله بین الکترودها و ولتاژ قرار گرفت و کارایی حذف با دو الکترود آهن-آهن، دو الکترود آلومینیوم-آلومینیوم و دو الکترود آهن-آلومینیوم و دو الکترود استیل-استیل نمونه برداری انجام شد. شکل ۵ بررسی اثر جنس الکترودها بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر فاصله بین الکترودها بر کارایی حذف نیترات و فسفات مطالعات در شرایط یکسان از لحاظ زمان واکنش، غلظت اولیه نیترات و فسفات، جنس الکترود و ولتاژ قرار گرفت و در فواصل بین الکترود ۱، ۲، ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر نمونه برداری

فرایند الکتروکواگولاسیون و تعیین pH بهینه اقدام شد. در pHهای مختلف ۳، ۵، ۷ و ۹ نمونه‌های آب با غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در داخل راکتور ریخته شد و پس از طی شدن زمان واکنش اقدام به نمونه برداری از پایلوت شد. برای تنظیم pH در پایلوت از اسیدسولفوریک  $H_2SO_4$  و هیدروکسید سدیم NaOH ۰/۱ نرمال استفاده شد. در مرحله سوم به منظور بررسی اثر غلظت اولیه نیترات و فسفات بر عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون و تعیین غلظت بهینه، نمونه‌های آب در هر مرحله با یکی از غلظت‌های اولیه ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات و فسفات در داخل راکتور ریخته شد و پس از تنظیم pH و طی شدن زمان واکنش بهینه اقدام به نمونه برداری شد. مرحله چهارم اثر جنس الکترودها بر عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون و تعیین جنس بهینه الکترود بود. نمونه‌های آب حاوی نیترات و فسفات با غلظت، pH و زمان واکنش بهینه به دست آمده از مراحل قبل در پایلوت اعمال شده و در هر مرحله پس از قرار دادن جنس‌های مختلف از الکترودها شامل آهن - آهن، آهن - آلومینیوم، آلومینیوم - آلومینیوم و استیل - استیل در کاتد و اقدام به نمونه برداری از پایلوت شد. در مرحله تعیین اثر فاصله بین الکترودها بر عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون، نمونه‌های آب حاوی نیترات و فسفات با اعمال شرایط بهینه به دست آمده در مراحل قبلی داخل پایلوت ریخته شد و پس از قرار دادن الکترودهای آهن - آهن در کاتد و آند در هر یک از فواصل مختلف ۱، ۲، ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر واکنش انجام و اقدام به نمونه برداری از پایلوت شد.

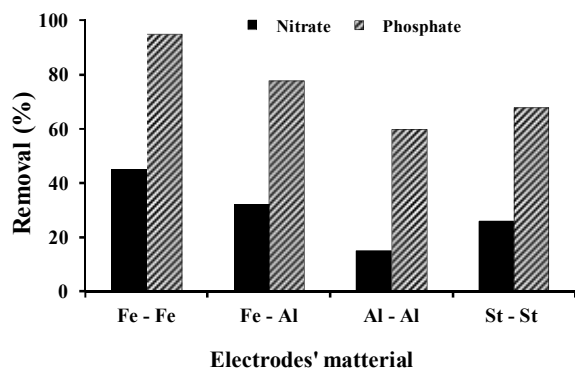
به منظور تعیین اثر ولتاژ جریان بر عملکرد فرایند الکتروکواگولاسیون، نمونه‌های آب حاوی نیترات و فسفات با شرایط بهینه قبلی داخل راکتور ریخته شد و ولتاژ برق پایلوت در هر مرحله بر روی یکی از ولتاژهای مختلف ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت، جریان مستقیم اعمال و در پس از طی شدن زمان واکنش واکنش اقدام به نمونه برداری از پایلوت شد. لازم به ذکر است یک نمونه نیز قبل از برقراری جریان برق به عنوان نمونه شاهد در هر مرحله از پایلوت برداشت و مقدار نیترات و فسفات آن اندازه‌گیری شد. در پایان هر مرحله از آزمایش نیز پس از آماده‌سازی نمونه‌های برداشت شده، غلظت نیترات و فسفات نمونه‌ها به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر شرکت هچ آمریکا و مدل DR5000 اندازه‌گیری و درصد حذف آنها طبق معادله ۱ مشخص شد





**Fig. 4.** Effect of concentration changes on nitrate and phosphate removal efficiency (distance between electrodes 5 cm, matter of electrodes are iron-iron, for 60 min reaction time, voltage 30 Volts, pH=7)

شکل ۴- اثر تغییرات غلظت بر کارایی حذف نیترات و فسفات (فاصله بین الکترودها ۵ سانتی متر، جنس الکترودها آهن-آهن، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت و pH=۷)

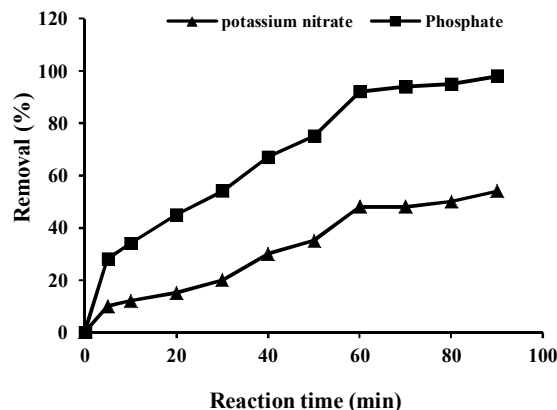


**Fig. 5.** Effect of electrode material on nitrate and phosphate removal efficiency (with 10mg/L concentration of nitrate and phosphate, distance between electrodes 5 cm, 60 min reaction time, voltage 30 Volts, pH=7)

شکل ۵- تأثیر جنس الکترود بر کارایی حذف نیترات و فسفات (غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی گرم در لیتر، فاصله بین الکترودها ۵ سانتی متر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت و pH=۷)

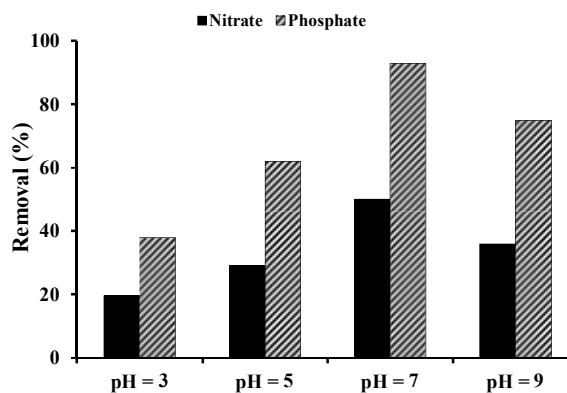
الکترودها، زمان واکنش و غلظت اولیه قرار گرفت و در ولتاژهای مختلف ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت نمونه برداری انجام شد. شکل ۷ بررسی اثر ولتاژ ورودی بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می دهد.

انجام شد. شکل ۶ بررسی اثر فاصله بین الکترودها بر کارایی حذف نیترات و فسفات را نشان می دهد. برای بررسی اثر ولتاژ ورودی بر کارایی حذف نیترات و فسفات مطالعات در شرایط یکسان از لحاظ جنس و فاصله بین



**Fig. 2.** Effect of reaction time on nitrate and phosphate removal efficiency (with concentration 10 mg/L of nitrate and phosphate, matter of electrodes is iron-iron, distance between electrodes 5 cm, voltage 30 Volt, primitive pH of water)

شکل ۲- اثر زمان واکنش بر کارایی حذف نیترات و فسفات (غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی گرم در لیتر، جنس الکترودها آهن-آهن، فاصله بین الکترودها ۵ سانتی متر، ولتاژ ۳۰ ولت، pH اولیه آب)



**Fig. 3.** The effect of pH changes on nitrate and phosphate removal efficiency (with 10mg/L concentration of nitrate and phosphate, iron-iron matter of electrodes, distance between electrodes 5 cm, 60 min reaction time, voltage 30 Volts)

شکل ۳- اثر تغییرات pH بر کارایی حذف نیترات و فسفات (غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی گرم در لیتر، جنس الکترود آهن-آهن، فاصله بین الکترودها ۵ سانتی متر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت)

همچنین در زمان‌های واکنش یکسان همواره درصد حذف فسفات در نمونه‌های آب بیشتر از درصد حذف نیترات است و در زمان‌های تماس کمتر از ۳۰ دقیقه، درصد حذف نیترات قابل توجه نیست. افزایش زمان انعقاد الکتریکی نقش بسزایی در انجام فرایند داشت. در طی الکترولیز در الکتروود مثبت، واکنش آندی و در الکتروود منفی واکنش‌های کاتدی اتفاق می‌افتد. یون‌های آزاد شده بار الکتریکی ذرات را خنثی کرده و به این ترتیب کوآگولاسیون شکل می‌گیرد (Holt et al., 2005).

کارایی حذف، مستقیماً بستگی به غلظت یون‌های تولیدی در الکتروودها دارد. با افزایش زمان الکترولیز، غلظت یون‌های تولیدی افزایش می‌یابد و در نتیجه لخته‌های هیدروکسید نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش تا ۶۰ دقیقه با سرعت بیشتر و از آن مدت به بعد به دلیل کاهش غلظت یون‌های تولیدی از الکتروود و در نتیجه کاهش تشکیل لخته‌های هیدروکسید به‌طور قابل توجه کاهش یافته است (Rahmani, 2009).

نتایج به‌دست آمده با پژوهش کومار و همکاران نیز که کارایی فرایند الکتروکوآگولاسیون در حذف نیترات از محلول‌های آبی را بررسی کردند، مطابقت دارد. در این پژوهش نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد با افزایش زمان تماس کارایی حذف افزایش می‌یابد به‌طوری که با افزایش زمان تماس از ۱۵ به ۹۰ دقیقه درصد حذف از ۱۰ درصد به بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است (Kumar and Goel, 2010).

### ۳-۲- تأثیر pH

با توجه به شکل ۳ با افزایش pH محیط داخل راکتور از ۳ تا ۷، درصد حذف نیترات و فسفات افزایش یافته و از pH=7 به بعد کاهش یافته است. به‌طوری که درصد حذف نیترات و فسفات در pH=7 به ترتیب ۵۰ و ۹۳ درصد گزارش شده است و pH=7 بهینه انتخاب استفاده شد. از آن پس با افزایش pH از ۷ تا ۹ یعنی به عبارتی در محیط قلیایی، درصد حذف نیترات و فسفات نه تنها افزایش نیافته بلکه کاهش نیز یافته است. در واقع اثر pH بر الکتروود آهن باعث می‌شود در pHهای اسیدی کمپلکس‌های هیدروکسید فلزی آهن که تأثیر زیادی در انعقاد ذرات و تشکیل لخته‌های درشت دارند تشکیل نمی‌شود و آهن به‌صورت یون فرو یا فریک در محیط وجود داشته باشد. در pHهای قلیایی نیز به جای

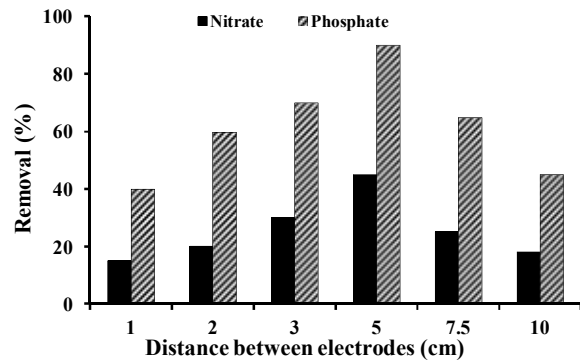


Fig. 6. Effect of distance between electrodes on nitrate and phosphate removal efficiency (with 10 mg/L concentration of nitrate and phosphate, electrode's matter of iron-iron, 60 min reaction time, voltage 30 Volts, primitive pH=7)

شکل ۶- اثر فاصله بین الکتروودها بر کارایی حذف نیترات و فسفات (غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، جنس الکتروودها آهن-آهن، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت و pH=7)

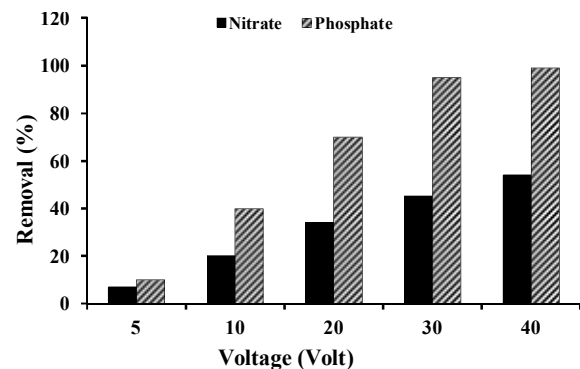


Fig. 7. Effect of input voltage on removal efficiency of nitrate and phosphate (with 10 mg/L concentration of nitrate and phosphate, electrode's matter of iron-iron, 5 cm distance between electrodes, 60 min reaction time, pH=7)

شکل ۷- اثر ولتاژ ورودی بر کارایی حذف نیترات و فسفات (غلظت نیترات و فسفات ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، جنس الکتروود آهن-آهن، فاصله بین الکتروودها ۵ سانتی‌متر، مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه و pH=7)

### ۳-۱- تأثیر مدت زمان واکنش

چنانچه در شکل ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش زمان واکنش درصد حذف نیترات و فسفات افزایش یافته است به‌طوری که در زمان ۶۰ دقیقه، درصد حذف فسفات و نیترات به ترتیب به ۹۲ و ۴۸ رسیده است. از آن پس با افزایش زمان واکنش تا ۹۰ دقیقه، درصد حذف نیترات و فسفات تغییر چندانی نکرده و تقریباً ثابت مانده است.



غلظت‌های کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیترات است و در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر (غلظت بیشتر) به دلیل کاهش کارایی تصفیه توصیه نمی‌شود (Mouedhen et al., 2008).

#### ۳-۴- تأثیر جنس الکترودها

به منظور بررسی اثر جنس الکترودها بر کارایی حذف نیترات و فسفات، آزمایش انجام و نمونه برداری در زمان تماس، pH و غلظت بهینه انجام شد. در فرایند الکتروکواگولاسیون جنس الکترود انتخابی تأثیر چشمگیری در کارایی حذف دارد، از این رو انتخاب جنس مناسبی از الکترود مهم است و همچنین جنس الکترود انتخابی برای تصفیه آب آشامیدنی باید برای سلامتی انسان غیر سمی باشد از این رو از الکترودهایی از جنس آهن، آلومینیوم و استیل به دلیل غیر سمی بودن، ارزانی و قابلیت دسترسی آسان انتخاب می‌شوند (Malakootian et al., 2010). چنانچه در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشترین درصد حذف نیترات و فسفات با جنس الکترود آهن - آهن است که مقدار حذف فسفات و نیترات به ترتیب ۹۵ و ۴۵ درصد بود. از این رو جنس الکترود آهن - آهن به عنوان جنس الکترود بهینه انتخاب و در آزمایشها استفاده شد. ملکوتیان و همکاران در پژوهش به بررسی اثر جنس الکترودها در حذف سختی آب پرداختند که الکترود آهنی با ۸۶ درصد بیشترین مقدار حذف را داشته است (Malakootian et al., 2010).

پژوهش‌های اون و همکاران نشان داد که الکترود آهن در حذف COD و کدورت مؤثرتر از الکترود آلومینیوم بود به طوری که بازده حذف COD در محدوده ۶۲ تا ۸۶ درصد بوده و مقدار حذف کدورت به ۱۰۰ درصد رسید (Ün et al., 2006). اوندرو و همکاران نیز امکان حذف سورفکتانت‌ها را از آب آلوده با الکترود آهن بررسی کردند و بازده حذف ۱۰۰ را گزارش دادند (Önder et al., 2007).

#### ۳-۵- تأثیر فاصله الکترودها از یکدیگر

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌ها که در شکل ۶ ارائه شده است مشخص شد با افزایش فاصله بین الکترودها (از ۱ تا ۵ سانتی‌متر) درصد حذف نیترات و فسفات افزایش یافته و از آن پس با افزایش فاصله بین الکترودها تا ۱۰ سانتی‌متر، درصد حذف نیترات و فسفات کاهش یافته است، بنابراین فاصله بین الکترود ۵ سانتی‌متر

تشکیل کمپلکس‌های هیدروکسید فلزی آهن ( $Fe_n(OH)^{+M}_p$ ) هیدروکسید فریک  $Fe(OH)_3$  تشکیل می‌شود که عملکرد کمتری در به دام انداختن آلاینده‌ها و نیترات و فسفات موجود در آب دارد و منعقدکننده ضعیف‌تر و نامطلوب‌تری برای آلاینده‌های آب است. در توضیح این مطلب باید افزود که در  $pH < 7$  و  $pH < 6$  علاوه بر رسوب هیدروکسید آهن ۳ ظرفیتی فلوک‌های سبزی تیره، هیدروکسیدهای آهن ۲ ظرفیتی نیز تولید می‌شود که منعقدکننده‌های مؤثری برای حذف آلاینده‌ها هستند (Yavuz and Ögütveren, 2018).

در پژوهشی توسط ادهم و همکاران pH بهینه در تصفیه پساب کارخانه روغن زیتون بین ۴ تا ۶ بوده که در این محدوده و بدون نیاز به تنظیم pH کارایی حذف COD در حدود ۹۱ درصد گزارش شده است (Adhoum et al., 2004).

حکیم‌زیمینا و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی به طور مروری کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون را بررسی و نشان دادند که بیشترین کارایی حذف در pHهای نزدیک به ۷ و محدوده pH خنثی اتفاق می‌افتد (Hakizimana et al., 2017).

#### ۳-۳- تأثیر غلظت اولیه نیترات و فسفات

از عوامل مؤثر دیگر در کارایی حذف هم‌زمان نیترات و فسفات، غلظت اولیه آنها در آب است. از شکل ۴ می‌توان دریافت با افزایش غلظت اولیه نیترات و فسفات درصد حذف نیترات و فسفات کاهش می‌یابد به طوری که غلظت اولیه نیترات و فسفات از ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر درصد حذف فسفات از ۹۹ درصد به ۹۲ درصد و درصد حذف نیترات از ۷۰ درصد به ۴۷ درصد کاهش یافته است. از آن پس با افزایش غلظت اولیه نیترات و فسفات تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، درصد‌های حذف به شدت و با شیب بیشتری کاهش یافته است. همان‌طور که مشخص است افزودن غلظت‌های بیشتر تأثیر آن‌چنانی در افزایش کارایی حذف نداشته است. بنابراین غلظت اولیه نیترات و فسفات ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به عنوان غلظت بهینه انتخاب و استفاده شد. پژوهشی دیگر توسط مدهن و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام شد که هدف آن بررسی قابلیت فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف نیترات بود. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که پارامترهای pH، زمان واکنش، ولتاژ، غلظت بر کارایی حذف مؤثر است. همچنین کارایی این روش در

به عمل آمد تأثیر فاصله بر کارایی حذف آهن بررسی و مشخص شد با افزایش فاصله داخلی بین الکترودها کارایی حذف کاهش می‌یابد (Ghosh et al., 2008).

### ۳-۶- تأثیر ولتاژ

یکی از مهمترین پارامترهایی که می‌تواند بر کارایی حذف نیترات و فسفات در فرایند الکتروکواگولاسیون مؤثر باشد شدت جریان یا ولتاژ ورودی است. چنانچه در شکل ۷ ملاحظه می‌شود برای یک زمان واکنش معین و بهینه با افزایش ولتاژ اعمال شده در فرایند، کارایی حذف هم‌زمان نیترات و فسفات نیز افزایش یافته است. این روند از ولتاژ ۵ ولت تا ۳۰ ولت سیر صعودی داشته و از ولتاژ ۳۰ ولت تا ۴۰ ولت کارایی حذف با سرعت کمتری انجام شده است. بنابراین ولتاژ ورودی ۳۰ ولت به‌عنوان ولتاژ بهینه انتخاب شد. با توجه به کارایی زیاد حذف هم‌زمان نیترات و فسفات در ولتاژ ۳۰ ولت طی فرایند الکتروکواگولاسیون با الکتروده آهن اعمال ولتاژهای بیشتر غیر ضروری است زیرا در صورت اعمال ولتاژهای زیادتر به جز افزایش انرژی مصرفی تغییر قابل ملاحظه‌ای در کاهش زمان واکنش برای دستیابی به حد مطلوب نیترات و فسفات رخ نخواهد داد. نتایج نشان داد که افزایش شدت جریان و ولتاژ در کارایی حذف اثر گذار است. با افزایش ولتاژ، پتانسیل انجام واکنش افزایش می‌یابد و با تأمین انرژی کافی، نیترات و فسفات در کاتد احیا و در آند اکسید می‌شوند.

این رفتار که کارایی تصفیه تا حدود زیادی تحت تأثیر ولتاژ است توسط برخی پژوهشگران به اثبات رسیده است. به‌عنوان مثال دروچی و همکاران در پژوهشی به بررسی کارایی حذف فلوراید از آب با استفاده از الکترودهای آلومینیوم پرداختند. ایشان مشاهده کردند که با افزایش ولتاژ، مقدار یون  $Al^{+3}$  افزایش یافته و به موجب آن، یون‌های فلوراید به‌طور مؤثری حذف می‌شوند (Drouiche et al., 2009).

همچنین در پژوهش‌های فرهادی و همکاران که بر روی کارایی روش الکترو انعقاد در حذف COD از پساب انجام شد، مشخص شد که با افزایش ولتاژ، درصد حذف COD و کدورت افزایش می‌یابد (Farhadi et al., 2012).

چو و همکاران نیز امکان کاهش فلزات سنگین و کدورت را از فاضلاب در ولتاژ حدود ۳۰ بررسی کردند و کارایی حذف را

به‌عنوان فاصله بهینه انتخاب و استفاده شد. در فواصل بین الکترودها یکسان همواره درصد حذف فسفات در نمونه‌های آب بیشتر از درصد حذف نیترات است و در فواصل بین الکترودها کمتر از ۵ سانتی‌متر، درصد حذف نیترات قابل توجه نیست. در واقع با افزایش فاصله بین الکترودها کارایی حذف کاهش می‌یابد به عبارتی با افزایش فاصله بین جفت الکترودها آند و کاتد، در صورت ثابت بودن اختلاف پتانسیل، شدت جریان کاهش می‌یابد و با توجه به ثابت ماندن مقدار الکترولیت و افزایش فاصله بین الکترودها، مقاومت محلول نیز افزایش (خوردگی الکترودها کمتر) و در نتیجه شدت جریان کاهش می‌یابد. این مسئله ممکن است به دلیل جابه‌جایی‌های بسیار ناچیز یون‌های تشکیل شده در حین فرایند باشد. همچنین کاهش جریان سبب عدم تولید یون‌های آهن و هیدروکسیل به مقدار کافی برای تشکیل لخته و حذف فلز است. علاوه بر آن، با افزایش فاصله بین الکترودها انتظار می‌رود که برخورد کمتری بین یون‌های آهن تولیدی با یون‌های هیدروکسیل به‌وقوع بپیوندد و لخته‌های کمتری تشکیل شود.

در این پژوهش از فاصله ۱ تا ۵ سانتی‌متر الکترودها از یکدیگر کارایی حذف نیترات و فسفات افزایش یافت، زیرا سطح الکترودها ثابت است و در نتیجه مقدار جریان ایجاد شده و مقدار تشکیل فلوک‌ها نیز ثابت بود، ولی در فاصله‌های بیشتر الکترودها از یکدیگر به دلیل وجود جریان‌های هیدرولیکی و برخورد بین ذرات، احتمال تشکیل فلوک‌های درشت‌تر بیشتر و انعقاد جارویی انجام می‌شود که در این پژوهش نیز از فاصله ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر الکترودها از یکدیگر کارایی حذف هم‌زمان نیترات و فسفات کاهش یافت (Chavalparit and Ongwandee, 2009).

همچنین این تغییرات ممکن است مربوط به نیروی دافعه الکتروستاتیک در فاصله بین الکترودها باشد. بنابراین هنگامی که فاصله افزایش می‌یابد، جابه‌جایی یون‌های تولید شده آرام‌تر شده و یون‌های تولید شده فرصت بیشتری برای مجتمع شدن و تولید لخته پیدا می‌کنند (Mook et al., 2014).

این نتایج کسب شده در بررسی حذف سختی از آب توسط فرایند الکتروکواگولاسیون که توسط ملکوتیان و همکاران در سال ۲۰۱۰ به عمل آمد همخوانی دارد (Malakootian et al., 2010). در پژوهشی که توسط گاش و همکاران در خصوص بررسی کارایی حذف آهن ۲ ظرفیتی از آب به روش الکتروکواگولاسیون

کارآمد و قابل انعطاف به منظور تصفیه نیترات و فسفات از منابع آب استفاده شد و همچنین فرایند الکتروگولاسیون را به واسطه پارامترهای کنترلی متعدد و گستره کارکرد متنوعی که دارد، به عنوان یک الترنا تیبو در تصفیه محیط‌های آبی می‌توان استفاده کرد.

#### ۵- قدردانی

نویسندگان، مراتب قدردانی خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران برای فراهم کردن امکانات علمی و آزمایشگاهی و همکاری دکتر علی ترابیان برای اجرای این پژوهش اعلام می‌کنند.

به ترتیب ۹۸ و ۹۰ گزارش دادند (Chou et al., 2009).

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده از این پژوهش نشان داد که، زمان واکنش ۶۰ دقیقه، pH برابر ۷، غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، جنس الکتروود آهن - آهن، فاصله بین الکتروود ۵ سانتی‌متر و ولتاژ ورودی ۳۰ ولت به عنوان پارامترهای بهینه مشخص شده‌اند و کارایی حذف فسفات و نیترات در شرایط بهینه به ترتیب ۹۵ و ۴۵ درصد گزارش شد که بیشترین مقدار درصد حذف بود. با توجه به مباحث مذکور فرایند انعقاد الکتریکی می‌تواند به عنوان یک روش

#### References

- Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal, N. & Belgaied, J. E. 2004. Treatment of electroplating wastewater containing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and Cr (VI) by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 112, 207-213.
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Belkada, R. & Miroud, D. 2015. Simultaneous removal of chromium (VI) and fluoride by electrocoagulation-electroflotation: application of a hybrid Fe-Al anode. *Chemical Engineering Journal*, 267, 153-162.
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M. & Hamitouche, H. 2010. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 1176-1182.
- Chavalparit, O. & Ongwandee, M. 2009. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 1491-1496.
- Chou, W. L., Wang, C. T. & Chang, S. Y. 2009. Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption. *Journal of Hazardous Materials*, 168, 1200-1207.
- Drouiche, N., Aoudj, S., Hecini, M., Ghaffour, N., Lounici, H. & Mameri, N. 2009. Study on the treatment of photovoltaic wastewater using electrocoagulation: fluoride removal with aluminium electrodes-characteristics of products. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 65-69.
- Farhadi, S., Aminzadeh, B., Torabian, A., Khatibikamal, V. & Fard, M. A. 2012. Comparison of COD removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 219, 35-42.
- Ghanbari, F., Moradi, M., Mohseni-Bandpei, A., Gohari, F., Abkenar, T. M. & Aghayani, E. 2014. Simultaneous application of iron and aluminum anodes for nitrate removal: a comprehensive parametric study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 1653-1660.
- Ghosh, D., Medhi, C. & Purkait, M. 2008. Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. *Chemosphere*, 73, 1393-1400.
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., et al. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21.
- Hashim, K. S., Al Khaddar, R., Jasim, N., Shaw, A., Phipps, D., Kot, P., et al. 2019. Electrocoagulation as a green technology for phosphate removal from river water. *Separation and Purification Technology*, 210, 135-144.

- Holt, P., Barton, G. & Mitchell, C. 1999. Electrocoagulation as a wastewater treatment. *The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event*, 1000, 41-46.
- Holt, P. K., Barton, G. W. & Mitchell, C. A. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59, 355-367.
- İrdemez, Ş., Yildiz, Y. Ş. & Tosunoğlu, V. 2006. Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52, 394-401.
- Jeong, J. Y., Song, Y. H., Kim, J. H. & Park, J. Y. 2014. Simultaneous removal of nitrate, phosphate, and fluoride using a ZVI-packed bed electrolytic cell. *Desalination and Water Treatment*, 52, 737-743.
- Kumar, N. S. & Goel, S. 2010. Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of Hazardous Materials*, 173, 528-533.
- Malakootian, M., Mansoorian, H. & Moosazadeh, M. 2010. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*, 255, 67-71.
- Mohammadi, M. J., Salari, J., Takdastan, A., Farhadi, M., Javanmardi, P., Yari, A. R., et al. 2017a. Removal of turbidity and organic matter from car wash wastewater by electrocoagulation process. *Desalination and Water Treatment*, 68, 122-128.
- Mohammadi, M. J., Takdastan, A., Jorfi, S., Neisi, A., Farhadi, M., Yari, A. R., et al. 2017b. Electrocoagulation process to chemical and biological oxygen demand treatment from carwash grey water in Ahvaz megacity, Iran. *Data in Brief*, 11, 634.
- Mook, W., Aroua, M. & Issabayeva, G. 2014. Prospective applications of renewable energy based electrochemical systems in wastewater treatment: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 36-46.
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M. D. P. & Ayedi, H. F. 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150 (1), 124-135.
- Ni'am, M. F., Othman, F., Sohaili, J. & Fauzia, Z. 2007. Removal of COD and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique. *The Malaysian Journal of Analytical Science*, 11, 198-205.
- Önder, E., Koparal, A. S. & Ögütveren, Ü. B. 2007. An alternative method for the removal of surfactants from water: Electrochemical coagulation. *Separation and Purification Technology*, 52, 527-532.
- Rahmani, A. 2009. Efficiency of electrocoagulation for removal of Ario Chrome Black T color from wastewater. *Journal of Water and Wastewater*, 20(1), 52-58. (In Persian).
- Ricordel, C., Darchen, A. & Hadjiev, D. 2010. Electrocoagulation–electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. *Separation and Purification Technology*, 74, 342-347.
- Sengil, İ. A. 2006. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 1197-1205.
- Ün, Ü. T., Uğur, S., Koparal, A. & Ögütveren, Ü. B. 2006. Electrocoagulation of olive mill wastewaters. *Separation and Purification Technology*, 52, 136-141.
- Vasudevan, S. & Oturan, M. A. 2014. Electrochemistry: as cause and cure in water pollution-an overview. *Environmental Chemistry Letters*, 12, 97-108.
- Vik, E. A., Carlson, D. A., Eikum, A. S. & Gjessing, E. T. 1984. Electrocoagulation of potable water. *Water Research*, 18, 1355-1360.
- Yavuz, Y. & Ögütveren, Ü. 2018. Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes. *Journal of Environmental Management*, 207, 151-158.