



## بررسی کارایی فرآیند انعقاد الکتروشیمیایی جهت حذف رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ از پساب رنگی

آرش دالوند<sup>۱</sup>، میترا غلامی<sup>۲\*</sup>، احمد جنیدی<sup>۲</sup>، نیاز محمد محمودی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۱۹۹

۲- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۱۹۹

۳- دانشجوی دکتری، گروه پژوهشی رنگ و محیط زیست، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۵/۱۴ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۸/۶/۲۰

### چکیده

در این تحقیق، کارایی روش تصفیه الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود آهنی برای تصفیه پساب حاوی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر عوامل مؤثر بر بازده فرآیند تصفیه مانند ولتاژ، زمان واکنش، غلظت الکترولیت، غلظت اولیه رنگزا و فاصله بین الکترودها بررسی شد. برای انجام آزمایشات از یک راکتور از جنس پلکسی گلاس با حجم مفید ۲ لیتر استفاده گردید. نتایج نشان داد که فرآیند الکتروشیمیایی روش مؤثری برای حذف ماده رنگزا می باشد و در شرایط عملیاتی با ولتاژ ۴۰ ولت و فاصله ۱ سانتیمتر بین الکترودها طی زمان تماس ۳۰ دقیقه، میزان حذف رنگ و COD به ترتیب ۹۹٪ و ۶۶٫۶٪ به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد، زمانی که ولتاژ و زمان واکنش افزایش و فاصله بین الکترودها کاهش یابد میزان مصرف انرژی، pH نهایی پساب و بازده حذف رنگزا افزایش می یابد. با افزایش غلظت الکترولیت زمان مورد نیاز برای حذف رنگزا کاهش می یابد.

واژه‌های کلیدی: انعقاد الکتروشیمیایی، الکترود آهنی، رنگزای راکتیو، پساب.

## Investigation of Electrochemical Coagulation Process Efficiency for Removal of Reactive Red 198 from Colored Wastewater

A. Dalvand<sup>1</sup>, M. Gholami<sup>1\*</sup>, A. Joneidi<sup>1</sup>, N. M. Mahmoodi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Health Engineering, Iran University of Medical Sciences, P.O.Box: 15875-4199, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

### Abstract

In this research the efficiency of electrochemical treatment process with iron electrodes for treatment of a colored wastewater containing Reactive Red 198 in laboratory scale was studied. The effect of operating parameters such as voltage, reaction time, electrolyte concentration, initial dye concentration and interelectrode distance on the dye removal efficiency have been investigated. The experiments were carried out in a plexiglass reactor. The results indicated that electrochemical process is very efficient method for dye removal and in the operational condition able to remove color and COD as high as 99% and 66.6% respectively in 30 minutes at 40 volts and 1 cm interelectrode distance. This study revealed that when the voltage and reaction time increased and interelectrode distance decreased, energy consumption, final pH and dye removal, would be increased. Increasing electrolyte concentration, resulted in decreasing retention time for dye removal. J. Color Sci. Tech. 3(2009), 97-105. © Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Electrochemical coagulation, Iron electrode, Reactive dye, Wastewater.

## ۱- مقدمه

به همراه رشد فزاینده جمعیت و گسترش صنعت و کشاورزی در سال‌های اخیر و کمبود آب سالم در جهان ضرورت تصفیه و بازیابی مجدد آب‌های مصرفی اهمیت خاصی پیدا کرده است. از میان صنایع مختلف، صنعت نساجی در سال‌های اخیر گسترش روزافزونی یافته است [۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سالانه حدود ۴۰ میلیون تن منسوجات در جهان تولید می‌شود که پساب تولیدی این صنایع حدود ۴ تا ۸ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد [۲]. بارزترین مشخصه پساب صنایع نساجی رنگی بودن آن است [۳]. دو مرحله اصلی رنگرزی و تکمیل در صنایع نساجی باعث می‌شود تا حجم قابل توجهی از پساب با غلظت رنگ بالا تولید گردد [۴، ۵]. بیشتر رنگزاهای مصرفی در این صنایع مصنوعی می‌باشند که ممکن است برای انسان و موجودات آبی سمی باشند. حذف رنگزاهای آلی از این گونه پساب‌ها به دلیل ساختار شیمیایی حاوی حلقه‌های آروماتیک اغلب آنها معمولاً با مشکلات زیادی همراه است. تخلیه پساب حاوی مواد رنگی به محیط زیست و اکوسیستم‌های آبی علاوه بر آسیب رساندن به مناظر زیبای طبیعی، از نفوذ نور به داخل اعماق آب جلوگیری می‌کند و باعث مختل شدن فرآیند فتوسنتز و از بین رفتن گیاهان آبی می‌شود [۶]. مواد رنگزای راکتیو دسته‌ای از رنگزاهای می‌باشند که به طور گسترده‌ای جهت رنگرزی الیاف در صنایع نساجی استفاده می‌شوند. حدود ۲۰ تا ۵۰٪ رنگزای راکتیو مصرفی برای رنگرزی پارچه‌ها به صورت تثبیت نشده وارد پساب واحدهای رنگرزی می‌شود. رنگزاهای راکتیو آبدوست بوده و بنابراین تمایل کمی به جذب بر روی توده زیستی در روش‌های تصفیه بیولوژیکی متداول دارند. این رنگزاهای اغلب دارای وزن مولکولی بالا و دارای حلقه‌های آروماتیک هستند و برای میکروارگانیسم‌ها سمی می‌باشند. بنابراین، تجزیه بیولوژیکی آنها بسیار مشکل است [۴]. با توجه به حجم بالای پساب تولیدی این واحدها، از آنجا که روش‌های متداول تصفیه پساب بازده لازم را جهت حذف این رنگزاهای از پساب ندارند، باید از روش‌های دیگری برای این منظور استفاده شود [۷]. روش‌های تصفیه بیولوژیکی به دلیل سمیت زیاد رنگزاهای میکروارگانیسم‌های موجود در فرآیند و مقاوم بودن بسیاری از آنها در برابر تجزیه بیولوژیکی، بازده پایینی در حذف رنگ دارند و برای رنگدایی از پساب صنایع نساجی قابل کاربرد نیستند [۸، ۹]. روش‌های اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس به دلیل هزینه بسیار بالای بهره‌برداری، اقتصادی نمی‌باشند [۴، ۸، ۱۰]. فرآیند الکتروشیمیایی یک فرآیند سازگار با محیط زیست است و از نظر هزینه با روش‌های دیگر تصفیه قابل رقابت است [۶]. روش الکتروشیمیایی یک روش تصفیه مناسب با بازده بالا جهت تصفیه پساب صنایع نساجی می‌باشد. این روش نسبت به سایر روش‌ها برای رنگدایی از پساب نساجی مؤثرتر می‌باشد و دارای مزایایی مانند نیاز

به تجهیزات ساده [۱۱، ۱۲]، سرعت بالا، زمان ماند کوتاه جهت حذف آلاینده‌ها [۱۳، ۱۴]، راهبری آسان و نیاز کم به مصرف مواد شیمیایی می‌باشد [۱۴، ۱۵].

در این تحقیق، کارایی فرآیند الکتروشیمیایی جهت حذف ماده رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ از محیط آبی با استفاده از الکترودهای آهنی در مقیاس آزمایشگاهی و در یک سیستم بسته بر روی پساب‌های مصنوعی مطالعه شد و در این راستا تأثیر متغیرهای زمان تماس، ولتاژ و فاصله بین الکترودها بر بازده حذف رنگزا، تأثیر روی pH نهایی پساب و میزان مصرف انرژی در طی انجام فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. سپس شرایطی که بالاترین بازده حذف رنگزا در آن به وقوع پیوسته بود (از نظر ولتاژ، فاصله بین الکترودها و زمان تماس) تعیین و تأثیر تغییرات غلظت اولیه الکترولیت و رنگزا روی بازده حذف رنگزا و میزان انرژی الکتریکی مصرفی در شرایط مذکور تعیین گردید.

## ۲- بخش تجربی

## ۲-۱- مواد و وسایل

در این تحقیق از رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ ساخت شرکت هوخست آلمان با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ استفاده شد. اسید هیدروکلریک مصرفی، کلرید سدیم و مواد شیمیایی مورد استفاده برای انجام آزمایش COD<sup>۱</sup> (اکسیژن مورد نیاز شیمیایی) ساخت شرکت مرک آلمان بود. برای اندازه‌گیری COD از روش شماره 5220B کتاب روش‌های استاندارد آزمایشات آب و پساب استفاده شد [۱۶]. برای اندازه‌گیری میزان رنگبری، توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر (CECIL7001-England) مطابق روش 2120C کتاب روش‌های استاندارد آزمایشات آب و پساب [۱۶]، میزان جذب نور در نمونه‌ها قرائت و درصد حذف رنگ تعیین گردید. برای تأمین جریان مستقیم برق از منبع تغذیه جریان مستقیم برق (MICRO-Iran) استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان ولتاژ و جریان مصرفی از مولتی‌متر (RE 330 FC.Taiwan) استفاده شد. برای انجام آزمایشات یک راکتور آزمایشگاهی به شکل مکعب مستطیل از جنس پلکسی گلاس با حجم مفید ۲ لیتر ساخته شد. از تعداد ۴ عدد صفحه آهنی (۲ عدد آند و ۲ عدد کاتد) به ابعاد ۱۱،۲ × ۱۰،۸ سانتیمتر که با فاصله ۲ سانتیمتر از کف راکتور به صورت عمودی درون راکتور قرار داده می‌شد به عنوان الکترودها استفاده گردید (شکل ۱). کل سطح مؤثر الکترودها در مجموع ۴۸۴ سانتیمتر مربع بود. لازم به ذکر است که فاصله الکترودها از هم در هر سری از آزمایشات ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شد.

1- Chemical oxygen demand

## ۲-۲- روش کار

در هر راه اندازی راکتور، ۲ لیتر پساب مصنوعی حاوی ماده رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ با غلظت اولیه ۵۰ mg/L که از طریق انحلال رنگزای مذکور در آب مقطر تهیه شده بود به راکتور الکتروشیمیایی انتقال داده شد. لازم به ذکر است که هدایت الکتریکی اولیه محلول رنگی ۴۴ - ۴۵ میکروزیمنس بر سانتیمتر و pH اولیه آن ۵٫۵ - ۵٫۳ بود. الکترودها به صورت ثابت و در مراحل مختلف با فاصله ۱، ۲، ۳ سانتیمتر درون راکتور قرار گرفته و توسط سیم به صورت تک قطبی به منبع تغذیه جریان مستقیم برق متصل شدند (شکل ۱). جهت برقراری اختلاط یکنواخت در درون راکتور از یک همزن مغناطیسی استفاده گردید. در هر راه اندازی یک ولتاژ ثابت (۵، ۲۰ یا ۴۰ ولت) بین الکترودها برقرار گردید و در فواصل زمانی مختلف (۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه) نمونه گیری از درون راکتور انجام گرفت و بلافاصله pH آن اندازه گیری شد. بعد از نمونه برداری، به مدت ۳۰ دقیقه به نمونه ها فرصت ته نشینی داده شد. پس از آن نمونه ها سانتریفیوژ شده (۴۰۰۰ دور، به مدت ۵ دقیقه) و میزان جذب نور (در طول موج ۵۱۸ نانومتر) در نمونه ها قرائت گردید و درصد حذف رنگ تعیین شد. پس از اتمام هر دوره آزمایش، الکترودها به مدت ۳۰ دقیقه در اسید هیدروکلریک ۵ درصد حجمی قرار گرفته، سپس با برس پلاستیکی شسته و آبکشی شدند. لازم به ذکر است که هر دوره آزمایش حداقل دو بار تکرار شد و میانگین آن در نظر گرفته شد. برای محاسبه بازده حذف رنگزا از معادله ۱ استفاده گردید.

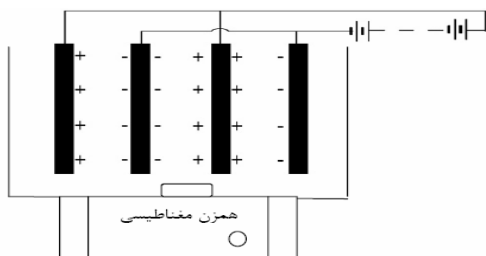
$$\eta = \frac{ABS_0 - ABS}{ABS_0} \times 100 \quad (1)$$

که  $\eta(\%) =$  بازده حذف رنگزا،  $ABS_0 =$  میزان جذب قبل از واکنش و  $ABS =$  میزان جذب بعد از واکنش می باشند.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- تأثیر تغییرات ولتاژ و زمان واکنش بر روی بازده حذف رنگ

در شکل های شماره ۲ تا ۴ ارتباط بازده حذف رنگزا با تغییرات ولتاژ، فاصله بین الکترودها و زمان واکنش نشان داده شده است. همان گونه که در شکل های ۲ تا ۴ مشاهده می شود، زمانی که ولتاژ از ۵ به ۴۰ ولت افزایش یافته است، بازده حذف رنگ نیز به طور چشمگیری افزایش یافته است به طوری که در ولتاژ ۴۰ ولت (فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر) بعد از گذشت ۳۰ دقیقه حداکثر بازده حذف رنگزا به میزان ۹۹٫۰۴ درصد شده است در حالی که بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از واکنش در ولتاژهای ۵ و ۲۰ ولت درصد حذف به ترتیب ۲۸ و ۸۷ درصد به دست آمده است. با مقایسه این بازده ها می توان نتیجه گرفت که بالاترین بازده حذف رنگ در ولتاژ ۴۰ ولت می باشد.



شکل ۱: نحوه قرار گرفتن الکترودها در درون راکتور.

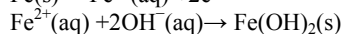
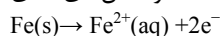
جدول ۱: مشخصات رنگزای مصرفی.

نام رنگزا	Reactive Red 198
ساختار مولکولی	
فرمول شیمیایی	$C_{27}H_{18}ClN_7Na_4O_{15}S_5$
وزن مولکولی (گرم بر مول)	۹۶۷٫۵
طول موج حداکثر ( $\lambda_{max}$ ) بر حسب نانومتر	۵۱۸

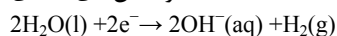
دلیل افزایش بازده حذف رنگ با افزایش ولتاژ را می‌توان با مکانیسم‌هایی که در حین استفاده از الکتروآهنی در آند و کاتد به وقوع می‌پیوندد تفسیر کرد. سه فرآیند اصلی که در طی واکنش الکتروشیمیایی به وقوع می‌پیوندد شامل واکنش‌های الکترولیتیک در سطح الکترودها، تشکیل منعقد کننده‌ها در فاز آبی، جذب آلاینده‌های محلول یا کلوئیدی روی منعقد کننده‌ها و حذف آنها توسط ته‌نشینی یا شناورسازی می‌باشند [۱۷]. به طور کلی دو مکانیسم برای واکنش‌هایی که در طی فرآیند الکتروشیمیایی با استفاده از الکتروآهنی در آند و کاتد به وقوع می‌پیوندد و منجر به تولید منعقد کننده‌ها می‌شود قابل بیان است [۱۸]:

مکانیسم اول:

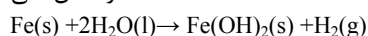
واکنش‌های آندی



واکنش‌های کاتدی

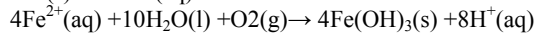
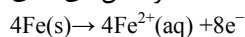


واکنش کلی

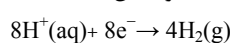


مکانیسم دوم:

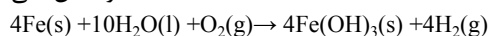
واکنش‌های آندی



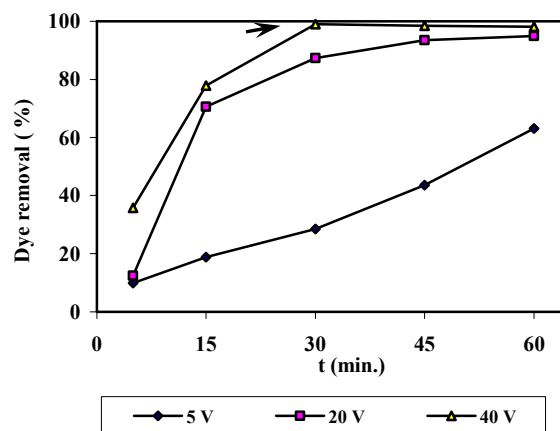
واکنش‌های کاتدی



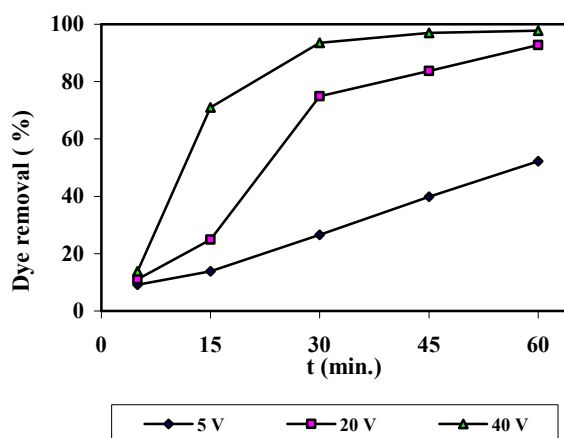
واکنش کلی



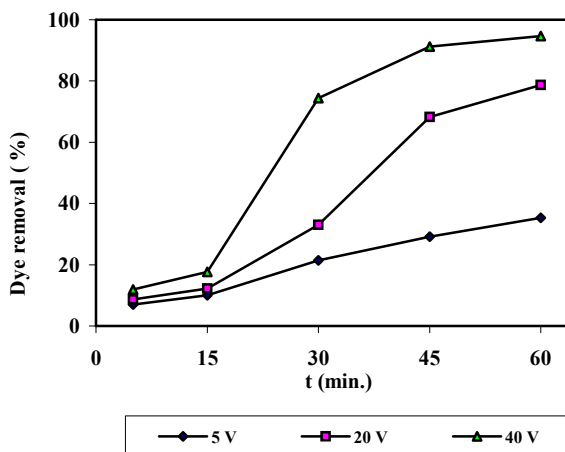
همان گونه که در این دو مکانیسم مشاهده می‌شود، محصولات اصلی واکنش‌های کاتدی گاز هیدروژن و یون هیدروکسید و محصولات اصلی واکنش‌های آندی یون‌های  $\text{Fe}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$  و  $\text{H}^{+}$  می‌باشند. یون‌های هیدروکسید تولید شده در طی احیا آب در کاتد در واکنش با یون‌های آهن تولیدی در آند، تولید سوسپانسیون ژلاتینی هیدروکسید آهن  $\text{Fe}(\text{OH})_n$  می‌کنند که می‌تواند از طریق مکانیسم‌های کمپلکس‌سازی سطحی و جذب الکترواستاتیک، آلاینده‌های رنگی در محلول را به دام انداخته و حین ترسیب لخته‌های سنگین هیدروکسید آهن، رنگزا توسط مکانیسم‌های فیزیکی جذب سطحی حذف شود [۱۸]. لخته‌های سبک نیز در اثر اتصال به حباب‌های گاز هیدروژن تولیدی در کاتد به سطح پساب آمده و حذف می‌گردند که بازده حذف رنگ و COD به مقدار آهن تولید شده در محلول بستگی دارد. از آنجا که مقدار آهن تولیدی نیز به زمان واکنش و ولتاژ بستگی دارد، زمانی که یکی از این دو عامل افزایش می‌یابد



شکل ۲: ارتباط بازده حذف رنگزا با تغییرات ولتاژ و زمان تماس (فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر).



شکل ۳: ارتباط بازده حذف رنگزا با تغییرات ولتاژ و زمان تماس (فاصله بین الکترودها ۲ سانتیمتر).



شکل ۴: ارتباط بازده حذف رنگزا با تغییرات ولتاژ و زمان تماس (فاصله بین الکترودها ۳ سانتیمتر).

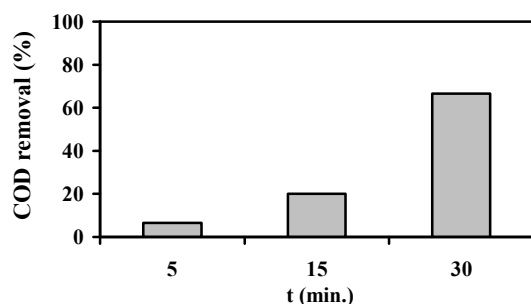
### ۳-۳- تأثیر زمان واکنش بر بازده حذف COD در شرایط بهینه حذف رنگزا

در شکل ۵ تأثیر زمان واکنش بر بازده حذف COD در شرایط بهینه حذف رنگزا ارائه شده است.

فرآیند حذف COD در طی فرآیند الکتروشیمیایی بسیار پیچیده است و می‌تواند شامل اکسیداسیون یا احیا الکتروشیمیایی، جذب الکترواستاتیکی و به دام افتادن فیزیکی ذرات آلاینده باشد [۱۹]. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان واکنش بازده حذف COD افزایش می‌یابد و بالاترین بازده COD به میزان ۶۶٫۶٪ طی زمان ۳۰ دقیقه حاصل می‌شود. یکی از مهمترین دلایل افزایش حذف COD با گذشت زمان، افزایش میزان تولید لخته‌های هیدروکسید آهن با گذشت زمان است [۱۹، ۲۱]. از مقایسه شکل ۲ با شکل ۵ ملاحظه می‌شود، زمانی که رنگزا بیشترین مقدار حذف را داشته است بالاترین میزان حذف COD نیز مشاهده شده است ولی میزان حذف کمتر COD نسبت به ماده رنگزا می‌تواند حاکی از تجزیه رنگزا و تبدیل آن به سایر ترکیبات آلی در طی فرآیند الکتروشیمیایی باشد. تحقیقات صورت گرفته جهت رنگزدایی رنگزای اسیدی نارنجی ۱۰ با استفاده از روش الکتروشیمیایی نشان داده است که الکترون‌های تولید شده در اثر اکسیداسیون آهن می‌توانند مولکول‌های رنگزا را احیا و آنها را به آمین‌های آروماتیک بی‌رنگ تبدیل کنند که این آمین‌های آروماتیک توسط هیدروکسیدهای آهن جذب و حذف می‌شوند. دلیل عدم حذف کامل COD با گذشت زمان نیز ناشی از برهمکنش ضعیف بعضی از این آمین‌های آروماتیک حاصل از شکستن مولکول رنگزا با هیدروکسید آهن می‌باشد [۳]. در شرایط بهینه بهره‌برداری، روش الکتروشیمیایی قادر به حذف ۹۸٪ رنگ و ۶۹٪ COD از محلول رنگی حاوی رنگزای اسیدی زرد ۲۳ است [۲۱].

### ۳-۴- تأثیر تغییرات ولتاژ بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی و pH نهایی پساب

در شکل‌های ۶ و ۷ تأثیر تغییرات ولتاژ در فواصل مختلف بین الکترودها بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی و pH نهایی پساب ارائه شده است.



شکل ۵: تغییرات بازده حذف COD با گذشت زمان در شرایط بهینه حذف رنگزا (ولتاژ ۴۰ ولت، فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر).

تولید مواد منعقد کننده نیز افزایش می‌یابد و حذف آلاینده‌ها کامل می‌شود. همچنین با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان چنین بیان کرد که بازده حذف اندک رنگ در ولتاژ کم و زمان واکنش اندک حاکی از عدم تشکیل مقدار کافی رسوبات برای حذف بالای رنگ باشد [۱۹]. همان گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود در ۵ دقیقه اول واکنش، بازده حذف رنگ اندک است و با گذشت زمان به تدریج افزایش می‌یابد. در دقایق اولیه واکنش بخصوص در ولتاژهای پایین مقدار تولید یون آهن در آند کم می‌باشد، لذا میزان لخته‌های تولیدی کم و بازده حذف پایین است ولی با گذشت زمان یا افزایش ولتاژ غلظت یون‌های آهن تولیدی در محلول و همچنین مقدار یون‌های هیدروکسید افزایش یافته و امکان تشکیل لخته‌ها زیاد می‌گردد و بازده حذف رنگ افزایش می‌یابد و حداکثر بازده حذف در ولتاژ ۴۰ ولت در ۳۰ دقیقه اول واکنش به دست می‌آید. نتایج تحقیق صورت گرفته برای حذف رنگزای اسیدی نارنجی ۲، با استفاده از روش الکتروشیمیایی نیز نشان داد که با افزایش ولتاژ از ۵ به ۲۰ ولت و با افزایش زمان واکنش، بازده حذف رنگ افزایش یافته و بعد از گذشت ۳۰ دقیقه ۹۸ درصد رنگزای مذکور حذف شده است [۲۰]. رنگزای راکتیو مشکی ۵ توسط روش الکتروشیمیایی و با استفاده از الکترودها آهنی در مدت زمان تماس ۱۵ دقیقه به میزان ۸۳ درصد حذف شده است و بعد از آن با گذشت زمان تغییر قابل ملاحظه‌ای در حذف رنگ مشاهده نگردید [۴].

### ۳-۲- تأثیر فاصله بین الکترودها بر بازده حذف رنگزا

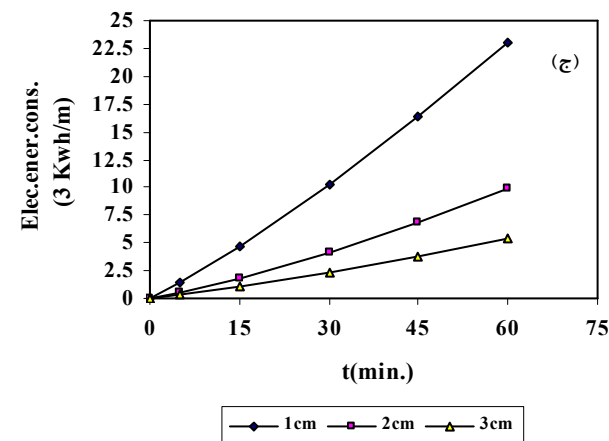
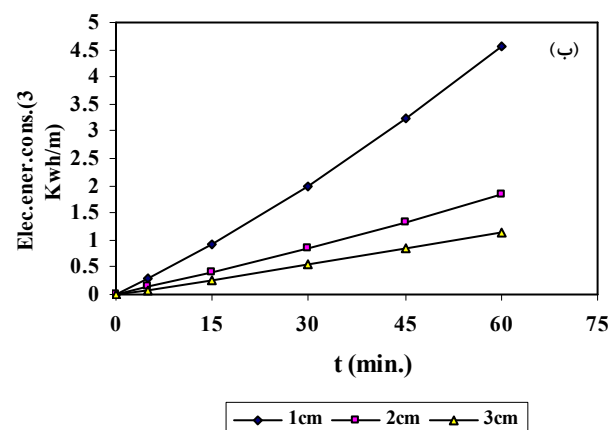
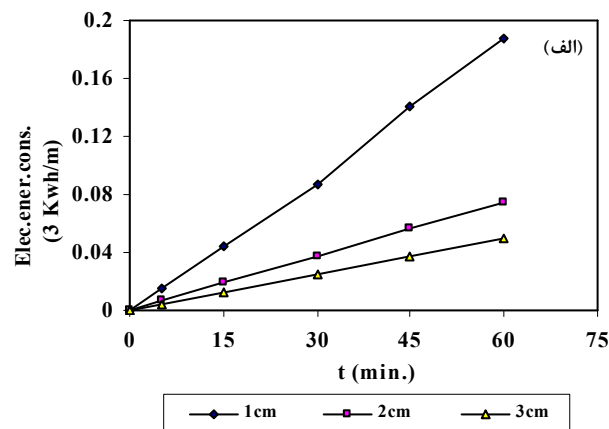
همان گونه که در شکل‌های ۲ تا ۴ ملاحظه می‌شود زمانی که فاصله بین الکترودها از ۱ به ۳ سانتیمتر افزایش می‌یابد بازده حذف رنگزا به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است به طوری که با افزایش فاصله الکترودها در ولتاژ ثابت ۴۰ ولت از ۱ به ۳ سانتیمتر طی زمان تماس ۳۰ دقیقه، بازده حذف رنگ از ۹۹٪ به ۷۴٪ کاهش یافت. با افزایش فاصله بین الکترودها مقاومت الکتریکی بین الکترودها افزایش می‌یابد. در نتیجه رسانایی محلول کم می‌شود و میزان جریان مصرفی کاهش می‌یابد که این کاهش جریان سبب عدم تولید یون‌های آهن و هیدروکسید به مقدار کافی برای تشکیل لخته و حذف رنگ است. علاوه بر آن با افزایش فاصله بین الکترودها انتظار می‌رود که از یک طرف برخورد کمتری بین یون‌های آهن تولیدی با یون‌های هیدروکسید به وقوع بپیوندد و لخته‌های کمتری تشکیل شود و از طرف دیگر برخورد مولکول رنگزا با پلیمرهای هیدروکسیدی کاهش یابد، در نتیجه جذب الکترواستاتیک کاهش و بازده حذف رنگ کم شود [۴]. نتایج تحقیقات قبلی نیز نشان داد که در طی فرآیند الکتروشیمیایی، در زمان یکسان، زمانی که فاصله بین الکترودها از ۰٫۵ به ۳ سانتیمتر افزایش یابد بازده حذف رنگزای دیسپرس آبی ۱۰۶ از ۸۰ درصد به ۴۸ درصد کاهش می‌یابد [۱۱].

همچنین جریان مصرفی در ولتاژ ۲۰ ولت تقریباً ۲۰ برابر بیشتر از انرژی الکتریکی مصرفی در حین اعمال ولتاژ ۵ ولت می‌باشد و در ولتاژ پایین ۵ ولت تغییرات شدت جریان با گذشت زمان بسیار اندک است. در ولتاژهای بالا میزان مصرف انرژی در طول زمان بیشتر می‌باشد و در نتیجه این افزایش مصرف انرژی، فعالیت‌های آندی و کاتدی افزایش و میزان احیاء مولکول آب در کاتد نیز به شدت افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مقدار یونهای هیدروکسیل در محیط به شدت افزایش یابد. از طرفی سرعت خروج یون‌های هیدروژن از محیط به صورت گاز  $H_2$  افزایش می‌یابد در نتیجه pH پساب با گذشت زمان به تدریج زیاد می‌شود [۳،۲۲]. همان گونه که از مقایسه نتایج شکل ۷ نیز قابل ملاحظه است در ولتاژهای بالا pH پساب در زمان کوتاه‌تری افزایش یافته است به طوری که در ولتاژ ۴۰ ولت، فاصله ۱ سانتیمتر، بعد از گذشت ۱۵ دقیقه از شروع واکنش pH از ۵٫۴ به ۹٫۸۴ می‌رسد و بعد از آن تغییرات بسیار کم می‌باشد و در فواصل زمانی ۱۵ تا ۶۰ دقیقه تغییرات pH در محدوده ۱۰٫۲ - ۱۰ بوده است. در ولتاژ پایین ۵ ولت تغییرات pH با گذشت زمان بسیار کم می‌باشد. در این ولتاژ، pH بعد از گذشت ۶۰ دقیقه از واکنش، در هیچکدام از نمونه‌ها بالاتر از ۷ نشده است. نتایج تحقیق صورت گرفته جهت حذف رنگزای اسیدی نارنجی ۶ با استفاده از روش الکتروشیمیایی با الکتروآهنی نیز نشان داده است. زمانی که pH اولیه محلول رنگی در محدوده ۵ تا ۷ باشد pH نهایی پساب با ولتاژ ارتباط مستقیم دارد و با افزایش ولتاژ، pH نیز افزایش یافته است و در ولتاژ ۸۰ ولت بعد از گذشت زمان مشخصی، pH به مقدار پایدار ۹ تا ۱۰ می‌رسد و بعد از آن دیگر تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است [۲۲].

### ۳-۵- تأثیر تغییرات غلظت الکترولیت بر بازده حذف رنگزا و میزان انرژی الکتریکی مصرفی

جهت تعیین تأثیر غلظت الکترولیت بر بازده حذف رنگزا در طی فرآیند الکتروشیمیایی و در شرایط بهینه حذف رنگزا (فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر، ولتاژ ۴۰ ولت)، از NaCl در ۳ غلظت مولی مختلف استفاده شد. شکل ۸ تأثیر تغییر غلظت الکترولیت روی بازده حذف رنگزا را نشان می‌دهد.

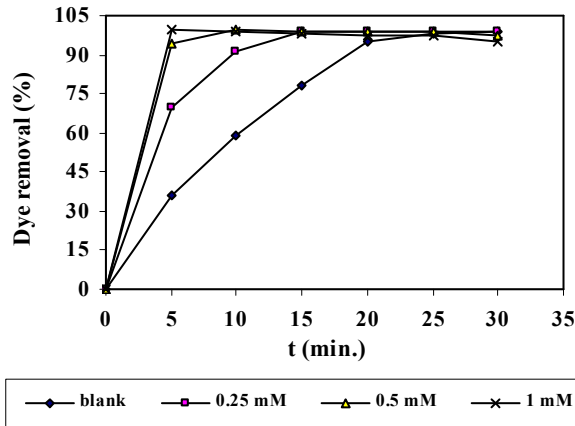
همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت الکترولیت از ۰٫۲۵ به ۱ میلی مول، طی زمان تماس ۵ دقیقه، بازده حذف رنگزا از ۶۹٪ به ۹۹٪ افزایش یافته است. همچنین با افزایش غلظت الکترولیت از ۰٫۲۵ به ۱ میلی مول، زمان لازم جهت رسیدن به بازده ۹۹٪ حذف رنگزا از ۲۰ دقیقه به ۵ دقیقه کاهش یافته است. دلیل افزایش بازده حذف رنگزا در زمان یکسان، افزایش غلظت الکترولیت است که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش غلظت الکترولیت، شدت جریان مصرفی افزایش می‌یابد. به طوری که در طی ۵ دقیقه زمان تماس، وقتی که غلظت الکترولیت از ۰٫۲۵ به ۱ میلی مول افزایش یابد، میزان انرژی



شکل ۶: تأثیر تغییرات ولتاژ بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی (Elec. ener. cons.)<sup>۱</sup> در فواصل مختلف بین الکترودها (الف: ۵ ولت، ب: ۲۰ ولت، ج: ۴۰ ولت).

همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ از ۵ به ۴۰ ولت میزان انرژی الکتریکی مصرفی نیز افزایش پیدا کرده است به طوری که در تمامی فاصله‌ها میزان جریان الکتریکی مصرفی در ولتاژ ۴۰ ولت تقریباً ۵ برابر بیشتر از جریان مصرفی در ۲۰ ولت بوده است،

1- Electrical energy consumption



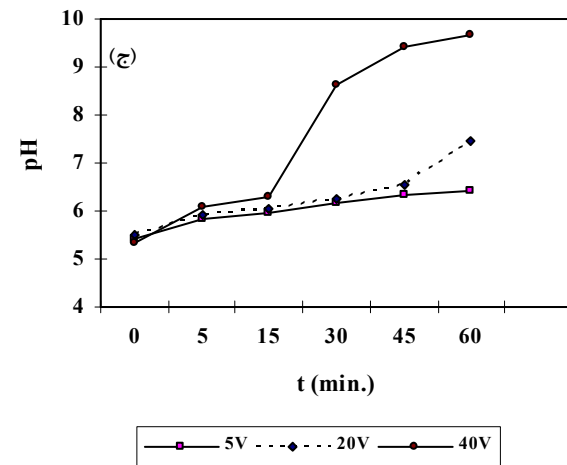
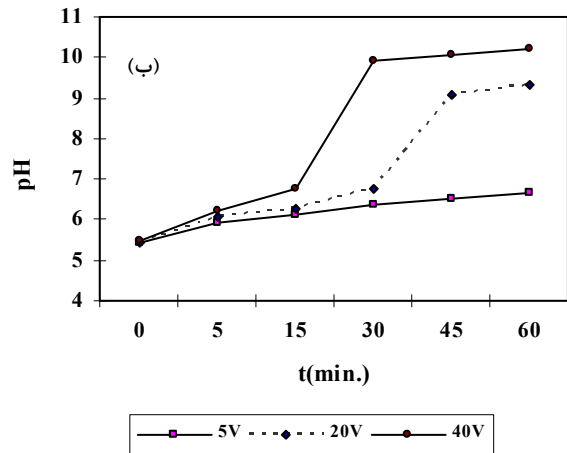
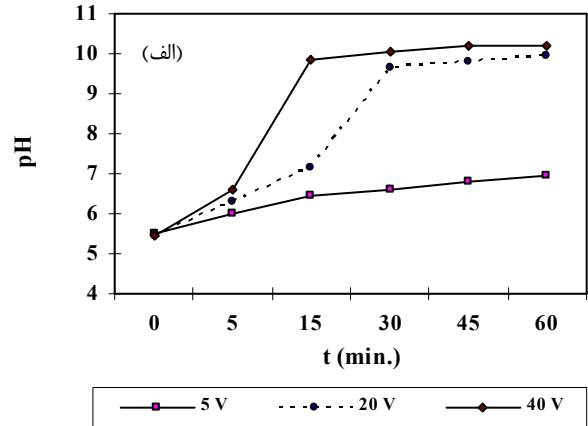
شکل ۸: تأثیر غلظت الکترولیت بر بازده حذف رنگزا (غلظت رنگزا ۵۰ میلیگرم در لیتر، pH اولیه ۵,۵، فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر، ولتاژ ۴۰ ولت).

### ۳-۶- تأثیر غلظت اولیه رنگزا بر بازده حذف رنگ

برای تعیین تأثیر غلظت اولیه رنگزا روی بازده حذف رنگزا در طی فرآیند الکتروشیمیایی و در شرایط بهینه حذف رنگزا (فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر، ولتاژ ۴۰ ولت، زمان واکنش ۳۰ دقیقه)، چهار غلظت ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ mg/L از رنگزا انتخاب شد.

لازم به ذکر است که هدایت الکتریکی اولیه محلول‌های رنگی به ترتیب ۴۵، ۹۰، ۱۷۴ و ۲۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر بود.

نتایج مطالعات انجام شده قبلی نشان داد که در فرآیند الکتروشیمیایی در شرایط ثابت از نظر شدت جریان و زمان تماس، زمانی که غلظت اولیه رنگزا افزایش یابد، بازده حذف رنگزا کاهش می‌یابد و در یک هدایت الکتریکی و ولتاژ ثابت، مقدار مشخصی ترکیبات هیدروکسید آهن در محیط تولید می‌شود و این مقدار هیدروکسید آهن تولیدی قادر به جذب و حذف مقدار مشخصی از مولکول‌های رنگزا می‌باشد [۱۳، ۱۸]، بنابراین، در صورت افزایش غلظت رنگزا، مقدار لخته‌های هیدروکسید آهن موجود در محیط برای حذف مولکول‌های رنگزای اضافی کافی نمی‌باشد، در نتیجه بازده حذف رنگزا کاهش می‌یابد. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت رنگزا، بازده حذف تغییر محسوسی نداشته است و دلیل آن این است که با افزایش غلظت اولیه رنگزا به همان نسبت هدایت الکتریکی محلول نیز افزایش یافته است، در نتیجه میزان انرژی مصرفی نیز افزایش یافته است (با افزایش غلظت رنگزا از ۵۰ به ۳۰۰ mg/L انرژی الکتریکی مصرفی از ۱۰,۳ به ۵۵ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب پساب رسید) و لخته‌های هیدروکسید آهن کافی برای حذف مولکول‌های رنگزا در محیط واکنش تولید شده است. لذا با افزایش غلظت اولیه رنگزا تغییر محسوسی در بازده حذف آن مشاهده نگردید.



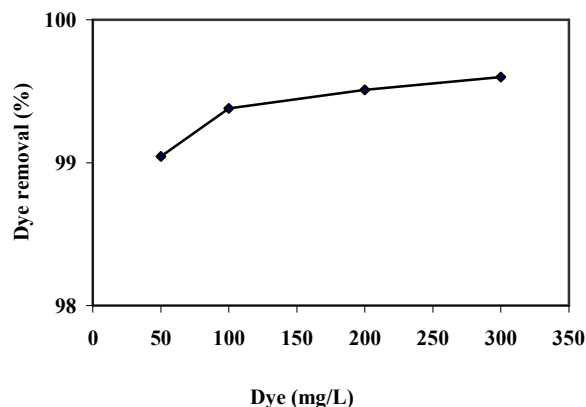
شکل ۷: تأثیر تغییرات ولتاژ بر pH نهایی پساب در فواصل مختلف بین الکترودها (الف: ۱ سانتیمتر، ب: ۲ سانتیمتر، ج: ۳ سانتیمتر).

الکتریکی مصرفی از ۱,۴ به ۶,۱ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب پساب نیز زیاد می‌شود و با افزایش میزان جریان مصرفی میزان تولید لخته‌های هیدروکسید آهن افزایش و بازده حذف رنگزا نیز زیاد می‌گردد.

گرفته نشان داد که بازده حذف رنگ با افزایش ولتاژ و زمان تماس رابطه مستقیم و با فاصله بین الکترودها رابطه عکس دارد. همچنین ولتاژ به کار گرفته شده تأثیر مستقیم بر روی میزان انرژی الکتریکی مصرفی و pH نهایی پساب دارد (در ولتاژهای پایین تغییرات pH پساب اندک و در ولتاژهای بالا این تغییرات شدیدتر است). با افزایش ولتاژ از ۵ به ۴۰ ولت میزان انرژی الکتریکی مصرفی چندین برابر افزایش پیدا می‌کند. با افزایش غلظت الکترولیت اگرچه زمان مورد نیاز برای حذف رنگزا کاهش می‌یابد ولی میزان انرژی الکتریکی مصرفی افزایش می‌یابد. با این وجود در صورت افزودن الکترولیت، برای رسیدن به بازده مشخصی از حذف رنگزا، نسبت به زمانی که الکترولیت به محیط اضافه نمی‌شود، انرژی الکتریکی کمتری مصرف گردید. به طور کلی نتایج نشان داد که انعقاد الکتروشیمیایی در مقیاس آزمایشگاهی روش مؤثری برای حذف رنگزاهای آنیونی مانند رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ از پساب رنگی می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت‌های مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران و همچنین از زحمات پرسنل آزمایشگاه شیمی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران تشکر می‌گردد.



شکل ۹: ارتباط غلظت اولیه رنگزا با بازده حذف رنگزا.

#### ۴- نتیجه‌گیری

فرآیند الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود آهنی جهت تصفیه پساب مصنوعی رنگی حاوی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ در شرایط بهینه (فاصله بین الکترودها ۱ سانتیمتر، ولتاژ ۴۰ ولت، زمان تماس ۳۰ دقیقه) می‌تواند رنگزا را به میزان ۹۹.۰۴٪ و COD را به میزان ۶۶.۶٪ حذف کند. تحت این شرایط، انرژی الکتریکی مصرفی ۱۰ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب پساب می‌باشد. نتایج آزمایشات صورت

#### ۵- مراجع

1. N. Daneshvar, Principles of water quality control. Tabriz University. Pub., 2004. (Persian)
2. L. Wang, Y. Hung, H. Lo, C. Yapijakis, Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment, Marcel Dekker, 2<sup>nd</sup> Ed. 2004.
3. M. Muthukumar, M. Thalamadai Karuppiah, B. Raju, Electrochemical removal of C.I. Acid orange 10 from aqueous solutions. *Sep. Purif. Technol.* 55(2007), 198-205.
4. S. Song, Z. He, J. Qiu, Xu. L. Chen, Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters. *Sep. Purif. Technol.* 55 (2007), 238-245.
5. N. Daneshvar, A. R. Khataee, N. D. Jafarzadeh, The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. *J. Hazard. Mater.* 137(2006), 1788-1795.
6. M. A. Sanroman, M. Pazos, M. T. Ricart, C. Cameselle, Electrochemical decolourisation of structurally different dyes. *Chemosphere.* 57 (2004), 233-239.
7. N. L. Nemrow, Industrial Waste Treatment. Butterworth-Heinemann. 2007, 187.
8. M. Kobya, M. Bayramoglu, M. Eyvaz, Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *J. Hazard. Mater.* 148 (2007), 311-318.
9. N. Daneshvar, A. Oladegaragoze, N. D. Jafarzadeh, Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *J. Hazard. Mater.* 129(2006), 116-122.
10. O. T. Can, M. Kobya, E. Demirbas, M. Bayramoglu, Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere.* 62(2006), 181-187.
11. T. H. Kim, Ch. Park, E. B. Shin, S. Kim, Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination.* 150(2002), 165-175.
12. A. H. Essadki, M. Bennajah, B. Gourich, C. Vial, M. Azzi, H. Delmas, Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor-Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. *Chem. Eng. Process.* 47(2008), 1211-1223.
13. N. Daneshvar, H. Ashassi Sorkhabi, M. B. Kasiri, Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *J. Hazard. Mater.* 112(2004), 55-62.
14. S. Yildiz Yalcin, Optimization of Bomaplex Red CR-L dye removal from aqueous solution by electrocoagulation using aluminum electrodes. *J. Hazard Mater.* 158(2008), 194-200.



15. I. Arslan-Alaton, I. Kabdas, D. Hanbaba, E. Kuybu, Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *J. Hazard. Mater.* 150 (2008), 166-173.
16. APHA, AWWA, WPCF, Standard methods for examination of water and wastewaters, 20<sup>th</sup> Ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington, DC, 1998.
17. A. Aleboyeh, N. Daneshvar, M.B. Kasiri, Optimization of C.I. Acid Red 14 azo dye removal by electrocoagulation batch process with response surface methodology. *Chem. Eng. Process.* 47(2008), 827-832.
18. M. Mollah, S. Pathak, P. Patil, M. Vayuvegula, Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *J. Hazard. Mater. B.* 109 (2004), 165-171.
19. Z. Zaroual, M. Azzi, N. Saib, E. Chainet, Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *J. Hazard. Mater.* 131(2006), 73-78.
20. Y. A. Xiong, P. J. Strunk, X. Hongyun, X. Zhu, H. T. Karlsson, Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell with three-phase three-dimensional Electrode. *Water. Res.* 35( 2001), 4226-4230.
21. N. Daneshvar, A. R. Khatae, A. R. Amani Ghadim, M. H. Rasoulifard, Decolorization of C. I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *J. Hazard Mater.* 148(2007), 566-572.
22. H. J. Hsing, P. C. Chiang, E. Chang, Y. Chen Mei, The decolorization and mineralization of Acid Orange 6 azo dye in aqueous solution by advanced oxidation processes: A comparative study. *J. Hazard. Mater.* 141 (2007), 8-16.