

# تصفیه شیرابه کهنه با روش انعقاد الکتریکی (مطالعه موردی: شیرابه زمین دفن کهریزک تهران)

سید حسین هاشمی<sup>۱</sup>      امیر باقری<sup>۲</sup>

(دریافت ۹۰/۷/۱۹      پذیرش ۹۰/۱۰/۶)

## چکیده

شیرابه زمین‌های دفن زباله شهری یکی از مشکلات مهم محیط زیستی است. امروزه روش انعقاد الکتریکی از جمله روش‌هایی است که برای تصفیه شیرابه مورد توجه است. در این فرایند، مواد منعقد کننده از انحلال الکترود فلزی تولید می‌شود. در این مقاله تصفیه پذیری شیرابه کهنه زمین دفن زباله کهریزک تهران به روش انعقاد الکتریکی با استفاده از الکترودهای فولادی گرید ST-12، ST-37 و CK-45 در مقیاس آزمایشگاهی با اندازه‌گیری پارامترهای COD، ذرات معلق و تغییرات پتانسیل اکسایش و کاهش بررسی شد. میزان حذف COD با مقدار اولیه ۱۶۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر در زمان ۱۰۰ دقیقه و جریان ۲/۷ آمپر برای الکترودهای ST-12، ST-37 و CK-45 به ترتیب ۴۲/۶۶، ۳۴/۳۷ و ۳۵/۲ درصد به دست آمد. با افزایش زمان به ۱۴۰ دقیقه میزان حذف COD به ترتیب ۶/۷۸، ۴/۳۸ و ۱۲/۱۲ درصد افزایش داشت. همچنین با افزایش دانسیته جریان اعمالی از ۳۳/۳۳ به ۱۶۶/۶۶ آمپر بر مترمربع افزایش حذف ۳۸/۹۸، ۲۲/۶۴ و ۲۵/۳۸ درصدی برای COD و ۱۶/۴، ۱۹/۷۹ و ۱۸/۷۱ درصدی برای ذرات معلق برای الکترودهای ST-12، ST-37 و CK-45 به دست آمد. نتایج نشان داد الکترود ST-12 بهترین عملکرد را برای تصفیه شیرابه دارد به طوری که در دانسیته جریان ۱۶۶/۶۶ آمپر بر مترمربع معادل بارگذاری شارژ ۴۶/۶۷ F/m<sup>3</sup>، ۱۵۵/۴۶ درصد از COD و ۹۸/۷۹ درصد از ذرات معلق حذف شدند.

**واژه‌های کلیدی:** شیرابه، انعقاد الکتریکی، دانسیته جریان، بارگذاری شارژ

## Treatment of Old Leachate by Electro-Coagulation: A Case Study for Leachate of Kahrizak Landfill in Tehran

Seyed Hossein Hashemi<sup>1</sup>

Amir Bagheri<sup>2</sup>

(Received Oct. 11, 2011)

Accepted Dec. 27, 2011)

### Abstract

Leachate of urban solid waste landfills is one of the most important of environmental concerns. Today, electro-coagulation is considered as a method for leachate treatment. In this process coagulants are produced during metallic electrode dissolution. In this article, treatability of old leachate of Kahrizak landfill of Tehran by electro-coagulation method was studied. The study was done in laboratory scale by using steel electrodes grades ST-12, ST-37, and CK-45 and measuring COD, SS and ORP parameters. COD removal was obtained 42.66, 34.37 and 35.2 percent for ST-12, ST-37 and CK-45 electrodes while the operation time and current were 100 min and 7.2 A for initial COD concentration of 160,000 mg/l. COD removal increased 6.78, 4.38 and 12.12 percent when the operation time increased to 140 min, respectively. As well, COD removal was increased 38.98, 22.64 and 25.38 percent and SS removal was enhanced 16.4, 19.79 and 18.71 percent for ST-12, ST-37 and CK-45 electrodes, while the current density increased from 33.33 to 66.166 A/m<sup>2</sup>. The results also showed ST-12 electrode had the best efficiency for leachate treatment with COD and SS removal of 64.67% and 98.79% respectively while the current density was 66.166 A/m<sup>2</sup> equals charge's loading of 46.155 F/m<sup>3</sup>.

**Keywords:** Leachate, Electrocoagulation, Current Density, Charge Loading.

1. Assist. Prof. of Environmental Pollutants, Environmental Sciences Institute, Shahid Beheshti University, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 22431971 h\_hashemi@sbu.ac.ir  
2. M.Sc. of Chemical Eng.-Environmental Eng., Dept. of Chemical Eng., Mahshahr Campus

۱- استادیار گروه آلاینده‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران (نویسنده مسئول) ۰۲۱ ۲۲۴۳۱۹۷۱ h\_hashemi@sbu.ac.ir  
۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، واحد ماهشهر

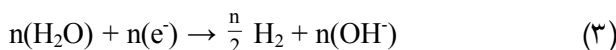
جایی که الکتریسیته گران قیمت باشد و نیز تشکیل یک لایه ممانعت کننده بر سطح الکترود که از انحلال فلز و انتقال الکترون جلوگیری کرده و موجب کاهش بازده فرایند با گذشت زمان می شود، دارد [۷ و ۸]. ولی مزایایی همچون وسعت عمل برای تصفیه انواع پسابهای صنعتی، قابلیت استفاده در مناطق شهری و روستایی، تجهیزات اندک مورد نیاز، زمان تصفیه کوتاه، بازدهی بالا، قابلیت حذف ذرات ریز (چون میدان الکتریکی اعمال شده، باعث حرکت سریع تر این ذرات می شود و در نتیجه انعقاد را تسهیل می کند)، عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی، تولید کمتر لجن نسبت به روشهای مشابه مانند انعقاد شیمیایی، سهولت ته نشینی و آگیری لجن تولیدی (چون اغلب از اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده است) و راهبری آسان موجب شده است تا این روش به عنوان یکی از روشهای امید بخش در آینده در نظر گرفته شود [۳، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۲]. اساس کار به این ترتیب است که ذره های باردار موجود در یک مخلوط کلوئیدی، در نتیجه برخورد با یون هایی با بار مخالف خنثی و ته نشین می شوند. بنابراین پدیده لخته شدن هنگامی رخ می دهد که بار سطحی ذره های کلوئیدی کاهش می یابد و این ذره ها به یکدیگر نزدیک می شوند. فرایند لخته شدن در نتیجه فراهم کردن عامل لخته کننده در اثر انحلال الکتریکی الکترود فلزی انجام می شود و در واقع یک واکنش کترولیز است که وقوع واکنش های الکتروشیمیایی در آن مستلزم اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب بین دو یا چند الکترود از جنس آهن یا آلومینیوم، برای انجام واکنش در سطح مشترک الکترود و محلول، از طریق یک منبع الکتریکی خارجی است و نتیجه آن تشکیل یون های آهن یا آلومینیوم در آند و آزاد شدن گاز هیدروژن در کاتد است [۱۱ و ۱۳].

در این فرایند عامل حذف آلاینده ها (لخته های هیدروکسید آهن یا آلومینیوم) با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای صفحه ای شناور در نمونه مورد تصفیه، طی واکنش اکسایش-کاهش زیر تولید می شود [۱۱]

واکنش های آندی



واکنش های کاتدی



شیرابه حاصل از دفن پسماندهای شهری یکی از آلوده ترین پسابها است که می تواند موجب آلودگی محیط زیست به ویژه منابع آب سطحی و زیرزمینی شود [۱]. تصفیه شیرابه به ویژه در مناطقی که دفن پسماند به صورت بهداشتی انجام نمی شود، مشکلات بسیاری به همراه دارد [۱]. مشکلاتی از قبیل تغییر نوع پسماندها با توجه به فصل، ورود روانابهای سطحی و تفاوت الگوی مصرف در مناطق مختلف می تواند کنترل و مدیریت شیرابه را بسیار دشوار کند، به طوری که موجب تفاوت روش بهینه تصفیه شیرابه در مناطق مختلف شود [۲]. همچنین وجود ترکیبات شیمیایی مختلف در شیرابه و برهم کنش های آنها، فهم و پیشگویی خواص شیرابه را در طول زمان دشوار می کند و این نیز یکی دیگر از مسائلی است که تصفیه شیرابه را با مشکل رو به رو می سازد [۳]. بر همین اساس و با توجه به سن، شیرابه را به دو دسته جوان و کهنه تقسیم می کنند. شیرابه جوان متعلق به زمین دفن با عمر کمتر از ۱ تا ۲ سال و شیرابه کهنه متعلق به زمین دفن با عمر بیش از ۵ تا ۱۰ سال است. اغلب ویژگی شیرابه تازه COD و نسبت BOD<sub>5</sub>/COD بالا و مشخصه شیرابه کهنه COD و نسبت BOD<sub>5</sub>/COD پایین تر است [۴ و ۵]. هرچند در نمونه های مورد استفاده در این مطالعه، شیرابه کهنه بار آلودگی بالاتری نسبت به شیرابه جوان در همان زمین دفن داشت.

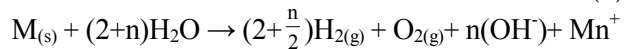
امروزه فرایندهای مختلف بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی برای تصفیه شیرابه زمین دفن ها به کار گرفته شده اند. برخی روشها مانند روشهای بیولوژیکی، غشایی، اکسیداسیون پیشرفته، انعقاد-لخته سازی، به خاطر این که با افزایش عمر زمین دفن، خواص آن تغییر می کند، مشکلاتی از قبیل کاهش بازدهی تصفیه و افزایش هزینه را در پی داشته اند. هرچند به کارگیری روشهای ترکیبی که در برگیرنده فرایندهای مختلف باشند، می تواند باعث حل مشکل شود [۳]. تصفیه بیولوژیکی که شامل فرایندهای بی هوازی و هوازی است، برای شیرابه ای که در مراحل اولیه شکل گیری بوده و نسبت BOD<sub>5</sub>/COD بالایی دارد، مؤثر است. اما برای تصفیه شیرابه با BOD<sub>5</sub>/COD نسبتاً پایین و نیز غلظتهای بالای فلزات سمی ناکارآمد است. از این رو فرایندهای فیزیکی-شیمیایی از قبیل شناورسازی / ته نشینی، جاذبهای فعال، تکنولوژی های غشایی و اکسیداسیون شیمیایی اغلب برای پیش تصفیه یا تصفیه کامل این نوع شیرابه ها به کار می روند [۶].

یکی از روشهایی که امروزه برای تصفیه آب و پساب مورد توجه است، روش انعقاد الکتریکی است. این روش معایبی از جمله مصرف آند و نیاز به تعویض آن، هزینه عملیاتی بالا به ویژه در



واکنش کلی

(5)



که در این روابط

M الکتروود فلزی و n بار الکتروود فلزی و تعداد الکترون ها است.

در مطالعات مشابه در سایر کشورها فاتح ایلحان و همکاران<sup>۱</sup> تأثیر لخته سازی الکتریکی را بر روی شیرابه ادایری<sup>۲</sup> استانبول با میزان COD، ۱۲۸۶۰ میلی گرم در لیتر بررسی کرده اند و با استفاده از الکتروود آهن و زمان تماس ۳۰ دقیقه در دانسیته جریان ۶۳۱ آمپر بر مترمربع توانسته اند ۳۵ درصد از COD را حذف کنند [۳]. همچنین سویل ولی و همکاران<sup>۳</sup> نیز نمونه شیرابه زمین دفن از میت<sup>۴</sup> در ترکیه با COD برابر با ۴۰۲۲ میلی گرم در لیتر را هم به صورت خالص (L1) و هم رقیق شده (L2) (نسبت ۱ به ۲) مورد بررسی قرار داده اند. بهترین نتایج با استفاده از الکتروود آهن ۸۷ و ۹۰ درصد حذف COD و ۸۶ و ۹۹ درصد حذف رنگ برای محلولهای L2 و L1 به دست آمده است [۷].

با توجه به ارزان و در دسترس بودن آهن و آلومینیوم و نیز قابلیت بالای تولید هیدروکسیدهای فلزی اغلب از این دو فلز به عنوان الکتروود استفاده می شود [۱۱]. روش انعقاد الکتریکی برای تصفیه فاضلاب صنایع مختلف مانند نساجی، غذایی، فلزی و گالوانیز به کار رفته است [۷، ۱۴، ۱۵]. همچنین می توان از آن برای تصفیه آب و فاضلابهای شهری، روغنی، حاوی فلزات سنگین، رادیوم و اورانیوم و پساب مرغداری ها و کشتارگاه ها استفاده کرد [۳، ۱۶-۱۸].

در این مطالعه هدف، بررسی این موضوع بود که آیا روش انعقاد الکتریکی در تصفیه شیرابه کهنه زمین دفن کهریزک تهران می تواند مؤثر باشد و اینکه در چه جریان یا زمان عملیاتی بازدهی بالاتری حاصل می شود.

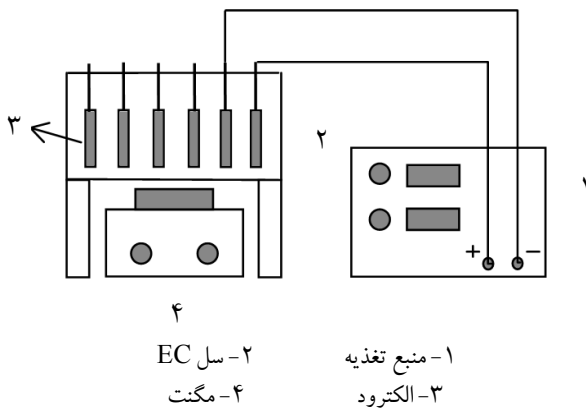
## ۲- مواد و روشها

نمونه شیرابه مورد استفاده از دریاچه شیرابه زمین دفن پسماند شهری کهریزک تهران برداشته شد. جدول ۱ ویژگی های این شیرابه را نشان می دهد.

برای انجام فرایند از یک راکتور با جنس پلکسی گلس<sup>۵</sup> به ابعاد ۱۹/۵×۱۴ سانتی متر و ارتفاع ۱۵/۵ سانتی متر و الکترودهای فولادی گرید ST-12، ST-37 و CK-45 با ابعاد ۱۰×۶ سانتی متر و ضخامت ۲ تا ۵ میلی متر استفاده شد. شکل ۱ شماتیک پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می دهد. جدول ۲ ویژگی های الکترودها را نشان می دهد. در هر آزمون دو لیتر شیرابه استفاده شد.

جدول ۱- خواص شیرابه کهنه زمین دفن کهریزک

پارامتر	مقدار
pH	۶/۶۸±۰/۰۵
COD (میلی گرم در لیتر)	۱۶۰۰۰±۵۰۰
ذرات معلق (SS) (میلی گرم در لیتر)	۱۱۶۰۰±۱۷۰
کلراید (میلی گرم در لیتر)	۱۷۶۱۳
فسفات (میلی گرم در لیتر)	۶۶۳
سولفات (میلی گرم در لیتر)	۵۲۰۰



شکل ۱- شماتیک پایلوت آزمایشگاهی انعقاد الکتریکی

برای تأمین نیروی الکتریکی مورد نیاز واکنش های انعقاد الکتریکی از یک منبع تغذیه با جریان مستقیم مدل Micro pw-4053R با قابلیت تنظیم ولتاژ و شدت جریان استفاده شد.

برای بررسی اثر جریان، شدت جریان های ۱، ۲/۷ و ۵ آمپر به ترتیب معادل دانسیته جریان ۳۳/۳۳، ۹۰ و ۱۶۶/۶۶ آمپر بر مترمربع و برای افزایش تماس بین هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده و ذرات آلاینده از همزن مغناطیسی طیف آزما طب مدل R-50 با دور ثابت ۳۰۰ دور در دقیقه در تمامی آزمایش ها استفاده شد.

پس از انجام چند پیش آزمایش، برای تعیین اثر زمان بر میزان حذف COD و ذرات معلق، مدت زمان های ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ دقیقه انتخاب گردید. با توجه به ثابت بودن جریان در طول فرایند و

<sup>1</sup> Fatih Ilhan et al.

<sup>2</sup> Odayeri

<sup>3</sup> Sevil Veli et al.

<sup>4</sup> Izmit

<sup>5</sup> Plexiglass

جدول ۲- ویژگی‌های الکترودهای فولادی مورد استفاده [۲۰]

گرید	درصد کربن	درصد منگنز	درصد فسفر	درصد گوگرد	درصد نیتروژن	درصد کروم	درصد مولیبدن	درصد سیلیسیم	درصد نیکل
ST-12	۰-۰/۱۲	۰-۰/۶۰	۰-۰/۰۴۵	۰-۰/۰۴۵	-	-	-	-	-
ST-37	۰-۰/۱۷	-	۰-۰/۰۴۰	۰-۰/۰۴۰	۰-۰/۰۰۹	-	-	-	-
CK-45	۰/۴۲-۰/۵۰	۰/۵۰-۰/۸۰	۰-۰/۰۳۵	۰-۰/۰۳۵	-	۰-۰/۰۴۰	۰-۰/۱۰	۰-۰/۴۰	۰-۰/۴۰

جدول ۳- دستگاهها و روشهای استاندارد مورد استفاده برای انجام آزمایشها

نام و مدل دستگاه	کاربرد	شماره روش استاندارد [۱۹]
سارتوریوس <sup>۱</sup> PB-11	اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش کاهش	۲۵۸۰
سارتوریوس PB-11	اندازه‌گیری درجه حرارت	۲۵۵۰B
منتل فن آزما گستر <sup>۲</sup>	اندازه‌گیری COD	۵۲۲۰B
هچ <sup>۳</sup> مدل DRB 200 و هچ مدل DR 2800	اندازه‌گیری COD	۵۲۲۰D
هچ مدل DR 2800	اندازه‌گیری ذرات معلق	۸۰۰۶

<sup>1</sup> Sartorius

<sup>2</sup> Mentel Fan Azma Gostar

<sup>3</sup> Hach

تولیدی نیز به زمان واکنش و جریان بستگی دارد، زمانی که یکی از این دو عامل افزایش یابد تولید مواد منعقدکننده نیز افزایش یافته و حذف آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. از همین رو این دو عامل یعنی زمان و جریان برای ارزیابی تأثیر آنها بر میزان حذف آلاینده‌ها بررسی شدند [۱۰].

همان‌طور که شکل‌های ۲- الف و ۲- ب نشان می‌دهند، با افزایش شدت جریان یا زمان، میزان COD نهایی کاهش پیدا می‌کند که به دلیل افزایش یون‌هایی است که از سطح الکتروود آزاد می‌شوند، ولی میزان آن برای الکترودهای مختلف متفاوت است. با افزایش زمان، میزان حذف COD افزایش چندانی ندارد، به‌طوری که در زمان ۱۰۰ دقیقه مقدار COD برای الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 به ترتیب برابر با ۹۱۷۴۲، ۱۰۵۰۰۰ و ۱۰۳۶۸۰ میلی‌گرم در لیتر و میزان حذف به ترتیب ۴۲/۶۶، ۳۴/۳۷ و ۳۵/۲ درصد است و با افزایش زمان عملیات به ۱۲۰ دقیقه درصد حذف COD به ترتیب به ۴۶/۵۵، ۳۷/۲۵ و ۴۵/۰۴ درصد و در مدت زمان ۱۴۰ دقیقه به ترتیب به ۴۹/۴۴، ۳۸/۷۵ و ۴۷/۳۱ درصد می‌رسد. نتایج نشان داد بهترین عملکرد در حذف COD را فولاد ST-12 و پس از آن به ترتیب ST-37 و CK-45 دارند.

شکل ۲- ب تأثیر شدت جریان بر عملکرد حذف COD را نشان می‌دهد. در جریان یک آمپر به ترتیب ۲۵/۶۹، ۲۷/۳۸ و ۲۶/۶۲ درصد از COD با استفاده از الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 حذف شد که نشان می‌دهد CK-45 در شدت جریان‌های پایین به صورت جزئی عملکرد بهتری دارد. با افزایش جریان به ۵ آمپر (معادل دانسیته جریان ۱۶۶/۶۶ آمپر بر مترمربع) میزان

تغییر هدایت الکتریکی شیرابه، تثبیت ولتاژ امکان‌پذیر نبود، بنابراین به ولتاژ اجازه داده شد که آزادانه تغییر کند. در هر آزمون از شش الکتروود موازی با فاصله دو سانتی‌متر از یکدیگر استفاده شد. اکسیدهای تشکیل شده بر روی الکتروودها به وسیله شستشو و سپس با استفاده از سمباده نرم پیش از هر آزمون به دقت زدوده می‌شدند. روش اتصال جریان الکتریکی به الکتروودها به صورت تک قطبی با اتصال متوالی بود. درجه حرارت اولیه و نهایی شیرابه در هر آزمون اندازه‌گیری و ثبت شد. در پایان هر آزمون ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه ته‌نشین و پس از آن به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۲۱۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شدند. با توجه به آلودگی بالای نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش‌های COD و ذرات معلق نمونه‌ها رقیق شدند. تمام آزمایش‌ها بر طبق روشهای پیشنهادی کتاب روشهای استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب ویرایش بیستم انجام شدند [۱۹]. برای حصول اطمینان از نتایج، هر آزمایش حداقل دو بار تکرار شد (جدول ۳).

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر انعقاد الکتریکی بر میزان کاهش COD

یون‌های هیدروکسید تولیدی در طی احیاء آب در کاتد در واکنش با یون‌های آهن تولیدی در آنند، تولید سوسپانسیون ژلاتینی هیدروکسید آهن  $Fe(OH)_n$  می‌کنند که می‌تواند از طریق مکانیسم‌های کمپلکس‌سازی سطحی و جذب الکترواستاتیک، آلاینده‌ها را به دام انداخته و سبب حذف آنها شوند. بازده این حذف به مقدار آهن تولیدی در محلول بستگی دارد. از آنجا که مقدار آهن

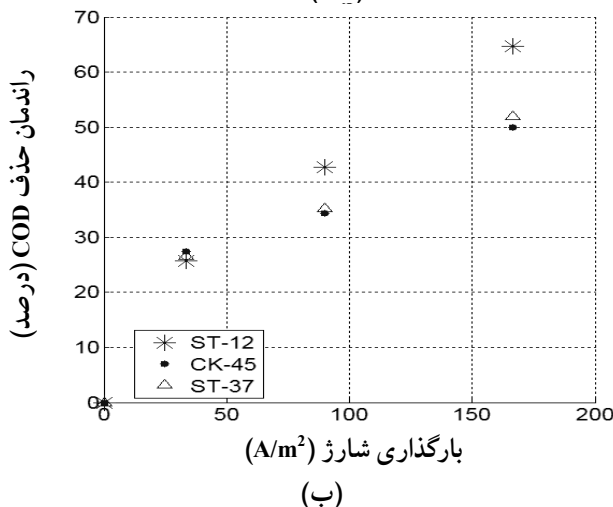
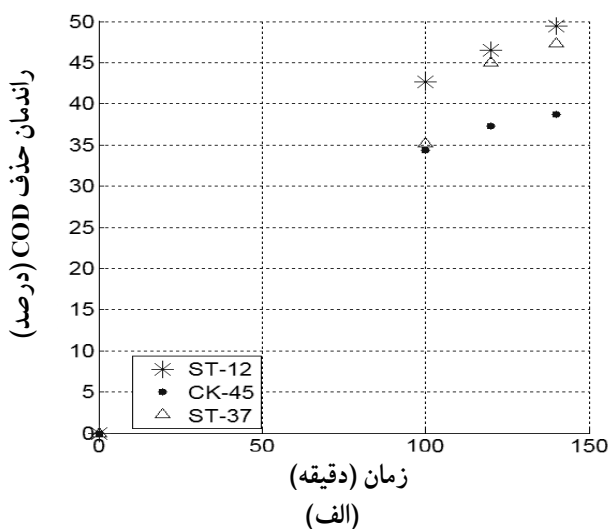
واکنش پذیری رخ می دهد. با گذشت زمان، سرعت کاهش کدورت و میزان آلاینده دفع شده کاهش می یابد و در مرحله پایدارسازی یکنواخت می شود [۸]. مرحله اول یا تأخیر زمانی ممکن است بسیار کوتاه باشد. این مرحله به هدایت محلول و جریان به کار رفته بستگی دارد. هرچه قدر هدایت یا شدت جریان اعمال شده در فرایند بالاتر باشد، زمانی که طول می کشد تا مرحله واکنش پذیری شروع شود کوتاه تر می شود [۸]. از آنجا که یکی از عوامل عمده ایجاد کدورت، ذرات معلق موجود در محلول هستند، لذا عبارات گفته شده در مورد حذف کدورت در مورد ذرات معلق نیز صدق می کند.

شکل ۳- الف تأثیر زمان عملیاتی را بر حذف ذرات معلق از شیرابه کهنه در جریان ۲/۷ آمپر با استفاده از الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود انعطاد الکتریکی برای حذف ذرات معلق کارایی بالایی دارد. به طوری که در زمان ۱۲۰ دقیقه الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 به ترتیب ۹۶/۳۸، ۹۵/۷۸ و ۹۶/۲۱ درصد از ذرات معلق را حذف می کنند. در حالی که در همین آزمایش ها میزان حذف COD به ترتیب برابر با ۴۶/۵۵، ۳۷/۲۵ و ۴۵/۰۴ درصد بود.

شکل ۳- ب تأثیر جریان اعمال شده را بر میزان حذف ذرات معلق نشان می دهد. نتایج نشان می دهد افزایش شدت جریان به جای افزایش زمان عملیاتی تفاوت آشکاری را ایجاد نمی کند. به عبارت دیگر چون بخش اعظم ذرات معلق در همان جریان ۲/۷ آمپر حذف می شوند، با افزایش جریان به ۵ آمپر تغییر زیادی ایجاد نمی شود ولی در جریان یک آمپر میزان حذف ذرات معلق کمتر است. به عبارت دیگر با استفاده از الکترود ST-12 میزان حذف ۲۶/۸۷، ۹۵/۸۶ و ۹۸/۷۹ درصد در الکترود CK-45 میزان حذف ۷۸/۵۸، ۹۷/۷۴ و ۹۸/۳۶ درصد در الکترود ST-37 میزان حذف ۷۹/۷۴، ۹۵/۰۹ و ۹۸/۴۵ درصد به ترتیب برای جریان های ۱، ۲/۷ و ۵ آمپر به دست آمد. این نتایج حاکی از نزدیک بودن عملکرد الکترودها است. البته با توجه به اینکه فاصله بین الکترودها ثابت در نظر گرفته شد و شدت جریان نیز در هر آزمایش ثابت بود، استفاده از یک اختلاف پتانسیل ثابت امکان پذیر نبود. علت این موضوع تغییر رسانایی محلول در طول فرایند انعطاد الکتریکی است که به دلیل ورود مواد جدا شده از الکترودها و خروج مواد ناپایدار تولیدی و سایر فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی، در محلول رخ می دهد. در نتیجه شدت جریان که بر طبق مطالعات انجام شده حساسیت بالایی دارد ثابت در نظر گرفته شد و به ولتاژ اجازه داده شد که آزادانه در طول فرایند تغییر کند.

همان طور که در بخش ۳-۱ و ۳-۲ مشاهده شد، الکترود ST-12، CK-45 و ST-37 به ترتیب بهترین عملکرد را در حذف

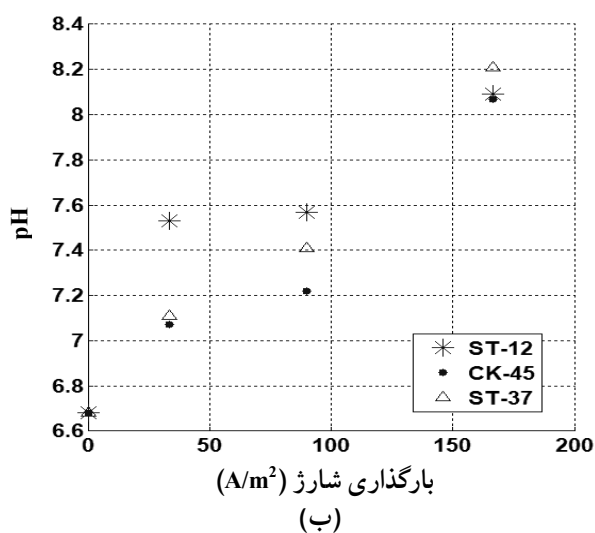
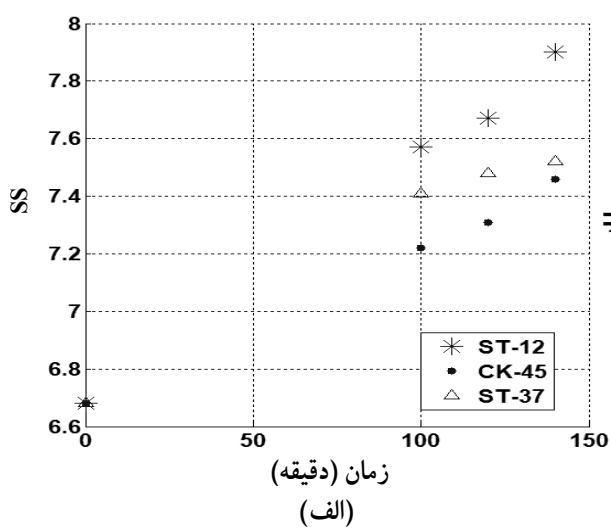
حذف در زمان ۱۰۰ دقیقه برای این سه الکترود برابر با ۶۴/۶۷، ۵۰/۰۰ و ۵۱/۹۹ به دست آمد. این موضوع تأثیر بیشتر افزایش جریان را نسبت به افزایش زمان در حذف COD نشان می دهد. لازم به ذکر است که با افزایش زمان در شدت جریان پنج آمپر سرعت حذف آلاینده کاهش چشمگیری پیدا می کند که به دلیل تشکیل لایه ممانعت کننده اکسید بر روی سطح الکترود است که از انحلال فلز و انتقال کتونر جلوگیری می کند.



شکل ۲- تأثیر زمان و جریان عملیاتی بر حذف COD برای الکترودهای ST-12 و CK-45 و ST-37 الف- در جریان ۲/۷ آمپر و ب- در زمان ۱۰۰ دقیقه

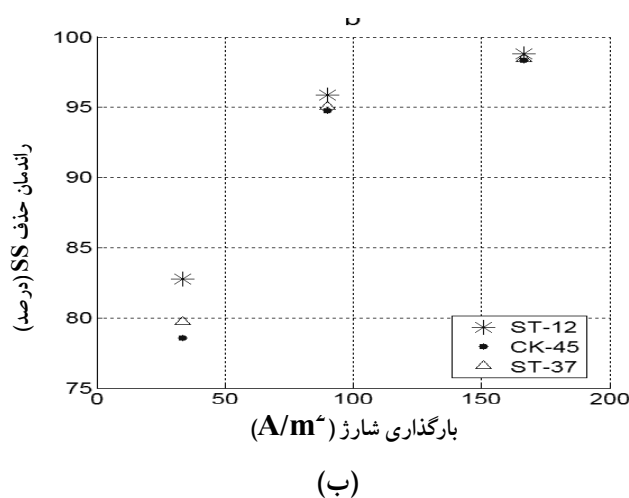
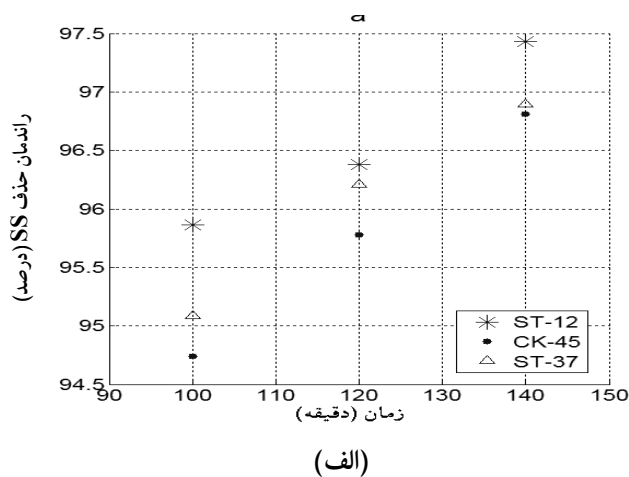
۳-۲- تأثیر انعطاد الکتریکی بر کاهش ذرات معلق در حین فرایند انعطاد الکتریکی سه مرحله شامل تأخیر زمانی، واکنش پذیری و پایدارسازی می توان به وضوح شناسایی کرد. در مرحله تأخیر زمانی تغییر اندکی در کدورت و میزان آلاینده دفع شده وجود دارد. بخش غالب حذف (تقریباً ۹۵ درصد) در مرحله

الکتریکی رخ می دهد، موادی تولید می شود که باعث افزایش pH می شوند و هرچه میزان تولید این مواد بیشتر باشد pH نیز بیشتر افزایش خواهد یافت [۲۱].



شکل ۴- الف- تأثیر زمان عملیاتی بر pH نهایی محلول برای الکترودهای ST-12 و CK-45 و ST-37 در جریان ۲/۷ آمپر و ب- تأثیر شدت جریان بر pH نهایی محلول برای الکترودهای ST-12 و CK-45 و ST-37 در زمان ۱۰۰ دقیقه

شکلهای ۵- الف و ۵- ب تأثیر دو عامل زمان عملیاتی در جریان ثابت و تغییر شدت جریان عملیاتی در زمان ثابت را بر درجه حرارت نهایی نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود درجه حرارت به تدریج افزایش یافته است، به عبارتی بین افزایش واکنش های الکتروشیمیایی با افزایش درجه حرارت تا حد بهینه و افزایش درجه حرارت به خاطر افزایش واکنش های الکتروشیمیایی ارتباط وجود دارد.



شکل ۳- تأثیر زمان و جریان عملیاتی بر حذف ذرات معلق برای الکترودهای ST-12 و CK-45 و ST-37 الف- در جریان ۲/۷ آمپر و ب- در زمان ۱۰۰ دقیقه

COD و SS از شیرابه داشتند. علت این امر به ساختار الکترودها و توانایی آنها در آزادسازی یون های مثبت مربوط است. به نظر می رسد که مقدار کمتر کربن در ساختار ST-12 تأثیر مثبتی در آزادسازی یون  $Fe^{2+}$  نسبت به ST-37 داشته است. همچنین وجود سایر ترکیبات فلزی و به خصوص منگنز که جایگزین آهن شده اند، تأثیر منفی در آزادسازی یون های فلزی به درون محلول داشته است و همین موضوع باعث کارایی کمتر CK-45 نسبت به ST-12 و ST-37 شده است (جدول ۲).

۳-۳- اثر فرایند انعقاد الکتریکی بر درجه حرارت و pH نهایی شکلهای ۴- الف و ۴- ب تأثیر زمان و شدت جریان عملیاتی را بر روی pH نهایی نشان می دهند. در هر دو مورد با افزایش زمان یا شدت جریان pH با شیب کمی افزایش می یابد. همان طور که پیشتر گفته شد به دلیل فرایندهای الکتروشیمیایی که در سلول انعقاد

الکتریکی است که روند کلی جریان و زمان بازداری را مشخص می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\text{Charge Loading (C}_t\text{)} = \frac{it}{FV} \quad (۶)$$

که در این رابطه

$i$  شدت جریان اعمال شده بر حسب آمپر،  $t$  زمان بازداری هیدرولیک متوسط بر حسب ثانیه،  $F$  ثابت فارادی برابر ۹۶۴۸۵ کولن و  $V$  حجم عملیاتی پساب استفاده شده در راکتور بر حسب مترمکعب است [۲۱].

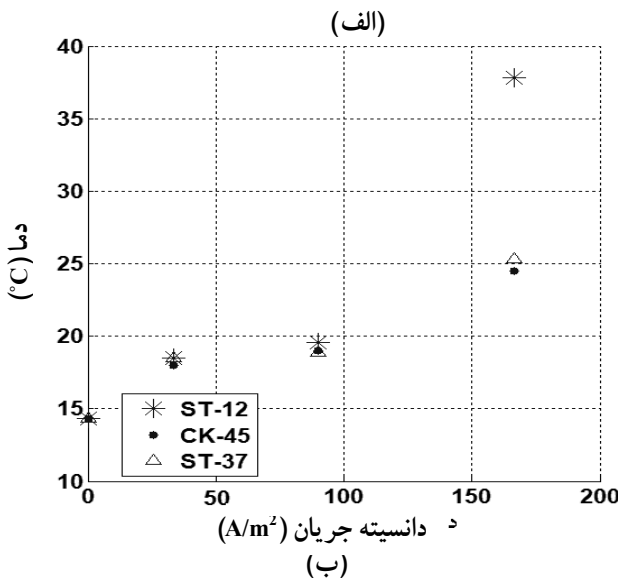
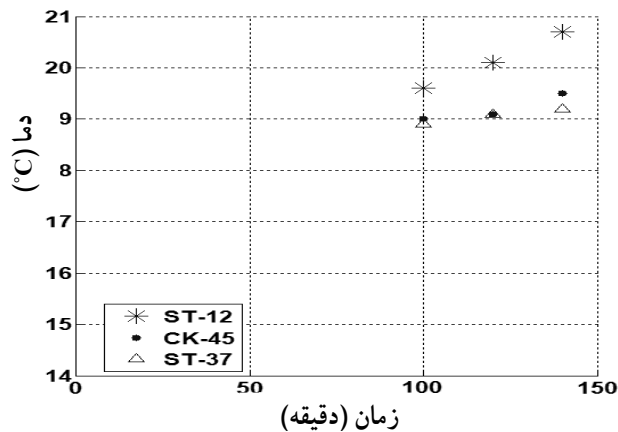
شکل ۶- الف اثر بارگذاری شارژ بر حذف COD شیرابه کهنه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش بارگذاری شارژ، درصد COD باقیمانده کاهش می‌یابد. در بارگذاری شارژ  $F/m^3$  ۱۵۵/۴۶ درصد COD باقیمانده به ترتیب ۳۵/۳۲، ۵۰ و ۴۸ درصد برای الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 است. مطابق شکل شیب کاهش میزان COD برای الکترود ST-12 نسبت به CK-45 و ST-37 بیشتر است. این موضوع به این معنی است که با افزایش بیشتر بارگذاری شارژ برای ST-12 احتمالاً می‌توان به بازدهی بالاتری دست یافت.

شکل ۶- ب اثر بارگذاری شارژ را بر میزان حذف ذرات معلق نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد هر سه الکترود الگوی یکسانی در این مورد دارند به طوری که از بارگذاری ۳۱/۰۹ تا ۸۳/۹۵ فارادی بر مترمکعب ذرات معلق با شیب تندی حذف شده‌اند ولی پس از آن سرعت میزان حذف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

### ۳-۵- اثر انعقاد الکتریکی بر تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش<sup>۳</sup>

وقتی جریان مستقیم از طریق یک جفت الکترود در میان آب اعمال می‌شود بر سد انرژی غلبه می‌کند و مولکول‌های آب به گازهای هیدروژن و اکسیژن شکسته می‌شوند. واکنش از طریق حبابهای هیدروژن که از کاتد ناشی می‌شوند و حبابهای اکسیژن که از آنود منشأ می‌گیرند مشاهده می‌شود. به هر حال وقتی آنود از فلزاتی ساخته می‌شود که پتانسیل اکسایش کمتری نسبت به آب دارند، آنود برای تولید یون‌های فلزی به جای تولید اکسیژن، حل می‌شود. این یون‌ها سپس با یون‌های هیدروکسید (محصول جانبی تولید هیدروژن) برای تولید هیدروکسیدهای فلزات واکنش می‌دهند. تغییرات رخ داده در پتانسیل اکسایش کاهش محلول ناشی از همین واکنش‌ها است [۲۴]. شکل‌های ۷- الف تا ۷- ب اثر انعقاد الکتریکی بر ORP پساب را نشان می‌دهند. تغییرات ORP به فهم اثر انعقاد الکتریکی در

<sup>3</sup> Oxidation Reduction Potential (ORP)

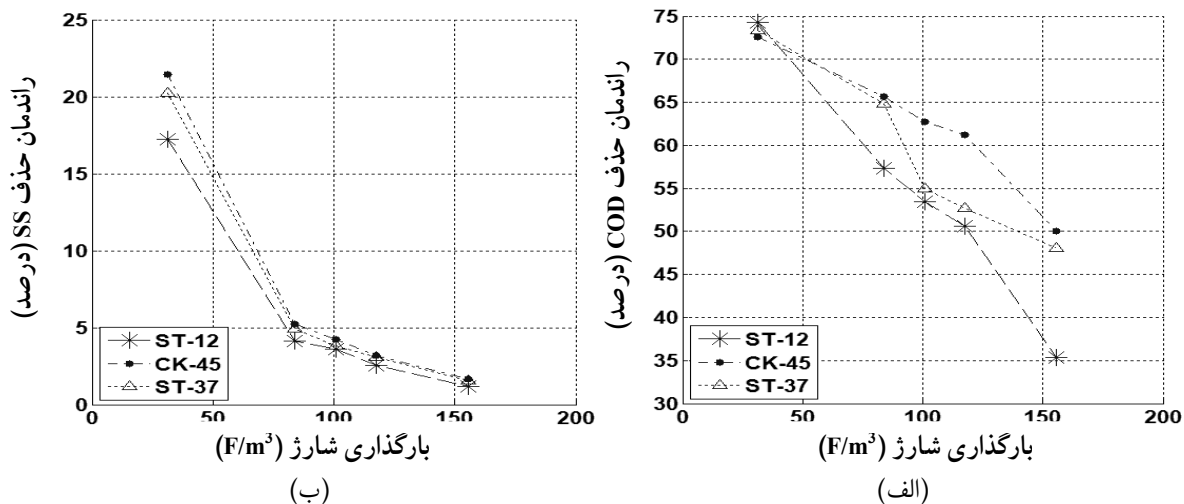


شکل ۵- تأثیر زمان و جریان عملیاتی بر درجه حرارت نهایی محلول برای الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37- الف- در جریان ۲/۷ آمپر و ب- در زمان ۱۰۰ دقیقه

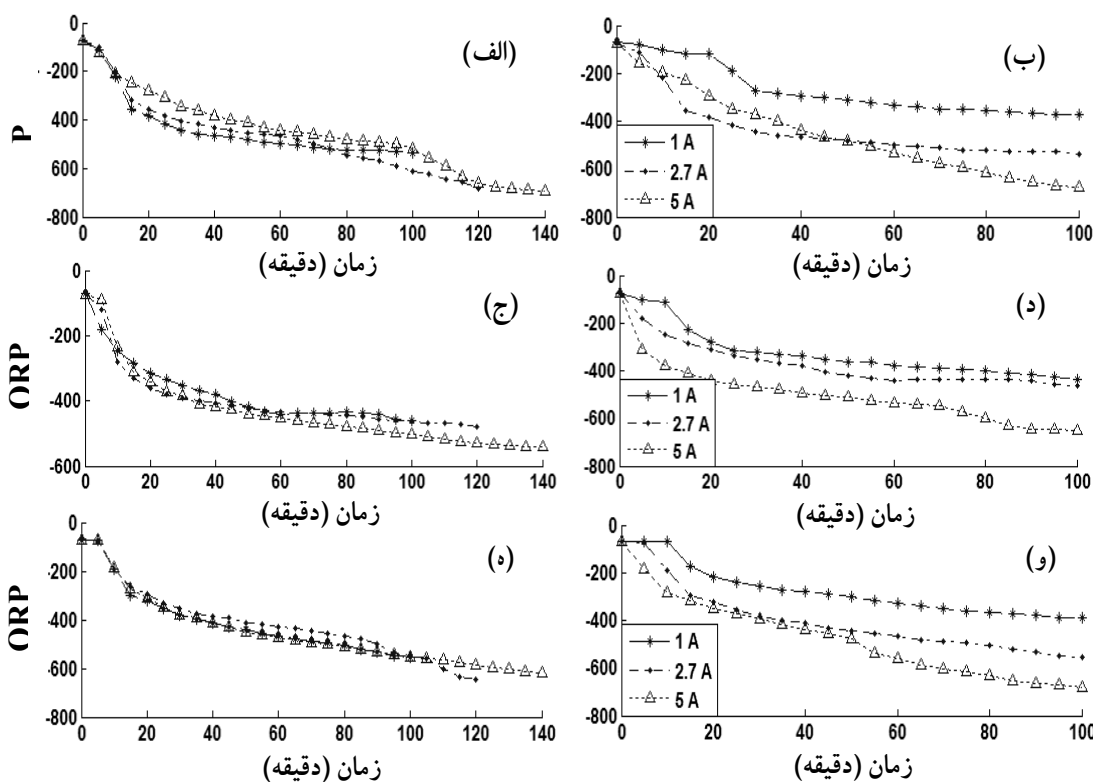
### ۳-۴- بررسی تأثیر بارگذاری شارژ<sup>۱</sup>

با توجه به این که شدت جریان و زمان عملیاتی بر فرایند تأثیر مشابهی دارند، می‌توان هر دو عامل را ترکیب و به صورت یک پارامتر به نام بارگذاری شارژ بیان کرد. در واقع بارگذاری شارژ یک پارامتر جایگزین است که اثر جریان اعمال شده و زمان بازداری<sup>۲</sup> را با هم ترکیب می‌کند [۲۱]. برخی محققان این پارامتر را مهم‌ترین پارامتر عملیاتی یا به عبارتی تنها عاملی که بر بازدهی تصفیه تأثیر عمده می‌گذارد در نظر گرفته‌اند [۲۲]. زیرا کیفیت پساب تصفیه شده به مقدار یون‌های تولیدی یا بارگذاری شارژی که به وسیله جریان با گذشت زمان تولید می‌شود، بستگی دارد [۲۳]. بارگذاری شارژی یک پارامتر مناسب برای طراحی فرایند انعقاد

<sup>1</sup> Charge Loading  
<sup>2</sup> Retention Time



شکل ۶- تأثیر بارگذاری شارژ بر حذف الف- COD برای الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37 و ب- SS با استفاده از الکترودهای ST-12، CK-45 و ST-37



شکل ۷- تغییرات پتانسیل اکسایش کاهش برای الف- الکترود ST-12 در جریان ۲/۷ آمپر، ب- الکترود ST-12 با تغییر جریان، ج- الکترود CK-45 در جریان ۲/۷ آمپر، د- الکترود CK-45 با تغییر جریان، ه- الکترود ST-37 در جریان ۲/۷ آمپر و و- الکترود ST-37 با تغییر جریان

حل شده دارای ترکیبات آهنی دائماً در حال افزایش است [۲۶]. طبق نتایج تجربی که نتایج این مطالعه هم آن را تأیید می‌کند، به کار بردن ولتاژ یا جریان بالاتر منجر به مقادیر ORP کوچک‌تر می‌شود [۲۷].

تصفیه پسابهای کمک می‌کند. مقادیر کم (منفی) ORP در پساب تصفیه شده نشان دهنده یک محیط قوی کاهش‌ی است [۲۵]. اندازه‌گیری ORP نشان می‌دهد کدام واکنش برای مثال اکسایش یا کاهش، غالب است. کاهش ORP در طی زمان تصفیه نشان می‌دهد که پتانسیل کاهش در نمونه در حال تصفیه به دلیل حضور یون‌های



#### ۴- نتیجه گیری

فرایند انعقاد الکتریکی با توجه به سادگی تجهیزات و عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی و زمان تصفیه کوتاه و همچنین بازدهی آن می تواند برای تصفیه اولیه شیرابه کهنه مورد توجه قرار گیرد. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد با استفاده از الکتروود ST-12 در مدت زمان ۱۴۰ دقیقه و شدت جریان ۲/۷ آمپر معادل با بارگذاری شارژ  $117/53 \text{ F/m}^3$ ، می توان ۴۹/۴۴ درصد از COD شیرابه با بار آلودگی حدود ۱۶۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر و ۹۷/۴۳ درصد از ۱۱۶۰۰ میلی گرم در لیتر ذرات معلق را حذف کرد. همچنین در زمان ۱۰۰ دقیقه و شدت جریان پنج آمپر معادل بارگذاری شارژ  $155/46 \text{ F/m}^3$ ، الکتروود ST-12 توانست ۶۴/۶۷ درصد از COD و ۹۸/۷۹ درصد از ذرات معلق را حذف کند. دلیل این تفاوت می تواند ویژگی های خاص شیرابه زمین های دفن در

ایران از جمله غلظت بسیار بالای COD و مواد معلق باشد. نتایج حاصل شده نشان داد که هم با افزایش زمان عملیاتی و هم با افزایش شدت جریان اعمال شده بر واحد سطح (دانسیته جریان)، بازدهی فرایند افزایش پیدا می کند و با گذشت زمان pH و درجه حرارت محلول نیز زیادتیر می شود. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که هرچند این روش به طور کلی نمی تواند بار آلودگی این شیرابه را حذف کند ولی می تواند به عنوان یکی از مراحل پیش تصفیه مؤثر باشد.

#### ۵- قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی تحت قرارداد شماره ۶۰۰/۸۵۲ اجرا شده است که به این وسیله از مسئولان مربوطه تشکر و قدردانی می گردد.

#### ۶- مراجع

- 1- Nayak, S., Sunil, B.M., and Shrihari, S. (2007). "Hydraulic and compaction characteristics of leachate-contaminated lateritic soil." *J. of Engineering Geology*, 94(3-4), 137-144.
- 2- Shokoh, A. (2007). "Laboratory study of reducing organic load of leachate by anaerobic process: Case study of Mashhad city." M.Sc. Thesis, Amir Kabir University of Technology, Tehran. (In Persian)
- 3- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, U., and Gonullu, M.T. (2008). "Treatment of leachate by electro coagulation using aluminum and iron electrodes." *J. of Hazardous Materials*, 154 (1-3), 381-389.
- 4- Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R., and Allia, K. (2008). "Evaluation of landfill leachate pollution and treatment." *J. of Desalination*, 220(1-3), 108-114.
- 5- Di laconi, C., Ramadori, R., and Lopez, A. (2006). "Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate." *J. of Biochemical Engineering*, 31(2), 118-124.
- 6- Deng, Y., and Englehardt, J.D. (2007). "Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment." *J. of Waste Management*, 27(3), 380-388.
- 7- Veli, S., O'zturk, T., and Dimoglo, A. (2008). "Treatment of municipal solid wastes leachate by means of chemical and electro-coagulation." *J. of Separation and Purification Technology*, 61(1), 82-88.
- 8- Holt, P.K., Barton, G.W., and Mitchell, C.A. (2005). "The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology." *J. of Chemosphere*, 59(3), 355-367.
- 9- Yousuf, M., Mollah, A., Schennach, R., Parga, J.R., and Cocke, D.L. (2001). "Electrocoagulation (EC)-science and applications." *J. of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- 10- Dalvand, A., Gholami, M., Jonaydi, A., and Mahmoudi, N. (2009). "Study of electro-coagulation efficiency for removal of reactive red 198 dye from colored wastewater." *J. of Science and Technology of Color*, (3), 97-105.
- 11- Jafarzadeh, N., and Daneshvar, N. (2006). "Treatment of textile wastewater contains basic dyes by electro-coagulation process." *J. of Water and Wastewater*, 57, 22-29. (In Persian)
- 12- Asadi Habib, M. (2009). "Investigation of the removal of heavy metals from water and wastewater using electro-coagulation process (by emphasis on Cr6+)." M.Sc. Thesis, Amir Kabir University of Technology, Tehran. (In Persian)
- 13- Koshayian, S. (2006). "Electrical coagulation." *Roshd J. of Chemistry Education*, 20(4), 29. (In Persian)
- 14- Dimoglo, A., Akbulut, H.Y., Cihan, F., and Karpuzcu, M. (2004). "Petrochemical wastewater treatment by

- means of clean electrochemical technologies.” *J. of Clean Techn. Environ. Policy*, 6(4), 288-295.
- 15- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M. (2009). “Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes.” *J. of Environmental Management*, 90(5), 1663-1679.
- 16- Hanayei, A., and Ganjali Khosroshahi, M. (2009). “Treatment of arsenic in polluted water by electrocoagulation.” *Iranian J. of Chemical Engineering*, 7(37), 75-85.
- 17- Kobya, M., Demirbas, E., Dedeli, A., and Sensoy M.T. (2010). “Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes.” *J. of Hazardous Materials*, 173(1-3), 326-334.
- 18- Baeza, A., Fernandez, M., Herranz, M., Legarda, F., Miro, C., and Salas, A. (2004). “Removing uranium and radium from a natural water.” *J. of Water, Air, and Soil Pollution*, 173(1-4), 57-59.
- 19- Clescerl, L.S., Greenberg, A.E., and Eaton, A.D. (1999). Standard method for the examination of water and wastewater, 20<sup>th</sup> Ed., American Public Health Association, USA.
- 20- Wegst, C.W. (1999). *Key to steel*, Verlag Stahlschlüssel, Germany.
- 21- Dena, W., and Huang, C. (2005). “Electrocoagulation for removal of silica nano particles from chemical-mechanical-planarization wastewater.” *J. of Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 254(1-3), 81-89.
- 22- Chen, X., Chen, G., and Yue, P.L. (2000). “Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation.” *J. of Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65-76.
- 23- Chen, G. (2004). “Electrochemical technologies in wastewater treatment.” *J. of Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41.
- 24- Yang, C.L. (2007). “Electrochemical coagulation for oily water demulsification.” *J. of Separation and Purification Technology*, 54(3), 388-395.
- 25- Mickley, M. (2004). *Pretreatment capabilities and benefits of electrocoagulation*, United States Office of Naval Research, Washington, D.C.
- 26- Kurt, U., Gonullu, M.T., Ilhan, F., and Varınca, K. (2008). “Treatment of domestic wastewater by electrocoagulation in a cell with Fe-Fe electrodes.” *J. of Environmental Engineering Science*, 25(2), 153-162.
- 27- Lee, P.C., Gau, S.H., and Song, C.C. (2007). “Particle removal of high-turbidity reservoir water by electroaggregation.” *J. of Environmental Engineering and Management*, 17(5), 371-375.