

مقایسه فرایندهای انعقاد الکتریکی و فتواکسیداسیون UV/O₃ در حذف رنگزای اسید آبی ۱۱۳

بی‌تا آیتی^۱ پریسا حسن‌زاده^۲ رویا نایبی‌گاوگانی^۳

(دریافت ۸۹/۱۲/۲۸ آخرین اصلاحات ۹۰/۸/۱۴ پذیرش ۹۰/۸/۱۵)

چکیده

روزانه میلیون‌ها لیتر پساب رنگی توسط صنایع مختلف تولید می‌شود که این پسابها باعث بروز مسائل محیط زیستی می‌شوند. هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه قابلیت حذف رنگزای اسید آبی ۱۱۳ یکی از پرمصرف‌ترین رنگزاهای نساجی، با استفاده از دو فرایند انعقاد الکتریکی و فتواکسیداسیون UV/O₃ در شرایط ناپیوسته بود. در روش انعقاد الکتریکی، آزمایش‌ها با استفاده از الکترودهای آهن صورت گرفت و تأثیر دانسیته جریان، زمان الکترولیز، pH و غلظت رنگزا و الکترولیت مورد بررسی قرار گرفت. در روش فتواکسیداسیون UV/O₃ تأثیر مقدار ازن، توان تابش، زمان، pH و غلظت رنگزا تعیین و بهینه‌سازی شد. آزمایش‌ها در شرایط بهینه در روش انعقاد الکتریکی نشان داد که با اعمال دانسیته جریان ۴۴ آمپر بر متر مربع در pH معادل ۶/۵ و غلظت الکترولیت ۳ گرم در لیتر، بیش از ۹۰ درصد از رنگزای پساب با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پس از ۵ دقیقه کاسته می‌شود در حالی که در روش فتواکسیداسیون UV/O₃ در pH برابر ۹، توسط ۴ گرم بر ساعت ازن و توان مؤثر تابش ۱۵ mW/cm² پس از ۱۵ دقیقه تنها ۷۰ درصد رنگزا با غلظت ۱۵ ppm حذف می‌گردد. طبق نتایج حاصل، روش انعقاد الکتریکی قابلیت بهتری نسبت به روش فتواکسیداسیون UV/O₃ دارد. اگر چه این روش با تجهیزات ساده راه‌اندازی شده و تا حدی اقتصادی است ولی مشکل تولید لجن را به‌دنبال دارد. لذا با توجه به وضعیت صنعت باید روش مناسب را انتخاب نمود.

واژه‌های کلیدی: رنگزای اسید آبی ۱۱۳، انعقاد الکتریکی، فتواکسیداسیون UV/O₃

Comparison of Electro-Coagulation and Photo-Oxidation UV/O₃ Processes in Removal of Acid Blue 113

Bita Ayati¹ Parisa Hassanzadeh² Roya Nayebi Gavvani³

(Received Mar. 19, 2011 Revised Nov. 5, 2011 Accepted Nov. 6, 2011)

Abstract

Every day million liters of dye wastewater is produced in different industries that cause environmental problems. The purpose of this research was to investigate the possibility of Acid Blue 113 removal, which is one of the most consumed textile dyes, by using electro-coagulation and photo-oxidation UV/O₃ processes in batch condition. Iron electrodes were used and the effect of current density, electrolysis time, pH, initial dye and electrolyte concentrations on dye removal were evaluated. Regarding photo-oxidation UV/O₃ process, parameters including ozone dosage, light power, time, pH and dye concentration were determined and optimized. The results in the optimum conditions showed that in the electro-coagulation method, over 90 percent of 100 mg/L dye was removed after 5 minutes in the applied current density of 44 mA/m², pH of 6.5 and electrolyte concentration of 3 g/L. However, in the photo-oxidation UV/O₃ process, only 70 percent of 15 mg/L dye was removed after 15 minutes in pH of 9, 4 g/h of ozone and 15 mW/cm² of power. According to the results, electro-coagulation method had better capability in comparison to photo-oxidation UV/O₃ process. Although, the first method was operated with simple equipments and was more economical but had still sludge producing remained. Therefore, according to the type of industry, the proper method should be selected.

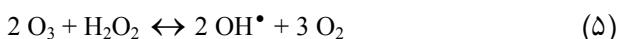
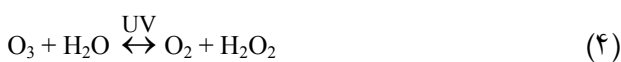
Keywords: Acid Blue 113, Electro-Coagulation, Photo-Oxidation UV/O₃.

1. Assoc. Prof. of Civil and Env. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran
(Corresponding Author) (+98 21) 82883328 ayati_bi@modares.ac.ir
2. Ph.D. Student of Civil and Env. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran
3. M.Sc. Student of Civil and Env. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (نویسنده
مسئول) ۸۲۸۸۳۳۲۸ (+۹۸ ۲۱) ayati_bi@modares.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ادامه منجر به پدیده انعقاد و ایجاد لجن می‌شود، حذف می‌کنند [۱۶]. این فرایند با وجود محدودیتهایی مانند نیاز به انرژی زیاد و کم بودن عمر مفید الکترودها، به لحاظ داشتن ویژگی‌هایی از جمله طراحی ساده سیستم و هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری کمتر، یکی از مؤثرترین روشهای تصفیه آب و پساب بوده و در سالهای اخیر به‌طور گسترده‌ای برای تصفیه پساب رنگی به‌خصوص رنگزاهای محلول و نامحلول اسیدی و آزو مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷].

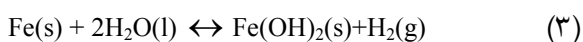
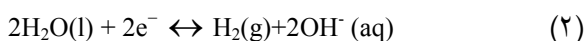
اساس فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، تولید رادیکال آزاد هیدروکسیل است که بیشترین کارایی را در اکسیداسیون ترکیبات آلی مقاوم دارد. فرایند UV/O_3 یکی از مؤثرترین روشهای اکسیداسیون پیشرفته است که در حضور اشعه ماوراء بنفش طبق واکنش‌های زیر باعث تخریب ساختار مولکولی ماده رنگزا می‌شود [۱۸].



اسید آبی ۱۱۳ جزء رنگزاهای آزوی اسیدی است و یکی از پرمصرف‌ترین رنگزاهای مورد استفاده در صنایع نساجی است [۱۹]. عامل رنگ این ترکیب (N=N)، در ناحیه مرئی جذب دارد در حالی که حلقه‌های آروماتیک بنزن، فنل و نفتالین در ناحیه UV جذب بالایی دارند [۲۰]. در مطالعات اخیر روشهای مختلفی به‌منظور معدنی‌سازی رنگزای مذکور صورت گرفته که نشان دهنده توانایی کاهش بار آلی محلول رنگی است [۲۱ و ۲۲]. به‌عنوان مثال شو و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰ با استفاده از رزین نانو ذرات صفر ظرفیتی آهن، در pH محدوده ۲ تا ۳، با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در مدت زمان ۲۰ دقیقه به راندمان حذف ۱۰۰ درصد دست یافته‌اند [۲۳]. انوشا و همکاران نیز در سال ۱۳۸۸ با استفاده از فرایند ازن‌زنی و اکسیداسیون با TiO_2/UV توانسته‌اند برای غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در زمان ماند ۶۰ دقیقه، به ترتیب در pHهای ۱۲ و ۳ به حذف ۹۵/۵ و ۸۶/۲ درصد برسند [۲۴]. شو و همکاران در سال ۲۰۰۵ با استفاده از فرایند اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 ، با غلظت اولیه ۴۶/۵۳ میلی‌مولار در pH برابر ۵/۵، راندمان حذف ۹۵ درصد را گزارش کرده‌اند [۲۵]. موتاکومار^۴ و سلوالومار^۵ در سال ۲۰۰۴ با استفاده از ازن‌زنی با غلظتهای ۵۴/۸ و ۱۱۷/۵ میلی‌گرم در لیتر ازن، برای غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر رنگزا، pH معادل ۷ و مدت زمان

رنگزاهای آلی مصنوعی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. رنگزاهای آزو دسته بزرگی از این ترکیبات هستند که پایداری زیاد و قابلیت سرطان‌زایی بالایی دارند، لذا حذف و تصفیه آنها از اهمیت بسیار برخوردار است [۱]. روشهای تصفیه متنوع فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای حذف رنگزا امکان‌پذیر است مانند جذب، فیلتراسیون غشایی، گیاه پالایی^۱، سونولیز^۲ یا تصفیه با امواج صوتی، انعقاد و لخته‌سازی، ازن‌زنی، کاربرد عوامل رنگ‌بر و اکسیدکننده نظیر پرمنگنات پتاسیم، الکتروشیمیایی، فنتون و فتوفنتون، فتوشیمیایی و فتوکاتالیستی، اکسیداسیون پیشرفته و بیولوژیکی و یا تلفیقی از آنها [۲-۱۲]. اما اغلب بهبود کیفیت رنگها که ناشی از پایداری ساختار مواد رنگزای مورد استفاده و ایجاد کمپلکس‌های قوی است، سبب مقاوم شدن آنها در برابر تجزیه بیولوژیکی و تصفیه متداول مانند جذب سطحی و انعقاد و لخته‌سازی می‌شود [۱۳]. به‌این دلیل در سالهای اخیر کاربرد روشهای نوینی به‌منظور حذف رنگزاهای سخت تجزیه‌پذیر بررسی شده که از جمله آنها فرایند انعقاد الکتریکی و فتواکسیداسیون UV/O_3 است. آنچه که در این روشها حائز اهمیت است، هزینه فرایند و کارایی مناسب آنها در حذف این دسته از آلاینده‌ها است.

در حالت کلی، انعقاد پدیده‌ای است که در آن ذره‌های باردار موجود در سوسپانسیون کلوئیدی بر اثر برخورد متقابل با یون‌های مخالف، خنثی شده، به‌صورت توده‌ای در آمده و در نهایت رسوب می‌کنند. در فرایند انعقاد الکتریکی، عوامل انعقاد (هیدروکسیدهای آهن یا آلومینیوم) با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای فلزی شناور در محلول، طی واکنش‌های اکسایش-کاهش زیر در سطح الکترودها تولید می‌شوند [۱۴].



به‌دلیل مزایای خاص دو فلز آهن و آلومینیوم از جمله ارزان قیمت بودن و نامحلول بودن هیدروکسیدهای آنها در آب و pH خنثی، در فرایند انعقاد الکتریکی از صفحات الکترودی از جنس این دو فلز استفاده می‌شود [۱۵]. مکانیسم حذف آلاینده‌ها به‌این صورت است که هیدروکسیدهای آهن تشکیل شده در فاز آبی به‌صورت یک سوسپانسیون ژلاتینی باقیمانده و آلودگی‌های پساب را به‌وسیله کمپلکس کردن یا نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی که در

³ Shu et al.

⁴ Muthukumar

⁵ Selvalumar

¹ Phytoremediation

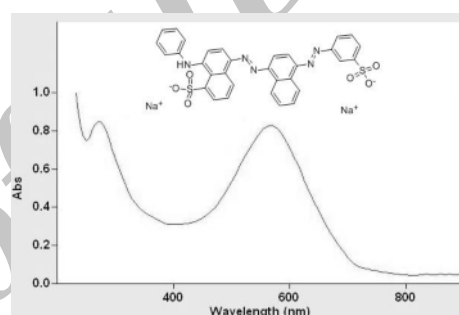
² Sonolysis

۱۴ دقیقه به ترتیب به راندمان حذف ۸۷/۸ و ۹۸/۷ درصد دست یافته‌اند [۲۶].

هدف این تحقیق، مطالعه و مقایسه قابلیت دو روش انعقاد الکتریکی و فتواکسیداسیون UV/O₃ در رنگبری و معدنی‌سازی ترکیب دی‌آزوی اسید آبی ۱۱۳ بود که در هر دو فرایند تأثیر pH، غلظت اولیه رنگزا، مصرف انرژی در شرایط بهینه و زمان و علاوه بر آنها در فرایند اول دانسیته جریان، غلظت الکترولیت و در فرایند دوم توان تابش و مقدار ازن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

در طی تحقیق ماده رنگزای اسید آبی ۱۱۳، با نام تجاری ASR، فرمول مولکولی C₃₂H₂₁N₃Na₂O₆S₂، وزن مولکولی ۶۸۱ گرم بر مول، عدد شاخص رنگزای ۲۶۳۶۰ و طول موج جذبی ۵۶۷ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- ساختار و طیف جذبی رنگزای اسید آبی ۱۱۳

۱-۲- انعقاد الکتریکی

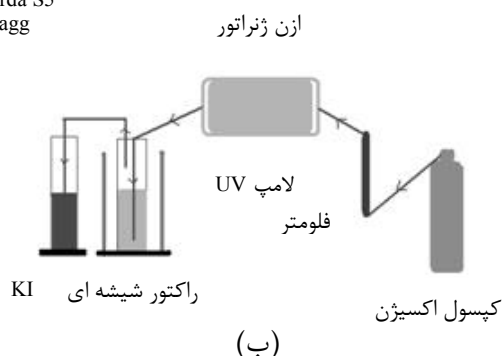
در این مرحله از تحقیق از یک راکتور به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر با الکترودهای آهن (کاتد و آنود) هر یک به ابعاد ۴/۵ در ۲/۵ سانتی‌متر و به فاصله ۱/۴ سانتی‌متر از یکدیگر برای محلول محتوی رنگزا به حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر استفاده شد (شکل ۲-الف). با روشن کردن منبع تغذیه و اعمال جریان ثابت، واکنش در سطح الکترودها با تولید هیدروکسیدهای آهن صورت گرفت. لخته‌های هیدروکسید تولیدی، ابتدا اندازه کوچکی داشته و در بالای ستون قرار گرفتند ولی بعد از مدتی به یکدیگر چسبیده و با تولید لخته‌های

بزرگ‌تر، شروع به ته‌نشینی کردند. در حین ته‌نشینی قسمت اعظم مواد رنگزا جذب لخته‌ها شده و حذف شدند. در آزمایش‌های انجام شده، ابتدا به منظور تعیین دانسیته جریان یا شدت جریان اعمالی بر واحد سطح کاتد که از عوامل اصلی راندمان حذف است، نمونه‌های رنگزا با غلظت ۵۰ ppm، زمان ۵ دقیقه و الکترولیت کلرید سدیم با غلظت ۲ گرم در لیتر و pH طبیعی رنگزا تهیه و جریان‌های مختلف ۰/۱ تا ۱/۱ آمپر اعمال شدند. سپس اثر pH، زمان الکترولیز (مدت زمان اعمال اختلاف پتانسیل مورد نظر بین آنود و کاتد که باعث برقراری شدت جریان ثابتی در مدار الکتریکی می‌شود) و نیز غلظت رنگزا و الکترولیت مورد بررسی قرار گرفتند. در آزمایش‌های صورت گرفته، نمونه‌های رنگزا با غلظت‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ ppm و pHهای ۳، ۵/۵، ۶/۵، ۷/۵ و ۱۱ با الکترولیت با غلظت‌های ۱/۵، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر و جریان‌های ۰/۱ تا ۱/۱ آمپر به منظور تعیین شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفت.

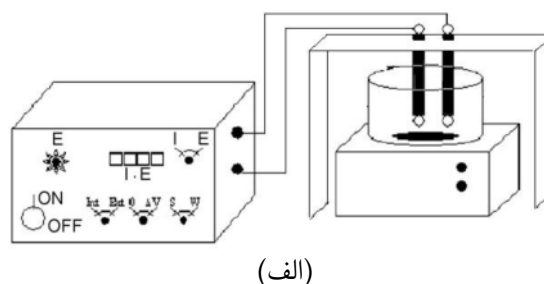
۲-۲- فتواکسیداسیون UV/O₃

در این مرحله از تحقیق که به موازات مرحله اول انجام شد، ابتدا گاز اکسیژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد از ازن ژنراتور آردا^۱ عبور داده شد و برای تعیین میزان جریان گاز از روتامتر راگ^۲ استفاده شد. ازن تولید شده از کف وارد راکتور شیشه‌ای به حجم ۱/۹۶ لیتر و مازاد آن از بالای راکتور به ظرف حاوی یدید پتاسیم با غلظت دو نرمال به منظور خنثی‌سازی و پیشگیری از خطرات احتمالی وارد شد. در اطراف راکتور، لامپ‌های ۸ وات UV شرکت پرتونیک با فاصله ۳ سانتی‌متر به صورت عمودی نصب شدند (شکل ۲-ب). در آزمایش‌های صورت گرفته، نمونه‌های رنگزا با غلظت‌های ۵، ۱۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ppm و pHهای ۵، ۹ و ۱۱ با مقدار ازن ۲، ۴ و ۶ گرم بر ساعت و توان‌های تابش مؤثر ۱۵، ۷/۵ و ۲۲/۵ mW/cm² در مدت زمان ۱۰۵ دقیقه به منظور تعیین شرایط بهینه، تصفیه شدند.

¹ Arda S5
² Ragg



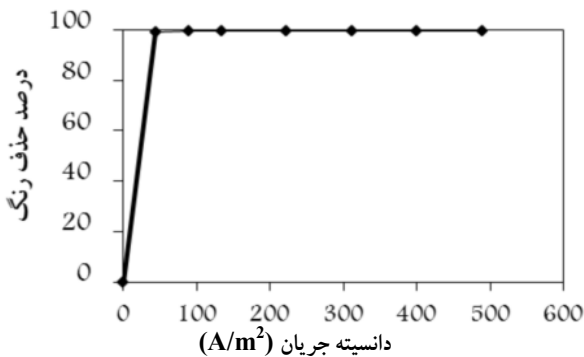
(ب)



(الف)

شکل ۲- شمای کلی سیستم الف- انعقاد الکتریکی ب- فتواکسیداسیون UV/O₃

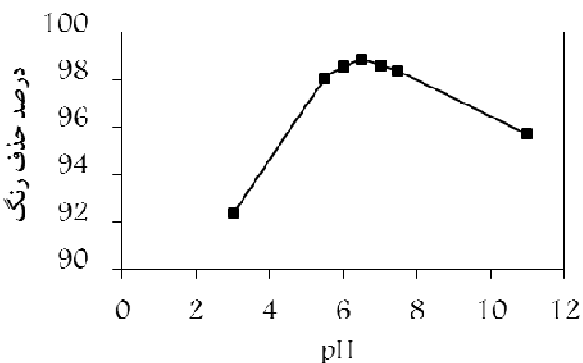
چگالی جریان ۴۴/۴ آمپر بر متر مربع به عنوان میزان بهینه در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه منبع تغذیه دقت کافی در اعمال جریان‌های کمتر از ۰/۱ آمپر را نداشت، جریان‌های پایین‌تر مورد بررسی قرار نگرفت.



شکل ۳- تأثیر دانسیته جریان بر راندمان حذف رنگزا در فرایند انعقاد الکتریکی

۳-۱-۲- بررسی اثر pH

نتایج تأثیر pH اولیه محلول به عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر بر راندمان حذف آلاینده‌ها در فرایند انعقاد الکتریکی در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین حذف در pH حدود خنثی اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- تأثیر pH بر راندمان حذف رنگزا در فرایند انعقاد الکتریکی

با کاهش یا افزایش pH، راندمان حذف کاهش می‌یابد زیرا در pH‌های اسیدی به دلیل غلظت بالای یون H^+ ، هیدروکسیدهای تولید شده از احیای آب در کاتد به سرعت خنثی شده و راندمان تولید هیدروکسید فلزی که عامل اصلی حذف رنگ محلول است، کاهش می‌یابد. همچنین در pH‌های قلیایی کاهش راندمان حذف را می‌توان با توجه به واکنش ۳ به این صورت توجیه کرد که طبق اصل لوشاتلیه با افزایش غلظت هیدروکسید، واکنش به سمت چپ جابه‌جا می‌شود به طوری که در غلظت‌های زیاد یون هیدروکسید، راندمان واکنش احیای آب افت کرده و در نتیجه باعث کاهش

تمام آزمایش‌ها در دمای ۲۲ تا ۲۴ درجه سلسیوس تا سه مرتبه تکرار شدند که روش‌های اندازه‌گیری براساس کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب بودند [۲۷]. لازم به ذکر است که میزان انحراف نسبی^۱ داده‌ها کمتر از ۲/۳۳ درصد بود که حاکی از میزان تکرارپذیری بالای داده‌ها است. همچنین برای تعیین فرایند مناسب، میزان مصرف انرژی در هر یک از غلظت‌های مورد آزمایش به ازای حذف هر ppm (میلی‌گرم در لیتر) آلاینده طبق رابطه ۶ محاسبه شد [۲۴]

$$\text{Energy Consumption} / C = \frac{W.t}{(C_{in} - C_{out})} \quad (6)$$

که در این رابطه

W برق مصرف شده برحسب کیلووات، t زمان تابش برحسب ساعت، Energy consumption/C انرژی مصرف شده برای حذف هر ppm آلاینده برحسب کیلووات ساعت به ازای هر C_{in} ، ppm غلظت اولیه و C_{out} غلظت نمونه برحسب میلی‌گرم در لیتر است.

دستگاه‌های عمده مورد استفاده در مراحل مختلف آزمایش شامل اسپکتروفوتومتر DR4000 مدل هچ^۲، منبع تغذیه DC مدل HY-5030E محصول کشور چین، مولتی‌متر مدل GDM-356 ساخت کشور تایوان، pH متر^۳، ترازوی دیجیتال کرن^۴ مدل PLS360-3 و مواد مورد استفاده، رنگزای اسید آبی^۵، کلرید سدیم، اسید سولفوریک، هیدروکسید سدیم ساخت کارخانه مرک^۵ آلمان و نیز الکترودهای آهنی ST 37 بودند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱-۱- انعقاد الکتریکی

۳-۱-۱-۱- اثر دانسیته جریان

نتایج این مرحله از تحقیق در شکل ۳ به عنوان نمونه برای غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر رنگزا، در مدت زمان ۵ دقیقه و در حضور الکترولیت کلرید سدیم با غلظت ۲ گرم در لیتر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت جریان اعمالی و در نتیجه میزان دانسیته جریان الکتریکی، غلظت یون‌های فلزی تفکیک شده از الکترود آند زیادتر می‌شود که این امر باعث تولید مقدار بیشتری از لخته‌های هیدروکسید فلزی و در نتیجه افزایش راندمان حذف رنگزا می‌گردد. به دلیل نزدیکی راندمان حذف برای جریان‌های ۰/۱ تا ۱/۱ آمپر، جریان ۰/۱ آمپر و یا به عبارتی

¹ Relative Standard Deviation (RSD)

² HACH

³ Metrohm

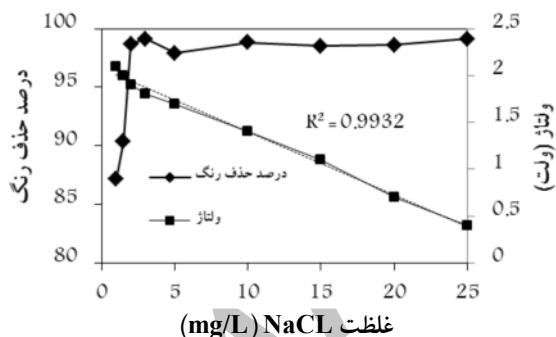
⁴ Kern

⁵ Merck

همان طور که مشاهده می‌شود تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف بالای ۹۰ درصد بوده ولی بعد از آن افت پیدا کرده است زیرا فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط ثابت، باعث ایجاد مقدار مشخصی از لخته‌های هیدروکسید آهن می‌شود که عامل اصلی حذف مولکول‌های رنگزا از محلول به دلیل پدیده جذب سطحی هستند. ولی این ظرفیت محدود بوده و تا غلظت مشخصی از مولکول‌های رنگی امکان پذیر است. لذا با توجه به شرایط بهینه، سیستم قادر به حذف ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر با راندمان بالای ۹۰ درصد است و طی آن می‌توان به حد استاندارد رنگزا برای تخلیه به محیط دست یافت.

۳-۱-۵- بررسی اثر غلظت الکترولیت

در فرایند انعقاد الکتریکی، از نمک NaCl به عنوان الکترولیت حامل برای تأمین هدایت الکتریکی لازم در محلول استفاده شد. طبق نتایج حاصل، افزایش غلظت الکترولیت تا ۳ گرم در لیتر باعث بالا رفتن قابل ملاحظه راندمان حذف شد ولی در غلظتهای بالاتر تقریباً ثابت ماند (شکل ۷). از طرفی افزایش غلظت الکترولیت باعث کاهش یکنواخت ولتاژ لازم به منظور حصول شدت جریان معین گردید. لذا غلظت ۳ گرم در لیتر از نمک NaCl به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفته شد که نتایج مشابهی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۲۸].



شکل ۷- تأثیر غلظت الکترولیت بر راندمان حذف رنگزا و ولتاژ در فرایند انعقاد الکتریکی

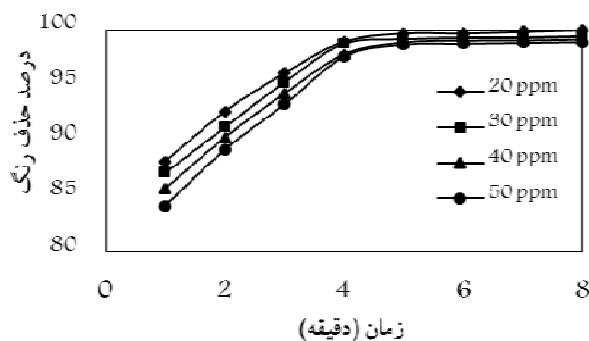
مقایسه حذف رنگزاهای مختلف با روش انعقاد الکتریکی نشان می‌دهد که با وجود ساختار پیچیده‌تر، رنگزای اسید آبی ۱۱۳ در قیاس با سایر مواد، راندمان حذف بالایی داشته که در زمان و چگالی جریان پایین‌تری نیز رخ داده است. به عنوان نمونه، آل بویه و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸، برای ۵۰ میلی‌گرم در لیتر اسید قرمز ۱۴ پس از ۴ دقیقه در pH معادل ۶/۵ و جریان ۱۰۲ آمپر بر

¹ Aleboyeh et al.

دانسته جریان می‌شود. متعاقب آن راندمان تولید یون آهن در واکنش اکسیداسیون آند آهنی نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به حذف بیش از ۹۹ درصد در pH طبیعی رنگزا، pH معادل ۶/۵ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد و برای آزمایش‌های بعدی هیچگونه تنظیم pH صورت نگرفت.

۳-۱-۳- بررسی اثر زمان الکترولیز

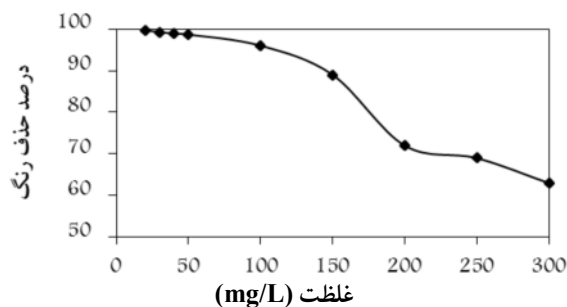
طبق نتایج حاصل از اثر زمان الکترولیز، افزایش این پارامتر از ۱ تا ۵ دقیقه در غلظتهای مختلف منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در راندمان حذف شد اما پس از آن تغییر چندانی نداشت (شکل ۵). بنابراین مدت زمان ۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه تحت شرایط چگالی جریان ۴۴/۴ آمپر بر متر مربع و pH بهینه ۶/۵ انتخاب شد.



شکل ۵- تأثیر زمان الکترولیز بر راندمان حذف رنگزا در فرایند انعقاد الکتریکی

۳-۱-۴- بررسی اثر غلظت رنگزا

به منظور تعیین غلظت بهینه رنگزا در شرایط بهینه حاصل از آزمایش‌های قبل یعنی چگالی جریان ۴۴/۴ آمپر بر متر مربع، زمان الکترولیز ۵ دقیقه و pH طبیعی ۶/۵، غلظتهای ۲۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر رنگزا مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.

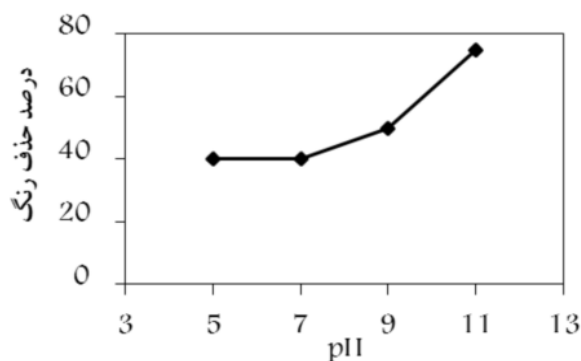


شکل ۶- تأثیر غلظت اولیه محلول بر راندمان حذف رنگزا در فرایند انعقاد الکتریکی

متر مربع، راندمان حذف ۹۱ درصد و کاشفی الاصل و همکاران در سال ۲۰۰۶، برای ۵۰ میلی‌گرم در لیتر اسید زرد ۳۶ پس از ۶ دقیقه در pH برابر ۸ و جریان ۱۲۷/۸ آمپر بر متر مربع راندمان حذف ۸۳ درصد را گزارش کرده‌اند [۲۹ و ۳۰].

۲-۳- اکسیداسیون پیشرفته UV/O₃ ۱-۲-۳- بررسی اثر pH

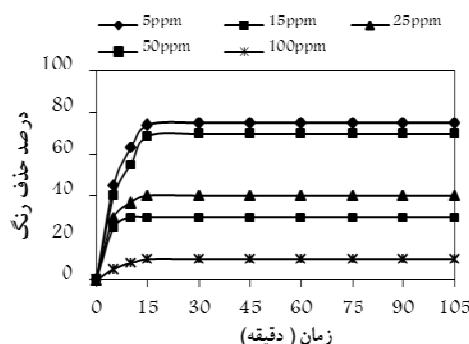
همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، در pH های قلیایی به دلیل تجزیه بیشتر از ن طبق واکنش‌های ۴ و ۵، راندمان حذف رنگزا بالاتر است. البته با وجود بالا بودن راندمان حذف در pH های ۹ و ۱۱، به منظور کاهش سود مصرفی و همچنین خنثی‌سازی آسان‌تر محلول رنگزا پس از تصفیه، pH معادل ۹ به عنوان pH بهینه انتخاب و در آزمایش‌های بعدی مورد بررسی بیشتر قرار گرفت.



شکل ۸- تأثیر pH بر راندمان حذف رنگزا در فرایند فتواکسیداسیون UV/O₃

۲-۲-۳- بررسی اثر زمان

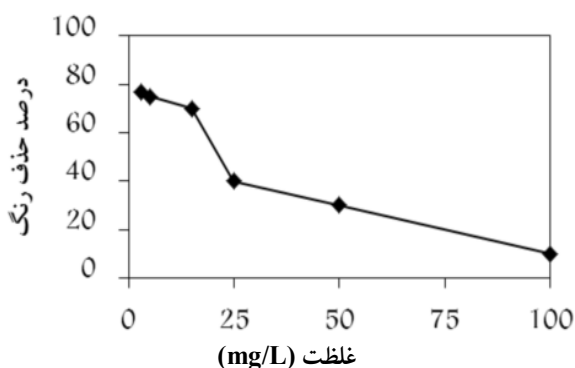
طبق نتایج حاصل از شکل ۹ پس از ۱۵ دقیقه از زنی راندمان حذف در غلظت‌های مختلف تغییری نداشته و لذا این زمان برای از زنی کافی و مناسب بوده و به عنوان زمان بهینه در ادامه آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت.



شکل ۹- تأثیر زمان بر راندمان حذف رنگزا در فرایند فتواکسیداسیون UV/O₃

۳-۲-۳- بررسی اثر غلظت رنگزا

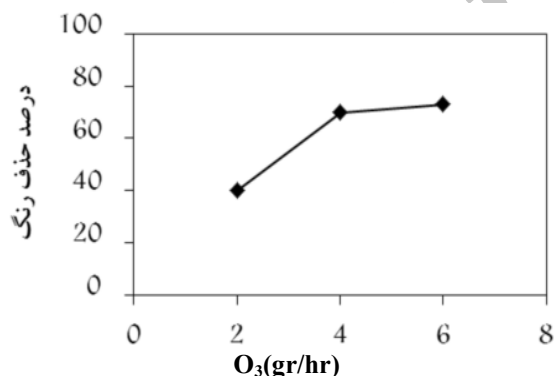
مطابق شکل ۱۰، هرچه غلظت رنگزا بیشتر شود به دلیل تیره شدن رنگ محلول، میزان عبور نور کمتر شده و در نتیجه راندمان حذف به دلیل کم شدن تولید رادیکال هیدروکسیل کاهش می‌یابد. لذا برای غلظت ۳ ppm و ۵ بیشترین راندمان حذف رنگزا برابر ۷۵ درصد به دست آمد اما با اختلاف کمی غلظت ۱۵ ppm به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.



شکل ۱۰- تأثیر غلظت اولیه محلول بر راندمان حذف رنگزا در فرایند فتواکسیداسیون UV/O₃

۳-۲-۴- بررسی اثر مقدار ازن

مطابق شکل ۱۱، میزان حذف در مقادیر ۲، ۴ و ۶ گرم بر ساعت ازن به ترتیب ۴۰، ۷۰ و ۷۳ درصد بود که به منظور کاهش مصرف انرژی و به دلیل اختلاف کم در میزان راندمان حذف، مقدار ۴ گرم بر ساعت به عنوان مقدار بهینه ازن تزریقی انتخاب شد.



شکل ۱۱- تأثیر مقدار ازن بر راندمان حذف رنگزا در فرایند فتواکسیداسیون UV/O₃

۳-۲-۵- بررسی اثر توان‌های مختلف تابش

طبق نتایج حاصل از شکل ۱۲، راندمان حذف رنگزا برای لامپ با توان مؤثر ۰.۷/۵ mW/cm²، ۳۰ درصد و با توان‌های مؤثر ۱۵ mW/cm² و ۲۲/۵ حدود ۷۰ درصد بود. بر این اساس، افزایش توان تا حدی مشخص می‌تواند تولید رادیکال هیدروکسیل

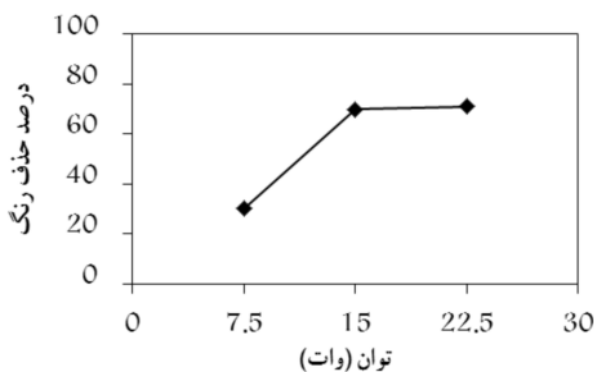
روش مناسب انتخاب شود.

۴- نتیجه گیری

گسترش روز افزون واحدهای رنگرزی در صنایع نساجی که مصرف آب قابل ملاحظه‌ای دارند، منجر به تولید حجم زیادی پساب حاوی مواد آلی رنگزا می‌شوند. در این تحقیق رنگبری رنگزای اسید آبی ۱۱۳ مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به نتایج حاصل، قابلیت روشهای الکتروشیمیایی شامل انعقاد الکتریکی و اکسیداسیون شیمیایی شامل UV/O₃ به‌عنوان فرایندی مؤثر در جهت کاهش این آلاینده را به اثبات رساند. مطابق نتایج، در فرایند انعقاد الکتریکی، با اعمال دانسیته جریان ۴۴ آمپر بر متر مربع در pH معادل ۶/۵ و غلظت الکترولیت ۳ گرم در لیتر، بیش از ۹۰ درصد از رنگزا با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پس از ۵ دقیقه حذف شد. در حالی که در روش فتواکسیداسیون UV/O₃ در pH برابر ۹، توسط ۴ گرم بر ساعت ازن و توان مؤثر تابش ۱۵ mW/cm² پس از ۱۵ دقیقه تنها ۷۰ درصد رنگزا با غلظت ۱۵ ppm حذف گردید. همچنین انرژی مصرفی به‌ازای هر میلی‌گرم در لیتر حذف ماده رنگزا، توسط فرایند انعقاد الکتریکی $5/2 \times 10^{-3} \text{ W.min/ppm}$ بود که بسیار پایین‌تر از انرژی مصرفی در فرایند UV/O₃ معادل $1/4 \times 10^4 \text{ W.min/ppm}$ بود. طبق نتایج حاصل، روش انعقاد الکتریکی قابلیت بهتری نسبت به روش دوم دارد. اگر چه روش اول با تجهیزات ساده راه‌اندازی شده و تا حدی اقتصادی است ولی مشکل دفع لجن را به‌دنبال دارد. لذا با توجه به وضعیت صنعت باید روش مناسب را انتخاب نمود.

را افزایش دهد. لذا به‌منظور کاهش مصرف انرژی، مقدار ۱۵ وات به‌عنوان توان تابش بهینه انتخاب شد.

نتایج حاصل تا حدودی مشابه دستاوردهای مطالعات محققان دیگر است. به‌عنوان نمونه گال^۱ در سال ۲۰۰۹ در بررسی قابلیت فرایند UV/O₃ در حذف ۲۰ میلی‌گرم در لیتر Reactive Yellow 145 و Reactive Red 194 در pH ۷ تا ۱۱ به راندمان ۸۵ درصد دست یافته است [۳۱]. توان تابش و غلظت ازن مصرفی به‌ترتیب ۲۰ mW/cm² و ۱۸ گرم بر ساعت بوده است.



شکل ۱۲- تأثیر توان تابشی بر راندمان حذف رنگزا در فرایند فتواکسیداسیون UV/O₃

۳-۲-۶- مقایسه دو سیستم

در جدول ۱ کارایی روشهای مختلف حذف این ماده مقایسه شده که ملاحظه می‌شود روش انعقاد الکتریکی قابلیت بهتری نسبت به روش دوم دارد اما با توجه به وضعیت صنعت و شرایط موجود باید

¹ Gul

جدول ۱- مقایسه روشهای مختلف در حذف رنگزا اسید آبی ۱۱۳

روش حذف	غلظت رنگزا (ppm)	pH	غلظت ماده افزودنی	زمان (min)	راندمان	مرجع
انعقاد الکتریکی	۱۰۰	۶/۵	۲ gr/L	۵	۹۰	تحقیق حاضر
UV/O ₃	۱۵	۹	توان = ۱۵ mW/cm ² ازن = ۴ gr/h	۱۵	۷۰	حاضر
کاربرد رزین نانو ذرات آهن صفر	۱۰۰	۲-۳	۵۰/۸ (mg/gr)	۲۰	۱۰۰	۲۳
ازن زنی	۱۰۰	۱۲	-	۶۰	۹۵/۴۷	۲۴
TiO ₂ /UV	۱۰۰	۳	۰/۴ gr/L	۶۰	۸۶/۲	۲۴
UV/H ₂ O ₂	۴۶/۵۳ میلی‌مولار	۵/۵	۲۳/۲۷ میلی‌مولار	<۲۵	۹۵	۲۵
ازن زنی	۵۰	۷	۵۴/۸ ۱۱۷/۵	۱۴	۸۷/۸ ۹۸/۷	۲۶

- 1- Dafale, N., Agrawal, L., Kapley, A., Meshram, S., Purohit, H., and Wate, S. (2010). "Selection of indicator bacteria based on screening of 16S rDNA metagenomic library from a two-stage anoxic-oxic bioreactor system degrading dyes." *J. of Bioresource Technology*, 101, 476-484.
- 2- Gupta, V.K., and Suhas, A. (2009). "Application of low-cost adsorbents for dye removal: A review." *J. of Environmental Management*, 90, 2313-2342.
- 3- Pazdzior, K., Klepacz-Smólka, A., Ledakowicz, S., Sójka-Ledakowicz, J., Ska, Z., and Z_ yła, R. (2009). "Integration of nano-filtration and biological degradation of textile wastewater containing Azo dye." *J. of Chemosphere*, 75, 250-255
- 4- Kagalkar, A.N., Jagtap, U.B., Jadhav, J.P., Bapat, V.A., and Govindwar, S.P. (2009). "Biotechnological strategies for phytoremediation of the sulfonated Azo dye Direct Red 5B using *Blumea malcolmii* Hook." *J. of Bioresource Technology*, 100, 4104-4110.
- 5- Onat, T., Tuğba, Gümüşdere, H., Güvenç, A., Dönmez, G., and Mehmetoğlu, Ü. (2010). "Decolorization of textile Azo dyes by ultra-sonication and microbial removal." *Desalination*, 255, 154-158.
- 6- Silva, A.C., Pic, J.S., Sant'Anna, Jr G.L., and Dezotti, M. (2009). "Ozonation of Azo dyes (Orange II and Acid Red 27) in saline media." *J. of Hazardous Materials*, 169, 965-971.
- 7- Aleboyeh, A., Olya, M.E., and Aleboyeh, H. (2009). "Oxidative treatment of Azo dyes in aqueous solution by potassium permanganate." *J. of Hazardous Materials*, 162, 1530-1535.
- 8- Wang, X., Jia, J., and Wang, Y. (2010). "Electrochemical degradation of reactive dye in the presence of water jet cavitation." *J. of Ultrasonics Sonochemistry*, 17, 515-520.
- 9- Lucas, M.S., and Peres, J.A. (2006). "Decolorization of the Azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation." *J. of Dyes and Pigments*, 71, 236-244.
- 10- Leghari Sajjad, A.K., Shamaila, S., Tian, B., Chen, F., and Zhang, J. (2010). "Comparative studies of operational parameters of degradation of Azo dyes in visible light by highly efficient WO_x/TiO₂ photocatalyst." *J. of Hazardous Materials*, 177, 781-791.
- 11- Elmorsi, T.M., Riyad, Y.M., Mohamed, Z.H., Abd El Bary, H.M.H. (2010). "Decolorization of Mordant red 73 Azo dye in water using H₂O₂/UV and photo-Fenton treatment." *J. of Hazardous Materials*, 174, 352-358.
- 12- Gou, M., Qu, Y., Zhou, J., Ma, F., and Tan, L. (2009). "Azo dye decolorization by a new fungal isolate, *Penicillium* sp. QQ and fungal-bacterial cocultures." *J. of Hazardous Materials*, 170, 314-319.
- 13- Alinsafia, A., Khemisa, M., Ponsa, M.N., Leclerca, J.P., and Yaacoubi, A. (2005). "Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater." *J. of Chemical Engineering and Processing*, 44(4), 461-470.
- 14- Bhatti, M.S., Reddy, A.S., and Thukral, A.K. (2009). "Electro-coagulation removal of Cr (VI) from simulated wastewater using response surface methodology." *J. of Hazardous Materials*, 172, 839-846.
- 15- Chang, E., Hsing, H., Ko, Ch., and Chiang, P. (2007). "Decolorization, mineralization, and toxicity reduction of acid orange 6 by iron-sacrificed plates in the electrocoagulation process." *J. of Chemical Technology and Biotechnology*, 82, 488-495.
- 16- Martinez-Huitle, C.A., and Enric, B. (2009). "Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods." *J. of A General Review*, 87(3-4), 105-145.
- 17- Chen, G. (2004). "Electrochemical technologies in wastewater treatment: Separation and purification." *J. of Technology*, 38(1), 11-41.
- 18- Klavarioti, M., Mantzavinos, D., and Kassinos, D. (2009). "Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes." *J. of Environ. Int.*, 35, 402-417.

- 19- Saravanan, M., Nurani, P.S., and Meenatchisundaram, S. (2006). "Kinetics of heterogeneous photocatalytic degradation of reactive dyes in an immobilized TiO₂ photocatalytic reactor." *J. of colloid Interface Sci.*, 295(1), 159-164.
- 20- Saravanan, M., Nurani, P.S., and Meenatchisundaram, S. (2010). "Treatment of Acid Blue 113 dye solution using iron electrocoagulation." *J. of CLEAN-Soil, Air, Water*, 38(5-6), 565-571.
- 21- Rahmani, A.R., and Samarghandi, M.R. (2008). "Electrocoagulation treatment of color solution containing colored index Eriochrome Black T." *J. of Water and Wastewater*, 69, 52-59. (In Persian)
- 22- Jafarzadeh, N., and Daneshvar, N. (2006). "Treatment of textile wastewater containing basic dyes by electrocoagulation process." *J. of Water and Wastewater*, 57, 22-29. (In Persian)
- 23- Shu, H.Y., Chang, M.C., Chen, C.C., and Chen, P.E. (2010). "Using resin supported nano zero-valent iron particles for decoloration of Acid Blue 113 Azo dye solution." *J. of Hazardous Materials*, 184(1-3), 499-505.
- 24- Anousha, M., Samadi, M., Samarghandi, M., Hoseini, N., and Khodadi, M. (2009). "Comprision of advanced oxidation processes "ozonation" with TiO₂/UV to remove acidic dyes "Acid Black 10B, Acid cyanin 5R." *12th Conference of Health*, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. (In Persian)
- 25- Shu, H.Y., Chang, M.Ch., and Fan, H.J. (2005). "Effects of gap size and UV dosage on decolorization of C.I. Acid Blue 113 wastewater in the UV/H₂O₂ process." *J. of Hazardous Materials*, 18(1-3) 205-211.
- 26- Muthukumar, M., and Selvakumar, N. (2004). "Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation." *J. of India Dyes and Pigments*, 62, 221-228.
- 27- Greenberg, A.E., Eaton, A.D., and Mary Ann, H.F. (2005). *Standard methods for the examination of water & wastewater*, 21st Ed., APHA., AWWA., WPCF., Washington, DC., USA.
- 28- Daneshvar, N., Bagherzadeh, M., and Jafarzadeh, N. (2005). "Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electro-coagulation and investigation of the effect of electrodes arrangement." *10th Iranian Chemical Engineering Congress*, Sistan and Baluchestan, Iran, 4044-4056. (In Persian)
- 29- Aleboye, A., Daneshvar, N., and Kasiri, M.B. (2008). "Optimization of C.I. Acid Red 14 Azo dye removal by electrocoagulation batch process with response surface methodology." *J. of Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 827-832.
- 30- Kashiefialasl, M., Khosravi, M., Marandi, R., and Seyyedi, K. (2006). "Treatment of dye solution containing colored index acid yellow 36 by electro-coagulation using iron electrodes." *Int. J. of Environ. Sci. and Technology*, 2(4), 365-371.
- 31- Gül, S., and Özcan, Ö. (2009). "Degradation of reactive Red 194 and Reactive Yellow 145 Azo dyes by O₃ and H₂O₂/UV-C processes." *J. of Chemical Engineering*, 155, 684-690.