

# کارایی روش الکتروکواگولاسیون در حذف فلز سنگین کادمیم موجود در محیط‌های آبی

علی آخوندی<sup>۱</sup>

احمد خدادادی دربان<sup>۲</sup>

حسین گنجی دوست<sup>۳</sup>

(دریافت ۸۸۸/۲۱ پذیرش ۹۰/۱۲/۲۰)

## چکیده

حضور فلزات سنگین در پسابهای صنعتی و مشکلات محیط‌زیستی ناشی از دفع غیر اصولی آنها، تصفیه این قبیل پسابها را قبل از تخلیه به محیط زیست و یا ورود به شبکه جمع‌آوری فاضلاب ضروری می‌سازد. در این تحقیق به بحث و بررسی در مورد روش الکتروکواگولاسیون برای حذف کادمیم از محیط‌های آبی در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته شد. آزمایش‌ها با استفاده از شش الکتروود آلومینیومی و آهنی اجرا گردید. در این پژوهش، راندمان حذف کادمیم در شرایط مختلف سطح و فاصله الکتروودها، توان‌های الکتریکی ورودی، زمان ماند، غلظت اولیه کادمیم و تغییرات pH مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های مربوط به سطح و فاصله الکتروودها، سیستم جریان پایلوت به صورت بسته در نظر گرفته شد و در بقیه آزمایش‌ها سیستم جریان پایلوت به صورت پیوسته طرح و اجرا گردید. تعداد الکتروودهای به کار رفته شش عدد از نوع آلومینیوم و آهن بود و مساحت‌های ۲۳۵۲، ۳۳۶۰ و ۴۲۰۰ سانتی‌متر مربع با فواصل ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر از یکدیگر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین راندمان حذف کادمیم هنگامی صورت می‌گیرد که مساحت الکتروود ۴۲۰۰ سانتی‌متر مربع و فاصله آنها از یکدیگر ۱ سانتی‌متر، توان الکتریکی ورودی ۱۸۵ وات، زمان ماند محلول ۴۰ دقیقه و pH محلول ورودی حدود ۱۰/۲۵ باشد. با بالا رفتن غلظت اولیه کادمیم در جریان ورودی به سیستم، راندمان حذف کادمیم تا حدودی کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** کادمیم، الکتروکواگولاسیون، تصفیه فاضلاب صنعتی، الکتروودهای آلومینیومی و آهنی، ایزوترم

## The Effectiveness of Electrocoagulation Process for the Removal of Cadmium from Water

Ali Akhondi<sup>1</sup>

Ahmad Khodadadi Darban<sup>2</sup>

Hossein Ganjidoust<sup>3</sup>

(Received Nov. 11, 2009 Accepted Mar. 10, 2012)

### Abstract

The presence of toxic heavy metals in industrial wastewaters and its discharge into the sewage system is one of the most environmental problems. In this research, electrocoagulation method was used to remove cadmium as a toxic heavy metal from aqueous phase. The important parameters which affect the removal of cadmium from wastewater such as the electrode type, area of the electrode, distance between electrodes, voltage, initial concentration of cadmium and the pH were examined. Six electrodes with aluminum and iron types were employed with the areas of 2352, 3360, 4200 cm<sup>2</sup>. The distance between electrodes were chosen to be 1, 2, 3 cm, respectively. The experimental results indicated that optimum condition was obtained with high surface area of the electrodes of 4200, distance of 1cm, entrance power of 185, residence time of 40 minutes and pH of influent of 10.25. Results showed that change in initial cadmium concentration reduced its removal.

**Keywords:** Cadmium, Electrocoagulation, Industrial Wastewater Treatment, Iron and Aluminum Electrodes, Isotherm.

1. Grad. M.Sc. Student of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Tehran
2. Assoc. Prof., Dept. of Eng., Tarbiat Modares University, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 82883399 akdarban@modares.ac.ir
3. Prof. of Environmental Eng., Dept. of Eng., Tarbiat Modares University, Tehran

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- ۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (نویسنده مسئول) ۸۲۸۸۳۳۹۹ akdarban@modares.ac.ir (۰۲۱)
- ۳- استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

یکی از مهم‌ترین مسائل دنیای امروز، آلودگی محیط زیست به فلزات سمی و خطرناک است. استخراج فلزات از معادن و کاربرد گسترده فلزات سنگین در صنایع، باعث شده است که غلظت این فلزات در آب، فاضلاب، هوا و خاک افزایش یابد. مکانیسم اثر سمیت فلزات سنگین، ناشی از تمایل شدید کاتیون‌های این فلزات به گوگرد و به این طریق مختل کردن فعالیت آنزیم‌های حیاتی در موجودات زنده است [۱]. از جمله این فلزات سنگین می‌توان به کادمیم اشاره کرد. کادمیم بعد از کاربرد در کود و یا آفت‌کشها، وارد محیط زیست و عمدتاً زمین می‌شود. کادمیم عمدتاً از راه غذا وارد بدن انسان می‌شود. غذاهایی که میزان کادمیم موجود در آنها بالا است، باعث می‌شوند که غلظت کادمیم در بدن انسان به شدت افزایش یابد. عوارضی که توسط کادمیم برای انسان ایجاد می‌شود عبارت‌اند از: اسهال، شکم درد و استفراغ شدید، شکستگی استخوان، عقیم شدن و نازایی، آسیب سیستم عصبی مرکزی، آسیب سیستم ایمنی، ناهنجاری‌های روانی و آسیب احتمالی DNA یا سرطان [۲ و ۳].

تقریباً سه چهارم کادمیم در باتری‌ها، به‌خصوص باتری‌های نیکل-کادمیم استفاده می‌گردد و بیشتر از یک چهارم باقی‌مانده عمدتاً برای ساخت رنگها، پوشش‌ها، آبکاری و به‌عنوان مواد ثبات بخش در پلاستیک‌ها به‌کار می‌رود. از دیگر مصارف کادمیم عبارت‌اند از: استفاده در برخی آلیاژهای زود ذوب به خصوص در آلیاژ بلبرینگ‌ها، ساخت لحیم‌ها، ساخت لامپ تصویر تلویزیون‌های سیاه و سفید و رنگی، ساخت برخی نیمه هادی‌ها و به‌عنوان تثبیت کننده در پلی‌وینیل کلراید [۴].

بنابراین حذف فلزات سنگین از محیط آبی، موضوع مهمی در بهداشت عمومی جامعه محسوب می‌شود که از دو جنبه اهمیت دارد: ۱- جداسازی فلزات سنگین سمی از پسابهای صنعتی، زهاب کشاورزی، معادن و خنثی کردن اثرات سمی آنها ۲- احیا و بازیافت فلزات که با کاهش تدریجی منابع معدنی امری ضروری است [۵].

در این زمینه تکنولوژی‌های متعددی قابل پیشنهاد است و امروزه به‌کار می‌رود. یکی از این روشهای پیشنهادی، روش الکتروشیمی است. البته دانش کمی در ارتباط با توانایی الکتروشیمی وجود دارد و آزمایش‌های کمی در ارتباط با تکنولوژی الکتروشیمیایی انجام شده است. اما تکنولوژی الکتروشیمیایی مدرن می‌تواند به‌عنوان راه حل ترجیحی برای حل محدوده وسیعی از مشکلات پیشنهاد گردد. اخیراً روش الکتروشیمیایی برای تصفیه فاضلاب حاوی آلودگی‌های آلی توجهات زیادی را به‌خود معطوف داشته است که اساساً به‌دلیل سهولت کنترل و بازدهی کاربرد رو به

افزایش این روش است که خود از کاربرد مواد جدید به‌عنوان الکتروود مصرفی و رواج راکتورهای دو قطبی جمع و جور ناشی می‌شود. تحقیق در زمینه اکسیداسیون آن‌دیک بعضی از مشتقات بنزین در آندهای پلاتین و آندهای نوع DSA انجام شده است و همچنین امکان استفاده از روش الکتروشیمیایی و مکانیسم‌های واکنش نشان داده شده است. آزمایش محصولات حد واسط و اندازه‌گیری بازدهی جریان در اکسیداسیون الکتروشیمیایی فنل در آندهای پلاتین و DSA نشان داده است که انواع آندهای رایج مانند پلاتین، تیتانیم-اکسید ایریدیم-اکسید رودنیم، تیتانیم-اکسید سرب بازدهی جریان پایینی دارد، در مقابل آند تیتانیم-اکسید قلع نه تنها بازدهی خوبی دارد بلکه حذف نسبتاً خوبی از کل کربن آلی را امکان‌پذیر می‌سازد [۵]. مطالعه‌ای که توسط ویگو و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۳ بر روی اکسیداسیون الکتروشیمیایی فاضلاب کارخانه‌های روغن زیتون در ایتالیا صورت گرفته نشان داده است که فاضلاب حاوی ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر COD و ۷۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر کلرید سدیم با pH معادل ۴/۹ و بوی زننده، پس از تصفیه غلظت COD و کلرید سدیم آن به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافته است. pH فاضلاب تصفیه شده معادل ۱۰/۲ و بوی آن اسیدی ملایم گزارش شده و نسبت ترقیق از ۴۰۰ به ۱۰ تقلیل یافته است [۶].

همچنین مطالعه‌ای که توسط تانتوری<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۶ تحت عنوان تصفیه الکتروشیمیایی فاضلاب فرایند حاوی ذرات کلئیدی صورت گرفته نشان داده است که الکتروکوآگولاسیون به‌وسیله آندهای آلومینیوم و آهن، ذرات کلئیدی را به‌صورت لخته<sup>۳</sup> حذف می‌نماید. این فرایند بر روی پساب کاغذسازی آزمایش شده و برای صنایع شیمیایی و ذوب فلزات کاربرد دارد [۷]. بررسی‌های آزمایشگاهی و پایلوت توسط لیندر<sup>۴</sup> و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۶ بر روی تصفیه فاضلاب حاصل از شستشوی گازهای اسیدی دودکش به‌روش الکتروشیمیایی مزایایی را دربرداشته که شامل تبدیل اسید کلریدریک موجود در فاضلاب به کلر و هیدروژن قابل بازیافت، حذف فلزات سنگین و شکستن مواد آلی بوده است [۷].

مطالعه‌ای که توسط ولیسیدزو و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۷ انجام گرفته و در آن فاضلاب حاصل از چغندر به‌وسیله الکترولیز تصفیه شده است، نشان می‌دهد که کلر، کلرات‌ها و سایر اکسیدکننده‌های تولید شده در فرایند الکتروشیمیایی، مواد آلی را به آب و دی اکسید کربن اکسید می‌نمایند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که درجه تصفیه به

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

<sup>2</sup> Tunturi

<sup>3</sup> Floe

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

<sup>5</sup> Vlyssides et al.

فعالیت کاتالیزوری آند مورد استفاده، میزان بار COD و pH محلول بستگی دارد. بهترین نتایج برای غلظت کلرید سدیم ۴ درصد، دمای ۴۲ درجه سلسیوس، غلظت COD معادل ۷۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و pH ۹/۵ به دست آمده است. تحت این شرایط کاهش COD معادل ۲۰ g/h/A/m<sup>2</sup> و غلظت COD برابر ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر بوده است [۸].

در مطالعه‌ای توسط هانگ و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۱ فرایند الکتروشیمیایی جدیدی که روش فرد-فنتون نامیده شده برای تصفیه فاضلابی با آلودگی بسیار شدید بررسی شد. نتیجه این مطالعه نشان داده است که فرایند یاد شده با ترکیب احیای الکتروشیمیایی و اکسیداسیون شیمیایی در یک راکتور بسته، توانایی حذف ترکیبات آلی و فلزات سنگین را دارد. فاضلاب تحت فرایند، یک تثبیت کننده PVC حاوی غلظت زیاد فلزات سنگین (Pb برابر ۷۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و غلظت زیاد مواد آلی (COD برابر ۱۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بوده و ترکیب آلی اصلی استات بوده است.

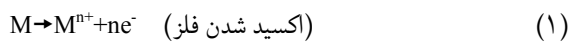
همچنین این مطالعه نشان داده که اکسیداسیون مستقیم آندی هیچ اثری روی حذف COD ندارد و روش فنتون به تنهایی با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهن دو ظرفیتی و ۲۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر آب اکسیژنه، فقط ۳۶ درصد از COD را حذف نموده است. این در حالی است که فرایند فرد-فنتون در غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهن ۳ ظرفیتی و ۲۸۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر آب اکسیژنه، حدوداً ۸۹ درصد از COD را حذف کرده است. به علاوه وقتی آب اکسیژنه با غلظت ۵۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر به کار رفته بازدهی حدود ۹۸ درصد به دست آمده است. نتایج نشان داده که روش فرد-فنتون که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته نسبت به روش اکسیداسیون آندی و روش فنتون، برتر است [۹].

در این زمینه در ایران می‌توان به تحقیقات جنیدی در خصوص حذف همزمان مس و تجزیه D<sup>4+</sup> در فاضلاب صنعتی با استفاده از سیستم ترکیبی تشعشع نوری و الکتروشیمیایی، سمرقندی و همکاران در خصوص حذف فسفات از محلولهای آب و رحمانی و همکاران در خصوص بررسی کارایی روش الکتروشیمیایی در حذف COD از پساب با استفاده از الکتروکوآگولاسیون اشاره نمود [۱۰-۱۳]. اما در خصوص حذف کادمیم با استفاده از الکتروآلومینیوم و پارامترهای مؤثر بر آن، مطالعات محدودی انجام شده است.

الکتروکوآگولاسیون یا انعقاد الکتریکی عبارت است از تولید مواد منعقدکننده در محل با استفاده از تجزیه الکتریکی الکترودهای آلومینیوم یا آهن و تولید یون‌های فلزی در آند و گاز هیدروژن در کاتد.

در این روش با استفاده از جریان الکتریکی و نصب الکترودهای شیمیایی از جنس آلومینیوم، آهن و غیره که به صورت آند و کاتد عمل می‌کنند ذرات کلوئیدی موجود در محیط آب یا فاضلاب از طریق تولید بارهای مثبت الکتریکی از لحاظ الکتریکی، خنثی شده و در نتیجه تولید Al<sup>3+</sup> و Fe<sup>3+</sup> و غیره، فرایند لخته‌سازی فراهم می‌گردد. این فرایند در صنایع مختلف از قبیل آبکاری، استخراج فلزات از معادن، چوب و کاغذ، صنایع فلزی، خودرو سازی، صنایع شیمیایی، داروسازی و غیره در مقیاس واقعی، طراحی و اجرا گردیده و از لحاظ راندمان تصفیه و حذف انواع آلاینده‌های محیط‌زیستی از بازده بسیار مطلوبی برخوردار بوده است [۷].

تئوری فرایند الکتروکوآگولاسیون به این صورت است که این فرایند، با استفاده از جریان مستقیم برق با یک ولتاژ کاری و شدت جریان متغیر که بسته به میزان آلودگی فاضلاب یا آب تعیین می‌شود و با استفاده از الکترودهایی که معمولاً از جنس آلومینیوم، آهن معمولی، فولاد ضد زنگ و یا زغال هستند، انجام می‌گیرد. واکنش‌های انجام گرفته در آند و کاتد به صورت زیر است



(احیای آب به گاز هیدروژن و یون هیدروکسید)

به‌طور خلاصه واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی که در محفظه انعقادسازی اتفاق می‌افتد عبارت‌اند از: اکسیداسیون آندی و احیای کاتدی ناخالصی‌های موجود در آب، انحلال فلز آند و تخلیه آن به محیط آب و در نتیجه انعقاد ذرات کلوئیدی، ایجاد فرایند الکتروفورژ (که در آن یون‌ها از غشاء نیمه تراوا عبور می‌کنند)، شناورسازی ذرات (که در آن حبابهای گازهای تولید شده در الکترودها باعث شناورسازی ذرات می‌شوند)، ترکیب یون‌های فلزی روی کاتد، تولید و تغلیظ اسیدها و بازها، سایر فرایندهای شیمیایی و الکتروشیمیایی [۱۴]. مزایای متعددی برای الکتروکوآگولاسیون گزارش شده است که عبارت‌اند از: راهبری و نگهداری آسان، بهره‌برداری کاملاً خودکار و پیوسته، هزینه پایین بهره‌برداری، بازیافت و استفاده مجدد فاضلاب، حجم کم لجن تولیدی، عدم نیاز به کنترل pH مگر برای مقادیر اضافی، عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی، مؤثر و سریع بودن در تجزیه مواد آلی با راندمان رایجی نزدیک ۹۰ درصد، کاهش تعداد واحدهای فرایندی تصفیه‌خانه و در نتیجه کاهش شدید سطح زمین مورد نیاز تصفیه‌خانه و فاضلاب تصفیه شده با این روش مطبوع، بی‌رنگ، شفاف و بی بو بودن [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. معایب اصلی برای الکتروکوآگولاسیون عبارت‌اند از: تولید گاز هیدروژن (ممکن است یک خطر ایمنی باشد)، خوردگی آند و رسوب لجن بر روی

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

الکترودها (که می‌تواند فرایند را محدود نماید)، افزایش غلظت یون‌های آهن و آلومینیوم در خروجی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً بالا و گرانی استفاده از برق در برخی مناطق [۱۶-۱۹].

## ۲- مواد و روشها

در این پژوهش که یک مطالعه تجربی آزمایشگاهی است و به صورت طرح نمونه در سطح پایلوت در آزمایشگاه محیط زیست دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس انجام پذیرفت، حذف کادمیم از محیط‌های آبی با استفاده از روش الکتروکواگولاسیون مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. به منظور انجام تحقیق این مراحل انجام شد: طراحی و ساخت پایلوت (راکتور الکتروکواگولاسیون)، ساخت نمونه سنتزی فاضلاب، انجام آزمایش‌های گوناگون و نمونه برداری.

به منظور ایجاد شرایط نزدیک به شرایط طبیعی و واقعی، نوع جریان انتخاب شده در راکتور آزمایشگاهی به صورت پیوسته<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. آرایش الکترودها در این طراحی، به صورت مونوپولار<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد که فاصله و سطوح آنها با توجه به انجام آزمایش‌ها به گونه‌ای تنظیم گردید که توان الکتریکی مورد نظر را تأمین کنند. برای ساخت پایلوت از شیشه استفاده شد و سعی گردید که اجزای تشکیل دهنده آن از جنس فلز نباشد تا در فرایند الکتروکواگولاسیون اختلال ایجاد نماید و همچنین در مقابل حرارت حاصل از آزمایش مقاوم باشد.

در این پژوهش از یک بشکه ۱۵۰ لیتری به منظور ساخت و ذخیره‌سازی فاضلاب و یک شبکه ۲۰ لیتری برای متعادل‌سازی و یکنواخت کردن فاضلاب قبل از ورود به راکتور اصلی استفاده شد. به منظور سنجش میزان جریان ورودی به راکتور و همچنین تنظیم آن، با کنترل شیر ورودی حد فاصل مخزن متعادل‌ساز و راکتور الکتروکواگولاسیون، دبی ورودی کنترل گردید. راکتور الکتروکواگولاسیون در ابعاد غیرمفید  $30 \times 18/2 \times 45$  سانتی‌متر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) از جنس شیشه به ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شد. مطابق شکل ۱ این راکتور از اجزاء و قسمت‌های زیر تشکیل شد:

لوله ورودی فاضلاب از مخزن یکنواخت‌ساز، تیغه (بافل) یکنواخت‌ساز و هدایت‌کننده جریان ورودی، مخزن الکترولیتیک به ابعاد مفید  $30 \times 17 \times 17$  سانتی‌متر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع)، الکترودها و پایه‌های نگهدارنده آنها از جنس پلکسی‌گلاس، مخزن (حوضچه) ته‌نشینی به ابعاد مفید  $28 \times 17 \times 25$  سانتی‌متر

(طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع)، تیغه سوراخ‌دار جلوگیری‌کننده از خروج کادمیم ته‌نشینی شده، شیر خروجی به منظور نمونه‌گیری و هدایت جریان به خارج پایلوت.

به منظور تبدیل جریان برق شهری (AC) به جریان مستقیم (DC) با مقدار جریان ثابت ۵ آمپر و شدت جریان (۰ تا ۴۰) ولت از یک دستگاه مبدل الکتریکی استفاده گردید.



شکل ۱- پلان راکتور الکتروکواگولاسیون

به منظور انجام آزمایش‌ها، از نمونه شیمیایی سنتزی که از نیترات کادمیم ساخته شده بود، استفاده گردید. بنابراین نمونه شیمیایی سنتزی در غلظتهای مختلف کادمیم با کنترل پارامترهای مختلف pH، COD و غلظت اولیه کادمیم در آزمایشگاه ساخته شد. به منظور انجام این پژوهش، پس از تهیه نمونه حاوی کادمیم با غلظت معین، تنظیم مقادیر pH و تنظیم ولتاژ مورد نیاز، نمونه‌ها به درون راکتور مربوطه وارد گردید. همزمان با این عمل دستگاه ترانسفورماتور نیز با ولتاژ مناسب روشن گردید. برای تهیه محلولهای با غلظتهای معین از COD، از گلوکز استفاده شد. بر اساس فرمول شیمیایی برای تهیه محلولی با COD حدودی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، حدود ۹۴ میلی‌گرم از گلوکز در یک لیتر آب مقطر به حجم رسانده شد.

پس از گذشت زمان‌مانند تعیین شده برای انجام فرایند، اقدام به نمونه‌برداری از محلول خروجی از مخزن ته‌نشینی گردید. نمونه برداشت شده پس از انجام فرآوری‌های لازم، مطابق روشهای استاندارد، مورد آنالیز قرار گرفت. غلظت کادمیم خروجی توسط دستگاه جذب اتمی مدل واریان AA240 با دقت ۱ ppb، پس از آماده‌سازی مورد آنالیز قرار گرفت. بنابراین پس از انجام آزمایش‌ها، شرایط بهینه از لحاظ متغیرهای pH، ولتاژ، زمان‌مانند، مساحت و فاصله الکترودها تعیین گردید. منظور از شرایط بهینه، شرایط حصول حداکثر راندمان برای حذف فلز سنگین کادمیم با تغییر در پارامترهای pH، ولتاژ، زمان‌مانند و غلظت اولیه کادمیم است (جدول ۱).

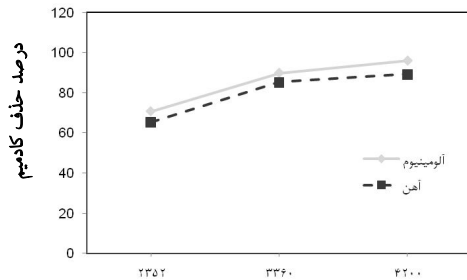
<sup>1</sup> Continuous

<sup>2</sup> Monopolar Plate

## جدول ۱- انواع و مقادیر متغیرهای مورد بررسی در فاضلاب سنتزی

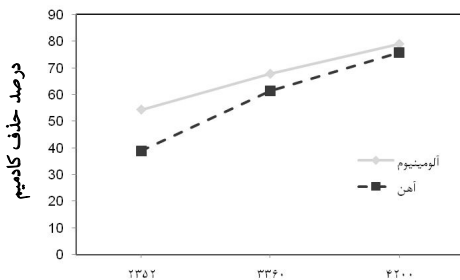
پارامتر	مقادیر
غلظت اولیه کادمیم (mg/L)	حدود ۵۵ و ۱۵۰ و ۳۰۰
زمان فاضلاب (دقیقه)	۱۰ و ۲۵ و ۴۰
pH اولیه	حدود ۳ و ۷ و ۱۰
توان الکتریکی (وات)	۷۵ و ۱۲۰ و ۱۸۵
متغیر COD (mg/L)	۱۰۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰
جنس الکترود	آلومینیوم و آهن

افزایش در توان الکتریکی ورودی و احتمال وقوع اتصال کوتاه در جریان الکتریکی، مرسوم و مقرون به صرفه نیست.



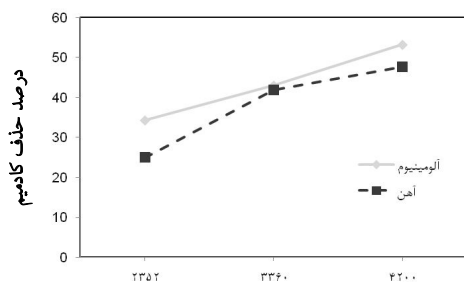
مساحت الکترودها (cm<sup>2</sup>)

شکل ۲- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در مساحت‌های مختلف الکترود (فاصله الکترودها از یکدیگر ۱ سانتی‌متر)



مساحت الکترودها (cm<sup>2</sup>)

شکل ۳- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در مساحت‌های مختلف الکترود (فاصله الکترودها از یکدیگر ۲ سانتی‌متر)



مساحت الکترودها (cm<sup>2</sup>)

شکل ۴- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در مساحت‌های مختلف الکترود (فاصله الکترودها از یکدیگر ۳ سانتی‌متر)

## ۳- نتایج و بحث

در این فصل از پژوهش حاضر، نتایج مطالعات و آزمایش‌های انجام شده با روش الکترودکواگولاسیون، بر روی محلول حاوی کادمیم، به صورت منحنی ارائه شده است.

### ۳-۱- سطح و فاصله بهینه الکترودها

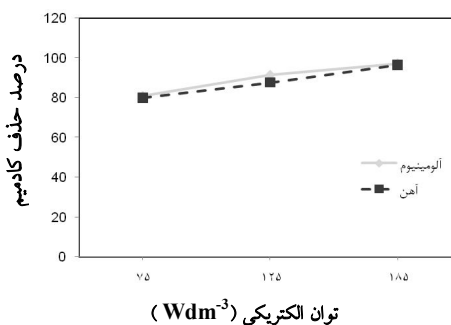
بررسی نتایج حاصل از شکل‌های ۲ تا ۴ بیانگر آن است که استفاده از مساحت بزرگ‌تر تیغه‌های الکترود باعث ایجاد واکنش شدیدتر، آزادسازی گازهای الکترولیتی و یون فلزی عامل منعقدکننده بالاتر می‌شود و در نتیجه سرعت فرایند الکترودکواگولاسیون را بالا می‌برد. همچنین داده‌های مربوط به تغییرات دما در محلول، رابطه مستقیم سطح الکترودها را با افزایش دمای محیط آبی نشان می‌دهد. افزایش نسبت سطح به حجم (S/V)، شدت جریان بهینه را کاهش می‌دهد. انتظار می‌رود که نسبت سطح به حجم به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم تغییر مقیاس باشد. در آزمایش‌های انجام شده برای انتخاب مقدار سطح بهینه الکترود، مقدار سطح بهینه الکترود در حدود ۴۲۰۰ cm<sup>2</sup> به دست آمد. با توجه به اینکه حجم محفظه راکتور الکترولیز در حدود ۸/۶۷ لیتر است، مقدار S/V در حدود ۴۸/۴ m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> بود.

همچنین شکل‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهند که هرچه فاصله الکترودها از یکدیگر کمتر شود راندمان حذف کادمیم بالا می‌رود. روش الکترودکواگولاسیون از بسیاری جهات با روش انعقاد و لخته‌سازی متعارف مشابهت دارد. در روش انعقاد و لخته‌سازی ابتدا با افزایش منعقدکننده، اختلاط سریع انجام می‌شود تا منعقدکننده کاملاً یکنواخت پخش شود. سپس اختلاط آرام شده تا ذرات ناپایدار با یکدیگر برخورد کرده و لخته شوند. همان‌گونه که از نتایج مشخص است بیشترین راندمان حذف در فاصله ۱ سانتی‌متری الکترودها از یکدیگر صورت می‌گیرد و هرچه که این فاصله بیشتر شود راندمان حذف پایین‌تر می‌آید. گرچه با افزایش سطح الکترود و کم کردن فاصله الکترودها راندمان حذف بالاتری از آلاینده به دست می‌آید، اما کم کردن فاصله الکترودها بیشتر از این اندازه به علت

### ۲-۳- تأثیر توان‌های مختلف الکتریکی ورودی

شکل‌های ۳ و ۴ میزان حذف کادمیم را در محدوده توان‌های الکتریکی ۰.۷۵، ۱۲۰ و ۱۸۵ Wdm<sup>-3</sup> نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که توان الکتریکی ورودی بالاتر، میزان حذف بیشتری از فلز سنگین کادمیم را حاصل می‌نماید (شکل ۵).

طبق قانون فارادی در مورد الکترولیز، مقدار جریان الکتریکی، مقدار مواد تشکیل شده یا آزاد شده از الکتروود را تعیین می‌نماید. در این سیستم، توان الکتریکی وارده، مقدار عوامل لخته کننده و شناور ساز در الکتروودها را تعیین می‌نماید. بنابراین توان الکتریکی بالاتر می‌تواند افزایش میزان حذف کادمیم را به همراه داشته باشد و در نتیجه فلوکوکولاسیون و فلو تاسیون بالاتر مورد انتظار است. طبق قانون فارادی، جرم الکترولیز شده در یک سلول الکترولیتیک تابع جریان الکتریسیته عبوری از سلول است.



شکل ۵- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در توان‌های مختلف الکتریکی ورودی

برای یادآوری این قانون می‌توان نوشت [۶]

$$M = \frac{1}{96500} \times \frac{A}{V} \times I \times T \quad (3)$$

که در این رابطه

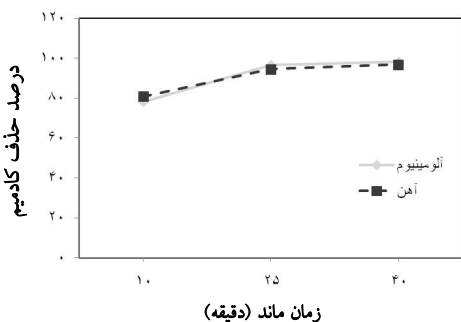
M جرم فلز حل شده، V ظرفیت فلز الکتروود آلومینیومی یا آهنی، A جرم اتمی فلز الکتروود آلومینیومی یا آهنی، I جریان بر حسب آمپر و T زمان بر حسب ثانیه است.

با توجه به رابطه ۳، جرم فلز الکتروود الکترولیز شده متناسب با شدت جریان ورودی به راکتور است. طبق شکل‌های ذکر شده می‌توان گفت که با کاربرد توان‌های مختلف الکتریکی، با الکترودهای آلومینیومی و آهنی قسمت عمده فلز سنگین کادمیم تحت توان الکتریکی ۱۸۵ Wdm<sup>-3</sup> حذف می‌شود. میزان حذف کادمیم در مدت ۳۰ دقیقه الکترولیز به حدود ۹۷ درصد می‌رسد. سودبخشی توان الکتریکی بالا به وسیله تأثیرات الکترولیز محدود شده است. برای مثال دما با افزایش توان الکتریکی ورودی بیشتر می‌شود و افزایش آن بستگی به میزان توان الکتریکی ورودی دارد.

البته افزایش دما محدودیتی برای انجام واکنش ندارد بلکه واکنش را تسریع می‌بخشد.

### ۳-۳- تأثیر زمان‌های ماند فاضلاب

مطابق داده‌های شکل‌های ۳ تا ۵ هر چقدر زمان ماند فاضلاب بیشتر باشد، میزان راندمان حذف فلز سنگین کادمیم بیشتر خواهد بود. این شکل نشان می‌دهد که با کاربرد فلز آلومینیوم قسمت عمده کادمیم در ۲۵ دقیقه اول الکترولیز و با میزان توان الکتریکی ۱۸۵ Wdm<sup>-3</sup> حذف می‌شود. راندمان در این حالت در حدود ۹۶/۷ درصد است. اما با افزایش زمان ماند روند حذف به کندی پیش می‌رود به طوری که در ۴۰ دقیقه راندمان حذف به ۹۸/۵ درصد می‌رسد. همچنین ملاحظه شد که این روند حذف در مورد الکترودهای آهنی نیز صادق است. از مقایسه و بررسی شکل‌ها چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در آغاز فرایند، حذف کادمیم سریع بوده و به تدریج سرعت حذف کاهش یافته است.

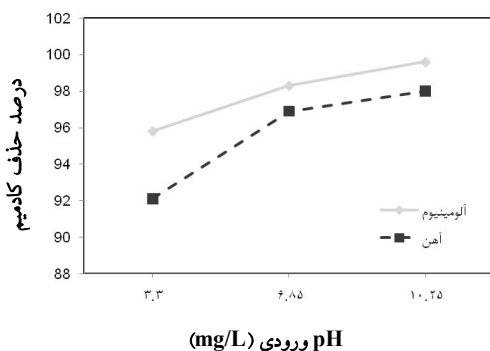


شکل ۶- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در زمان‌های ماند فاضلاب

آهن و آلومینیوم تولیدی به دلیل خوردگی آند تشکیل کمپلکس‌هایی را با یون‌های کادمیم می‌دهند و لذا حذف سریع‌تر کادمیم در ابتدای فرایند مشاهده می‌شود (شکل 6). با توجه به رابطه 3 نیز صحت این موضوع را می‌توان بررسی کرد. به طوری که جرم ماده الکترولیز (الکتروود) شده که همان کوآگولانت واکنش است با مدت زمان ماند فاضلاب و یا به عبارت دیگر مدت زمان الکتروکوآگولاسیون متناسب است.

### ۴-۳- تأثیر تغییرات غلظت کادمیم ورودی

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که غلظت اولیه کادمیم می‌تواند راندمان حذف را تا حدودی تحت تأثیر قرار دهد. به نحوی که راندمان حذف برای توان الکتریکی ۱۸۵ Wdm<sup>-3</sup>، زمان تماس ۴۰ دقیقه و غلظت اولیه برابر ۵۳/۶ میلی‌گرم در لیتر در حدود ۹۸/۷ درصد بوده، در حالی که راندمان حذف در همین شرایط



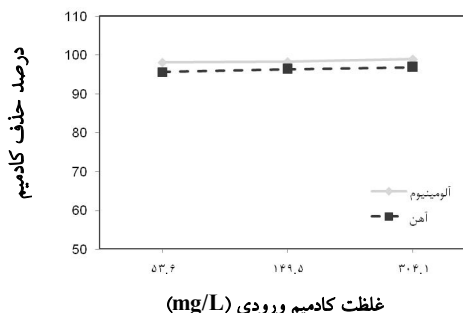
شکل ۸- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در pH های مختلف ورودی

مطابق شکل ۸، pH در هنگام انجام آزمایش به مقدار جزئی بالا می‌رود که علت آن تشکیل گاز هیدروژن در کاتد است. مصرف  $H^+$  باعث افزایش جزئی در pH پس از خروجی از سیستم می‌شود. با مرور واکنش‌های انجام شده در کاتد و آند ملاحظه می‌گردد که یون هیدروکسید تولید شده در سطح کاتد و نیز قلیایت فاضلاب در واکنش تشکیل هیدروکسید آلومینیوم مؤثر است. کاتیون هیدرولیز شده در آب با توجه به pH محلول، گونه‌های مختلف هیدروکسید را تشکیل می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روش الکتروکواگولاسیون برای حذف کادمیم از محیط‌های آبی، در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین راندمان حذف کادمیم هنگامی صورت می‌گیرد که مساحت الکتروود در بیشترین اندازه، فاصله آنها از یکدیگر در نزدیک‌ترین فاصله، توان الکتریکی ورودی در بیشترین حد یعنی ۱۸۵ وات، زمان ماند محلول در بیشترین زمان، حدود ۴۰ دقیقه و pH محلول ورودی حدود ۱۰/۲۵ باشد. با بالا رفتن غلظت اولیه کادمیم در جریان ورودی به سیستم، راندمان حذف کادمیم تا حدودی کاهش می‌یابد. در مجموع از روش الکتروکواگولاسیون می‌توان به‌عنوان یک روش بسیار مؤثر در حذف کادمیم استفاده نمود.

و برای غلظت ۱۴۹/۵ و ۳۰۴/۱ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب در حدود ۹۸/۳ و ۹۸/۵ درصد تعیین شد. به عبارت دیگر راندمان حذف با وجود افزایش در غلظت اولیه کادمیم کاهش پیدا کرده است (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه درصد حذف کادمیم به وسیله کاربرد الکترودهای آهن و آلومینیوم در غلظت‌های مختلف کادمیم ورودی

این امر با نتایج پژوهش‌های قبلی مطابقت داشت به‌نحوی که بذرافشان و همکاران در مطالعه‌ای که به بررسی کارایی فرایند الکتروکواگولاسیون در حذف کروم پرداختند، مشاهده نمودند که نرخ حذف کروم با افزایش غلظت آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۰].

#### ۳-۵- تأثیر تغییرات pH

pH محلول، گونه‌های مختلف یون‌های فلزی را تعیین می‌کند. pH محلول بر وضعیت دیگر گونه‌ها در محلول و قابلیت حلالیت محصولات تشکیل شده نیز اثر می‌گذارد. بنابراین pH محلول بر روی کارایی و قابلیت اجرای فرایند تأثیر می‌گذارد. مطابق شکل ۸، تغییرات pH در طول فرایند الکتروکواگولاسیون، جزئی و با افزایش کمی همراه بوده و نیازی به تنظیمات pH وجود ندارد. افزایش حذف کادمیم در pH بالاتر از ۱۰ می‌تواند بیشتر به دلیل تشکیل هیدروکسید کادمیم و در نتیجه رسوب کادمیم باشد. نتایج آزمایش‌های بذرافشان و همکاران نیز نشان که بیشترین راندمان حذف کروم در pH معادل ۳ صورت پذیرفته است [۲۰].

#### ۵- مراجع

- 1- Mardan, S., Tofighi, H., and Ahmadzadeh S. (2008). *Removal of heavy metals from industrial wastewater*, Iran Smal Industries and Industrial Park Organization (ISIPO) Pub., Tehran. (In Persian)
- 2- Derk, P. (1999). *Guide to electrochemical technology*, Southampton University Electrosynthesis Company, Inc., Southampton.

- 3- Alloway, B.J., and Axres, D.C. (1997). *Chemical principles of environmental pollution*, Chapman & Hall, Inc. London.
- 4- Patter Som, J.W. (1985). *Industrial wastewater treatment technology*, 2<sup>nd</sup> Ed., Butter Worth Publishers, USA.
- 5- Comminellis, C. (1992). "Electrochemical treatment of wastewater containing Phenol." *Process Safe Environmental Protection*, 70(4), 219-224.
- 6- Vigo, F., Avalle, L., and Paz, M. (1983). "Disposal of vegetation water from olive oil mills, study of electrochemical oxidation." *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 60 (3), 125-131. (in Italian)
- 7- Tunturin, P.J. (1996). "Electrochemical treatment of process wastewater containing colloidal particles." *International Chemical Engineering*, 16 (2), 222-228.
- 8- Vlyssides, A., Gisrailides, C.J., Loizidou, M., Karvouni, G., and Mourafeti, V. (1997). "Electrochemical treatment of vinasse from beet molasses." *Water Science and Technology*, 36 (2-3), 271-278.
- 9- Huang, G.G., and Shou, S.S. (2001). "Comparison of a novel electro-fenton method with fenton's reagent in treating a highly contaminated wastewater." *Water Science and Technology*, 143 (2), 17-24.
- 10- Masters, G.M. (2005). *Introduction to environmental engineering and science*, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice- Hall of India, New Delhi.
- 11- Echenfelder, W.W., and Cecil, L.K. (2002) *Applications of new concepts of physical-chemical wastewater treatment*, TN: Pergamon Press, Inc., Vanderbilt University, Nashville.
- 12- Joneidi Jafari, A. (2004). "Simultaneous removal of copper and 2, 4-dichlorophenol from industrial water through combined photo electrochemical degradation." *J. of Environmental Studies*, 33, 1-7. (In Persian)
- 13- Samarghandi, M.R., Zarabi, M., Safari, G., Shirzad, M., Gharibi, H., and Dheikh Mohammadi, A. (2009). "Study of electro-coagulation for phosphate removal from aqueous solution." *12<sup>th</sup> Conf. of National Environmental Health*, Tehran, 18-27. (In Persian)
- 14- Rahmani, A., and Samarghandi, M.R. (2007). "Electrochemical removal of COD from effluents." *J. of Water and Wastewater*, 64, 9-20. (In Persian)
- 15- Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D. (2004). "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation." *J. of Hazardous Materials* 114, 199-210.
- 16- Holt, P.K., Barton, G.W., and Mitchell, C.A. (2006). "The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology." *Chemosphere*, 23 (2), 355-367.
- 17- Rich, L.G. (1999). *Mixed – liquor recycle (MLR) Lagoon nitrification system*, Technical Note Number 7, Department of Environmental Engineering and Science, Clemsom University, USA.
- 18- Chen, G. (2004). "Electrochemical technologies in wastewater treatment." *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- 19- Janssen, L.J.J., and Koene, L. (2002). "The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection." *Chemical Engineering*, 85 (2-3), 137-146.
- 20- Bazrafshan, A., Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A.R., Nasser, S., and Vaezi, F. (2007). "Study of electro coagulation with Alumina electrodes for Cr removal." *10<sup>th</sup> Conf. of Environmental Health*, Hamedan, 35-38. (In Persian)