

## بررسی حذف کدورت‌های بالا از آب توسط فرایند انعقاد الکتریکی

مهدی قربانیان<sup>۱</sup>، سید غلامرضا موسوی<sup>۲\*</sup>، زینب حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۲</sup> دکترای مهندسی بهداشت محیط، دانشیار دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

نشانی نویسنده مسؤل: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، گروه مهندسی بهداشت محیط

E-mail: moussavi@modares.ac.ir

وصول: ۹۳/۴/۳۱، اصلاح: ۹۳/۵/۵، پذیرش: ۹۳/۶/۱۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** با توجه به اثرات بهداشتی، زیست‌محیطی و زیبایی‌شناختی کدورت در آب، لزوم تصفیه‌ی آب‌های کدر بدیهی است. لذا این مطالعه با هدف تعیین کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت‌های بالای فصلی انجام گرفت.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه از نوع تجربی بوده و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. در این مطالعه از یک استوانه‌ی مدرج شیشه‌ای با ارتفاع ۵۱ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر و دو الکترود آلومینیومی با فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر استفاده شد. متغیرهای مورد بررسی عبارت بودند از: دانسیته‌ی جریان (۱ تا ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع)، زمان واکنش (۱ تا ۱۵ دقیقه) و کدورت اولیه (۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ واحد نفلومتری).

**یافته‌ها:** در این مطالعه با افزایش زمان واکنش، کدورت اولیه و دانسیته‌ی جریان، راندمان حذف کدورت افزایش یافت. به طوری که در زمان واکنش بهینه (۲ دقیقه) با افزایش دانسیته‌ی جریان از ۱ به ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، راندمان حذف کدورت از ۹۸/۴۸ به ۹۹/۳۷ درصد رسید و در دانسیته‌ی جریان بهینه (۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) با افزایش زمان واکنش از ۱ دقیقه به ۱۵ دقیقه، راندمان از ۹۸/۸ درصد به ۹۹/۸۷ درصد ارتقا پیدا کرد و با افزایش کدورت ورودی از ۱۰۰۰ به ۳۰۰۰ واحد نفلومتری در شرایط بهینه، راندمان از ۹۸/۷ به ۹۹/۳۶ درصد افزایش یافت.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این تحقیق نشان داد که روش انعقاد الکتریکی می‌تواند کدورت‌های فصلی ناشی از جریان‌های سطحی را با راندمان مطلوب و تا رسیدن به استانداردهای مجاز کاهش دهد.

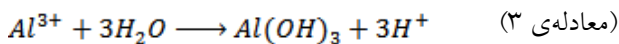
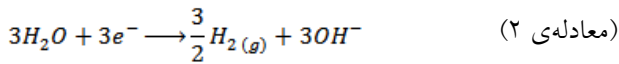
**واژه‌های کلیدی:** انعقاد الکتریکی، کدورت، الکترود آلومینیوم.

### مقدمه

شکست، پراکندگی و یا جذب قسمتی از نور و یا برعکس، مانع عبور نور تابیده شده می‌شود (۱-۳). کدورت آب، علاوه بر اثرات زیبایی‌شناختی، اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی فراوانی را نظیر کاهش اثر گندزدایی، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول،

کدورت آب، عبارت است از حضور مواد کلوئیدی و معلق ریزی مانند خاک، گل‌ولای، ترکیبات آلی و معدنی ریز و محلول، جلبک‌ها، پلانکتون‌ها و سایر میکروارگانیسم‌های موجود در آب به‌گونه‌ای که سبب

مولکول‌های آب به یون هیدروکسیل و گاز هیدروژن احیامی‌شوند (معادله‌ی ۲) و مطابق معادله‌ی شماره‌ی ۳، رسوبات هیدروکسید آلومینیوم تشکیل شده، به‌عنوان منعقدکننده عمل می‌نمایند (۶، ۷).



باتوجه به این‌که در فرایند انعقاد منعقدکننده‌های حاوی کاتیون‌های سه ظرفیتی نسبت به کاتیون‌های دو ظرفیتی ۵۰ تا ۶۰ برابر عملکرد بهتری دارند (۸)، انتظار می‌رود استفاده از الکتروود آلومینیوم نسبت به الکتروود آهن کارایی بهتری در حذف کدورت داشته‌باشد.

امروزه روش انعقاد الکتریکی به‌دلیل مزایای بالای آن از جمله سازگاری با محیط‌زیست، به‌کارگیری تجهیزات ساده، عدم نیاز به مواد منعقدکننده‌ی شیمیایی، زمان ماند کوتاه، کارایی بالای حذف، کاهش حجم لجن و غیره به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌است (۶). فرایند انعقاد الکتریکی برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های مختلفی مانند فاضلاب کارواش (۶) فاضلاب آب‌کاری، رخت‌شویی-خانه‌ها، رستوران‌ها و کشتارگاه‌ها (۹)، صنایع نساجی (۱۰)، صنایع لبنی (۱۱، ۱۲) و همچنین فاضلاب حاوی جلبک (۱۳)، فلزات سنگین (۱۴)، نیترات (۱۵)، فلوراید (۱۶) و غیره به‌کار رفته‌است.

مقادیر کدورت در آب‌های سطحی، بسیار متفاوت بوده و به‌خصوص در فصل‌های پرباران و طغیان رودخانه‌ها مقدار آن به بیش از ۱۵۰۰ واحد نفلومتری می‌رسد. این درحالی‌است که اکثر تصفیه‌خانه‌های آب برای کدورت‌های پایین در آب طراحی‌شده و در صورت مواجهه با مقادیر بالای کدورت در آب ورودی به تصفیه‌خانه، کارایی لازم را در حذف کدورت‌های بالا ندارند. به‌دلیل توانایی بالای فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت‌های بالا، می‌توان آن را در حذف کدورت بالای آب‌های سطحی در فصول پرباران استفاده‌کرد. لزوم

کاهش عمق نفوذ نور و در نتیجه کاهش فتوسنتز، تغییر زنجیره‌ی غذایی در محیط‌های آبی، گرفتگی آبشش ماهی‌ها توسط عوامل مولد کدورت، کاهش رشد تخم و لارو آبزیان و افزایش حساسیت آن‌ها در برابر بیماری‌ها دارد (۴). بنابراین، لزوم کاهش کدورت آب تا حدود استاندارد، بدیهی است. درحال حاضر مطابق استاندارد شماره‌ی ۱۰۵۳ موسسه‌ی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مقدار مطلوب و حداکثر مقدار مجاز کدورت در آب آشامیدنی به‌ترتیب ۱ و ۵ واحد کدورت نفلومتری (NTU) تعیین شده است (۳). فرآیندهای متداول که امروزه جهت حذف کدورت از آب استفاده می‌شوند شامل آشغال‌گیری، انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی، صاف‌سازی و گندزدایی می‌باشد. در طی فرایند انعقاد از مواد منعقدکننده (عمدتاً نمک‌های آلومینیوم و آهن) و کمک منعقدکننده‌ی مختلفی استفاده می‌شود که این مواد شیمیایی می‌توانند مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی متعددی را سبب-شوند. به‌عنوان مثال، استفاده از کلرید فریک ضمن ایجاد مزه‌ی دارویی در آب و ایجاد لکه‌ی زرد متمایل به قرمز بر روی اجسام، در صورت به‌جا گذاشتن باقی‌مانده‌ی بیش از یک میلی‌گرم در لیتر، منجر به ایجاد رنگ و کدورت در آب می‌گردد (۵). در قرن بیست‌ویکم به دلیل برقراری محدودیت‌های زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر در مورد کیفیت نهایی آب و پساب، استفاده از فرایندهای الکتروشیمیایی و به‌خصوص فرایند انعقاد الکتریکی مورد توجه بیشتری قرار گرفت (۶). مکانیسم‌های حذف آلاینده در انعقاد الکتریکی، ممکن است شامل اکسایش، کاهش، تخریب، ترسیب، انعقاد، جذب و رسوب‌دهی باشد (۲). به‌طور کلی در انعقاد الکتریکی پس از برقراری جریان الکتریکی بین آند و کاتد (با فرض این‌که هر دو الکتروود از جنس آلومینیوم باشند)، الکترون‌ها از آند به سمت کاتد حرکت نموده و آلومینیوم صفر به آلومینیوم سه ظرفیتی اکسیدگشته و از سطح آند جدا شده، وارد محلول می‌گردد (معادله‌ی ۱). همزمان با دریافت الکترون توسط کاتد،

طولانی‌ترین زمان واکنش) کدورت اولیه و نهایی تغییری نداشت، از این پساب به‌عنوان پساب اولیه استفاده می‌گردد (۲، ۷، ۱۷). جهت تأمین هدایت الکتریکی موردنیاز، مقدار ۰/۵ درصد سدیم کلراید (۱ گرم به ازای ۲۰۰ میلی‌لیتر نمونه) به نمونه‌های مورد آزمایش اضافه شد. pH همه‌ی نمونه‌ها در محدوده‌ی خنثی تنظیم گردید. برای تنظیم pH از اسید کلریدریک و سود یک مولار استفاده و pH توسط دستگاه pH متر (Jenway ۳۵۰۵) اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد انجام گرفت.

## ۲-۲- راکتور انعقاد الکتریکی

جهت انجام فرایند انعقاد الکتریکی از یک استوانه‌ی مدرج شیشه‌ای به‌حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر، ارتفاع ۵۱ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر استفاده گردید (شکل شماره‌ی ۱). حجم محلول در تمام مراحل ۲۰۰ میلی‌لیتر بود. الکترودهای مورداستفاده از جنس آلومینیوم (به‌دلیل داشتن راندمان بالاتر نسبت به الکترودهای فولاد و آهن در مطالعات گذشته) (۱۸)، با طول ۱۳، عرض ۲/۵، ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر، سطح موثر ۷۰/۲ سانتی‌متر مربع و فاصله‌ی بین الکترودها ۲ سانتی‌متر بودند. در انتهای هر آزمایش، الکترودها با سمباده تمیز و با آب مقطر شستشو داده می‌شدند. جهت اختلاط از هواده دیفیوژری متصل به پمپ هوا با دبی ثابت استفاده گردید. در تمامی آزمایش‌ها پس از اتمام آزمایش، نمونه به‌مدت ۳۰ دقیقه در حال سکون قرار داده شد تا لجن تشکیل شده ته‌نشین شود. سپس حجم لجن و کدورت مایع بالای مزور اندازه‌گیری و ثبت گردید.

## ۲-۳- اندازه‌گیری کدورت

نمونه‌های موردنیاز برای آزمایش از فاصله‌ی ۴ سانتی‌متری زیر سطح آب توسط یک پیت دهانه باز برداشته شد. اندازه‌گیری کدورت با استفاده از دستگاه کدورت سنج (Hach 2100N)، مطابق با روش ۲۱۳۰ کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و

ارائه‌ی روشی به‌منظور حذف و یا کاهش کدورت آب ورودی به تصفیه‌خانه در فصول پر باران، همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است (۷)، ولی نویسندگان در بررسی مطالعات پیشین موردی را نیافتند که با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی کدورت‌های بالای ۱۵۰۰ واحد نفولمتری را حذف نمایند. لذا این مطالعه، جهت تعیین کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت‌های بالا و سنجش تأثیر پارامترهایی همچون زمان واکنش، کدورت اولیه و مقدار دانسیته‌ی جریان بر میزان حذف کدورت در pH طبیعی، انجام گرفته است.

## مواد و روش‌ها

این مطالعه، تجربی و درمقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل دانسیته‌ی جریان ( $1-5 \text{ mA/cm}^2$ )، زمان واکنش (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ دقیقه) و کدورت اولیه (۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ واحد نفولمتری) بودند. هر یک از آزمایش‌ها، سه بار تکرار و در انتها، داده‌ها به‌صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شد. ترسیم نمودارها و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MS-Excel 2013 و SPSS V16 و آزمون آنالیز واریانس انجام گردید.

## ۲-۱- تهیه‌ی پساب اولیه

برای تهیه‌ی کدورت‌های مورد نیاز، ابتدا خاک رس کوبیده و نرم شده از الک مش ۲۰۰ عبور داده شد و سپس به‌مدت یک ساعت با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه توسط همزن مغناطیسی با آب مقطر مخلوط گردید. به‌منظور جداسازی ذرات قابل ته‌نشینی، پساب ساخته شده به‌مدت ۴ ساعت در قیف‌های ایمهاف در حالت سکون قرار داده و از مایع فوقانی قیف به‌عنوان پساب کدر استفاده شد. قبل از هر آزمایش برای اطمینان از عدم ته‌نشینی مجدد، پساب ساخته شده کاملاً مخلوط می‌شد و در صورتی که پس از باقی‌ماندن در قیف ایمهاف به‌مدت ۲ ساعت (بیش از دو برابر مجموع زمان ته‌نشینی و

فاضلاب انجام گردید (۱۹).

تأثیر زمان واکنش در محدوده‌ی ۱ تا ۱۵ دقیقه بر کارایی حذف کدورت توسط فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط pH حدود ۷، دانسیته‌ی جریان ۱ تا ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و کدورت اولیه‌ی ۳۰۰۰ واحد نفلومتری مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده در تمامی حالات با افزایش زمان واکنش، راندمان حذف کدورت افزایش یافت. به‌عنوان، در دانسیته‌ی جریان ثابت ۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش یک دقیقه، راندمان حذف کدورت، ۹۷/۳ درصد بود و با افزایش زمان ماند به ۱۵ دقیقه، راندمان حذف کدورت، به ۹۹/۴۹ درصد رسید.

شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش زمان واکنش و دانسیته‌ی جریان، مقدار لجن تولیدی نیز افزایش یافته است. به‌طوری‌که کمترین میزان لجن (۱/۵ درصد حجمی) در زمان واکنش یک دقیقه و دانسیته‌ی جریان یک میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و بیشترین مقدار لجن (۳۳ درصد حجمی) در زمان واکنش ۱۵ دقیقه و دانسیته‌ی

## یافته‌ها

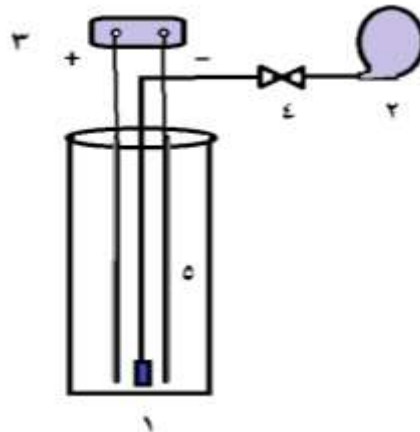
### ۳-۱- تأثیر دانسیته‌ی جریان

تأثیر دانسیته‌ی جریان در محدوده‌ی ۱ تا ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع بر حذف کدورت توسط فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط pH حدود ۷، زمان واکنش ۱ تا ۱۵ دقیقه و کدورت اولیه ۳۰۰۰ واحد نفلومتری مورد بررسی قرار گرفته و میانگین نتایج بعد از سه بار تکرار در شکل ۱ به نمایش درآمده است. مطابق شکل ۱، در پی افزایش دانسیته‌ی جریان، راندمان حذف کدورت نیز افزایش یافته است. به‌طوری‌که در زمان واکنش ثابت، یک دقیقه راندمان حذف کدورت در دانسیته‌ی جریان ۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، برابر با ۹۷/۳ درصد بود و با افزایش دانسیته‌ی جریان به ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، راندمان حذف، به ۹۸/۹۲ درصد رسید.

### ۳-۲- تأثیر زمان واکنش

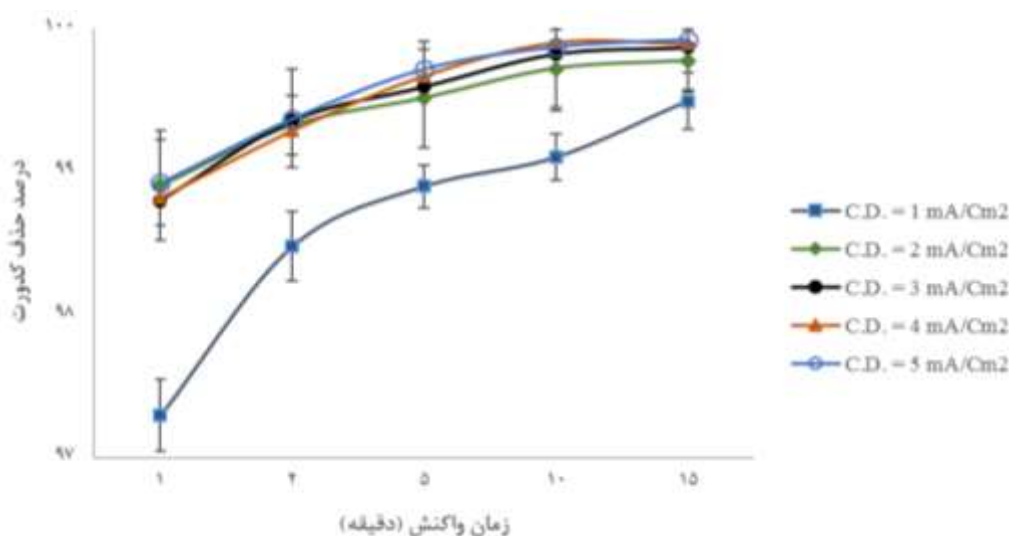
جدول ۱: تغییرات انرژی مصرفی با دانسیته جریان و زمان واکنش (کدورت اولیه ۳۰۰۰ واحد نفلومتری)

زمان (دقیقه)	دانسیته جریان (میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع)				
	۵	۴	۳	۲	۱
۱	۲۰۴/۱۷	۱۰۵	۶۳	۳۰/۳۳	۱۱/۰۸
۲	۴۰۸/۳۳	۲۱۰	۱۲۶	۶۰/۶۷	۲۲/۱۷
۵	۱۰۲۰/۸	۵۲۵	۳۱۵	۱۵۱/۶۷	۵۵/۴۲
۱۰	۲۰۴۱/۷	۱۰۵۰	۶۳۰	۳۰۳/۳۳	۱۱۰/۸۳
۱۵	۳۰۶۲/۵	۱۵۷۵	۹۴۵	۴۵۵	۱۶۶/۲۵

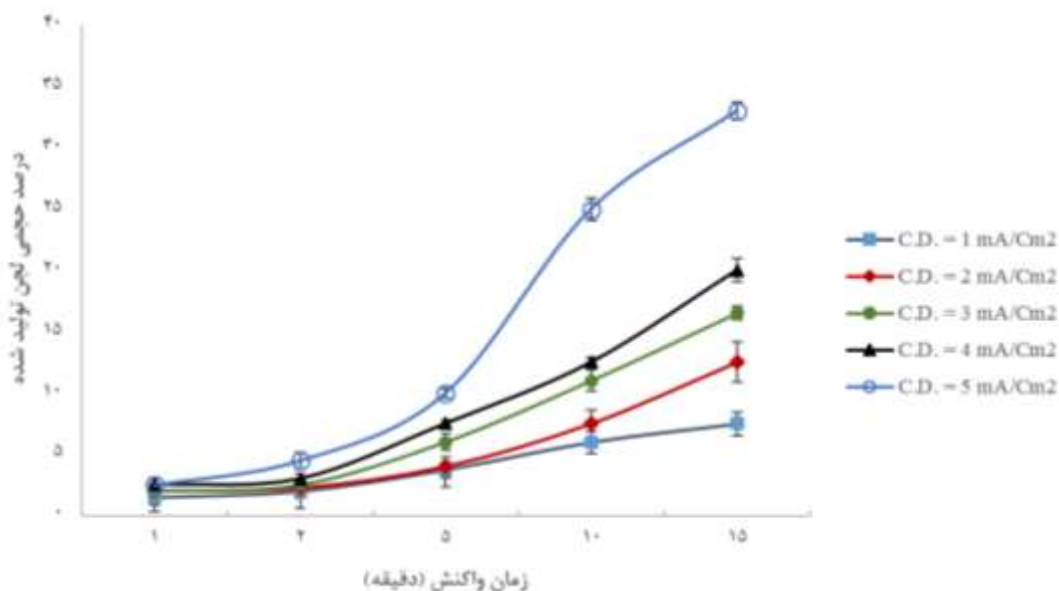


شکل ۱: شماتیک ساده راکتور انعقاد الکتریکی

(۱- راکتور حاوی الکترودها ۲- پمپ تأمین هوا ۳- دستگاه تأمین ولتاژ برق ۴- شیر تنظیم هوا ۵- الکترودهای آلومینیوم)



شکل ۱: تأثیر دانسیته‌ی جریان و زمان واکنش بر حذف کدورت (کدورت اولیه ۳۰۰۰ واحد نفلومتری و  $\text{pH}=7$ )



شکل ۲: تغییرات درصد لجن تولیدی با دانسیته جریان و زمان واکنش (کدورت اولیه ۳۰۰۰ واحد نفلومتری و  $\text{pH}=7$ )

کدورت با مقادیر کدورت اولیه‌ی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ واحد نفلومتری، به ترتیب برابر با ۹۸/۷۷، ۹۹/۱۹۵ و ۹۹/۳۶ درصد بود.

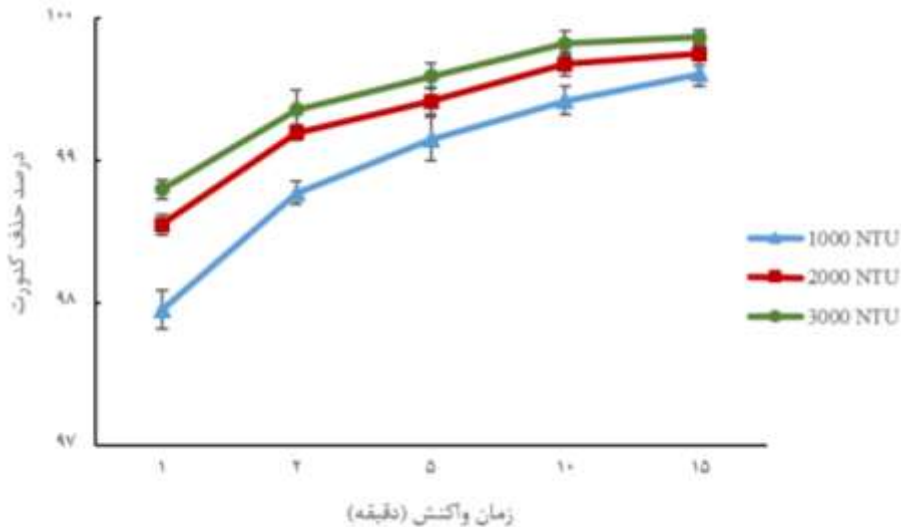
### بحث

بررسی تأثیر دانسیته‌ی جریان بر کارایی فرایند انعقاد الکتریکی نشان داد که بین دانسیته‌ی جریان (در محدوده‌ی ۱ تا ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع) و کارایی فرایند انعقاد الکتریکی رابطه‌ی مستقیم وجود دارد و در پی افزایش دانسیته‌ی جریان، راندمان حذف کدورت نیز

جریان ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع تولید گردید.

### ۳-۳- تأثیر کدورت اولیه

تأثیر کدورت اولیه در مقادیر ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ واحد نفلومتری بر کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت در شرایط  $\text{pH}$  حدود ۷، دانسیته‌ی جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۱ تا ۱۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، با افزایش کدورت اولیه، کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت بهبود یافت. به طوری که در زمان ماند بهینه (۲ دقیقه) راندمان حذف



شکل ۳: تغییرات درصد حذف کدورت در زمان‌های واکنش و کدورت‌های اولیه مختلف و دانسیته جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع

افزایش زمان واکنش میزان تولید کاتیون‌های آلومینیوم در آند (معادله‌ی ۱) و آنیون‌های هیدروکسیل در کاتد (معادله‌ی ۲) افزایش یافت و فرصت کافی برای تشکیل رسوب هیدروکسید آلومینیوم فراهم شد (۲۰). در نتیجه با افزایش میزان هیدروکسید آلومینیوم (به‌عنوان منعقدکننده) کارایی حذف کدورت نیز افزایش یافت (۷). ژائو و همکاران در بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت از نفتاب اعلام کردند. با افزایش زمان کنترل‌شده از ۱۰ به ۵۰ دقیقه کارایی حذف از ۷۲ درصد به ۸۹/۶۴ درصد افزایش یافت (۲۰). مرزوک و همکاران در دو مطالعه‌ی جداگانه، نشان دادند که افزایش زمان کنترل‌شده موجب افزایش حذف کدورت، سرب، مس، نیکل، کادمیم، روی و آهن از پساب نساجی توسط فرایند انعقاد الکتریکی شد (۱۴، ۲۱). عسگری و همکاران نیز در مطالعه‌ای که بر روی حذف کدورت‌های فصلی (۱۲۰۰ واحد نفلومتری) با الکتروکود آلومینیوم داشتند، اعلام کردند با افزایش زمان کنترل‌شده از ۵ به ۳۰ دقیقه کارایی حذف از ۳۰ درصد به ۷۲ درصد افزایش یافت (۷).

براساس نتایج این مطالعه، میزان لجن تولیدی با دانسیته‌ی جریان و زمان واکنش رابطه‌ی مستقیم داشت (شکل ۲). با توجه به معادله‌ی ۴ با افزایش زمان واکنش و میزان جریان، نرخ انتقال الکترون و در نتیجه نرخ انتقال

افزایش یافته‌است (شکل ۱). طبق قانون فارادی (معادله‌ی ۴) در یک زمان واکنش ثابت با افزایش میزان جریان عبوری از سطح الکتروکود، نرخ انتقال الکترون و در نتیجه میزان اکسیداسیون و احیا در آند و کاتد افزایش می‌یابد. لذا با افزایش دانسیته‌ی جریان، میزان تولید هیدروکسیدهای فلزی و ناپایدارسازی مواد کلوئیدی و در نتیجه کارایی حذف کدورت توسط فرایند انعقاد الکتریکی افزایش خواهد یافت (۲، ۷، ۱۴، ۲۰). در مطالعه‌ی مرزوک و همکاران و بسیاری از مطالعات دیگر نیز با افزایش دانسیته‌ی جریان، کارایی فرایند انعقاد الکتریکی افزایش یافت (۲، ۷، ۹، ۱۴، ۲۱).

$$ELC \left( \frac{g}{m^3} \right) = \frac{I \times t \times M}{n \times F \times V} \quad (\text{معادله‌ی ۴})$$

در معادله‌ی فوق ELC غلظت یون آلومینیوم آزاد شده از آند برحسب گرم بر مترمکعب، I شدت جریان اعمال شده بر حسب آمپر، t زمان واکنش برحسب ثانیه، M جرم مولی الکتروکود (آلومینیوم) برحسب گرم بر مول، n تعداد الکترون آزاد شده در آند، V حجم محلول بر حسب مترمکعب و F ضریب تبدیل کلمب به فارادی (۹۶۴۸۵) می‌باشد (۹).

مطابق شکل ۱، در تمامی حالات با افزایش زمان واکنش، راندمان حذف کدورت افزایش یافت. در واقع با

شرایط کاری دانسیته‌ی جریان ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۱۵ دقیقه، فقط ۰/۵۶ درصد کمتر شده، ولی میزان انرژی مصرفی بیش از ۲۴ برابر کاهش یافته و از ۳۰۶۲/۵، به ۱۲۶ کیلووات ساعت بر مترمکعب رسیده‌است (جدول ۱). لجن تشکیل شده نیز از ۳۳ درصد به ۲/۵ درصد (بیش از ۱۳ برابر) کاهش یافته‌است (شکل ۲).

$$ENC \left( \frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{I \times t \times U}{V} \quad (\text{معادله‌ی ۵})$$

در معادله‌ی فوق ENC میزان انرژی الکتریکی مصرف شده برحسب کیلووات ساعت بر مترمکعب، I شدت جریان اعمال شده برحسب آمپر، t زمان الکترولیز برحسب ساعت، U ولتاژ اعمال شده برحسب ولت و V حجم محلول برحسب مترمکعب می‌باشد (۹).

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش کدورت اولیه، کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت بهبودیافت. یون‌های آلومینیوم تولیدشده در اثر فرایند انعقاد الکتریکی دارای بار مثبت هستند و با استفاده از مکانیسم جذب سطحی و خنثی‌سازی بار، بارهای منفی ذرات معلق در آب را خنثی کرده و آن‌ها را رسوب می‌دهند (۸). با افزایش کدورت آب، احتمال برخورد عوامل کدورت با یون‌های مثبت آلومینیوم بیشتر است. در نتیجه مکانیسم جذب سطحی و خنثی‌سازی بار بهتر صورت گرفته و لخته‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شوند. افزایش وزن لخته‌ها باعث ترسیب آن‌ها می‌گردد و مقدار کدورت بیشتری از آب حذف می‌شود (۱، ۴). در نتیجه با افزایش مقدار کدورت اولیه، کارایی فرایند انعقاد الکتریکی نیز افزایش می‌یابد.

تا به حال مطالعات زیادی جهت تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر روی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی انجام گرفته است. در مطالعات مشابه، تأثیر پارامترهای pH، ولتاژ جریان، نوع مواد منعقدکننده، زمان ماند هیدرولیکی، مقدار کدورت اولیه و جنس الکترودهای به-

جرم در الکترودها افزایش یافته و هیدروکسیدهای فلزی بیشتری تولید می‌شود. در نتیجه حجم لجن تولیدشده نیز افزایش می‌یابد (۲، ۷، ۹، ۲۱، ۲۲). مطالعات دیگری نیز نتایج مشابه‌ای برای تأثیر دانسیته‌ی جریان و زمان واکنش بر فرایند انعقاد الکتریکی برای تصفیه‌ی کدورت و سایر آلاینده‌ها مانند هیدروکربن‌های نفتی (۲۲، ۲۳)، رنگ (۲۴)، جیوه (۲۵)، سولفات (۲۳) و پساب مخمرسازی (۲۶) گزارش کرده‌اند.

شکل ۱ نشان می‌دهد که بیشترین راندمان حذف کدورت (۹۹/۹۲ درصد) در بیشترین زمان واکنش (۱۵ دقیقه) و بالاترین دانسیته‌ی جریان (۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) به دست آمده‌است، اما با توجه به معادله‌ی ۵ و جدول ۱ هر چه مقادیر زمان واکنش و شدت جریان بیشتر باشد، انرژی مصرفی و در نتیجه هزینه‌ی بهره‌برداری بیشتر خواهد شد. از طرفی، با افزایش زمان واکنش حجم واحد انعقاد الکتریکی و در نتیجه هزینه‌ی ساخت نیز افزایش خواهد یافت. همچنین طبق معادله‌ی ۴ و شکل ۲ در شرایط فوق بیشترین میزان لجن (۳۳ درصد) تولید می‌شود. لذا با توجه به مشکلات مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌ها، لازم است شرایطی به‌عنوان شرایط بهینه‌ی بهره‌برداری انتخاب شود تا ضمن دارابودن کارایی بالا در حذف کدورت، انرژی کمتری مصرف و لجن کمتری نیز تولید گردد. با توجه به این‌که در شرایط کاری دانسیته‌ی جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۲ دقیقه، لجن تولیدشده با دانسیته‌ی جریان‌های ۱ و ۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در زمان واکنش ۱ و ۲ دقیقه، اختلاف معناداری نداشت ( $P > 0/05$ ) و راندمان حذف کدورت در شرایط مذکور با راندمان در شرایط دانسیته‌ی جریان‌های ۴ و ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در زمان مانده‌های ۳، ۴ و ۵ دقیقه نیز اختلاف معناداری نداشت ( $P > 0/05$ ). لذا دانسیته‌ی جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۲ دقیقه به‌عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. در این حالت اگرچه راندمان حذف نسبت به

برسانتی مترمربع که طی این مطالعه به دست آمده، کمتر از مطالعات مشابه می‌باشد که ضمن مصرف کمتر انرژی به- دلیل تولید لجن کم و درصد حذف بالا (۹۹/۳۶ درصد حذف)، می‌تواند مقدار مناسبی جهت استفاده در مطالعات بعدی باشد.

این مطالعه با هدف تعیین کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت‌های بالا (۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ واحد نفلومتری) انجام گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد کارایی فرایند انعقاد الکتریکی با افزایش دانسیته‌ی جریان، زمان واکنش و کدورت اولیه افزایش می‌یابد. بیشترین راندمان حذف کدورت (۹۹/۹۲ درصد) در شرایط دانسیته‌ی جریان ۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، زمان ۱۵ دقیقه، کدورت اولیه‌ی ۳۰۰۰ واحد و pH خشی به دست آمد که توانست کدورت را از ۳۰۰۰ واحد به ۲/۴ واحد نفلومتری برساند. ولی با توجه به میزان لجن تولیدی و ملاحظات اقتصادی شرایط کاری زمان ۲ دقیقه، دانسیته‌ی جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه و pH خشی به عنوان شرایط بهینه انتخاب شد. در شرایط بهینه کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کدورت ۹۹/۳۶ درصد بود. نتایج این مطالعه نشان داد که می‌توان از فرایند انعقاد الکتریکی با الکتروود آلومینیوم برای حذف کدورت‌های بالای فصلی ناشی از آب‌های سطحی ورودی به تصفیه خانه آب استفاده کرد.

کاررفته مورد ارزیابی قرار گرفته است (۵، ۷، ۱۸، ۲۷). طی پژوهشی که مرزوک و همکاران در مورد اعمال دانسیته‌ی جریان ۱۱/۵ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۱۰ دقیقه، با الکتروود آلومینیوم انجام دادند، آنها توانستند به مقدار ۸۶/۵۴ درصد حذف کدورت دست یابند (۱۴). طبق مطالعه‌ی دیگری که توسط نیام و همکاران در مورد دانسیته‌ی جریان ۵/۶۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و زمان واکنش ۴۰ دقیقه انجام گرفت، آنها توانستند به وسیله الکتروود آهن میزان ۹۶/۷۴ درصد از کدورت اولیه را حذف نمایند (۱۱). نتایج مطالعه‌ی انجام گرفته توسط لی و همکاران نشان داد که با ولتاژ ۲۸۰ ولت و زمان واکنش ۲/۱۳ دقیقه، با الکتروود آلومینیوم، کدورت NTU ۵۰۰، به میزان ۸۰ درصد حذف شد (۱۸). مطالعه‌ی مشابهی که در این زمینه توسط تکدستان و همکاران انجام گرفته است، نشان داد که در pH برابر با ۷، بعد از طی زمان ماند ۹۰ دقیقه و با ولتاژ ۳۰ ولت و به کارگیری الکتروودهای آلومینیوم، بالاترین مقدار حذف کدورت به بیش از ۹۹ درصد رسید (۶). وی لانگ چو و همکاران در پژوهشی نشان دادند که تا ۹۸ درصد حذف کدورت را می‌توان با ولتاژ ۲۰ ولت و زمان واکنش ۱۲ دقیقه، با هر دو الکتروود آهن و آلومینیوم به دست آورد (۲۸). مقایسه‌ی مطالعه‌ی حاضر با مطالعات مشابهی که در این زمینه انجام گرفته، نشان می‌دهد که دانسیته‌ی جریان بهینه‌ی ۳ میلی‌آمپر

## References

1. Kawamura S, McGivney WT, Rader RB, Batzer DP, Wissinger SA, Ramaswami A. Integrated design and operation of water treatment facilities: John Wiley & sons; 2000.
2. Isanloo H, Mohseni M, Nazari SH, Sarkhosh M, Alizadeh Matboo S. Efficiency of electrical coagulation process in reduction of water turbidity. Journal of Health and Hygiene. 2014;5(1):67-74. [Persian]
3. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Drinking water physical and chemical specifications. 2010. [Persian]
4. Moussavi G. water works engineering: planning, design and operation. Tehran: Hafiz; 2000. [Persian]
5. Kord Mostafapoor F, Bazrafshan E, Kamani H. Effectiveness of three coagulants of polyaluminum chloride, aluminum sulfate and ferric chloride in turbidity removal from drinking water. Zahedan Journal of Research in Medical Sciences. 2008;10(2):87-95. [Persian]
6. Takdastan A, Azimi A, Salari Z. The use of electrocoagulation process for removal of turbidity, COD, detergent and phosphorus from carwash effluent. Journal of water and wastewater. 2011;3:19-25. [Persian]
7. Asgari G, Mohammadi A, Roshanaie G, Sharifi Z, Mehralipur J, Shabanlo A, Shabanlo M. Electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes for removing high turbidity from surface water using Al and Fe electrodes. water and wastewater. 2012;24(86):62-9. [Persian]



8. Mansourpanah Y, Kakoie E, Kakanejadifard A. Water and wastewater treatment. Qom: Manshore Seidy; 2000. [Persian]
9. Khandegar V, Saroha A. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. environmental management. 2013;128:949-63.
10. Kobya M, Taner Can O, Bayramoglu M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. J Hazard Mater. 2003;100(1-3):163-78.
11. Niam MF, Othman F, Sohaili J, Fauzia Z. Removal of COD and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulant technique. The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 2007;11(1):198-205.
12. Niam M, Othman F, Sohaili J, Fauzia Z. Electrocoagulation technique in enhancing COD and suspended solids removal to improve wastewater quality. Water Science & Technology. 2007;56(7): 47-53.
13. Gao S, Yang J, Tian J, Ma F, Tu G, Maoau D. Electrocoagulation - flotation process for algae removal. Journal of Hazardous Materials. 2010;177(1-3):336-43.
14. Merzouk B, Gourich B, Sekki A, Madani K, Chibane M. Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique: A case study. J Hazard Mater. 2009;164(1):215-22.
15. Koparal AS, Oğütveren UB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. J Hazard Mater. 2002;89(1):83-94.
16. Hu C, Lo S, Kuan W, Lee Y. Removal of fluoride from semiconductor wastewater by electrocoagulation–flotation. Water Research. 2005;39(5): 895-901.
17. Mesdaghinia A, Rafiee M, Mahvi AH, Vaezi F. Using coagulation process in optimizing natural organic matter removal from low turbidity waters. water and wastewater. 2006;57:1-6. [Persian]
18. Lee PC, Gau SH, Song CC. Particle removal of high-turbidity reservoir water by electro-aggregation. J Environ Eng Manage. 2007;17(5):371-5.
19. APPA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC, USA: American Public Health Association (APHA); 2005.
20. Zhao S, Huang G, Cheng G, Wang Y, Fu H. Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to Reverse Osmosis membranes. Desalination. 2014;344:454-62.
21. Merzouk B, Madani K, Sekki A. Using electrocoagulation–electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. Desalination. 2010;250(2):573-7.
22. Moussavi G, Khosravi R, Farzadkia M. Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated groundwater using an electrocoagulation process: Batch and continuous experiments. Desalination. 2011;278(1–3):288-94.
23. El-Naas MH, Al-Zuhair S, Al-Lobaney A, Makhlof S. Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. Journal of Environmental Management. 2009;91(1):180-5.
24. Sengil A, Ozacar M. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. Journal of Hazardous Materials. 2009;161(2–3):1369-76.
25. Nanseu-Njiki CP, Tchamango SR, Ngom PC, Darchen A, Ngameni E. Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. J Hazard Mater. 2009;168(2–3):1430-6.
26. Kobya M, Delipinar S. Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 2008;154(1–3):1133-40.
27. Mohammadi A, Askary G, Mobarakian A, Taherkhny F, editors. Effect of chitosan coagulant aid in seasonal turbidity using electrocoagulation process using iron electrodes. Sixteenth National Conference on Environmental Health Forums 2013; Tabriz, Iran: Tabriz university of medical sciences. [Persian]
28. Chou W, Wang C, Chang S. Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption. J Hazard Mater. 2009;168(2-3):1200-7.

# Investigating the removal of high turbidity from water by electrocoagulation

**Mahdi Ghorbanian.,**

Ph. D. Student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Gholamreza Moussavi.,**

Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Zeinab Hosseiny.,**

MSc. Student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Received:22/07/2014, Revised:27/07/2014, Accepted:10/09/2014**

---

## Corresponding author:

Gholamreza Moussavi,  
Tarbiat Modares University,  
Tehran, Iran.  
E-mail: moussavi@modares.ac.ir

## Abstract

**Background:** Removal of turbidity is essential due to its hygienic, environmental and aesthetics effects. Therefore, this study aimed to determine electrocoagulation efficiency in high seasonal turbidity.

**Materials and Methods:** This experimental study was conducted in bench scale. The electrochemical reactor was consist of cylindrical glass column having an internal diameter of 5 cm and a height of 51 cm and operated in the batch mode. Two sheets of aluminum spaced 2 cm apart were installed in the cell's electrodes. The studied parameters was current density, reaction time and initial turbidity.

**Results:** Turbidity removal increased by reaction time, initial turbidity and current density. Regarding amount of produced sludge and economic aspects, reaction time of 2 min and current density of 3 mA/cm<sup>2</sup> were selected as optimum conditions.

**Conclusion:** Results of present work indicated that the electrocoagulation process is capable to reduce high concentration of turbidity to permissible standard levels efficiently.

**Keywords:** *Electrocoagulation, Seasonal turbidity, Aluminum electrode*