



کاهش یون فلوراید بعد از حوض فسفاتنه سالن رنگ شرکت خودروسازی به روش الکتروکواگولاسیون

جواد مدبر^۱، علی صیادی ملکامی^۱، امیر امامی^۱، نعیمه شیراکبری^۲، زهره رشمئی^۲

۱- معاونت خدمات فنی، مدیریت انرژی، آزمایشگاه کنترل کیفی آب

۲- معاونت کیفیت، مدیریت تضمین کیفیت مواد شیمیایی

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	به منظور کاهش یون فلوراید از آب، از روش های جذب - تبادل یون، فرایندهای غشایی، انعقاد و لخته سازی شیمیایی و الکتروکواگولاسیون استفاده می شود. در این مقاله جهت کاهش حداکثری یون فلوراید از آب سرریز بعد از حوض شیمی فسفاتنه سالن پیش رنگ خودروسازی، از روش الکتروکواگولاسیون استفاده شد. از آب سرریز آبکشی های بعد از حوض شیمی فسفاتنه سالن پیش رنگ که به صورت مداوم در جریان است به عنوان ورودی استفاده شد. پساب سالن پیش رنگ حاوی فلوراید به میزان ۳۵-۲۲ mg/L، pH ۵/۲ الی ۶/۳، کدورت ۳۵-۳۱ NTU، هدایت الکتریکی ۲۰۰۸-۱۸۱۵ $\mu\text{S/cm}$ و TDS به میزان ۹۵۲-۹۰۹ mg/L است. با استفاده از رکتیفایر، ولتاژ ۵۰ ولت و جریان ۱۱۰ آمپر به ترتیب به ۲، ۳، ۴ و ۵ الکترودهای آلومینیوم و آهن موجود در راکتور الکتروکواگولاسیون به حجم ۱ مترمکعب اعمال شده و نمونه طی ۴ روز و هر روز به مدت زمان های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه تست شد. سپس، تأثیر حضور تعداد الکترودها و مدت زمان ماند نمونه در راستای تشخیص نتایج بهینه مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج نیمه صنعتی و آزمایشگاهی با روش راکتور الکتروکواگولاسیون، کاهش بیش از ۸۵-۷۵ درصد فلوراید مشاهده شد. بیشترین میزان کاهش یون فلوراید در سیستم ۴ الکترودها و در مدت زمان ۶۰ دقیقه از ۲۴/۲ به ۳/۷ mg/L رسید. شایان ذکر است با گذشت زمان و کاهش غلظت اولیه آنیون فلوراید، کدورت و مقدار شدت جریان کاهش یافت اما pH محیط به شدت قلیایی شد و در یکی از آزمایش ها به ۱۰/۲۷ رسید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸	
کلید واژه ها: یون فلوراید، حوض فسفاتنه، الکتروکواگولاسیون، پساب صنعتی	



Reduction of fluoride ions from phosphate tank overflow water in an automotive paint shop using the electrocoagulation method

Javad Modaber¹, Ali Sayadi Malakami¹, Amir Emami^{1✉}, Naeemeh Shirakbari²

1. IKCO, Deputy of Technical Services, Energy Management, Water Quality Control Laboratory

2. IKCO, Deputy of Quality, Management of Chemicals Quality Assurance

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received:
2024/12/08

Accepted:
2025/04/21

Available online:
2025/07/18

Keywords:

Fluoride ions,
Phosphate tank,
Electrocoagulation,
Industrial
wastewater

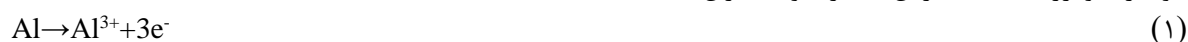
Abstract

Various methods such as ion exchange, membrane processes, chemical coagulation, and electrocoagulation are employed to reduce fluoride ions from water. In this study, electrocoagulation was applied to reduce fluoride concentration in the overflow water from the phosphate chemical tank in the pre-treatment section of an automotive paint shop. The influent, which is the continuously flowing rinsing overflow from the phosphate tank, contained fluoride concentrations ranging from 22 to 35 mg/L, pH between 5.2 and 6.3, turbidity of 31–35 NTU, electrical conductivity of 1815–2008 $\mu\text{S}/\text{cm}$, and TDS levels between 909 and 952 mg/L. A rectifier supplying 50 volts and 110 amperes was used to energize 2, 3, 4, and 5 aluminum and iron electrodes in a 1 m³ electrocoagulation reactor. The system was operated over four days, with samples taken at 15, 30, 45, and 60-minute intervals each day. The effects of electrode number and retention time on fluoride removal efficiency were evaluated. Results from pilot-scale and laboratory experiments showed that the electrocoagulation process achieved fluoride removal efficiencies between 75% and 85%. The highest fluoride reduction—from 24.2 to 3.7 mg/L—was observed in the system with 4 electrodes and a retention time of 60 minutes. Notably, as the initial fluoride concentration decreased over time, turbidity and current intensity also declined. However, the pH of the treated water became strongly alkaline, reaching as high as 10.27 in one of the tests.

مقدمه

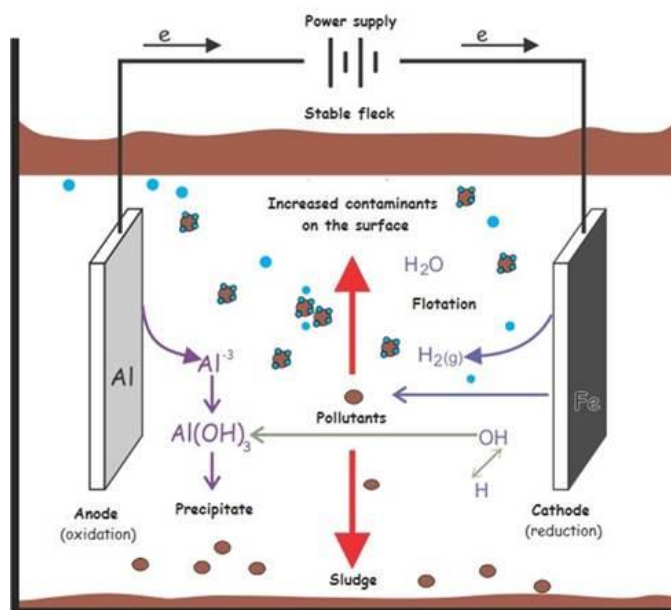
امروزه، بدون شک یکی از چالش‌های اساسی انسان حفظ و نگهداری محیط زیست است. در درجه اول آب به عنوان یکی از مهمترین منابع محیط زیستی است و با توسعه روزافزون صنعت و واحدهای تولیدی، همواره تصفیه فاضلاب‌های بهداشتی و پساب‌های صنعتی یکی از دغدغه‌های مهم است. در این راستا یافتن شیوه‌های جدید، کارآمد و کم هزینه‌تر از روش‌های قبل برای تصفیه کامل و خالص‌سازی هرچه بیشتر فاضلاب و پساب بسیار قابل توجه است. شایان ذکر است با وجود اینکه آب، برای پاک‌کنندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما، رفع آلودگی از آن بسیار دشوار است. در کارخانه‌هایی که دارای سالن‌های رنگ هستند، بخش حوض شیمی فسفاتنه به علت وجود یون فلوراید در آن نیاز به تصفیه و کاهش یون فلوراید دارد (سکینه شکوهیان و همکاران، ۱۴۰۲). با بهره‌گیری از فناوری‌های روز دنیا از جمله روش‌های جذب تبادل یون، فرایندهای غشایی، انعقاد و لخته‌سازی شیمیایی و الکتریکی می‌توان به بهترین شکل ممکن این پساب را تصفیه کرد (سارا نام آور و همکاران، ۱۳۹۱). از آنجایی که آب بازیافتی پساب‌های صنعتی و بهداشتی به منظور آبیاری فضای سبز کاربرد دارد لذا مقدار غلظت یون فلوراید آن براساس استاندارد ملی محیط زیست ایران باید از ۲ میلی‌گرم بر لیتر کمتر باشد که هم برای آبیاری مناسب بوده و هم مطابق قوانین و الزامات محیط زیستی باشد.

به منظور افزایش بازده حذف آلاینده‌گی و کنترل مواد مضر ورودی به محیط زیست می‌توان از فناوری الکتروکواگولاسیون به جای استفاده از ترکیبات شیمیایی استفاده کرد. این روش با اعمال جریان الکتریسیته، منجر به کاهش آلاینده‌گی غیرآلی، پاتوژن‌ها، حذف ذرات و مواد معلق از محلول در آب می‌شود. در الکتروکاتد حباب‌های ریز گاز هیدروژن و در الکتروکاتد آن‌د کاتیون فلزی تولید می‌شود. کاتیون فلزی به تشکیل لخته‌های هیدروکسید فلزی و کمپلکس آنیون فلوراید می‌انجامد (فریبرز ریاحی و محبویه رادگودرزی، ۱۳۸۴؛ قربان عسگری و همکاران، ۱۳۹۵).



افزایش چگالی جریان به کاهش زمان واکنش می‌انجامد. تغییرات زمان واکنش تایید کننده این یافته است که در طی فرآیند انعقاد، در ابتدا میزان میکروفلاک‌ها به علت غلظت فلوراید بیشتر و تولید بیشتر هیدروکسید آلومینیوم در اثر خوردگی آن‌د و کمپلکس آلومینیوم با آنیون فلوراید، بالاتر است. بنابراین کاهش سریعتر فلوراید در آغاز واکنش مشاهده می‌شود. بعد از گذشت زمان، این میکروفلاک‌ها بزرگتر و سنگین‌تر شده و در نتیجه طبق فرآیند انعقاد، ته‌نشین می‌شوند. سرعت کاهش در ۱۰ دقیقه اول بیش از زمان‌های بعدی است. با وجود این کارایی بیشتر، نیازمند زمان واکنش زیادتر است به طوری که کارایی پس از ۳۰ دقیقه به حداکثر می‌رسد. متغیرهای موثر در کاهش یون فلوراید عبارت است از غلظت نخستین فلوراید، PH سیال، چگالی جریان و مدت زمان واکنش. (محمدعلی ززولی و همکاران، ۱۳۹۴).

این دستگاه از دو الکتروکاتد و آن‌د، الکترولیت و یک منبع تغذیه تشکیل شده است. می‌توان با استفاده از این دستگاه فرایند اکسیداسیون و احیا را به ترتیب در الکترودهای آن‌د و کاتد انجام داده و نهایتاً آلودگی‌ها رسوب کرده و از سیستم حذف می‌شوند.



شکل (۱) شمای کلی فرایند الکتروکواگولاسیون

مدبر و همکاران در سال ۱۴۰۱ با استفاده از راکتور کواپتاسیون پلاسمایی توسط رکتیفایر، ولتاژ ۵۰ ولت و جریان ۱۱۰ آمپر به ۵ الکتروده آهنی موجود در مخزن راکتور کواپتاسیون به حجم ۱ متر مکعب اعمال کرده و نشان دادند که تاثیر حضور راکتور کواپتاسیون بر روی میزان COD آب خروجی از مخزن نهایی کواپتاسیون کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است که پساب تصفیه شده با این روش قابلیت استفاده در مصارف آبیاری و کشاورزی را دارد و نیز میزان کدورت آن کمتر از ۱۰۰ NTU است (مدبر و همکاران، ۱۴۰۱).

آرندام و چونگ^۲ مطرح کردند که یکی از رایج‌ترین روش‌های فلوتورزدایی، استفاده از ترکیب شیمیایی نمک آلوم و آهک (نالگودا) است که به تشکیل آنیون سولفات و کاتیون آلومینیوم می‌انجامد. این روش به دلیل حضور مواد شیمیایی هزینه‌بر بوده و باقیماندن مواد شیمیایی منجر به صدمه به محیط زیست می‌شود. به علاوه، این سیستم به دلیل حضور مواد شیمیایی به صورت هوشمند عمل نکرده و نمی‌تواند به صورت جامع و گزینشی باعث کاهش مواد گردد. حذف یون فلوراید توسط مواد شیمیایی، ناخالصی‌هایی در فاضلاب به جا می‌گذارد. لذا بهتر است تا حد امکان روش بهینه از نظر هزینه و ناخالصی‌های به جا مانده انتخاب شود (آرندام و چونگ، ۲۰۲۴).

یونگهای‌گان^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۹ عملکرد و مکانیسم کاهش یون فلوراید توسط $ZrCl_4$ و $Al_2(SO_4)_3$ را مورد بررسی قرار دادند. محدوده pH بهینه ۴ الی ۶ برای $ZrCl_4$ و ۸ الی ۱۰ برای $Al_2(SO_4)_3$ است. $ZrCl_4$ نسبت به $Al_2(SO_4)_3$ برای تقلیل یون فلوراید بهتر بود. علاوه بر تقلیل بهتر یون فلوراید یکی از مزایای دیگر $ZrCl_4$ نسبت به $Al_2(SO_4)_3$ حذف قابل توجه غلظت فلزات باقیمانده در محدوده pH ۴ الی ۱۴ بود (یونگهای‌گان، ۲۰۱۹).

صالح‌الدین^۴ و همکاران در راستای حذف یون فلوراید از روش انعقاد بعد از مرحله تصفیه نهایی استفاده کردند. نتایج تجربی نشان داد که الکتروده آلومینیوم کارآمدتر از الکتروده آهن است. بازده کاهش فلوراید به شدت به pH اولیه عملیات بستگی دارد که در محدوده ۶ الی ۷ بود. به علاوه، کاهش فلوراید تحت تاثیر آنیون‌های کلراید سولفات و نیترات قرار نمی‌گیرد ولی آنیون‌های کربنات بر حذف فلوراید تاثیر منفی دارد (صالح‌الدین و همکاران، ۲۰۱۲).

^۱Arindam Sinharoy

^۲Chong Min Chung

^۳Yonghai Gan

^۴Salaheddine Aoudj

افشین تکدستان و همکاران (2014) نیز نشان دادند که در مقایسه الکتروُد آهن و آلومینیوم، الکتروُد آلومینیوم کارایی بالاتری جهت حذف یون فلوراید دارد. در مدت زمان ۴۰ دقیقه و با pH ۷/۵ در حضور ولتاژ ۲۰ ولت روند کاهش فلوراید به میزان ۹۷/۸۶ درصد رسید (افشین تکدستان و همکاران، ۲۰۱۴).

سکینه شکوهیان و همکاران جهت ارتقای فرایند حذف فلوراید از فاضلاب تولیدی در واحد پیش رنگ صنعت خودروسازی منظور دستیابی به استانداردهای تخلیه آب‌های سطحی تحقیق کردند. نتایج خصوصیات فاضلاب واقعی نشان داد که pH فاضلاب تولیدی در گستره ۱/۶ تا ۳/۶ و غلظت فلوراید آن در گستره ۴۵ mg/L تا ۵۵ است. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که در بهینه‌ترین حالت ممکن در روش انعقاد شیمیایی امکان دستیابی به راندمان حذف فلوراید در گستره ۷۶ تا ۸۱ درصد امکان‌پذیر است. اما، راندمان حذف در فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از آند آلومینیوم در غلظت ۵ mol/L یون کلسیم و دانسیته جریان ۲۰ A/m² پس از گذشت زمان ۲۰ min تا ۹۹ درصد نیز قابل دستیابی است (سکینه شکوهیان و همکاران، ۱۴۰۲).

علیرضا رحمانی و همکاران مطالعه کردند که با توجه به بار آلی بسیار بالای فاضلاب تولیدی توسط صنایع غذایی بخصوص صنایع فرآوری تخم مرغ، تصفیه فاضلاب این صنایع توسط روش‌های با کارایی و هزینه اثربخشی مناسب از ضروریات این صنایع می‌باشد لذا هدف از مطالعه حاضر بررسی کارایی روش الکتروکوآگولاسیون در تصفیه فاضلاب صنایع فرآوری تخم مرغ می‌باشد. بالاترین میزان کاهش COD به میزان ۹۹ درصد و توسط الکتروُد آلومینیوم و در زمان واکنش ۱۰ دقیقه و شدت جریان الکتریکی ۷ mA/cm² حاصل شد. هم‌چنین الکتروُد آلومینیوم با مصرف انرژی به میزان ۹ kWh/m³ و مقدار مصرف آند به میزان ۰/۵ در مقایسه با الکتروُد آهن به صرفه‌تر است (علیرضا رحمانی و همکاران، ۱۳۹۵).

مقایسه روش کاهش یون فلوراید به وسیله الکتروکوآگولاسیون با روش‌های فیلتراسیون و شیمیایی

روش الکتروکوآگولاسیون به دلیل کارایی بالا در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها مانند رنگ، روغن، فلزات سنگین و مواد آلی، تولید لجن کمتر، عدم نیاز به استفاده از مواد شیمیایی و انعطاف‌پذیری بالا به منظور استفاده در تصفیه انواع مختلف فاضلات، نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد (کبری و ریج کاظمی و معصومه احتیاط کار، ۱۴۰۱). لازم به ذکر است که تنها ایرادات این روش نسبت به روش‌های شیمیایی هزینه اولیه بالاتر تجهیزات، مصرف انرژی بیشتر در تولید جریان الکتریکی و نیاز به تخصص بیشتر به منظور بهره‌برداری از این دانش فنی است. روش فیلتراسیون نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر بوده و به تجهیزات پیچیده‌ای نیاز ندارد اما فقط در حذف ذرات جامد مورد استفاده قرار گرفته و برای حذف مواد محلول مانند رنگ و مواد آلی کارایی ندارد. از طرف دیگر با مسدود شدن فیلترها نیز نیاز به تعویض و شستشوی دوره‌ای فیلترها وجود دارد (سید محسن بلائی و همکاران، ۱۴۰۲).

روش شیمیایی یکی از روش‌های شناخته شده قدیمی است که فقط برای حذف برخی از آلاینده‌ها مانند فسفر و نیتروژن موثر است اما به دلیل تولید لجن زیاد، نیاز به استفاده از مواد شیمیایی و در نتیجه آسیب به محیط زیست و همچنین هزینه‌های عملیاتی بالا به دلیل استفاده از مواد شیمیایی در حال حاضر روش مطلوبی محسوب نمی‌شود. (آرون‌دام و چونگ، ۲۰۲۴).

مواد و روش‌ها

در حال حاضر در در سیستم تصفیه فاضلاب به منظور کاهش یون فلوراید از مواد شیمیایی PAC استفاده می‌شود. در این تحقیق به منظور افزایش کارایی حذف یون فلوراید، از فرایند الکتروکوآگولاسیون در آزمایشگاه کنترل کیفی آب و فاضلاب به صورت پایلوت استفاده شد. در این بررسی پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و نهایتاً این فرایند به عنوان روشی امید بخش در فلوتور زدایی پساب خروجی سالن رنگ در نظر گرفته شد (گیتی کاشی و همکاران، ۱۳۹۳).

در شکل ۳ اجزای تشکیل دهنده سیستم الکتروکوآگولاسیون نشان داده شده است:



شکل (۲) شمای کلی راکتور الکتروکواگولاسیون

الف) قرارگیری الکترودهای آلومینیوم و آهن کنار یکدیگر (ب) راکتور در حال انجام تست و ایجاد گاز هیدروژن در این تحقیق اثر حضور راکتور کاویتاسیون بر روی میزان کاهش غلظت یون فلوراید بعد از سرریز آبکشی اولیه بعد از حوض فسفاتة سالن رنگ به روش الکتروکواگولاسیون با تعداد ۲، ۳، ۴ و ۵ مجموعه الکترودها و میزان ولتاژ ثابت ۵۰ ولت و شدت جریان متغیر حداکثر ۱۱۰ آمپر و نیز در دوره‌های زمانی ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت (مدبر و همکاران، ۱۴۰۱؛ امیر حسین طالبی، ۱۴۰۰). الکترودها مطابق شکل ۳ ج به صورت استوانه‌های متحدالمرکز قرار گرفته است که شامل الکترودهای آهنی مشبک به عنوان کاتد و الکترودهای آلومینیوم به عنوان آنود و فاصله مابین الکترودها ۲ سانتیمتر است (شهرزاد علیان نژاد و گیتی کاشی، ۱۳۹۳). مشبک بودن الکترودهای آهنی باعث بهبود شرایط الکترولیز و ایجاد جریان سیال پساب بهتر و در نتیجه افزایش کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون می‌گردد. لازم به ذکر است که ضخامت ورق الکترودهای آلومینیوم ۲ میلی‌متر و آهنی ۵ میلی‌متر است. با افزایش تعداد الکترودها، سطح تماس بین الکترودها و فاضلاب افزایش یافته که این امر باعث می‌شود که جریان الکتریکی به طور یکنواخت‌تری در فاضلاب توزیع شده و در نتیجه تولید یون‌های فلزی افزایش می‌یابد. (مهدی مرتضایی و علی تریان، ۱۳۹۸). با افزایش تعداد یون‌های فلزی تولید شده، لخته‌های بیشتری تشکیل شده که در نتیجه راندمان حذف آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. به علاوه با افزایش تعداد الکترودها، زمان تماس یون‌های فلزی با آلاینده‌ها کاهش یافته، زیرا یون‌های فلزی در نقاط مختلف فاضلاب تولید می‌شوند و به سرعت با آلاینده‌ها واکنش می‌دهند. با افزایش زمان واکنش نیز، واکنش‌های بین یون‌های فلزی و آلاینده‌ها به طور کامل انجام شده و لخته‌های بزرگتری تشکیل می‌شوند که در نتیجه لخته‌های بزرگتر به دلیل نیروی گرانش به سرعت ته‌نشین می‌شوند و در نتیجه راندمان حذف آلاینده‌ها افزایش می‌یابد (زینب رادفر و مهوش کیوانی، ۱۳۹۴).

شایان ذکر است که نحوه قرارگیری الکترودها باید به صورتی باشد که یک چهارم الکترودها خارج از پساب قرار گرفته و مابقی آن در پساب غوطه‌ور باشد. مطابق با شکل ۳ ب، در زمان شروع فرایند الکترولیز، دو مجموعه الکترودها در بیشترین فاصله از هم قرار داشته و در دو راس قطر مخزن قرار دارند، وارد مدار می‌شوند و زمانی که قرار است الکترودها سوم وارد مدار شود، در مرکز مخزن قرار داده می‌شود. الکترودها چهارم و پنجم که در دو راس دیگر مخزن قرار گرفته‌اند نیز به ترتیب وارد مدار می‌شوند (بهاره پناهی، مصطفی خضری، ۱۳۹۶).

نمونه آب مورد آزمون، از سرریز آبکشی‌های بعد از حوض فسفاتة سالن رنگ ۲ بوده، که پس از قرارگیری در راکتور الکتروکواگولاسیون و انجام فرایند الکترولیز توسط رکتیفایر شرکت خزرترانسو ۲۰ کیلووات، میزان غلظت یون فلوراید توسط روش اسپکتروفوتومتری و با دستگاه HACH DR5000 در طول موج ۵۷۰ نانومتر و با استفاده از محلول‌های مورد نیاز جهت اندازه‌گیری میزان غلظت یون فلوراید شامل محلول شناساگر SPANDS (Cat No.: 44453) شرکت HACH شامل Hydrochloric acid و Zirconium oxychloride-Sodium arsenate اندازه‌گیری شد. (علی اکبر عظیمی و همکاران، ۱۳۸۲).

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش اثر تعداد الکتروده، زمان الکترولیز و شدت جریان ورودی در فرایند الکتروکواگولاسیون بر روی غلظت باقیمانده یون فلوراید و درصد بازده کاهش آن مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جداول زیر به طور خلاصه آورده شده است. در جدول ۱ میزان مشخصات اولیه پساب سر ریز حوض شیمی فسفات‌ها قبل از اعمال ولتاژ و شروع فرایند الکترولیز نشان داده شده است.

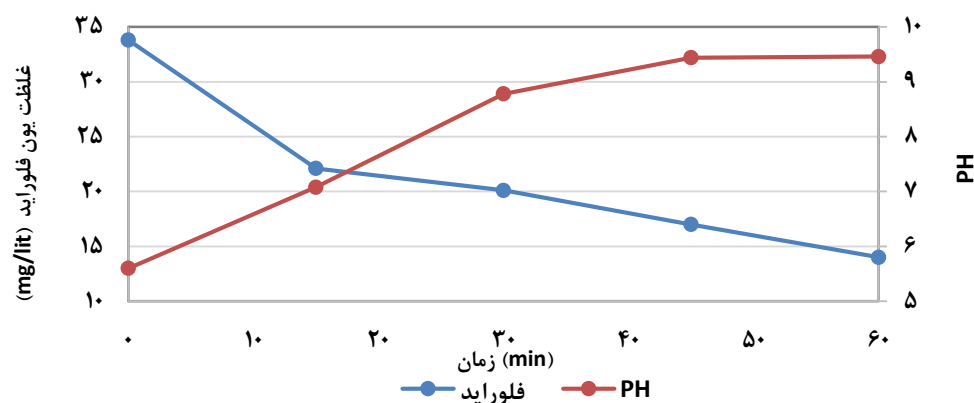
جدول (۱) میزان داده های آب سرریز قبل از اعمال الکتروکواگولاسیون

ردیف	پارامترهای فیزیکی و شیمیایی	علامت اختصاری	مقدار	واحد
۱	دما	T	۲۹/۴	(°C)
۲	pH	pH	۵/۷۶	pH
۳	کدورت	Turb	۳۳	(NTU)
۴	هدایت	E.C	۱۹۰۰	(μS/cm)
۵	قلیاییت نسبت به متیل اورانژ	M.AIK	۳۶/۴	(mg/L)
۶	کلراید	Cl ⁻	۲۵/۸	(mg/L)
۷	سدیم	Na ⁺	۳۰/۸	(mg/L)
۸	پتاسیم	K ⁺	۱/۹	(mg/L)
۹	نیترات	NO ³⁻	۲۲۸	(mg/L)
۱۰	فسفات	PO ⁴³⁻	۱۲۲/۵۸	(mg/L)
۱۱	آهن کل	Fe ⁺²	۰/۳۶	(mg/L)
۱۲	پاک کننده ها	ABS	۰/۴۷	(mg/L)
۱۳	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	COD	۴۸	(mg/L)
۱۴	فلوراید	F ⁻	۲۶/۲	(mg/L)

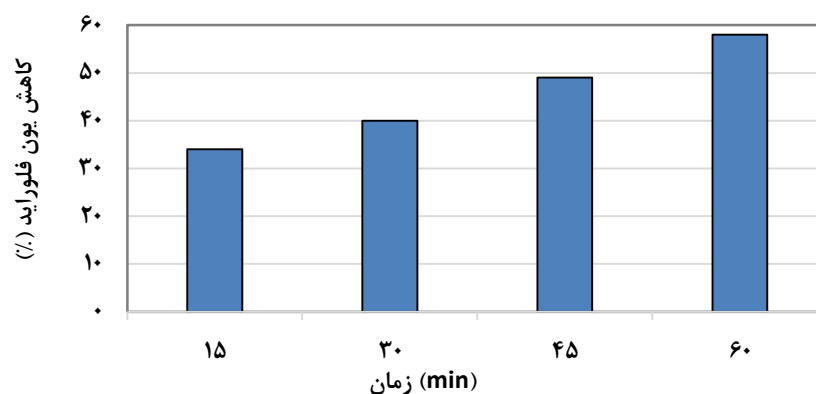
در جدول ۲ و شکل ۴ و ۵، اثر زمان در سیستم محتوی دو الکتروده بر روی غلظت یون فلوراید، pH و درصد کاهش یون فلوراید نشان داده شده است.

جدول (۲) نتایج pH، غلظت فلوراید و شدت جریان اولیه و ثانویه بر حسب زمان در سیستم محتوی ۲ الکتروده

زمان (min)	شدت جریان اولیه (A)	شدت جریان ثانویه (A)	pH	فلوراید (mg/lit)	کارایی کاهش فلوراید (%)
۰	-	-	۵/۶	۳۳/۸	
۱۵	۳۰	۲۸	۷/۰۸	۲۲/۱	۳۴
۳۰	۲۸	۲۵	۸/۷۸	۲۰/۱	۴۰
۴۵	۲۵	۲۲	۹/۴۴	۱۷	۴۹
۶۰	۲۲	۱۹	۹/۴۶	۱۴	۵۸



شکل (۴) نمودار تغییرات غلظت فلوراید و pH نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۲ الکتروود

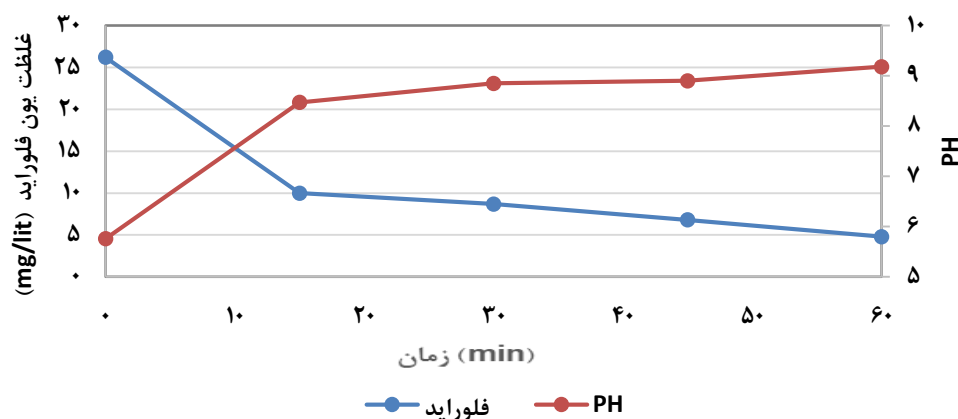


شکل (۵) درصد کاهش یون فلوراید نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۲ الکتروود

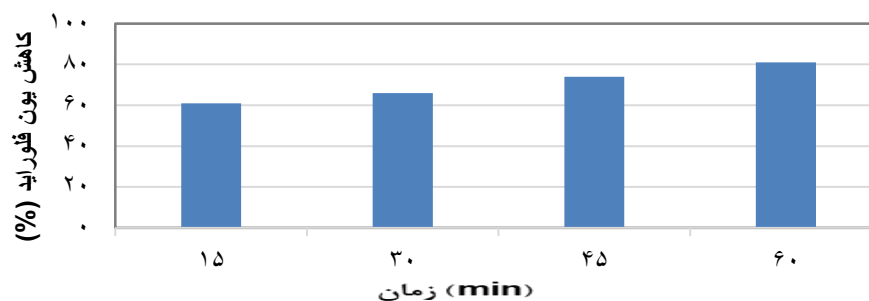
در جدول ۳ و شکل ۶ و ۷، اثر زمان در سیستم محتوی سه الکتروود بر روی غلظت یون فلوراید، pH و درصد کاهش یون فلوراید نشان داده شده است.

جدول (۳) نتایج pH، غلظت فلوراید و شدت جریان اولیه و ثانویه بر حسب زمان در سیستم ۳ محتوی الکتروود

زمان (min)	شدت جریان اولیه (A)	شدت جریان ثانویه (A)	pH	فلوراید (mg/lit)	بازده کاهش فلوراید (%)
0	-	-	۵/۷۶	۲۶/۲	-
۱۵	۶۰	۴۵	۸/۴۷	۱۰	۳۴
۳۰	۴۵	۳۵	۸/۸۵	۸/۷	۴۰
۴۵	۳۵	۲۸	۸/۹	۶/۸	۴۹
۶۰	۲۸	۲۴	۹/۱۸	۴/۸	۵۸



شکل (۶) نمودار تغییرات غلظت فلوراید و pH نسبت به زمان الکترولیز در سیستم ۳ محتوی الکترود

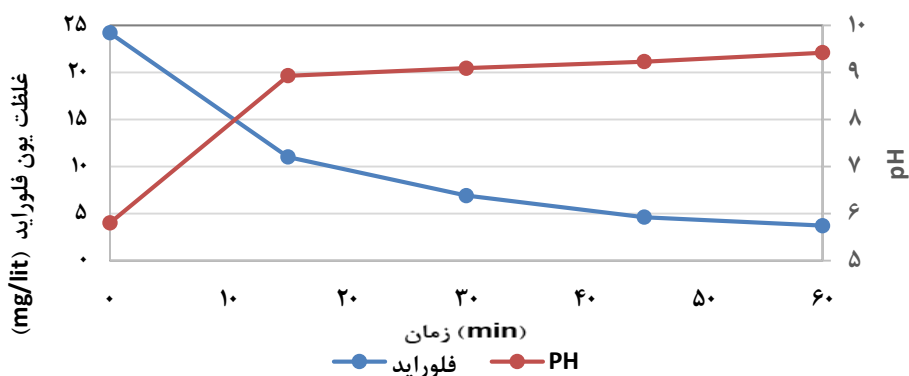


شکل (۷) درصد کاهش یون فلوراید نسبت به زمان الکترولیز در سیستم ۳ محتوی الکترود

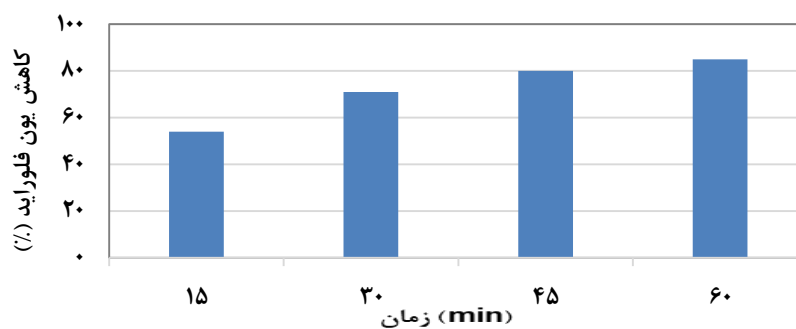
در جدول ۴ و شکل ۸ و ۹، اثر زمان در سیستم محتوی چهار الکترود بر روی غلظت یون فلوراید، pH و درصد کاهش یون فلوراید نشان داده شده است.

جدول (۴) نتایج pH، غلظت فلوراید و شدت جریان اولیه و ثانویه بر حسب زمان در سیستم محتوی ۴ الکترود

زمان (min)	شدت جریان اولیه (A)	شدت جریان ثانویه (A)	pH	فلوراید (mg/lit)	بازده کاهش فلوراید (%)
0	-	-	5/85	24/2	-
15	60	56	8/93	11	54
30	56	41	9/09	6/9	71
45	41	33	9/23	4/6	80
60	33	28	9/42	3/7	85



شکل (۸) نمودار تغییرات غلظت فلوراید و pH نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۴ الکترود

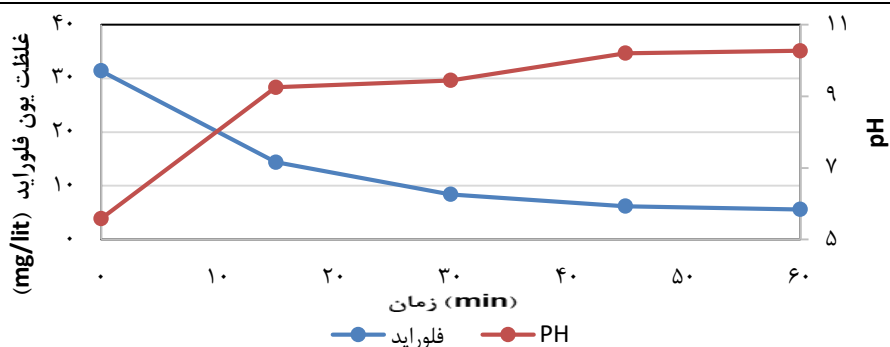


شکل (۹) درصد کاهش یون فلوراید نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۴ الکترود

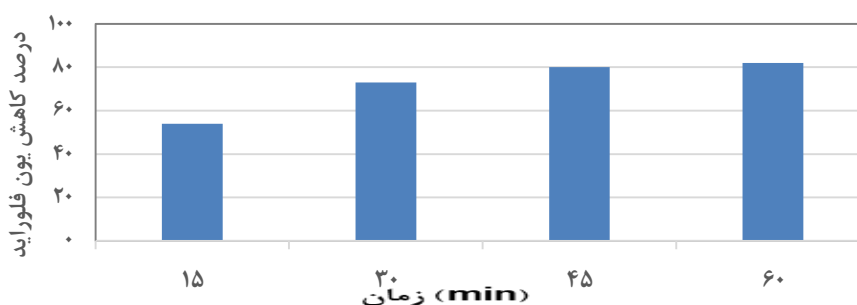
در جدول ۵ و شکل ۱۰ و ۱۱، اثر زمان در سیستم محتوی پنج الکترود بر روی غلظت یون فلوراید، pH و درصد کاهش یون فلوراید نشان داده شده است.

جدول (۵) نتایج pH، غلظت فلوراید و شدت جریان اولیه و ثانویه بر حسب زمان در سیستم محتوی ۵ الکترود

زمان (min)	شدت جریان اولیه (A)	شدت جریان ثانویه (A)	pH	فلوراید (mg/lit)	بازده کاهش فلوراید (%)
0	-	-	5/58	31/4	-
15	110	92	9/25	14/4	54
30	92	72	9/44	8/4	73
45	72	53	10/2	6/2	80
60	53	38	10/27	5/6	82



شکل (۱۰) نمودار تغییرات غلظت فلوراید و pH نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۵ الکترود



شکل (۱۱) درصد کاهش یون فلوراید نسبت به زمان الکترولیز در سیستم محتوی ۵ الکترو

بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از واکنش‌های انجام شده فوق مشخص شد که روش الکتروکواگولاسیون می‌تواند نقش موثری در کاهش یون فلوراید داشته باشد. بیشینه بازده بر اساس آزمون‌های انجام شده برابر با حذف ۸۵ درصدی میزان یون فلوراید بوده که در حضور ۴ الکترو و در مدت زمان واکنش ۶۰ دقیقه رخ می‌دهد و میزان یون فلوراید در این حالت به $3/7$ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد با توجه به زمان مفید قرار گیری فاضلاب و الکترو کوار یکدیگر و حداکثر بازدهی می‌توان این نقطه را نقطه شکست برای حذف یون فلوراید در نظر گرفت، که بستگی به مشخصات اولیه فاضلاب ورودی به راکتور واکنش را دارد. در روش الکتروکواگولاسیون میزان کدورت آب به شدت کاهش یافت. در طی انجام واکنش، قلیایی شدن پساب خروجی با نرخ دو برابری رخ داد و pH به میزان $10/27$ رسید. پسماند قلیایی دلیل خوردگی تجهیزات، تخریب پوشش‌های بتنی است که در انتهای فرایند دفع با افزودن مقدار متناسب با حجم پسماند آن را خنثی می‌شود. ماده ته‌نشین شده، لرد سفید رنگی است که حاصل از رسوب فلوراید آلومینیوم است که این لرد حجم بسیار کمی دارد که شامل فلوراید آلومینیو، فسفات آلومینیوم و سولفات آلومینیوم است. این لرد قبل از ورود به تصفیه نهایی وارد قیف جداکننده می‌شود بر اسان نیروی جاذبه از پساب جا گردیده و پساب شفاف می‌شود و سپس با دیگر رسوبات وارد مرحله نهایی تصفیه خانه در قسمت فیلتر پرس می‌شود. با توجه به چگالی پایین، بسیار کم حجم بوده و این باعث مدیریت پسماند و حمل و نقل آسان می‌شود. به دلیل عدم وجود فلزات سنگین در پسماند پس از خروج از تصفیه خانه معدوم می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با گذشت زمان و کاهش غلظت اولیه، میزان شدت جریان نیز کاهش می‌شد و به ۲۸ آمپر رسید. با این روش میزان غلظت یون فلوراید خروجی به محدوده الزامات محیط زیستی نزدیک شد. به منظور رسیدن به محدوده مجاز، می‌توان از تلفیق این روش با روش شیمیایی استفاده نمود که مزیت استفاده همزمان از این دو روش، مصرف کمتر مواد شیمیایی در جهت کاهش بیشتر یون فلوراید است. بدیهی است که با مصرف کمتر مواد شیمیایی در این فرایند، علاوه بر صرفه اقتصادی، از نظر محیط زیستی نیز میزان مواد شیمیایی کمتری وارد محیط شده و امکان استفاده از پساب تصفیه شده به عنوان آب آبیاری فضای سبز نیز فراهم می‌شود. در پایان لازم به ذکر است.

منابع

- بلادی، سید محسن؛ مافی غلامی، رویا؛ مهردادیان، مهرداد (۱۴۰۲). کارایی فرایند تلفیقی الکتروکواگولاسیون با الکترودهای آهن و ستون فیلتری حاوی پامیس در حذف کروم و سیانید از فاضلاب شهرک صنعتی صفادشت. " فصلنامه پایداری توسعه و محیط زیست، دوره ۴ (۳)، ۳۵-۵۳.
- پناهی، بهاره؛ خضری، مصطفی (۱۳۹۶). بررسی راندمان حذف LAS و COD در کارایی دو فرایند همزمان الکتروکواگولاسیون و الکتروفنتوندر فاضلاب صنایع شوینده. " سومین کنفرانس ملی «مدیریت کلاتشهرها» با رویکرد ایمنی، بهداشت و محیط زیست. برگرفته

- رادفر، زینب؛ کیوانی، مهوش (۱۳۹۴). کاربرد فرایند الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب رنگی. "دهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران". برگرفته از: <https://civilica.com/doc/482409/>
- رحمانی، علیرضا؛ معصومی، زینب؛ آتش زبان، زینب؛ آذریان، قاسم (۱۳۹۵). کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب صنعت فرآوری تخم مرغ. *مجله علمی پژوهان*، دوره ۱۴(۴)، ۵۹-۶۹.
- ریاحی، فریبرز؛ رادگودزی، محبوبه (۱۳۸۴). کاربرد ترکیبات تیتانیم در کاهش یون فلوراید از منابع آب و پساب حاوی غلظت بالای این یون. *مجله آب و فاضلاب*، دوره ۱۶(۵۴)، ۸۲-۸۹.
- ززولی، محمد علی؛ یزدانی چراتی، جمشید؛ علوی نیا، محسن؛ اسفندیاری، یحیی (۱۳۹۴). بررسی کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون با الکتروآلومینیوم در پیش تصفیه فاضلاب رختشویخانه بیمارستان. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، دوره ۲۵(۱۳۴)، ۲۶-۳۶.
- شکوهیان، سکینه؛ پوراکیبر، مجتبی؛ زهدی شیران، اصغر؛ قنبری، فرشید؛ مهدویان پور، مصطفی؛ آقایی، احسان (۱۴۰۲). مطالعه کارایی فرایند انعقاد شیمیایی و الکتریکی در حذف فلوراید از فاضلاب واحد پیش رنگ صنعت خودروسازی. "فصلنامه سلامت و محیط زیست، دوره ۱۶(۴)، ۸۰۵-۸۲۰.
- طالبی، امیرحسین (۱۴۰۰). فرایند حذف فسفر از فاضلاب شهری توسط الکترولیز مطالعه موردی. فاضلاب شهر تبریز "چهارمین کنفرانس بین المللی و پنجمین کنفرانس ملی عمران، معماری، هنر و طراحی شهری، برگرفته از: <https://civilica.com/doc/1427807/>
- عسگری، قربان؛ فردمال، جواد؛ صید محمدی، عبدالمطلب؛ الماسی، حلیمه (۱۳۹۵). مقایسه کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در تصفیه فاضلاب شور حاوی فنل طراحی آزمایشات بر پایه مدل آماری تاگوچی. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*، دوره ۲(۴)، ۳۲۱-۳۳۱.
- عظیمی، علی اکبر؛ نبی بید هندی، غلامرضا؛ هاشمی، سید حسین؛ مهام، یونس (۱۳۸۲). بررسی غلظت یون فلوراید در منابع سطحی تامین آب شرب شهر تهران. *مجله علمی محیط شناسی*، دوره ۲۹(۳۲)، ۳۵-۴۰.
- علیان نژاد، شهرزاد؛ کاشی، گیتی؛ خضری، سید مصطفی؛ ماشینیچیان مرادی، علی (۱۳۹۳). بررسی حذف فلوراید از آب آشامیدنی به روش الکترو واگولاسیون راکتور ناپیوسته. *مجله ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیتها*، دوره ۲(۱)، ۴۷-۵۴.
- کاشی، گیتی؛ خرم نژادیان، گیتی؛ ناصحی، نیلوفر (۱۳۹۳). بررسی کارایی فرایند تلفیقی انعقادشیمیایی و الکتریکی در حذف فلوئور از آب آشامیدنی. *مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی دانشکده بهداشت*، دوره ۲(۲)، ۴۳-۵۲.
- مدبر، جواد؛ لیلی، معصومی قلعه؛ صیادی، علی؛ امامی، امیر؛ شیراکبری، نعیمه؛ جوادیان سرچشمه، سرچشمه (۱۴۰۱). تغلیظ لجن تصفیه خانه بهداشتی شرکت ایران خودرو با استفاده از راکتور کواپتاسیون پلاسمایی. *مجله پژوهش و فناوری محیط زیست*، دوره ۷(۱۱)، ۶۹-۷۸.
- مرتضایی، مهدی؛ ترابیان، علی (۱۳۹۸). امکان سنجی تصفیه فاضلاب صنایع الکل سازی برپایه استفاده از ملاس چغندر قندبه روش لکتروکواگولاسیون. *ششمین همایش و جشنواره ملی محیط زیست و بحران های پیش رو*. برگرفته از: <https://www.google.com/amp/s/civilica.com/doc/914888/amp/>
- نام آور، سارا؛ ناصری، سیمین؛ محوی، امیرحسین؛ نبی زاده، رامین (۱۳۹۱). بررسی کارایی فرایند نانوفیلتراسیون در حذف فلوراید از آب. *مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی*، دوره ۴(۴)، ۳۰-۳۸.
- وربج کاظمی، کبری؛ احتیاط کار، معصومه (۱۴۰۱). بررسی کارایی روشهای شیمیایی و بیولوژیکی و الکتروکواگولاسیون جهت حذف فسفات از پساب صنایع شوینده. "ششمین کنگره بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران" برگرفته از: <https://civilica.com/doc/1622652/>
- Aoudj, Salaheddine, Drouiche. Nadjib, Hecini. Mouna, Ouslimane. Tarik, Palaouane. Baya, (2012). Coagulation as a Post-Treatment Method for the Defluoridation of PHotovoltaic Cell Manufacturing Wastewater. Unité de Développement de la Technologie du Silicium.33(111-120), <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1183>

- Sinharoy. Arindam, Chong. Min. Chung, (2024). Fluoride removal from wastewater and potential for resource recovery: Comparative studies between different treatment technologies. *Environmental Engineering Research* 2024. 29(6). <https://doi.org/10.4491/eer.2024.179>
- Takdastan. Afshin, Emami Tabar. Saeed, Neisi. Abdolkazem, Eslami. Azade, (2014). Fluoride Removal From Drinking Water by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes, *Jundishapur Journal of Health Sciences*. Vol.6. issue 3. e21718. <http://dx.doi.org/10.5812/jjhs.21718>
- Yonghai. Gan, Xiaomeng. Wang, Li. Zhang, Bingdang Wu, Guoyang Zhang, Shujuan Zhang, (2019), Coagulation removal of fluoride by zirconium tetrachloride: Performance evaluation and mechanism analysis. *Chemosphere*, Volume 218, March 2019, (860-868). <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.192>