

# بررسی عملکرد فرایندهای الکتروکواگولاسیون و الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در حذف کدورت‌های فصلی با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم

قربان عسگری<sup>۱</sup>      عبدالمطلب صید محمدی<sup>۲</sup>      قدرت‌اله روشنایی<sup>۳</sup>  
زهرا شریفی<sup>۴</sup>      جمال مهر علیپور<sup>۵</sup>      امیر شعبانلو<sup>۵</sup>      مهرداد شعبانلو<sup>۵</sup>  
(دریافت ۹۰/۹/۷      پذیرش ۹۰/۱۲/۲۴)

## چکیده

عملیات انعقاد شیمیایی و انعقاد شیمیایی/شناورسازی از جمله فرایندهای جدید و روبه رشدی است که به نحو چشمگیری به منظور حذف آلاینده‌ها از آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مطالعه از یک واحد الکتروکواگولاسیون و فلوتاسیون در مقیاس آزمایشگاهی به حجم تقریبی ۶ لیتر، مجهز به ۴ الکترودهای جنس آهن و آلومینیوم به ابعاد ۲۰×۲۰×۲ میلی‌متر به منظور حذف کدورت استفاده شد. تأثیر جنس الکترودها، کدورت اولیه، ولتاژ جریان ۱۰ تا ۳۰ ولت، pH محیط ۳ تا ۱۲ و زمان تماس ۵ تا ۳۰ دقیقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون حذف ۸۴ و ۸۸ درصدی کدورت در مقدار اولیه کدورت ۱۲۰۰ NTU در pH بهینه ۶ و ۹-۷ به ترتیب در هنگام استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم در ولتاژ جریان ۳۰ ولت بعد از زمان ۳۰ دقیقه مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در ولتاژ جریان ۳۰ ولت و زمان تماس ۳۰ دقیقه به ترتیب ۸۷ و ۸۰ درصد کدورت اولیه با استفاده از الکترودهای آلومینیوم و آهن حذف شد که بیانگر تأثیر جنس الکترودها در فرایند حذف کدورت است. این در حالی است که در فرایند الکتروکواگولاسیون در شرایط مشابه بهره‌برداری تنها ۶۸ و ۶۷ درصد با استفاده از الکترودهای آلومینیوم و آهن حذف شده است. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیرگذاری بیشتر فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیوم در مقایسه با استفاده از الکترودهای آهن و همچنین فرایند الکتروکواگولاسیون است.

**واژه‌های کلیدی:** تصفیه آب، کدورت فصلی، الکتروکواگولاسیون، الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون، الکترودهای آهن و آلومینیوم

## Electrocoagulation (EC) and Electrocoagulation/Flotation (ECF) Processes for Removing High Turbidity from Surface Water Using Al and Fe Electrodes

Ghorban Asgari<sup>1</sup>  
Zahra Sharifi<sup>4</sup>

Abdolmotaleb Seid-Mohammadi<sup>2</sup>  
Jamal Mehralipur<sup>5</sup>      Amir Shabanlo<sup>5</sup>

Ghodrat Allah Roshanaie<sup>3</sup>  
Mehرداد Shabanlo<sup>5</sup>

(Received Nov. 27, 2011      Accepted March 12, 2012)

### Abstract

Electrocoagulation (EC) and Electrocoagulation/flotation (ECF) processes are simple and efficient in water and wastewater treatment. In recent years, many investigations have focused on the use of these processes for treating of polluted water. The purpose of this study was to investigate the efficiency of EC and ECF processes in removal of high turbidity water using different electrodes in different circumstances. In present study an electrocoagulation and electrocoagulation/ flotation reactor in a lab scale to an approximate volume of 6 liters which is equipped with four Al-AL and Fe-Fe electrodes (200 \* 20 \* 2 mm) was used for removing of high turbidity water. The effects of operating parameters such as type of electrodes, initial water turbidity, applied voltage (10 to 30 v), initial pH of the solution (3 to 12) and reaction times (5 to 30 minutes) were evaluated. The

- 1- Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan
- 2- Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan (Corresponding Author) (+98 811) 8380090 sidmohammadi@umsha.ac.ir
- 3- Assist. Prof. of Statistics and Epidemiology Faculty of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan
- 4- B.S. of Environmental Health, Hamedan Health Center, Hamedan
- 5- M.Sc. Student of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Hamedan University of Medical Science, Hamedan

- ۱- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۲- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان (نویسنده مسئول) ۰۹۰۸۳۸۰۰۹۰ sidmohammadi@umsha.ac.ir
- ۳- استادیار گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان
- ۴- کارشناس بهداشت محیط، مرکز بهداشت شهرستان همدان
- ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

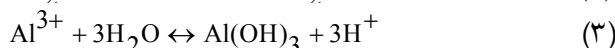
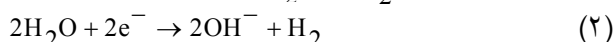
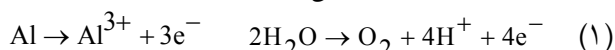
batch experimental results showed that initial turbidity water, initial pH of the solution, different applied voltages up to %88 turbidity as initial turbidity of 1200 NTU have been removed when using Al-Al and Fe-Fe electrodes and reaction times highly effective on the turbidity removal efficiency in these processes. In ECF process, 84% in optimum condition. However, in EC process the maximum removal was found up to 68% of initial turbidity when using Al-Al and Fe-Fe electrodes in same operation. Based on the result obtained in this study, the type of electrodes in EC and ECF processes significantly affect the removal rate of high turbid water. Also, it was found that much higher turbidity removal could be achieved by ECF process than that by EC process in the same condition.

**Keywords:** Water Treatment, Seasonal Turbidity, Electrocoagulation, Electrocoagulation/Flotation, Al and Fe Electrodes.

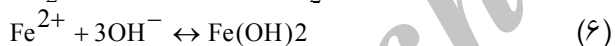
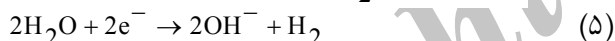
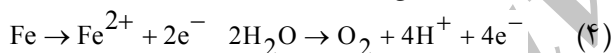
## ۱- مقدمه

هیدروکسیدهای فلزی که می‌توانند سبب تجمع و تشکیل لخته‌های ناشی از مواد معلق یا جذب عوامل آلاینده‌های محلول در آب باشند را تولید می‌کنند. این فرایند در نهایت منجر به ناپایداری ذرات کلوئیدی، تشکیل لخته و شناورسازی و یا ته نشینی عوامل آلاینده در آب می‌شود که با عنایت به نوع الکتروود مورد استفاده، واکنش‌های زیر در محلول اتفاق می‌افتد [۹ و ۱۰].

در حالت استفاده از الکتروود آلومینیوم در آند، کاتد و محلول به ترتیب روابط ۱، ۲ و ۳ بروز می‌کند [۹ و ۱۰].



و در حالت استفاده از الکتروود آهن در آند، کاتد و محلول به ترتیب روابط ۴، ۵ و ۶ بروز می‌کند [۹ و ۱۰].



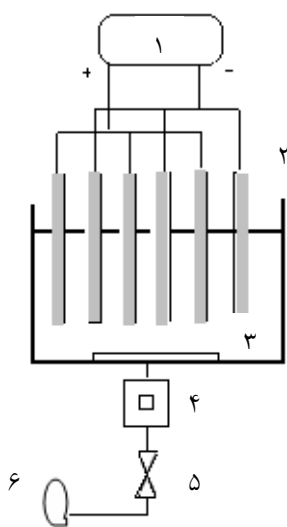
استفاده از فناوری بالا به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی، بالا بودن عمر واحدهای مورد استفاده، راهبری و نگهداری آسان، تولید لجن کمتر و کاهش هزینه‌ها در مقایسه با فرایندهای متداول تصفیه آب با استفاده از مواد منعقد کننده بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۴]. از طرفی فرایند توام الکتروکوآگولاسیون / فلوتاسیون به عنوان یک روش جدید برای حذف آلاینده‌های موجود در آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. این فرایند شامل کاربرد توام جریان الکتریسیته و جابجایی هواست [۹، ۱۲ و ۱۳]. در حقیقت این فرایند طی سه مکانیسم اکسیداسیون الکتروود، تولید جابجایی گازی و عملیات شناورسازی و ته نشینی لخته‌های تشکیل شده منجر به حذف آلاینده‌ها می‌شود [۱]. از این فرایند اولین بار توسط کالینچک و همکاران<sup>۱</sup> به منظور حذف روغن از فاضلاب

در سالیان اخیر بالا رفتن مصرف آب به علت رشد جمعیت و به تبع آن افزایش آلودگی منابع آبی، مشکلات فراوانی را برای مسئولین تامین آب شهری و روستایی فراهم آورده است. در میان منابع مختلف آبی، آبهای سطحی به عنوان یکی از گزینه‌های مهم تأمین آب شرب در جوامع مختلف مطرح شده‌اند. حضور مواد معلق نظیر ذرات شن و ماسه، باکتری‌ها و جلبکها و مواد آلی در آبهای سطحی بسیار محتمل بوده و مشکلاتی از قبیل بالا رفتن کدورت و افزایش رنگ را در این آبها به همراه دارد [۱]. به منظور استفاده از این منابع آبی برای مصارف شرب، لزوم انجام فرایند متداول تصفیه آب با افزودن عوامل ناپایدار کننده عوامل ایجاد کننده کدورت (مواد منعقد کننده) به منظور حذف عوامل مولد کدورت در آب ضروری است. از طرفی مقادیر کدورت در آبهای سطحی بسیار متفاوت بوده و علی‌الخصوص در فصلهای پر باران و طغیان رودخانه مقدار آن به بیش از ۱۵۰۰ NTU نیز می‌رسد [۱]. این در حالی است که عموم تصفیه‌خانه‌های آب برای کدورت‌های معین و پایین در آب طراحی شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و در صورت مواجهه با مقادیر بالای کدورت در آب ورودی به تصفیه‌خانه، کارایی واحدهای تصفیه‌خانه به شدت کاهش می‌یابد [۲]. لذا در این شرایط لزوم انجام فرایند پیش تصفیه آب از جمله استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی اولیه و صافی‌های شنی درشت دانه توسط محققان توصیه شده است اما مشکلات بهره‌برداری و نگهداری و همچنین هزینه بالای ساخت تجهیزات استفاده از آنها را به شدت محدود نموده است [۳].

در دهه اخیر کاربرد فناوری انعقاد شیمیایی در حذف آلاینده‌های مختلف نظیر کدورت، سختی، آرسنیک، فلوراید، روغن کروم و چربی از آب مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۸]. در اغلب فرایندهای انعقاد الکتروشیمیایی به منظور ناپایداری عوامل آلوده کننده آب، مواد معلق و کلوئیدی از جریان الکتریسیته و به کارگیری الکترودهایی عموماً از جنس آهن و آلومینیوم استفاده می‌شود [۹ و ۱]. در فرایند مذکور الکترودهای آهن و آلومینیوم طی فرایند الکترولیز، تجزیه شده و عوامل منعقد کننده و

<sup>1</sup> Kalinichuk et al.

شکل ۱ نشان داده شده است از جنس پلکسی گلاس به ابعاد  $100 \times 200 \times 300$  میلی متر به حجم ۶ لیتر مجهز به سنگ هوا، پمپ هوا، شیر تنظیم هوا و دستگاه مولد جریان الکتریسیته بود. تعداد ۴ الکتروود از جنس آلومینیوم در مرحله نخست و آهن در مرحله دوم هر یک به ابعاد  $2 \times 200 \times 200$  میلی متر به فاصله ۶ سانتی متر از هم به صورت شناور در راکتور تعبیه شده بود. در هر مرحله الکتروودها به صورت دو به دو آلومینیوم-آلومینیوم و آهن-آهن به مولد جریان الکتریسیته از نوع DC متصل بود و ۲ الکتروود تقش کاتد و دو الکتروود نقش آنود را داشتند. دستگاه مولد انرژی قابلیت تولید جریان الکتریسیته در مقادیر استفاده در جریان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت را دارا بوده است.



شکل ۱- شمای پایلوت واحد الکتروکوآگولاسیون-فلوتاسیون

۱- منبع انرژی ۲- الکتروود آلومینیوم یا آهن ۳- سنگ هوا ۴- فلومتر ۵- شیر تنظیم هوا ۶- پمپ هوا

نمونه آب مورد مطالعه، آب آشامیدنی شهر همدان بود که با استفاده از بنتونیت کدورت‌های مورد نظر در آن تأمین شد. به این منظور ابتدا بنتونیت با استفاده از الک در مش ۲۳۰ دانه بندی گردید، ۵۰ گرم از آن در ۱۰۰۰ میلی لیتر آب مقطر کاملاً مخلوط و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محل ثابت از سوپرناتانت آن به عنوان منبع کدورت استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر فرایند حذف کدورت در مقادیر NTU ۳۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ آزمایش‌ها در دو مرحله و با استفاده از فناوری الکتروکوآگولاسیون و الکتروکوآگولاسیون/فلوتاسیون برای هر یک از الکتروودهای از جنس آهن و آلومینیوم به صورت مجزا انجام گرفت.

مورد استفاده قرار گرفت که نتایج ایشان بیانگر بالا بودن کارایی فرایند در مقایسه با فرایند الکتروکوآگولاسیون بوده است [۱۵]. مرزوک و همکاران<sup>۱</sup> حذف کدورت و فلزات سنگین را با استفاده از فرایند الکتروکوآگولاسیون/فلوتاسیون مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج نشان‌دهنده بالا بودن حذف همزمان کدورت و فلزات سنگین از آب بوده است [۱۶]. در پژوهشی دیگر که توسط ژائو<sup>۲</sup> انجام گرفته است تأثیر فرایند الکتروکوآگولاسیون/فلوتاسیون در حذف فلوراید از آب مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حکایت از بالا بودن کارایی فرایند در حذف این آلاینده از آب داشته است [۱۳]. در مطالعه انجام گرفته توسط لی و همکاران<sup>۳</sup> حذف کدورت در مقادیر بالا در آب با استفاده از فرایند الکتروکوآگولاسیون با صفحات آهن، استیل و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که استفاده از صفحات از جنس آلومینیوم به عنوان الکتروود، کارایی بهتری نسبت به الکتروود از جنس آهن و استیل دارد [۱]. نتایج مطالعه انجام گرفته توسط ژانگ و همکاران<sup>۴</sup> که در آن از دو الکتروود آهن و آلومینیوم به منظور تصفیه فاضلاب صنایع نساجی با استفاده از فرایند الکتروکوآگولاسیون استفاده شده است حاکی از آن است که استفاده از الکتروود آهن نتایج بهتری در حذف کدورت از آب در مقایسه با الکتروود آلومینیوم داشته است [۱۷]. جئو و همکاران در مطالعه‌ای تأثیر فرایند الکتروکوآگولاسیون/فلوتاسیون را در حذف جلبک از آب با استفاده از الکتروودهای آهن و آلومینیوم مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتایج حکایت از اثر بخشی بیشتر آلومینیوم در حذف جلبک از آب در مقایسه با الکتروود آهن داشته است [۱۰]. بنابراین با عنایت به تأثیرگذار بودن جنس الکتروود در کارایی فرایند الکتروشیمیایی و فرایندهای توأم الکتروشیمیایی/شناورسازی و عدم وجود اطلاعات جامع در این زمینه به خصوص در حذف کدورت در مقادیر بالا، این پژوهش به منظور تعیین کارایی فرایند الکتروکوآگولاسیون و فرایند توأم الکتروکوآگولاسیون/فلوتاسیون در حذف کدورت در غلظت‌های مختلف با استفاده از الکتروود آهن و آلومینیوم و تأثیر فاکتورهای مختلف بر انجام فرایند انجام گرفت.

## ۲- مواد و روشها

مطالعه حاضر در یک راکتور با جریان ناپیوسته در آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان در سال ۱۳۹۰ به انجام رسید. پایلوت مورد نظر که طرح شماتیک آن در

<sup>1</sup> Merzouk et al.

<sup>2</sup> Zuo

<sup>3</sup> Lee et al.

<sup>4</sup> Zhang et al.

۱-۲- مرحله اول: فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم

در این مرحله از انجام آزمایش‌ها ابتدا با تنظیم pH آب ورودی در دامنه ۱۲-۳ با افزودن اسید سولفوریک ۱ نرمال و سود ۱ مولار و کدورت ثابت ۱۲۰۰ NTU در ولتاژ ۳۰ ولت و قرار دادن الکترودهای آلومینیوم یا آهن به صورت مجزا، بهره‌برداری از راکتور آغاز و با انجام نمونه‌برداری در زمان‌های مختلف (۵ تا ۳۰ دقیقه) مقدار کدورت در آب تصفیه شده، تعیین شد. نمونه‌برداری با استفاده از پیپت کاملاً تمیز با حجم ۵۰ میلی لیتر و از عمق ۷ سانتی‌متری راکتور انجام گرفت. در ادامه و پس از مشخص شدن pH بهینه در حین استفاده از هر یک از الکترودها در کدورت ثابت ۱۲۰۰ NTU، تغییر ولتاژ جریان در دامنه ۱۰ تا ۳۰ ولت مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت و پس از مشخص شدن مقدار جریان و pH بهینه، کدورت‌های ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ NTU به آب اضافه شد و به صورت مجزا در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری از آب انجام و مقدار کدورت آب و درصد حذف آن توسط راکتور تعیین شد. در این مرحله از انجام آزمایش‌ها عملیات شناورسازی با استفاده از وارد نمودن هوا با استفاده از یک واحد پمپ آکوازیوم و پخش آن در راکتور با استفاده از سنگ هوا به طول ۱۵ سانتی‌متر انجام گرفته است.

۲-۲- مرحله دوم: فرایند الکتروکواگولاسیون

به منظور انجام این مرحله از آزمایش‌ها و پس از تعیین pH بهینه مرحله قبل، کارایی حذف کدورت با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون با تغییر ولتاژ جریان در دامنه ۱۰ تا ۳۰ ولت، مقدار بهینه ولتاژ جریان تعیین شد. در ادامه و پس از تعیین شرایط بهینه بهره‌برداری، کدورت‌های ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ NTU به آب اضافه شد و به صورت مجزا در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری از آب انجام و مقدار کدورت آب و درصد حذف آن توسط راکتور تعیین شد.

کلیه مراحل انجام آزمایش در دمای اتاق انجام گرفت و متوسط ۳ بار آزمایش گزارش گردید. به این منظور نمونه‌های برداشت شده در فرایند الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی/شناورسازی به ترتیب پس از گذشت ۳۰ و ۱۰ دقیقه برای ته‌نشینی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. اندازه‌گیری کدورت با استفاده از روش کدورت سنجی بر اساس دستورالعمل استاندارد متد و با استفاده از دستگاه کدورت سنج هچ<sup>۱</sup> ساخت کشور آمریکا تعیین شد [۱۸]. در نهایت تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 و آزمون‌های آماری

<sup>1</sup> HACH 2100

t-student و آنالیز واریانس با سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر pH اولیه

pH محیط یکی از فاکتورهای بسیار کلیدی و مؤثر در واکنش‌های انعقاد شیمیایی همگام با سایر فرایندهای شیمیایی دیگر است [۸-۱۵ و ۱۷]. نتایج تحقیقات انجام گرفته در این زمینه نشان داده است که تأثیر pH اولیه محیط بسته به نوع فرایند مورد استفاده و نوع آلاینده بسیار متفاوت است [۸]. در این مطالعه تأثیر تغییرات pH محیط در دامنه ۱۲-۳ در زمان ۳۰ دقیقه و کدورت اولیه NTU ۱۲۰۰ در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در حین استفاده از الکترودهای مختلف آهن و آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج این مرحله از انجام آزمایش‌ها حاکی از آن است که تغییرات pH محیط در حذف کدورت در هنگام استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم بسیار مؤثر و بسته به جنس الکترودها متفاوت است. به طوری که بالاترین درصد حذف کدورت در هنگام استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم به ترتیب در pH ۶ و ۹-۷ مشاهده شده است. نتایج حاکی از آن است که در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با الکترودهای آهن با کاهش و افزایش مقدار pH محیط از مقدار بهینه (pH برابر ۶)، درصد حذف کدورت به شدت کاهش یافته و به ۴۱ و ۲۲ درصد به ترتیب در pH برابر ۳ و ۱۲ رسیده است. همچنین نتایج مشابهی نیز در حین بهره‌برداری فرایند با استفاده از الکترودهای آلومینیوم حاصل شده است به نحوی که مقدار حذف کدورت در pH ۳ و ۱۲ به ترتیب به ۴۴ و ۵۴ درصد کاهش یافته است. همچنین نتایج این مرحله از انجام آزمایش‌ها بیانگر آن است که میانگین و انحراف معیار حذف کدورت در حین استفاده از آلومینیوم و آهن در تمام pH های مورد استفاده به ترتیب  $170 \pm 13$  درصد و  $57 \pm 12$  درصد بوده که تفاوت معنی‌داری را در حذف کدورت نشان می‌دهد. ( $Pvalue=0/02$ ). بررسی رابطه تأثیر pH بر حذف کدورت در حین استفاده از الکترودهای آلومینیوم و آهن را با استفاده از معادلات رگرسیونی به ترتیب می‌توان به صورت معادلات درجه دومی ۷ و ۸ نشان داد.

$$y = -34.4 + 30.4pH - 1.93(pH)^2, R^2 = 0.95 \quad (7)$$

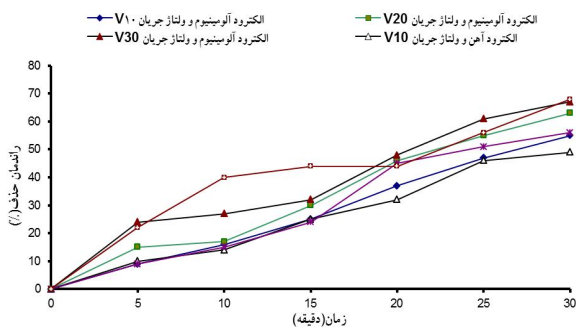
$$y = -28.25 + 29.92pH - 2.2(pH)^2, R^2 = 0.9 \quad (8)$$

عامل مهم در فرایندهای انعقاد شیمیایی از طریق تأثیر بر تشکیل انواع هیدروکسیدهای فلزی بر کارایی فرایند تأثیر گذار است.

به منظور حذف جلبک استفاده شده است، بهترین عملکرد فرایند در pH های ۵ تا ۷ بوده است [۱۰].

### ۳-۲- تأثیر شدت ولتاژ جریان در فرایندهای الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون و الکتروکواگولاسیون

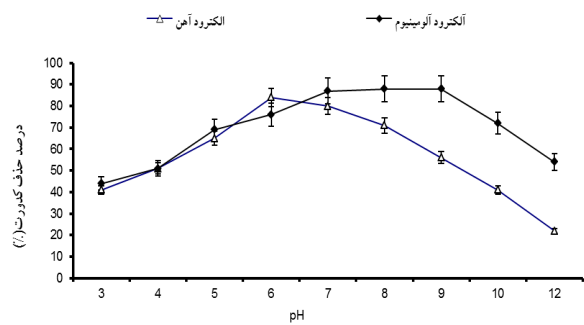
در فرایندهای انعقاد شیمیایی یکی دیگر از فاکتورهای بسیار حائز اهمیت که می تواند نقش قابل توجهی در حذف آلاینده ها داشته باشد، تأثیر تغییرات ولتاژ جریان است [۱۱، ۱۳ و ۱۴]. این فاکتور از طریق تأثیر بر میزان یون های فلزی که از سطح الکتروود کننده می شوند، بر سرعت انجام واکنش های الکتروکواگولاسیون تأثیر گذار است [۱۱]. لذا مقادیر بهینه ولتاژ جریان در هر فرایند الکتروشیمیایی باید تعیین گردد. از این رو در این پژوهش پس از تعیین شرایط بهینه بهره برداری فرایند از نظر pH محیط کارایی فرایندهای الکتروکواگولاسیون و الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در کدورت ورودی ۱۲۰۰ NTU و مقادیر متفاوت ولتاژ جریان مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر این اساس شکل ۳ پروفیل میزان حذف کدورت در زمان های مختلف را در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در pH بهینه و در حین استفاده از الکتروده های آهن و آلومینیوم و کدورت ورودی ۱۲۰۰ NTU نشان می دهد. نتایج این مرحله از انجام فرایند حاکی از آن است که در این فرایند و در به کارگیری الکترودهای مختلف با افزایش ولتاژ جریان، مقدار حذف کدورت افزایش یافته و از این حیث اختلاف معنی داری بین میزان حذف کدورت با تغییرات شدت ولتاژ در این فرایند مشاهده شد (Pvalue=0.01).



شکل ۳- پروفیل تغییرات کدورت در فرایند

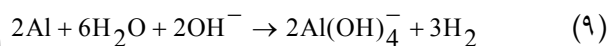
الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در مقادیر متفاوت جریان در حین استفاده از الکتروده آهن و آلومینیوم (NTU1200= کدورت، pH بهینه

به نحوی که در هنگام استفاده از الکتروده آهن در زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب ۷۴ و ۸۰ درصد کدورت در ولتاژهای ۱۰ و ۳۰ ولت حذف شده است. همچنین در این فرایند و هنگام استفاده از آلومینیوم



شکل ۲- پروفیل تغییرات کدورت در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در مقادیر متفاوت pH محیط و الکترودهای متفاوت (NTU1200= کدورت، ۷۳۰ ولتاژ

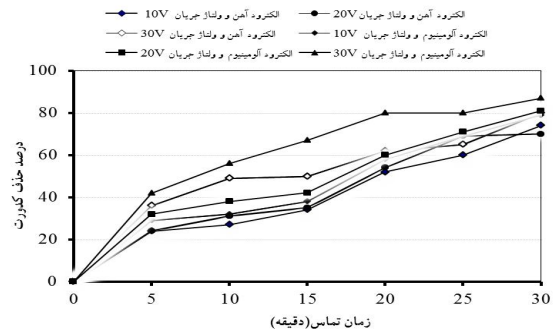
بررسی نتایج مطالعات مختلف در این خصوص نشان داده است که در فرایند انعقاد الکتروشیمیایی و در pH محیط برابر ۲ تا ۴، گونه های فلزی غالب  $Al(OH)_2^+$  و  $Al^{3+}$  هستند و در pH بالاتر از ۱۰ انواع  $Al(OH)_4^-$  جایگزین هیدروکسید آلومینیوم می شوند که در هر دو مورد قدرت تشکیل فلوک آنها از  $Al(OH)_3$  کمتر است [۱۸-۲۰]. همچنین نتایج مطالعات اخیر نشان داده است که با افزایش pH محیط به بیش از ۱۰، یون های  $OH^-$  تولید شده در خلال واکنش به الکتروود کاتد حمله کرده و طی واکنش زیر، تشکیل یون های  $Al(OH)_4^-$  می دهند که جایگزین عامل اصلی انعقاد یعنی  $Al(OH)_3$  شده است [۲۱].



ضمن آنکه در pH محیط بین ۴ تا ۹ یون های  $Al^{3+}$  و  $OH^-$  وارد واکنش شده و گونه های فلزی واسطه ای تولید می شوند که در نهایت به تولید هیدروکسید فلزی آلومینیوم کمک می کنند [۲۲]. از طرفی در حین استفاده از الکتروده آهن در محیط اسیدی  $Fe(OH)_2$ ، در محیط خنثی  $Fe(OH)_2$  و  $Fe(OH)_3$  و در محیط قلیایی گونه غالب  $Fe(OH)_3$  است. بنابراین در محیط با pH خنثی به دلیل تشکیل  $Fe(OH)_2$  و  $Fe(OH)_3$  و امکان تشکیل لخته های بیشتر، کارایی حذف کدورت افزایش می یابد. در سایر مطالعات انجام گرفته نیز در واکنش های الکتروشیمیایی، تأثیر pH محیط به عنوان یک عامل مهم در انجام واکنش و نوع آلاینده تصریح شده است. در این زمینه کلیک و همکاران<sup>۱</sup> بهترین راندمان حذف کدورت را در هنگام استفاده از الکتروده آلومینیوم در pH محیط برابر با ۹ تخمین زده اند [۲۰]. در مطالعه انجام شده توسط مرزوک و همکاران pH محیط برابر با ۸ به عنوان pH بهینه معرفی شده است [۱۶]. در حالی که در مطالعه انجام شده توسط ژائو که در آن از فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با استفاده از الکتروده آلومینیوم

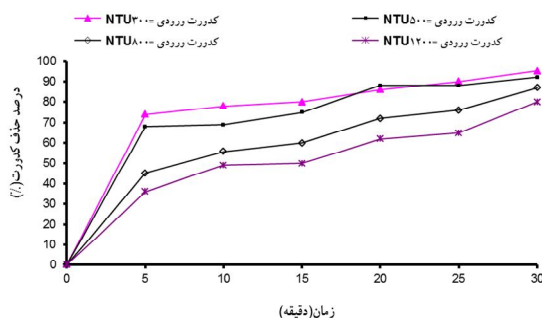
<sup>1</sup> Kilic et al.

در ذرات بوده و سبب کاهش نیروی دافعه الکتریکی و افزایش نیروی جاذبه واندرالسی می شود که به تشکیل لخته کمک می کند. لذا در ولتاژ کم، مقدار یون های آلومینیوم و آهن جدا شده از الکترودهای آهن و آلومینیوم کمتر بوده و به همان نسبت کارایی فرایند در حذف کدورت کمتر است. نتایج اخذ شده در این مطالعه در خصوص تغییرات شدت جریان، نتایج مطالعات مشابهی که در آنها با افزایش ولتاژ جریان میزان حذف آلاینده های مختلف در آب به منظور حذف آرسنیک، اسید هیومیک، سختی و غیره افزایش یافته است را تأیید می کند [۱۹-۲۴].



شکل ۴- پروفیل تغییرات کدورت در فرایند الکتروکواگولاسیون در مقادیر متفاوت جریان در حین استفاده از الکتروده آهن و آلومینیوم (NTU1200=کدورت، pH بهینه)

۳-۳- تأثیر کدورت اولیه در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون از دیگر پارامترهای کیفی که بر کارایی فرایند حذف کدورت در فرایند انعقاد شیمیایی می تواند مؤثر باشد، میزان کدورت اولیه در آب ورودی به راکتور است. در مطالعه اخیر به منظور بررسی تأثیر مقادیر اولیه کدورت در کارایی فرایند انعقاد شیمیایی/شناورسازی با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم، غلظتهای متفاوت کدورت در آب ورودی در شرایط بهینه بهره برداری در نظر گرفته شده است که نتایج حاصله در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج این مرحله از انجام آزمایش ها حاکی از آن است که در سیستم مذکور و در حین استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم با کاهش میزان کدورت ورودی از NTU ۱۲۰۰ به ۳۰۰ میزان حذف کدورت افزایش یافته است. در فرایند انعقاد شیمیایی با الکتروده آلومینیوم با گذشت زمان انجام فرایند و رسیدن آن به ۳۰ دقیقه به ترتیب ۹۸، ۹۶، ۹۲، ۸۷ درصد کدورت به ترتیب در کدورت ورودی NTU ۳۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ حذف شده است (شکل ۵). بررسی آماری نتایج نیز حاکی از معنی دار بودن تأثیر غلظت اولیه کدورت بر میزان حذف آن در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون است (Pvalue=0.01).



شکل ۵- پروفیل تأثیر کدورت ورودی در حذف کدورت با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون و الکتروده آلومینیوم بهینه pH=۷.۳۰ ولتاژ

به عنوان الکتروده نیز با افزایش شدت جریان از ۱۰ به ۳۰ ولت پس از گذشت زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب ۷۹ و ۸۷ درصد کدورت در مقادیر ۱۰ و ۳۰ ولت جریان حذف شد. همچنین نتایج مشابهی نیز در فرایند الکتروکواگولاسیون با الکترودهای مختلف و مقادیر متفاوت ولتاژ جریان حاصل شد که مشروح نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج این مرحله از انجام آزمایش ها حاکی از آن است که افزایش میزان ولتاژ جریان در مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ ولت سبب افزایش کارایی حذف کدورت در فرایند الکتروشیمیایی با الکترودهای آهن و آلومینیوم شده است. به این ترتیب در هنگام استفاده از الکتروده آهن در زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب ۵۵ و ۶۷ درصد کدورت در ولتاژهای ۱۰ و ۳۰ ولت حذف شد. همچنین در این فرایند و هنگام استفاده از آلومینیوم به عنوان الکتروده نیز با افزایش شدت جریان از ۱۰ به ۳۰ ولت پس از گذشت زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب ۴۹ و ۶۸ درصد کدورت در مقادیر ۱۰ و ۳۰ ولت جریان حذف شد. در این مرحله از انجام آزمایش ها نیز اختلاف معنی داری بین میزان حذف کدورت در حین استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم در فرایند الکتروکواگولاسیون مشاهده شد (Pvalue=0.01).

نتایج اخذ شده در این زمینه حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ جریان، سرعت واکنش و به تبع آن میزان حذف آلاینده افزایش می یابد. ضمن آنکه زمان ماند کمتری برای حذف آلاینده مورد نیاز است. هر چند با بالا رفتن ولتاژ جریان، مصرف الکتروده افزایش یافته، انرژی الکتریکی بیشتری مصرف شده و تولید لجن بیشتر می شود [۱۱]. علت افزایش کارایی فرایند با افزایش ولتاژ جریان را می توان به افزایش جریان الکتریسیته عبوری از محلول نسبت داد که این عامل منجر به تجزیه بیشتر الکترودهای آهن و آلومینیوم و تولید هیدروکسیدهای فلزی بیشتر شده است. هیدروکسید آلومینیوم و آهن، خنثی کننده بارهای الکترواستاتیک

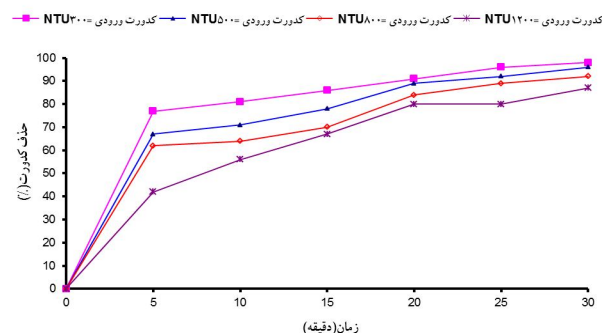
#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه که به منظور حذف کدورت در مقادیر بالا (۳۰۰ NTU تا ۱۲۰۰) در آب ورودی به تصفیه‌خانه‌های آب با استفاده از دو سیستم الکتروکواگولاسیون و الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با الکترودهای مختلف آهن و آلومینیوم انجام شد حاکی از آن است که با استفاده از سیستم الکتروکواگولاسیون و الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون می‌توان کدورت را تا حد قابل توجهی حذف نمود. در عین حال کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون در حذف کدورت بیش از الکتروکواگولاسیون است. همچنین نتایج از اثر بخش بودن الکتروکواگولاسیون نسبت به الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون دارد. از دیگر پارامترهای مؤثر بر انجام فرایند تأثیر غلظت‌های اولیه کدورت، pH محیط، ولتاژ جریان و زمان بهره‌برداری فرایند در حذف کدورت است. بنابراین فرایندهای مورد استفاده در این پژوهش به نحو قابل ملاحظه‌ای می‌تواند به عنوان پیش تصفیه در حین مواجهه با کدورت‌های فصلی مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی همدان، طرح شماره ۹۱۰۹۱۲۳۱۲۹ به انجام رسیده است که به این وسیله قدردانی می‌گردد.

این شرایط در فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با استفاده از الکترودهای آهن نیز تکرار شده است (شکل ۶). به طوری که با افزایش کدورت در آب ورودی میزان حذف کدورت کاهش یافته و در زمان ۳۰ دقیقه حذف کدورت از ۹۵ درصد در کدورت ورودی ۳۰۰ NTU به ۸۰ درصد در کدورت ورودی ۱۲۰۰ NTU رسیده است. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج مشابه دیگر مطالعات که در آن با افزایش کدورت ورودی میزان حذف کدورت کاهش یافته است، مطابقت دارد [۱ و ۱۶].



شکل ۶- پروفیل تأثیر کدورت ورودی در حذف کدورت با استفاده از فرایند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون و الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با pH=7.30 و ولتاژ

#### ۶- مراجع

- 1- Lee, P.C., Gau, S.H., and Song, C.C. (2007). "Particle removal of high-turbidity reservoir water by electro-aggregation." *J. Environmental Engineering and Management*, 17(6), 371-375.
- 2- Gasim, S.R., Motley, M.E., and Zhu, G. (2000). *Water works engineering*, Prentice Hall Inc., N.J.
- 3- Kawwamura, S. (2000). *Water treatment facilities*, John Willy and Sons, Inc., N.Y.
- 4- Gomes, J.A., Daida, P., Kezmez, M., Weir, M., Moreno, H., Parga, J.R., Irwin, G., Mcwhinney, H., Grady, T., Petersan, E., and Cocke, D.L. (2007). "Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products." *J. Hazardous Materials*, 139(2), 220-231.
- 5- Hu, C.Y., Lo, S.L., and Kuan, W.H. (2003). "Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes." *J. Water Research*, 37(18), 4513-4523.
- 6- Carmona, M., Khemis, M., Leclerc, J.P., and Lapisque, F. (2006). "A simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique." *J. Chemical Engineering Science*, 61(4), 1237-1246.
- 7- Masoud, A. H., Alavimoghadam, S.M.R., Arami, M., and Hashemi, S.H. (2012). "Optimization of the electrocoagulation process for removal of Cr using Taguchi method." *J. of Water and Wastewater*, 80, 2-8. (In Persian)
- 8- Mahvi, A.H., Bazrafshan, E., Mesdaghinia, A.R., Nasseri, S., and Vaezi, F. (2007). "Chromium removal from aqueous environments by electrocoagulation process using aluminum electrodes." *J. of Water and Wastewater*, 62, 28-34. (In Persian)



- 9- Jiang, J.Q., Graham, N., and Andre, C. (2003). "Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment." *J. Water Research*, 36, 4064-4078.
- 10- Shanshan Yang, J., Tran, J., Ma, F., Ta, G., and Du, M.. (2010). "Electro-coagulation–flotation process for algae removal." *J. Hazardous Materials*, 177, 336-343
- 11- Malakootian, M., Mansoorian, H.J., and Moosazadeh, M. (2010). "Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness." *J. Desalination*, 255, 67-71.
- 12- Poon, C.P.C. (1997). "Electroflotation for groundwater decontamination." *J. Hazardous Materials*, 55, 159-170.
- 13- Zuo, Q., Chen, X., and Li, W.(2008). "Combined electrocoagulation and flotation for removal of fluoride from drinking water." *J. Hazardous Materials*, 159, 452-457.
- 14- Emamjomeh, M.H., and Sivakumar, M. (2009). "Review of pollutants removal by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes." *J. Environmental Management*, 90, 1663-1679.
- 15- Kaliniichuk, E.M., Vasilenko, I., Shchepanyuk, V.Y., Shukhaverkhova, N.A., and Makarov, I.S. (1976). "Treating refinery wastewaters to remove emulsified oils by electrocoagulation and electroflotation." *J. Int. Chem. Eng.*, 16 (3), 434-435.
- 16- Merzouk, B., Gourich, B., and Sekki, A. (2009). "Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation- electroflotation technique." *J. Hazardous Materials*, 164, 215-222.
- 17- Inoussa, Z., Maiga, A.H., Wethe, J., Valentin, G., Leclerc, J. P., Paternotle, G., and Lapicque, F. (2009). "Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance." *J. Hazardous Materials*, 169, 70-76.
- 18- APHA, AWWA, WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 31<sup>th</sup> Ed., Washington. DC.
- 19- Emamjomeh, M., and Sivakumar, M. (2009). "Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor." *J. Environmental Management*, 90, 1204-1212.
- 20- Kilic, M.G., and Hosten, C. A. (2010). "Comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders." *J. Hazardous Materials*, 176, 735-740.
- 21- Alinsafi, A., Khemis, M., Pans, M.N., Leclerc, J. P., Vaacoubi, A., Benhamou, A., and Nejmeddine, A. (2005). "Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater." *J. Chemical Engineering Process*, 44, 461-470.
- 22- Bayramgol, M., and Kobya, M. (2003). "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater." *J. Purification Technology*, 37, 117-125.
- 23- Ratna Kumar, P., Chaudhari, S., Khilar, K.C., and Mahajan, S.P. (2004). "Removal of arsenic from water by electrocoagulation." *J. Chemosphere*, 55, 1245-1252.
- 24- Yan, F.Q., Li, Y. J., Meng, L., and Meng, Q.J. (2007). "Removal of humic acid from groundwater by electrocoagulation." *J. of China University of Mining and Technology*, 17, 513-515.