

"یادداشت فنی"

## بررسی روش الکتروکواگولاسیون برای کاهش ذرات معلق، در سرریز تیکنر هماتیت گل گهر

سید مرتضی موسوی راد<sup>۱\*</sup>؛ مریم عباسپور سیرجانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار بخش مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرن، دانشگاه شهید باهنر کرمان s.m.moosavirad@gmail.com  
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان maryamabaspour1@gmail.com

(دریافت ۱۳ شهریور ۱۳۹۴، پذیرش ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

### چکیده

فرایند الکتروکواگولاسیون از جمله فرآیندهای جدید و رو به رشدی است که به نحوه چشم‌گیری به منظور حذف ذرات معلق آب استفاده قرار شده است. در این تحقیق به بررسی روش الکتروکواگولاسیون برای کاهش کل ذرات جامد معلق (TSS)، کدورت و سختی در آب سرریز تیکنر هماتیت گل گهر سیرجان پرداخته شده است. بدین منظور در مقیاس آزمایشگاهی محفظه شیشه‌ای به حجم ۳ لیتر و مجهز به ۶ الکتروود ساخته شد. الکتروودها از جنس آهن، استیل و آلومینیوم، که به صورت مجزا در هر یک از انواع الکتروود قرار گرفته‌اند. پارامترهای جنس الکتروود، مدت زمان تماس و ولتاژ بررسی شد. نتایج نشان داد که الکتروود آلومینیوم نسبت به الکتروودهای آهن و استیل بیشترین میزان حذف TSS را دارد. به طوری که در ولتاژ ۶ ولت و زمان ماند ۵ دقیقه، TSS به میزان ۸۸/۵ درصد حذف شده است. از طرفی الکتروود استیل در ولتاژ ۶ ولت و مدت زمان ماند ۱۵ دقیقه بالاترین مقدار حذف کدورت برابر با ۸۱٪ (۲۱ NTU) را دارد. همچنین در ولتاژهای مختلف و زمان ماندهای متفاوت هیچ‌گونه تغییر قابل توجهی در سختی مشاهده نشد. بر اساس بررسی فنی و اقتصادی، هزینه‌های سرمایه‌ای، عملیاتی و نگهداری برای الکتروودهای آلومینیوم، آهن و استیل به طور جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان داد الکتروود آهن با توجه به کل هزینه‌های اجرایی (۸۷۸ ریال) نسبت به الکتروودهای استیل (۲۹۷۸ ریال) و الکتروود آلومینیوم (۳۱۶۰ ریال) ارجحیت دارد. از طرفی الکتروود آهن با توجه به سهولت در بهره‌برداری، قابلیت ته نشینی خوب لجن تولیدی، قابلیت آبیگری مناسب و تولید لجن کمتر، مناسب تشخیص داده شده است.

### کلمات کلیدی

کل ذرات جامد معلق، الکتروکواگولاسیون، سختی کل، بررسی فنی و اقتصادی، سرریز تیکنر، گل گهر سیرجان

## ۱- مقدمه

تیکنرها اغلب در انتهای مسیرهای کان‌هارایی برای بازیافت آب و تغلیظ استفاده می‌شوند [۱]. این تجهیزات در دو دهه اخیر دستخوش تغییرات چشمگیری شده‌اند. امروزه تیکنرهای مورد استفاده در صنعت به چهار گروه عمده تیکنرهای مرسوم<sup>۱</sup>، تیکنرهای نرخ بالا<sup>۲</sup>، تیکنرهای دانسیته بالا<sup>۳</sup> و تیکنرها با ته ریز خمیری<sup>۴</sup> طبقه‌بندی می‌شوند که سه گروه آخر به‌عنوان تیکنرهای مدرن شناخته می‌شوند. این نوع تیکنرها نسبت به تیکنرهای مرسوم، نسبت ارتفاع به قطر بیشتری دارند که باعث افزایش ارتفاع آب و در نتیجه افزایش فشار در کف مخزن می‌شود. همچنین ظرفیت آن‌ها حدود ۱۰ الی ۱۵ برابر تیکنرهای مرسوم با قطر یکسان است [۲]. در تیکنر، در اثر اختلاف دانسیته جامد و مایع، ذرات جامد ته‌نشین شده و به‌صورت دوغاب غلیظ‌شده از ته‌ریز تیکنر خارج می‌شود. جریان سرریز نیز به‌صورت آب شفاف برای استفاده مجدد به مدار بازگردانده می‌شود. تیکنرهای مورد استفاده در ابتدا مخازن ساده‌ای بودند که با ابعاد بسیار بزرگ ساخته می‌شدند. با گذشت زمان، فناوری ساخت تیکنر توسعه پیدا کرد به‌طوری‌که تیکنرهای جدید با ابعاد کوچکتر و ظرفیت معادل، طراحی و ساخته می‌شوند [۳]. انعقاد الکتریکی عبارت است از تولید مواد منعقدکننده در محل با استفاده از تجزیه الکتریکی الکترودهای آلومینیوم یا آهن تولید یون‌های فلزی در آند و گاز هیدروژن در کاتد انجام می‌شود. در این روش با استفاده از جریان الکتریکی و نصب الکترودهای شیمیایی از جنس آلومینیوم، آهن و غیره که به‌صورت آند و کاتد عمل می‌کنند ذرات کلوئیدی موجود در محیط آب یا پساب از طریق تولید بارهای مثبت الکتریکی از لحاظ الکتریکی خنثی شده در نتیجه تولید  $Al^{3+}$ ،  $Fe^{3+}$  و غیره فرآیند لخته‌سازی فراهم می‌شود. این فرآیند در صنایع مختلف از قبیل آبکاری، استخراج فلزات از معادن، چوب و کاغذ، صنایع فلزی، خودروسازی، صنایع شیمیایی، داروسازی و غیره در مقیاس واقعی طراحی و اجرا شده و از لحاظ راندمان تصفیه و حذف انواع آلاینده‌های زیست محیطی بازده بسیار مطلوبی دارد [۴-۶].

## قابلیت‌های سیستم

- ۱- کاهش فلزات سنگین مثل آرسنیک، کادمیوم، کرم، سرب، نیکل و روی تا میزان ۹۹
- ۲- کاهش سیلیس‌های محلول، ذرات رس و سایر مواد معلق تا

۹۸ درصد

- ۳- کاهش باکتری‌ها از ۱۱۰ میلیون عدد در میلی لیتر به ۲۷۰۰ عدد در میلی متر ۹۵ درصد
- ۴- کاهش آلودگی‌های روغنی ناشی از فاضلاب پالایشگاه‌ها، صنایع غذایی و غیره تا میزان ۹۹
- ۵- حذف ایزوتوپ‌های رادیواکتیو و غیره
- ۶- کاهش سختی، فلزات سنگین، کدورت، COD و TSS
- ۷- کاهش مواد آلی پیچیده و غیره

## مزایای سیستم

- ۱- بهره برداری کاملاً خودکار و پیوسته
- ۲- کاهش تعداد واحدهای فرآیندی تصفیه‌خانه و در نتیجه کاهش شدید سطح زمین مورد نیاز تصفیه‌خانه و کاهش هزینه‌های بهره برداری سیستم تصفیه
- ۳- عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی
- در این روش مقدار مواد زائد تقریباً برابر همان مقدار مواد ته‌نشین شده در قسمت جداسازی است و هیچ افزایشی به وسیله مواد شیمیایی صورت نمی‌گیرد. به همین دلیل مقدار لجن ناشی از این فرآیند نیز بسیار کمتر از روش‌های دیگر است.
- ۴- بازیافت و استفاده مجدد پساب
- در این روش چون از مواد شیمیایی در سیستم استفاده نمی‌شود بنابراین بهره‌وری کامل از بازیافت پساب امکان پذیر است.
- ۵- هزینه پائین بهره برداری
- هزینه بهره برداری از فرآیند انعقاد الکتریکی به نوع آب بستگی دارد.
- ۶- راهبری و نگهداری آسان
- ۷- حداقل فضای مورد نیاز
- ۸- به غیر از پمپ هیچ قطعه متحرکی وجود ندارد.
- ۹- محدودیتی در مورد نوسانات جریان، غلظت و نوع ترکیبات وجود ندارد. سیستم قابلیت بسیار بالایی در مقابل شوک مواد آلی، هیدرولیکی و کلیه مواد سمی و سنتتیک دارد.
- اکثر روش‌های مختلف تغلیظ و تخلیص کارخانجات فرآوری مواد معدنی، در محیطی آبی انجام می‌شوند. در این صورت مواد به‌دست آمده در مراحل مختلف فرآوری به‌صورت پالپی است که گاهی رقت زیادی دارد و بایستی بخش آبی آن را از جامد جدا کرد. با توجه به کمبود آب و تسهیل در انتقال مواد لازم است که کنسانتره و باطله تا حد مشخصی آبیگری شوند. بنابراین آب

بر اساس شرایط موجود و کمبود آب منطقه، به بررسی تأثیر پارامترهای مربوطه و بررسی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم الکتروکواگولاسیون در سر ریز تیکنر هماتیت گل گهر سیرجان پرداخته شده است.

## ۲- روش کار

در این روش آب سرریز تیکنر مورد نظر ابتدا به داخل مخزن پمپ شد. سپس الکترودها با استفاده از جریان برق فعال شده و در نتیجه عوامل منعقدکننده در آند و کاتد هیدروژن در کاتد متصاعد می شود. عوامل منعقد کننده به مواد آلاینده چسبیده و باعث تشکیل لخته می شود و سپس گاز هیدروژن در حین بالا آمدن آن‌ها را به سطح می آورد و پس از شناور شدن در سطح به حوض ته نشینی منتقل می شوند. اغلب مقدار جریان خروجی همراه با مواد آلاینده از سطح، ۵٪ حجم کل جریان موجود در مخزن است. در نهایت آب تمیز از سیستم به تانک ذخیره پمپ می شود. مدت زمان فرآیند به طبیعت مواد آلاینده و همچنین آهنگ مورد نیاز حذف مواد به آلاینده‌ها بستگی دارد، ولی به طور معمول این زمان تماس، ۵ تا ۱۵ دقیقه است.

مطالعه حاضر در یک راکتور با جریان ناپیوسته در آزمایشگاه انجام شد. پایلوت مورد نظر که طرح شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده از جنس شیشه به ابعاد ۱۰۰\*۱۰۰\*۳۰۰ میلی متر به حجم ۳ لیتر مجهز به دستگاه مولد جریان الکتریسیته بود. تعداد ۶ الکترودها از جنس آلومینیوم در مرحله نخست و آهن در مرحله دوم و استیل در مرحله سوم هر یک به ابعاد ۱۰۰\*۲۰\*۲ میلی متر به فاصله ۲ سانتی متر از یکدیگر و به صورت شناور در راکتور تعبیه شده بودند در هر مرحله الکترودها به صورت دو به دو آلومینیوم-آلومینیوم و آهن-آهن و استیل-استیل به مولد جریان الکتریسیته از نوع DC متصل بود و سه الکترودها نقشه کاند و سه الکترودها نقش آند را داشتند. دستگاه مولد انرژی قابلیت تولید جریان الکتریسیته در مقادیر استفاده در جریان های ۵، ۱۰، ۲۰، و ۳۰ ولت را داشت.

پس از آن متغیرات آزمایش که شامل تأثیر جنس الکترودها، زمان تماس ۵ تا ۱۵ دقیقه و ولتاژ ۲/۵ تا ۱۰ ولت بود مطالعه شد و سپس با استفاده با شیر تعبیه شده در راکتور نمونه‌گیری به عمل آمد و به صورت برجها به آزمایشگاه برای اندازه‌گیری TSS، کدورت و سختی فرستاده شد.

برگشتی می‌تواند دوباره به خط تولید وارد شده و از اتلاف آن جلوگیری شود. به دلیل قرار گرفتن مجتمع سنگ آهن گل‌گهر در منطقه خشک و کم آب جلوگیری از هدرروی آب صنعتی بسیار مهم است. در کارخانه فرآوری هماتیت به منظور بازیابی آب باطله، از یک تیکنر به قطر ۲۵ متر و عمق ۶ متر در مرکز و ۴ متر در اطراف با سرعت پاروی ۱/۱ دور بر دقیقه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در طراحی اولیه کارخانه درصد جامد ته‌ریز مورد اشاره ۵۷٪ بوده و در حال حاضر این مقدار به‌طور متوسط ۳۲٪ است در نتیجه در شرایط فعلی آب بیشتری نسبت به طراحی از ته‌ریز به حوضچه باطله منتقل شده و با نفوذ به داخل زمین به هدر می‌رود. این هدر روی علاوه بر این که از جهت مشکلات دسترسی به آب در این منطقه اهمیت دارد از نقطه نظر زیست‌محیطی نیز اثرات منفی را در پی خواهد داشت. چون کارخانه گل‌گهر سیرجان در منطقه کویری و کم آب واقع شده است، مدیریت بهینه آب در اولویت های اصلی کارخانه است. بدین منظور تغییراتی در سیستم آب کارخانه و بومی سازی طرح با در نظر گرفتن یک روش اقتصادی می‌تواند تا حد زیادی خروجی آب کارخانه را به منظور آب برگشتی کنترل کند. چون مقادیر کدورت و مواد معلق موجود در آب برگشتی از تیکنر هماتیت بسیار متفاوت است بنابراین در این شرایط لزوم انجام فرایند پیش تصفیه آب از جمله استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی اولیه و صافی‌های شنی درشت‌دانه توسط محققان توصیه شده است اما مشکلات بهره برداری و نگهداری و همچنین هزینه بالای ساخت این تجهیزات استفاده از آن‌ها را به شدت محدود کرده است. در دهه اخیر کاربرد فناوری انعقاد الکتروشیمیایی در حذف آلاینده‌های مختلف نظیر کدورت، سختی، آرسنیک، فلوراید، روغن و چربی از آب بررسی شده است [۷، ۸].

بنابراین چون آب برگشتی واحد هماتیت از ۳ سرریز تیکنر که در یک مخزن ذخیره شده تامین می‌شود. سرریز این تیکنرها ذرات معلق ریز زیادی دارند که به دلیل حجم زیاد آب تیکنر توانایی حذف آن‌ها را ندارد بنابراین ذرات معلق زیادی که وارد جریان آب شده منجر به تغییر کیفیت آب می‌شود. آنالیز شیمیایی آب سرریز تیکنر هماتیت گل‌گهر سیرجان در جدول ۱ نشان داده شده است. چنانچه غلظت ذرات معلق به بیش از حد مجاز برسد لازم است برای کنترل، ذرات تصفیه شوند. هدف از تصفیه حذف یا کاهش TSS، کدورت و سختی است. بنابراین

جدول ۱: آنالیز شیمیایی آب سرریز تیکنر هماتیت گل گهر سیرجان

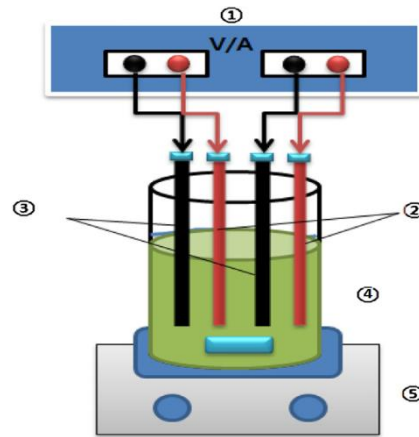
ردیف	TH (ppm)CaCO <sub>3</sub>	MgH (ppm)CaCO <sub>3</sub>	CaH (ppm)CaCO <sub>3</sub>	EC (μs/cm)	PH	MA (ppm)CaCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup> (ppm)	TDS (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
۱	۹۵۸۸	۲۹۵۸	۶۶۳۰	۳۱۳۰۰	۶/۶	۶۹	۱۳۱۷۴	۲۵۰۴۰۰	-

۱۰ ولت به حالت دو فازی نرسیده‌اند. به گونه‌ای که الکتروده آلومینیوم در ولتاژ ۱۰ ولت ۸۳/۷٪ از TSS را در ۲/۵ دقیقه حذف کرده است.

در شکل ۳ تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۵ دقیقه برای انواع الکترودها بر روی حذف TSS نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ میزان حذف TSS افزایش می‌یابد. اما بعد از ولتاژ ۶ ولت همانند مدت زمان ۲/۵ دقیقه کاهش قابل توجهی تا ولتاژ ۱۰ ولت مشاهده می‌شود. در چنین شرایطی الکتروده آلومینیوم نسبت به الکترودهای آهن و استیل بیشترین میزان حذف TSS را دارد. به طوری که در ولتاژ ۶ ولت و زمان ماند ۵ دقیقه، TSS به میزان ۸۸/۵ درصد حذف شده است. اما با افزایش ولتاژ برای هر سه الکتروده حالت دو فازی در آب بوجود آمده است و در چنین شرایطی در الکتروده آلومینیوم TSS از ۸۸/۵ درصد به ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۴ تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۱۰ دقیقه برای انواع الکترودها بر روی حذف TSS نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ میزان حذف TSS افزایش می‌یابد. اما بعد از ولتاژ ۳ ولت همانند مدت زمان ۲/۵ و ۵ دقیقه کاهش قابل توجهی تا ولتاژ ۱۰ ولت مشاهده می‌شود. در چنین شرایطی الکتروده آلومینیوم نسبت به الکترودهای آهن و استیل بیشترین میزان حذف TSS را دارد. به طوری که در ولتاژ ۳ ولت و زمان ماند ۱۰ دقیقه، TSS به میزان ۸۹/۷ درصد حذف شده است. اما با افزایش ولتاژ برای هر سه الکتروده حالت دو فازی در آب به وجود آمده است و در چنین شرایطی در الکتروده آلومینیوم TSS از ۸۹/۷ درصد به ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

در شکل ۵ تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۱۵ دقیقه برای انواع الکترودها بر روی حذف TSS نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ میزان حذف TSS افزایش می‌یابد. اما بعد از ولتاژ ۳ ولت همانند مدت زمان ۲/۵ ، ۵ و



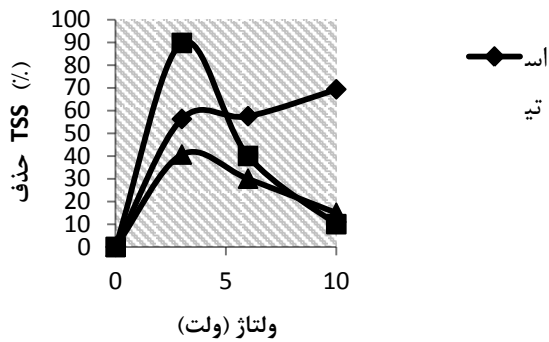
شکل ۱: شمای پایلوت واحد الکتروکوگولاسیون

- ۱- منبع تغذیه
- ۲- الکترودهای آند
- ۳- الکترودهای کاتد
- ۴- آب سرریز تیکنر
- ۵- همزن مگنتیتی

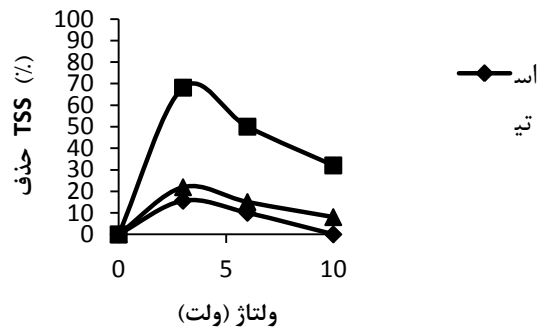
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- حذف کل ذرات جامد معلق آب

باید توجه داشت که استفاده از الکتروکوگولاسیون تأثیر بسیاری بر حذف TSS دارد به طوری که می‌تواند حدود ۸۰٪ از TSS را حذف کند [۹]. در شکل ۲ تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۲/۵ دقیقه برای انواع الکترودها بر روی حذف TSS نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ میزان حذف TSS افزایش می‌یابد. الکتروده آهن نسبت به الکترودهای آلومینیوم و استیل کمترین میزان حذف TSS را دارد. به طوری که در ولتاژ ۶ ولت و زمان ماند ۲/۵ دقیقه، TSS از ۱۶۰ به ۷۶ mg/l کاهش یافته است (۵۲/۵٪). اما با افزایش ولتاژ حالت دو فازی در آب بوجود آمد به گونه‌ای که ذرات آهن رها شده در آب تمایل به ایجاد لخته ندارد. که علت آن این است که یون‌های فلزی تولید شده در آند به درستی با ذرات کلوئیدی به حالت الکتریکی خنثی نمی‌رسند. در چنین شرایطی در الکتروده آهن TSS از ۵۲/۵ درصد به ۲۴/۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. الکترودهای آلومینیوم و استیل در ولتاژ



شکل ۴: تأثیر تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۱۰ دقیقه برای انواع الکترودها روی حذف TSS



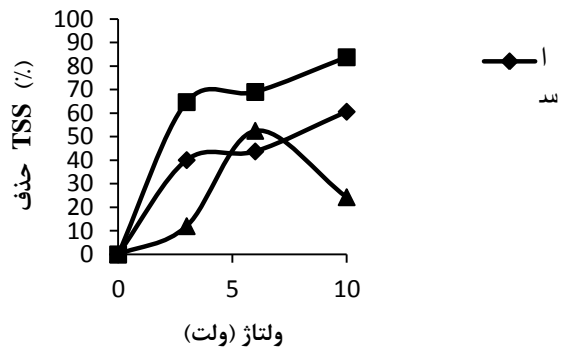
شکل ۵: تأثیر تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۱۵ دقیقه برای انواع الکترودها روی حذف TSS

### ۳-۲- حذف کدورت

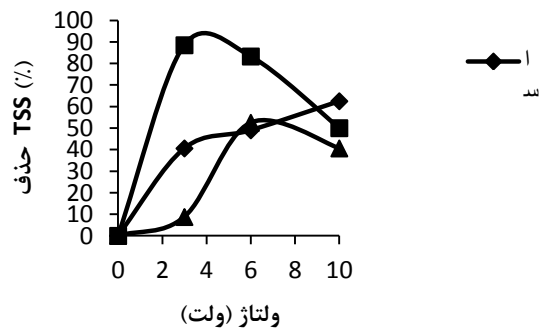
در فرایند انعقاد شیمیایی فاکتورهای بسیار حائز اهمیت که می‌تواند نقش قابل توجهی در حذف کدورت داشته باشد تأثیر تغییرات ولتاژ و زمان ماند و نوع الکترودها است [۱۰-۱۳].

این فاکتورها از طریق تأثیر بر میزان یون‌های فلزی که از سطح الکترودها جدا می‌شوند، بر سرعت انجام واکنش‌های الکتروکواگولاسیون تأثیرگذار است [۱۱]. بنابراین مقادیر بهینه ولتاژ و نوع الکترودها و زمان ماند بهینه مطالعه شد. که نتایج آن در شکل ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر اساس شکل‌های موجود پروفیل میزان کدورت در زمان‌های مختلف را در فرایند الکتروکواگولاسیون در حین استفاده از الکترودهای آهن، استیل و آلومینیوم در ولتاژهای متفاوت را نشان می‌دهد. نتایج این مرحله از انجام فرایند حاکی از آن است که در این فرایند و در

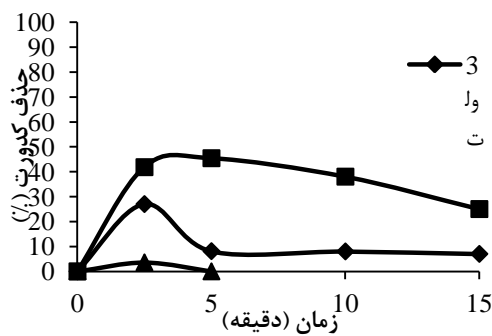
۱۰ دقیقه کاهش قابل توجهی تا ولتاژ ۱۰ ولت مشاهده می‌شود. در چنین شرایطی الکترودها آلومینیوم نسبت به الکترودهای آهن و استیل بیشترین میزان حذف TSS را دارد. به طوری که در ولتاژ ۳ ولت و زمان ماند ۱۰ دقیقه، TSS به میزان ۶۸/۱ درصد حذف شده است. اما با افزایش ولتاژ برای هر سه الکترودها حالت دو فازی در آب به وجود آمده است و در چنین شرایطی در الکترودهای آلومینیوم TSS از ۶۸/۱ درصد به ۳۲ درصد کاهش پیدا کرده است.



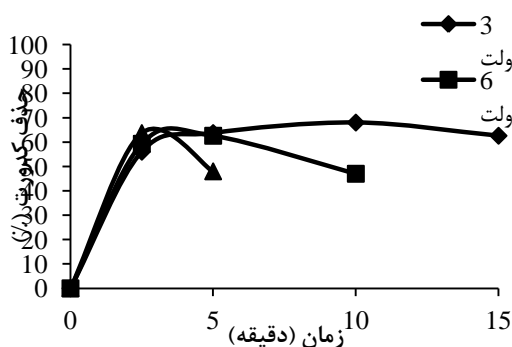
شکل ۲: تأثیر تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۲/۵ دقیقه برای انواع الکترودها روی حذف TSS



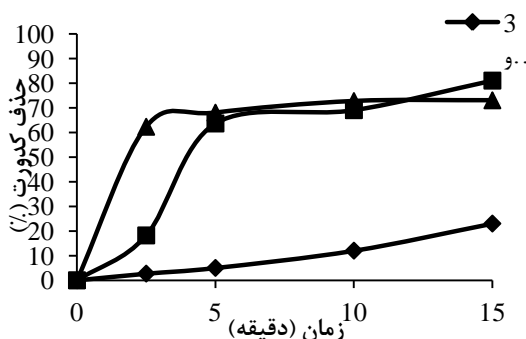
شکل ۳: تأثیر تغییرات ولتاژ در مدت زمان ۵ دقیقه برای انواع الکترودها روی حذف TSS



شکل ۶: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ روی حذف کدورت در الکتروود آهن



شکل ۷: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ روی حذف کدورت در الکتروود آلومینیوم



شکل ۸: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ روی حذف کدورت در الکتروود استیل

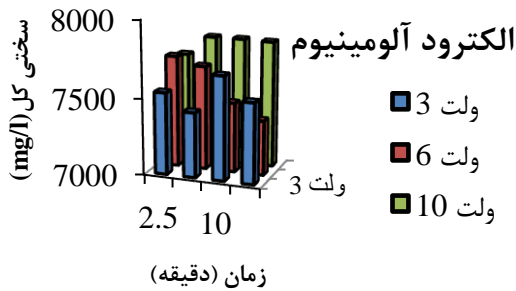
### ۳-۳- حذف سختی کل

فرآیند الکتروکوگولاسیون قادر به حذف سختی کل پساب تا حد استاندارد مورد نظر سازمان بهداشت جهانی است. پارامترهای زمان ماند، ولتاژ و جریان ورودی در حذف سختی مؤثر است به گونه‌ای که با افزایش زمان ماند، ولتاژ و جریان میزان حذف سختی نیز افزایش می‌یابد و فلوک‌های بزرگ‌تری تولید شده و در نتیجه این امر می‌تواند روی کارایی فرآیند تأثیرگذار باشد [۱۴، ۱۵]. با توجه به شکل ۹ می‌توان این گونه

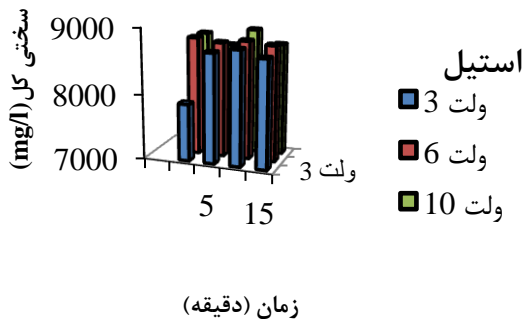
به کارگیری الکترودهای مختلف با افزایش ولتاژ جریان، مقدار حذف کدورت افزایش یافته و از این حیث اختلاف معنی‌داری بین میزان حذف کدورت با تغییرات شدت ولتاژ در این فرآیند مشاهده شد به نحوی که برای الکتروود آهن در زمان ماند ۲/۵ دقیقه و ولتاژ ۳ ولت، کدورت از ۱۱۰ NTU به ۱۳۶ NTU افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل جدا شدن براده‌های آهن در دقایق ابتدایی از روی الکترودها بوده به گونه‌ای که این ذرات رها شده هنوز تشکیل لخته در آب نداده‌اند. پس از این شرایط با افزایش زمان ماند مقدار کدورت نیز به تدریج افزایش می‌یابد که در زمان ماند ۱۵ دقیقه توانسته است مقداری از کدورت را حذف کند (۲۰٪). با مقایسه ولتاژها می‌توان به این نتیجه رسید که در ولتاژ ۶ ولت مقدار بالاترین حذف برای کدورت برابر با ۶۰ NTU (۴۵/۴۶٪) به دست آمده است.

آلومینیوم در زمان ماند ۲/۵ دقیقه و ولتاژ ۳ ولت، کدورت را از ۲۵۱ NTU به ۸۰ NTU کاهش داده است (۵۶٪)، و پس از آن با افزایش زمان ماند مقدار کدورت تغییر چندانی نکرده است به گونه‌ای که در زمان ماند ۱۵ دقیقه توانسته است مقدار بیشتری از کدورت را حذف کند (۶۲/۶٪). با مقایسه ولتاژها می‌توان به این نتیجه رسید که در ولتاژ ۱۰ ولت و در مدت زمان ماند ۲/۵ دقیقه مقدار بالاترین حذف برای کدورت برابر با ۶۶ NTU (۶۳/۷٪) به دست آمده که با مقایسه با عملکرد سیوا کمار در سال ۲۰۰۴ که توانسته بود با استفاده از الکتروود آلومینیوم به بالاترین درصد حذف کدورت (۸۸٪) برسد این روش درصد کمتری از کدورت را حذف کرده است [۱۲].

الکتروود استیل در زمان ماند ۲/۵ تا ۱۵ دقیقه و ولتاژ ۳ ولت، کدورت را را به مقدار ناچیزی از ۱۱۰ NTU به ۸۴/۷ NTU کاهش داده است، در حالی که با افزایش ولتاژ میزان حذف کدورت در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود. با مقایسه ولتاژها می‌توان به این نتیجه رسید که در ولتاژ ۶ و مدت زمان ماند ۱۵ دقیقه بالاترین مقدار حذف کدورت برابر با ۲۱ NTU (۸۱٪) به دست آمد که با مقایسه با حالت و همکاران در سال ۲۰۰۴ که توانسته بودند در ولتاژ ۲۴ ولت مقدار ۹۰٪ از کدورت آبی با ۴۰ NTU را حذف کند، این روش مقدار کمتری از کدورت را حذف کرده است [۱۴]. بایستی این نکته را در نظر داشت که سربز تیکتر کدورتی چندین برابر پساب‌های سایر صنایع دارد.

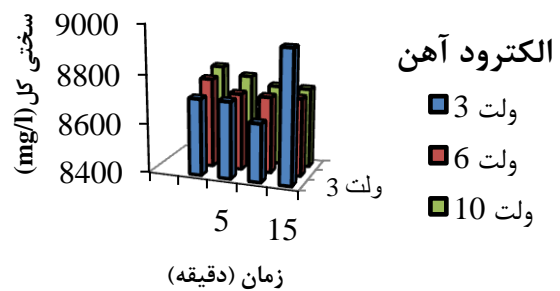


شکل ۱۰: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ روی حذف سختی کل در الکتروکواگولاسیون آلومینیوم



شکل ۱۱: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ بر روی حذف سختی کل در الکتروکواگولاسیون استیل

بیان کرد که الکتروکواگولاسیون آهن در ولتاژ ۲/۵ و زمان ماند ۱۰ دقیقه سختی کل را ۸۳۶۳ mg/l به ۸۷۸۷ mg/l کاهش داده است که با افزایش ولتاژ تا ۱۰ ولت این راندمان حذف ثابت مانده و تغییر چندانی نداشته است و در حقیقت افزایش ولتاژ نتوانسته است درصد بیشتری از سختی کل را حذف کند. که این نتایج با مقایسه باگا و همکاران در چین با الکتروکواگولاسیون مطابقت دارد [۱۶]. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان این‌گونه بیان کرد که الکتروکواگولاسیون آهن در ولتاژ ۲/۵ به دلیل پایین بودن ولتاژ در مدت زمان‌های ماند مختلف تغییر چندانی در سختی ایجاد نکرده است. در حالی که در ولتاژ ۶ ولت و زمان ماند ۱۵ دقیقه سختی کل را از ۷۸۹۷ mg/l به ۷۳۵۶ mg/l کاهش می‌دهد که با افزایش ولتاژ تا ۱۰ ولت این راندمان حذف ثابت مانده و تغییر چندانی نمی‌یابد. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان این‌گونه بیان کرد که برای الکتروکواگولاسیون آهن همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ولتاژهای مختلف و زمان‌های متفاوت هیچ‌گونه تغییر قابل-توجهی در سختی مشاهده نمی‌شود که دلیل اصلی عدم حذف سختی به‌طور کامل، بالا بودن TDS و EC آب است. چون در سختی آب کمتر از ۲۰۰۰ ppm روش الکتروکواگولاسیون سختی آب را تا ۷۸ درصد کاهش داده است اما به دلیل بالا بودن ذرات جامد محلول (TDS حدود ۲۵۰۴۰۰ ppm) در سرریز تیکنر این روش قادر به حذف کامل سختی نیست [۱۸].



شکل ۹: تأثیر تغییرات زمان ماند و ولتاژ بر روی حذف سختی کل در الکتروکواگولاسیون آهن

### ۳-۴- آنالیز اقتصادی در روش الکتروکواگولاسیون

#### ۳-۴-۱- مقایسه فنی و اقتصادی روش انعقاد و لخته‌سازی شیمیایی با روش انعقاد و لخته‌سازی الکتریکی مقایسه فنی

مقایسه مستقیم بین انعقاد الکتریکی و انعقاد شیمیایی امکان‌پذیر نیست. زیرا هر دو سیستم در یک حالت و یک فاز راهبری نمی‌شوند. در انعقاد شیمیایی، اضافه کردن مواد شیمیایی مستقل از تجزیه آلومینیوم و pH است ولی انعقاد الکتریکی میزان لخته فلزی که تشکیل می‌شود، تابعی از جریان الکتریکی مصرفی و میزان pH محیط است. در انعقاد الکتریکی، گرادیان غلظت به‌صورت مستمر بر اساس میزان تجزیه شدن الکترودها تغییر می‌کند. تا جایی که pH در گستره ۸/۳-۸/۸ تثبیت شود (بسته به میزان جریان الکتریکی).

از نظر نوع ته‌نشینی آلاینده‌ها نیز این دو سیستم با هم تفاوت عمده‌ای دارند. در انعقاد شیمیایی تنها راه جداسازی لجن ته‌نشینی است، در صورتی که در انعقاد الکتریکی می‌توان

با در نظر گرفتن آن ه قیمت هر کیلوگرم شمش آلومینیوم و آهن و استیل به ترتیب برابر با ۷۲۰۰۰، ۹۰۰۰ و ۱۰۳۰۰۰ ریال است.

(قیمت هر کیلوگرم شمش استیل) \* (مصرف الکتروود کیلوگرم بر متر مکعب) \* (متر مکعب پساب) = فرمول محاسبه قیمت تمام شده برای الکتروود  
ریال  $۲۱۶۰ = ۷۲۰۰۰ * ۰.۰۳ * ۱$  = قیمت برای الکتروود آلومینیوم  
ریال  $۳۷۸ = ۹۰۰۰ * ۰.۴۲ * ۱$  = قیمت برای الکتروود آهن  
ریال  $۲۶۷۸ = ۱۰۳۰۰۰ * ۰.۲۶ * ۱$  = قیمت برای الکتروود استیل

برآورد هزینه برق مصرفی

میزان برق مصرفی در این سیستم برحسب آب متغیر است، اما برای تصفیه پساب مورد نظر با مشخصات گفته شده و رسیدن آن‌ها به حد استاندارد برای مصارف دوباره در صنعت در الکتروود آلومینیوم، آهن و استیل به ترتیب ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ کیلو وات بر ساعت است.

(قیمت هر کیلو وات برق) \* (مصرف برق کیلو وات بر ساعت) \* (متر مکعب پساب) = فرمول محاسبه قیمت برق مصرفی  
ریال  $۱۰۰۰ = ۲۰۰۰ * ۰/۵ * ۱$  = قیمت برای الکتروود آلومینیوم  
ریال  $۵۰۰ = ۲۰۰۰ * ۰/۲۵ * ۱$  = قیمت برای الکتروود آهن  
ریال  $۳۰۰ = ۲۰۰۰ * ۰/۱۵ * ۱$  = قیمت برای الکتروود استیل

در مجموع هزینه‌های راهبری برای تصفیه یک متر مکعب از آب مورد نظر با استفاده از انواع الکتروود استفاده شده به شرح زیر است.

هزینه مصرف الکتروود + هزینه‌های مصرف برق = مجموع هزینه‌ها  
ریال  $۳۱۶۰ =$  (هزینه برق)  $۱۰۰۰ +$  (هزینه مصرف الکتروود)  $۲۱۶۰ =$  الکتروود آلومینیوم  
ریال  $۸۷۸ =$  (هزینه برق مصرفی)  $۵۰۰ +$  (هزینه مصرف الکتروود)  $۳۷۸ =$  الکتروود آهن  
ریال  $۲۹۷۸ =$  (هزینه برق مصرفی)  $۳۰۰ +$  (هزینه مصرف الکتروود)  $۲۶۷۸ =$  الکتروود استیل  
اقتصادی‌ترین شرایط مربوط به الکتروود آهن است که هزینه تمام شده آن برای هر متر مکعب آب برابر با ۸۷۸ ریال است که این مقدار به وضوح از تمام روش‌های بررسی شده ارزان تر است. بنابراین در سیستم تصفیه سر ریز تیکنر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که الکتروود آهن از نظر اقتصادی با توجه به کل هزینه‌های اجرایی نسبت به الکتروودهای استیل و آلومینیوم برتری دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در رابطه با کدورت در بهترین حالت مشاهده شد که الکتروود استیل در ولتاژ ۶ ولت و مدت زمان ماند ۱۵ دقیقه بالاترین مقدار حذف کدورت برابر با ۲۱ NTU (۸۱٪) را دارد بایستی این نکته را در نظر داشت که سریز تیکنر به دلیل بالا بودن ذرات جامد معلق کدورتی چندین برابر پساب‌های خروجی از سایر صنایع دارد. در مورد حذف سختی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در ولتاژهای مختلف و زمان ماندهای متفاوت هیچ‌گونه

از شناورسازی نیز استفاده کرد، بنابراین کاهش میزان کدورت در این واحدها بیشتر است.

لجن تولیدی از فرآیند انعقاد الکتریکی دارای pH حدود ۶-۷ است که در این حالت استانداردهای زیست‌محیطی نیز رعایت می‌شود. ولی در روش انعقاد شیمیایی به علت این که لجن ته‌نشین شده pH بالای ۱۰ دارد فلزات در این pH به صورت هیدروکسید رسوب می‌کنند که مخاطرات زیست محیطی زیادی را به همراه دارد. در روش انعقاد الکتریکی هیچ نوع ماده شیمیایی به جز مواد اسیدی و قلیایی که برای تنظیم pH در ورودی سیستم اضافه می‌شود هیچ نوع ماده‌ای به کار برده نمی‌شود. بنابراین لجن جدا شده اغلب فقط شامل آلودگی‌های تغلیظ شده آب بوده و شامل مواد شیمیایی دیگر نیست. در مقایسه با روش‌های متعارف مثل جداسازی با آب آهک مقدار لجن کمتر از ۱۰٪ دارد و نکته قابل توجه و مهم امکان بازیابی و استفاده مجدد در این روش است که در روش‌های متعارف غیر ممکن و بسیار پرهزینه است.

#### ۳-۴-۲- هزینه‌های بهره برداری فرآیند الکتروکواگولاسیون

برآورد هزینه از جنبه‌های مهم در تصفیه پساب است [۱۷]. هزینه‌های کلی توسط مجموع هزینه سرمایه، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری، بیان می‌شود. برای یک سیستم در مقیاس کامل، این هزینه به شدت به طبیعت و غلظت آلاینده‌ها، سرعت جریان پساب و پیکربندی دستگاه‌ها بستگی دارد [۱۷].

هزینه‌های راهبری در فرآیند انعقاد الکتریکی شامل هزینه‌های مربوط به خریداری مواد (الکتروودها)، هزینه‌های راهبری (برق) و تعمیرات و نگهداری سیستم است.

هزینه‌های عملیاتی + هزینه‌های انرژی + هزینه‌های الکتروود

هزینه‌های الکتروود و هزینه‌های انرژی = مقدار مصرف انرژی و الکتروود به ازای هر کیلوگرم از TSS حذف شده

با توجه به بررسی به عمل آمده مقدار مصرف انرژی و الکتروود به ازای هر کیلو گرم از TSS حذف شده در سیستم تصفیه سر ریز تیکنر محاسبه شده است.

برآورد هزینه در صورت استفاده از الکتروودهای فلزی (آلومینیوم، آهن و استیل) و در نظر گرفتن انرژی الکتریکی با قیمت ۲۰۰۰ ریال به ازای هر کیلو وات در ساعت انرژی مصرفی

متر مکعب در روز = دبی

گرم بر متر مکعب ۳۰ = میزان مصرف آلومینیوم به ازای هر متر مکعب آب

گرم بر متر مکعب ۴۲ = میزان مصرف آهن به ازای هر متر مکعب آب

گرم بر متر مکعب ۲۶ = میزان مصرف استیل به ازای هر متر مکعب آب



- [6] Khandegar, V., Saroha, A.K., 2013, " *Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review* ", journal of environment management, 128, pp. 949–963
- [7] Ghosh, D., Medhi, C.R., Purkait, M.K., 2011, " *Techno-economic analysis for the electrocoagulation of fluoride-contaminated drinking water* ", Toxicology environmental chemistry, 93 (3), pp. 424–437
- [8] Viero A.F, Mazzarollo A.C.R, Wada K, Tessaro I.C., 2002, " *Removal of hardness and COD from retanning treated effluent by membrane process* ", Desalination. 149: pp. 145–149.
- [9] Farhadi, S., Aminzadeh, B., Torabian, A., Khatibikamal, V., Fard, M.A., 2012, " *Com-parison of COD removal from pharmaceutical wastewater by electro-coagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes* ", Journal of Hazardous Materials, 220, pp. 35–42.
- [10] Emamjomeh, M.H., and Sivakumar, M., 2009, " *Review of pollutants removal by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes* ", Journal of Environmental Management, 90, pp. 1663–1679.
- [11] Malakootian, M., Mansoorian, H.J., and Moosazadeh, M., 2010, " *Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness* ", Desalination, 255, pp. 67–71.
- [12] Sivakumar, M., Emamjomeh, M.M., Chen, M., 2004, " *Use of electrocoagulation (EC) as an alternative method to chemical coagulation in water treatment* ", In: Eighth Annual Environmental Engineering Research Event (EERE) Conference, 6th–9th December,

تغییر قابل توجهی در سختی مشاهده نمی‌شود که دلیل اصلی عدم حذف سختی به‌طور کامل، بالا بودن EC و TDS آب است. با توجه به بالاترین راندمان حذف TSS می‌توان این‌گونه بیان کرد که الکتروکواگولاسیون نسبت به الکترودهای آهن و استیل بیشترین میزان حذف TSS برابر با ۸۸/۵ درصد را دارد با توجه به بررسی به عمل آمده مقدار مصرف انرژی و الکتروکواگولاسیون هر کیلو گرم از TSS حذف شده در سیستم تصفیه سر ریز تیکنر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که الکتروکواگولاسیون از نظر اقتصادی با توجه به کل هزینه‌های اجرایی (۸۷۸ ریال) نسبت به الکترودهای استیل (۲۹۷۸ ریال) و آلومینیوم (۳۱۶۰ ریال) ارجحیت دارد. از طرفی الکتروکواگولاسیون با توجه به سهولت در بهره‌برداری، قابلیت ته‌نشینی خوب لجن تولیدی، قابلیت آبیگری مناسب و تولید حجم لجن کمتر، مناسب تشخیص داده شده است.

#### ۵- تشکر و قدردانی

از کارشناسان و پرسنل محترم آزمایشگاه سنگ آهن و فولاد مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

#### مراجع

- [۱] حسینی نسب، مرضیه، ۱۳۸۷، تأثیر غلظت اولیه پالپ بر سرعت ته‌نشینی ذرات در نواحی مختلف تیکنر، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، صفحات ۲۹۹–۳۰۶
- [۲] صالح نسب، مرضیه، دهقان، رضا، ۱۳۹۱، معرفی فناوریهای جدید مورد استفاده در تیکنرها، اولین کنفرانس فناوریهای معدنکاری ایران، یزد، شهریور، صفحات ۱۵–۱۷
- [3] Tarleton, E.S., Wakeman, R.J., 2007, " *Solid/Liquid Separation-Equipment Selection and Process Design*," [Elsevier].
- [4] E. Friedler, M. Hadari, 2006, " *Economic feasibility of on-site grey water reuse in multi-storey buildings* ", Desalination, 190(1-3), pp. 221–234.
- [5] Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L., 2001, " *Electrocoagulation (EC) science and applications* ", Journal of Hazardous Materials, 84 (1), pp. 29–41

- [16] Ranta Kumar P, Chaudhary S, Khilar K.C, Mahajan S.P., 2004, "*Removal of arsenic from water by electro coagulation*," *Chemosphere*, 55, pp. 1245–1252.
- [17] Chin-Jung Lin; Shang-Lien Lo; Chao-Yin Kuo; and Chung-Hsin Wu., 2005, "*Pilot-Scale Electrocoagulation with Bipolar Aluminum Electrodes for On-Site Domestic Greywater Reuse* ", *Journal of Environmental Engineering*, 131, pp. 451–491.
- [18] Brahmi K, Bouguerra W, Belhsan H, Elaloui E, Lounbou M, Tlili Z, Hamrouni B., 2015, "*Use of Electrocoagulation with Aluminum Electrodes to Reduce Hardness in Tunisian Phosphate Mining Process Water*," *Mine Water and the Environment*, 1, pp. 1-8.
- Wollongong, New South Wales, Australia, pp. 320–332.
- [13] Zuo, Q., Chen, X., and Li, W., 2008, "*Combined electrocoagulation and flotation for removal of fluoride from drinking water* ", *Journal of Hazardous Materials*, 159, pp. 452–457.
- [14] Holt, P.K., Barton, G.W., Mitchell, C.A., 2004, "*Deciphering the science behind electrocoagulation to remove clay particles from water* ", *Water Science and Technology*, 50 (12), pp. 177–184.
- [15] Gao B Y, Yue Q Y, Wang Y., 2007, "*Coagulation performance of polyaluminum silicate chlorid (PASiC) for water and wastewater treatment* ", *Separation and Purification Technology*, 56, pp.225–230.