دانشکده شیمی
گروه شیمی کاربردی

پایان نامه

برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ شیمی کاربردی

عنوان

تثبیت نانو ذرات ZnO بر روی الکترود استیل ضدزنگ به روش الکتروفورز و حذف ماده رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط آن در حضور میدان الکتریکی

استاد راهنما

دکتر سهیل عابر

استاد مشاور

دکتر علیرضا ختائی

پژوهشگر

رباب سلطانی جیقه

بهمن 1389

نام خانوادگی دانشجو: سلطانی جیقه **نام**: رباب

عنوان پایان نامه: تثبیت نانو ذراتZnO بر روی الکترود استیل ضدزنگ به روش الکتروفورز و حذف ماده رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط آن در حضور میدان الکتریکی

استاد راهنما: دکتر سهیل عابر

استاد مشاور: دکتر علیرضا ختائی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: شیمی **گرایش**: شیمی کاربردی **دانشگاه**: دانشگاه تبریز

دانشکده: **دانشکده** شیمی **تاریخ فارغ التحصیلی**: 1389/11/20 **تعداد صفحه**: 127

کلید واژه ها: تثبیت؛ فرآیند فتوکاتالیستی ارتقا یافته با میدان الکتریکی ؛ فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته؛ مدل لانگمیر – هنشلوود؛ Reactive Navy Blue SP-BR

چکیده:

بازترکیبی بین الکترون ـ حفره‌های تولید شده توسط نور، عامل اصلی در کاهش بازده فرآیندهای فتوکاتالیستی است. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در جهت کاهش بازترکیبی بین الکترون و حفره انجام شده است. اعمال میدن الکتریکی به آندی که ذرات فتوکاتالیست روی آن تثبیت شده، می‌تواند به طور مؤثری بازترکیبی بین الکترون و حفره را کاهش داده و راندمان فرآیند فتوکاتالیستی را افزایش دهد. برای بررسی اثر میدان الکتریکی بر روی حذف فتوکاتالیستی، ماده نیمه‌رسانای اکسید روی به عنوان فتوکاتالیست انتخاب و روی الکترود استیل ضدزنگ تثبیت شد. روش مورد استفاده برای تثبیت نانوذرات اکسید روی، فرآیند الکتروفورز بود و تصاویر SEM از سطح الکترود قبل و بعد از تثبیت نشان داد که ذرات اکسید روی به طور یکنواخت تمام سطح فلز را می‌پوشانند. ماده رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR به عنوان ماده آلاینده در بررسی اثر میدان الکتریکی بر حذف فتوکاتالیستی توسط فیلم اکسیدروی تثبیت شده، انتخاب شد. در این مطالعه اثر پارامترهای مختلف مانند غلظت اولیه آلاینده، ولتاژ اعمالی و جنس الکترود کار بر روی فرآیند فتوکاتالیستی در حضور میدان الکتریکی بررسی شد. سینتیک حذف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR با استفاده از مدل لانگمیر ـ هنشلوود توضیح داده شده است. مقادیر ثابت تعادل جذب سطحی (K_{ads}) و ثابت سرعت سینتیکی واکنش سطحی (k_c) برای حذف فتوکاتالیستی در حضور میدان برابر با $0/157 mg^{-1} l$ و $0/359\ mg\ l^{-1}\ min^{-1}$ به دست آمد. نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید نیز بر روی الکترود استیل ضدزنگ به روش الکتروفورز تثبیت و اثر میدان الکتریکی بر حذف فتوکاتالیزوری آنها نیز بررسی شد. اثر پارامترهایی مانند غلظت اولیه آلاینده، ولتاژ اعمالی و جنس الکترود کار برای حذف فتوکاتالیستی در حضور میدان الکتریکی برای فیلم تیتانیم دی‌اکسید نیز بررسی گردید.

Surname: Soltani-Jigheh **Name**: Robab

Thesis title: Immobilization of ZnO nanoparticales on stainless steel electrode and investigation of Reactive Navy Blue SP-BR dye removal in the presence of electrical field

Supervisor: Dr. S. Aber **Advisor**: Dr. A. R. Khataee

Degree: Master of Science **Major**: Chemistry **Field**: Applied Chemistry

University: University of Tabriz **Faculty**: Chemistry **Graduation date**: 2011/01/09

Pages: 127

Keywords: Immobilization, Electro-assisted Photocatalysis, Advanced Oxidation Processes, Langmuir-Hinshelwood model, Reactive Navy Blue SP-BR

Abstract

Recombination between photogenerated electron-holes is the main factor that limits photocatalytic efficiency. Recently many efforts have been done to reduce the recombination between electron-holes. Applying an electrical field across an anode on which the photocatalyst particles are immobilized can effectively reduce the recombination between electron-holes and increase photocatalytic efficiency. To investigate the effect of electrical field on photocatalytic degradation, ZnO semiconductor was used as a photocatalyst material and was immobilized on stainless steel. The Electrophoretic deposition method was used for immobilizing the ZnO particles. The SEM images from steel surface before and after immobilization showed that ZnO particles cover the whole metal surface. The Reactive Navy Blue SP-BR dye was used as a model contaminant to investigate the effect of electrical field in the photocatalytic degradation by immobilized ZnO film. In the present study, the effects of operational parameters such as initial pollutant concentration, applied voltage and the material of the working electrode on the electro-assisted photocatalysis process were discussed. The degradation of Reactive Navy Blue SP-BR dye was explained using Langmuir-Hinshelwood model. The values of adsorption equilibrium constant (K_{ads}) and the kinetic rate constant of surface reaction (k_c) for electro-assisted degradation were calculated. The values were k_{ads}= 0.157 mg^{-1} l and k_c= 0.359 mg l^{-1} min^{-1}. As an additional work TiO_2 nanoparticles were immobilized on the stainless steel electrode by electrophoresis method and the effect of electrical field on its photocatalytic degradation was investigated. The effect of some operational parameters such as initial pollutant concentration, the applied voltage and the material of the working electrode in electro-assisted photocatalytic degradation by TiO_2 film were studied, too.

University of Tabriz
Faculty of Chemistry
Department of Applied Chemistry

Dissertation for Receipt of a Master's Degree in Applied Chemistry

Title

Immobilization of ZnO nanoparticles on stainless steel electrode and investigation of Reactive Navy Blue SP-BR dye removal in the presence of electrical field

Supervisor
Dr. S. Aber

Advisor
Dr. A. R. Khataee

Researcher

Robab Soltani-Jigheh

February 2011

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و بررسی منابع

1-1- مقدمه 1
1-2- آلاینده‌های رنگی 2
1-2-1- مواد رنگزای راکتیو 2
1-2-2- مواد رنگزای آزو 3
1-2-3- Reactive Navy Blue SP-BR 3
1-4- فتوکاتالیست و فرآیند فتوکاتالیستی 5
1-5- اکسید روی 7
1-6- تثبیت نانوذرات فتوکاتالیستی 8
1-6-1- الکتروفورز 8
1-7- فرآیند فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 9
1-7-1- مکانیسم فرآیند اکسایش فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 10
1-8- بررسی سینتیک رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط فرآیندهای فتوکاتالیستی، الکترواکسیداسیون و فتوکاتالیست ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 12
1-9- استیل ضدزنگ 304 14
1-10- ولتامتری با روبش خطی پتانسیل 15
1-11- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه حذف آلاینده‌ها توسط فرآیند EAP 15
1-12- اهداف پروژه حاضر 20

فصل دوم: مواد و روش‌ها

2-1- مواد مورد استفاده 22

2-2- دستگاه های مورد استفاده 22
2-2- راکتور مورد استفاده برای واکنش فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 23
2-3- روش تثبیت با الکتروفورز 25
2-3-1- آماده سازی الکترودها 25
2-3-1-1- آماده‌سازی الکترودهای استیل ضدزنگ، آلومینیوم و مس 25
2-3-1-2- آماده‌سازی الکترود تیتانیم 25
2-3-2- روش تهیه سوسپانسیون برای تثبیت توسط فرآیند الکتروفورز 25
2-3-2-1- تهیه سوسپانسیون برای تثبیت نانو ذرات ZnO 25
2-3-2-2- تهیه سوسپانسیون برای تثبیت نانو ذرات TiO_2 26
2-3-3- تثبیت نانوذرات روی سطح الکترود کاتد 26
2-3-3-1- تثبیت نانو ذرات ZnO روی الکترودهای استیل ضدزنگ، تیتانیم، آلومینیوم و مس 26
2-3-3-2- تثبیت نانوذرات TiO_2 روی الکترودهای استیل ضدزنگ و تیتانیم 27
2-4- روش تهیه محلول مادر Reactive Navy Blue SP-BR 27
2-5- روش اندازه‌گیری غلظت Reactive Navy Blue SP-BR در محلول آبی 27
2-6- روش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR 29
2-6-1- روش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط فرآیند EAP 29
2-6-2- روش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط فرآیند PC 30
2-6-3- روش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط فرآیند EO 30
2-6-4- تعریف کسر تبدیل 31
2-7- آزمایش بررسی پایداری تثبیت 31
2-8- آزمایش بررسی نقش فتولیز در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR 32

2-9- آزمایش‌های مربوط به بررسی پارامترهای مؤثر بر رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط فرآیندهای PC، EAP و EO 32
2-9-1- آزمایش بررسی اثر غلظت اولیه ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR بر روی فرآیندهای PC، EAP و EO 33
2-9-2- آزمایش بررسی اثر مقدار اختلاف پتانسیل اعمالی بر روی فرآیند EAP و EO 33
2-9-3- آزمایش بررسی اثر جنس الکترود بر روی فرآیند EAP 33
2-10- آزمایش اثبات جداسازی الکترون و حفره طی فرآیند EAP 33
2-11- انجام تست ولتامتری خطی 34
2-12- روش توصیف نانوذرات اولیه با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس(XRD) 34
2-13- روش توصیف نانو ذرات قبل و بعد از عمل تثبیت با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) 35
2-14- روش توصیف نانوذرات اولیه با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) 36

فصل سوم: نتایج و بحث

3-1- آنالیز نانوذرات اکسیدروی اولیه 37
3-1-1- تعیین میانگین اندازه کریستالی نانوذرات اکسید روی اولیه توسط پراش اشعه X 37
3-1-2- بررسی نانوذرات اکسیدروی اولیه با استفاده از تصویر SEM 38
3-1-3- بررسی نانوذرات اکسیدروی اولیه با استفاده از تصویر TEM 38
3-2- بررسی میزان و نحوه‌ی تثبیت نانوذرات اکسید روی تثبیت شده روی الکترود استیل ضدزنگ 39
3-3- بررسی پایداری فیلم ZnO تثبیت شده روی الکترود استیل ضدزنگ 40
3-4- بررسی نقش فتولیز در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR 41
3-5- بررسی نتایج تست ولتامتری خطی 43
3-6- بررسی عوامل مؤثر در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR از توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیندهای PC ، EAP و EO 45

3-6-1- اثر غلظت‌های اولیه مختلف از آلاینده 45
3-6-1-1- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند PC 45
3-6-1-2- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EO 47
3-6-1-3- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EAP 49
3-6-1-4- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترودZnO/Steel در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP با غلظت‌های مختلف از آلاینده 51
3-6-2- بررسی تأثیر مقدار اختلاف پتانسیل اعمالی 54
3-6-2-1- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EO 54
3-6-2-2- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EAP 56
3-6-2-3- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel در سه سیستم مختلف EO،PC و EAP با اختلاف پتانسیل‌های مختلف اعمالی 59
3-6-3- بررسی تأثیر جنس بستر فتوکاتالیست 60
3-6-3-1- الکترود مس 60
3-6-3-2- الکترود آلومینیوم 63
3-6-3-3- الکترود تیتانیم 64
3-6-3-3- الف- رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR با استفاده از الکترود ZnO/Ti در سیستم PC 65
3-6-3-3- ب- رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR با استفاده از الکترود ZnO/Ti در سیستم EO 65
3-6-3-3- پ- رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR با استفاده از الکترود ZnO/Ti در سیستم EAP 66

3-6-3-3- ت- مقایسه رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزا با استفاده از الکترود ZnO/Ti در سه سیستم PC، EO و EAP 68
3-7- بررسی جداسازی الکترون از حفره در فرآیند رنگزدایی فتوکاتالیستی در حضور میدان الکتریکی 69
3-8- بررسی سینتیک رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیندهای PC، EAP و EO 71
3-8-1- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف بر ثابت سرعت ظاهری واکنش رنگزدایی فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 81
3-8-2- بررسی تأثیر جنس الکترود بستر فتوکاتالیست ZnO بر ثابت سرعت ظاهری واکنش رنگزدایی فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 82
3-9- محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط ZnO/Steel الکترود و با استفاده از فرآیندهای PC، EAP و EO 83
3-9-1- محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند PC 83
3-9-2- محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترودZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EO 84
3-9-3- محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel و با استفاده از فرآیند EAP 85
3-10- آنالیز ذرات تیتانیم دی‌اکسید اولیه 85
3-10-1- تعیین میانگین اندازه کریستالی نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید اولیه توسط پراش اشعه X 85
3-10-2- بررسی نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید اولیه با استفاده از تصویر SEM 86
3-11- بررسی میزان و نحوه تثبیت نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید تثبیت شده روی الکترود استیل ضدزنگ 87
3-12- بررسی عوامل مؤثر در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیندهای PC، EAP و EO 88
3-12-1- اثر غلظت‌های اولیه مختلف از آلاینده‌ها 88
3-12-1-1- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیند PC 89

3-12-1-2- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیند EO 90
3-12-1-3- بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه مختلف از Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیند EAP 92
3-12-1-4- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط TiO_2/Steel در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP با غلظت‌های مختلف از آلاینده 94
3-12-2- بررسی تأثیر مقدار اختلاف پتانسیل اعمالی 96
3-12-2-1- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیند EO 97
3-12-2-2- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیند EAP 98
3-12-2-3- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP با اختلاف پتانسیل‌های مختلف اعمالی 100
3-12-3- بررسی تأثیر جنس بستر فتوکاتالیست 102
3-12-3-1- الکترود تیتانیم 102
3-12-3-1- الف- رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزا با استفاده از الکترود TiO_2/Ti در سیستم PC 102
3-12-3-1- ب- رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزا با استفاده از الکترود TiO_2/Ti در سیستمEO 103
3-12-3-1- پ- رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزا با استفاده از الکترود TiO_2/Ti در سیستم EAP 104
3-12-3-1- ت- مقایسه رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزا با استفاده از الکترود TiO_2/Ti در سه سیستم PC، EO و EAP 105
3-13- بررسی سینتیک رنگزدایی از محلول حاوی مادهی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود TiO_2/Steel و با استفاده از فرآیندهای PC، EAP و EO 106
3-13-1- بررسی تأثیر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف بر ثابت سرعت ظاهری واکنش رنگزدایی فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 115

3-13-2- بررسی تأثیر جنس الکترود بستر فتوکاتالیست ZnO بر ثابت سرعت ظاهری واکنش رنگزدایی فتوکاتالیستی ارتقا یافته توسط میدان الکتریکی 117
3-14- محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیند رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط TiO_2 و با استفاده از فرآیندهای PC، EO و EAP 118
نتیجه گیری 119
پیشنهادها 120
منابع 121

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول1-1- فرمول ساختاری و خصوصیات ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR 4
جدول 1-2- ترکیب شیمیایی استیل ضدزنگ 304 14
جدول 3-1- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند فتولیز (شرایط عمل: بدون الکترود ZnO/Steel و $\Delta V = 0V$، تنها تحت تابش نورUV) 42
جدول 3-2- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V = 0$ V) 46
جدول 3-3- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی، $\Delta V = 4V$) 48
جدول 3-4- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V = 4V$) 50
جدول 3-5- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی، $[\text{Reactive Navy Blue SP-BR}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 55
جدول 3-6- کسر تبدیل رنگ Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $[\text{Reactive Navy Blue SP-BR}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 57
جدول 3-7- ساختار رنگ‌های مختلف مورد استفاده در بررسی تشکیل کمپلکس مس با آنها 63
جدول 3-8- کسر تبدیل ماده رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود ZnO/Ti، تحت تابش نور UV، $\Delta V = 0V$، $[\text{Reactive Navy Blue SP-}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 65
جدول 3-9- کسر تبدیل ماده رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Ti، تحت تاریکی، $\Delta V = 4V$، $[\text{Reactive Navy Blue SP-}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 66

جدول 3-10- کسر تبدیل رنگ Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل:الکترود ZnO/Ti، تحت تابش نور UV، $\Delta V= 4V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP- = 15\ mg\ l^{-1}$ $(BR]_0$ 67

جدول 3-11 - مقدار k_{obs} برای رنگزدایی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند PC در غلظت‌های مختلف از آلاینده (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=0V$) 72

جدول 3-12- مقدار k_{obs} برای رنگزدایی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند EO در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 72

جدول 3-13- مقدار k_{obs} برای رنگزدایی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند EAP در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V=4V$) 73

جدول3-14- مقدار k_{obs} برای واکنش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel ، $[Reactive\ = 15\ mg\ l^{-1}$ $Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0$ برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4V$) 74

جدول 3-15- مقادیر ثابت‌های لانگمیر- هنشلوود برای سیستم‌های PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 76

جدول 3-16- مقدار k_{obs} برای اختلاف پتانسیل‌های مختلف اعمالی در سیستم EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 81

جدول 3-17- مقدار k_{obs} برای الکترود کار با جنس متفاوت در سیستم EAP (شرایط عمل: فتوکاتالیست ZnO تحت تابش نور UV، $\Delta V= 4\ V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 82

جدول 3-18- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=0\ V$) 89

جدول 3-19- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تاریکی، $\Delta V= 4V$) 91

جدول 3-20- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V = 4V$) 93
جدول 3-21- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تاریکی، $[\text{Reactive Navy Blue SP-BR}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 97
جدول 3-22- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نور UV، $[\text{Reactive Navy Blue SP-BR}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 99
جدول 3-23- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Ti، تحت تابش نور UV، $\Delta V = 0V$، $[\text{Reactive Navy Blue SP-}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$ [BR]) 103
جدول 3-24- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Ti، تحت تاریکی، $\Delta V = 4V$، $[\text{Reactive Navy Blue SP-BR}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 103
جدول 3-25- کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در فواصل زمانی مشخص طی فرآیند EAP (شرایط عمل:الکترود TiO_2/Ti، تحت تابش نور UV، $\Delta V = 4V$، $[\text{Reactive Navy Blue}]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$ [SP-BR]) 104
جدول 3-26 - مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند PC در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نور UV، V $\Delta V=0$) 107
جدول 3-27 - مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EO در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 107
جدول 3-28 - مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EAP در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نور UV، V $\Delta V=4$) 108

جدول3-29- مقدار k_{obs} برای واکنش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP، (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel ، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0$ = 15 mg l^{-1}، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار ΔV=4V) 109

جدول 3-30- مقادیر ثابت‌های لانگمیر- هنشلوود برای سیستم‌های PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0$ = 15 mg l^{-1}، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار V ΔV=4) 111

جدول 3-31- مقدار k_{obs} برای اختلاف پتانسیل‌های مختلف اعمالی در سیستم EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نور UV، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0$ = 15 mg l^{-1}) 116

جدول 3-32- مقدار k_{obs} برای الکترود کار با جنس متفاوت در سیستم EAP (شرایط عمل: فتوکاتالیست TiO_2 تحت تابش نور UV، ΔV= 4V، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0$ = 15 mg l^{-1}) 118

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 1-1- مکانیسم عمومی پیشنهادی برای فتوکاتالیست 7
شکل 1-2- سیستم فتوالکتروکاتالیستی مورد استفاده در آزمایش فن و همکارانش 16
شکل 1-3- نتایج کورتیس و همکارانش در غیر فعال‌سازی کریپتوسپوریدیوم با استفاده از راکتور تیتانیم دی‌اکسید ارتقا یافته با میدان الکتریکی 18
شکل 1-4- سیستم PEEF مورد استفاده توسط جیانگ و همکارانش 19
شکل 2-1- راکتور مورد استفاده برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزا با استفاده از فرآیند EAP، شامل: (1) الکترود کاتد، (2) الکترود آند، (3) پایه چوبی، (4) لامپ UV، (5) همزن مغناطیسی، (6) منبع اعمال اختلاف پتانسیل، (7) آمپرومتر (جریان‌سنج) 24
شکل2-2 : طیف جذبی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در pH = 5/4 و $C_0 = 20\ mg\ l^{-1}$ 28
شکل2-3- نمودار کالیبراسیون محلول Reactive Navy Blue SP-BR در طول موج 597 nm و pH= 5/4 29
شکل 3-1- طیف XRD نمونه‌ی اکسیدروی فلوکا (ماده‌ی اولیه) 37
شکل 3-2- تصویر SEM نمونه‌ی اکسیدروی فلوکا (ماده‌ی اولیه) 38
شکل 3-3- تصویر TEM نمونه‌ی اکسیدروی فلوکا (ماده‌ی اولیه) 39
شکل 3-4- تصاویر SEM از روی سطح فلز استیل ضدزنگ (الف) قبل از تثبیت اکسید روی (ب) بعد از تثبیت اکسید روی 40
شکل 3-5- بررسی میزان پایداری فیلم اکسید روی تثبیت شده روی استیل ضدزنگ پس از شرکت در n آزمایش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزا در دو سیستم PC و EAP (شرایط عمل: برای هر دو سیستم الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم EAP مقدار $\Delta V=4V$) 41
شکل3-6- ولتامتری خطی برای محلول آب سه بار تقطیر با آند ZnO/steel، کاتد استیل ضدزنگ و کالومل اشباع به عنوان شاهد (شرایط عمل: محدوده ولتاژ mv 1- تا mv 2+ و سرعت اسکن mv/s 30 و $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 0\ mg\ l^{-1}$) 44

شکل3-7- ولتامتری خطی برای محلول رنگ با آند ZnO/steel، کاتد استیل ضدزنگ و کالومل اشباع به عنوان شاهد (شرایط عمل: محدوده ولتاژ mv 1- تا mv 2+ و سرعت اسکن mv/s 30 و $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 44
شکل 3-8- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=0\ V$) 47
شکل 3-9- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 49
شکل 3-10- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=4\ V$) 51
شکل 3-11- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 5\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 52
شکل 3-12- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 10\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 52
شکل 3-13- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 53
شکل 3-14- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 20\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 53
شکل 3-15- اثر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 56

شکل 3-16- اثر اختلاف پتانسیل‌های اعمالی مختلف در رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 58

شکل 3-17- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف EO،PC و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=2\ V$) 59

شکل 3-18- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف EO،PC و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=3\ V$) 60

شکل 3-19- ساختار ماده‌ی رنگزای C.I. Direct Blue 1 (بالا) و کمپلکس C.I. Direct Blue 76 (پایین) 61

شکل 3-20- تصاویر SEM از روی سطح فلز تیتانیم (الف) قبل از تثبیت اکسید روی (ب) بعد از تثبیت اکسید روی 64

شکل 3-21- مقایسه کسر تبدیل ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR با استفاده از الکترودهای ZnO/Steel و ZnO/Ti در سیستمEAP، (شرایط عمل: تحت تابش نور UV، $\Delta V= 4V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 67

شکل 3-22- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Ti، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 68

شکل3-23- منحنی‌های جریان ـ پتانسیل الکترود ZnO/Steel (a): تحت نور UV (b): تحت تاریکی (c): تفاضل منحنی‌های (a) و (b)، (شرایط عمل:الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0=15\ mg\ l^{-1}$، $\Delta V= 4V$) 70

شکل3-24- منحنی‌های جریان ـ پتانسیل الکترودداستیل‌ضدزنگ (a): تحت نور UV (b): تحت تاریکی (c): تفاضل منحنی‌های (a) و (b)، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0=15\ mg\ l^{-1}$، $\Delta V=4V$) 70

شکل 3-25- تعیین مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند PC در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V=0V$) 71
شکل 3-26- تعیین مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند EO در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تاریکی ، $\Delta V=4V$) 72
شکل 3-27- تعیین مقدار k_{obs} برای رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR توسط الکترود ZnO/Steel طی فرآیند EAP در غلظت‌های مختلف از آلاینده، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V=4V$) 73
شکل3-28- مقایسه k_{obs} برای واکنش رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP، (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel ، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4V$) 74
شکل 3-29- تغییرات $1/k_{obs}$ بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، تحت تابش نور UV، $\Delta V=0V$) 75
شکل 3-30- تغییرات $1/k_{obs}$ بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 75
شکل 3-31- تغییرات $1/k_{obs}$ بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EAP (شرایط عمل: فیلم فتوکاتالیست ZnO/Steel، تحت تابش نور UV، $\Delta V=4V$) 76
شکل 3-32- تغییرات k_{obs} بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، تحت تابش نور UV، $\Delta V=0V$) 77
شکل 3-33- تغییرات k_{obs} بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel، تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 78
شکل 3-34- تغییرات k_{obs} بر حسب غلظت اولیه Reactive Navy Blue SP-BR طی فرآیند EAP (شرایط عمل: فیلم فتوکاتالیست ZnO/Steel، تحت تابش نور UV، $\Delta V=4V$) 78
شکل 3-35- مقایسه مقادیر C/C_0 تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (شرایط عمل: فیلم فتوکاتالیست ZnO/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=0V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 79

شکل 3-36- مقایسه مقادیر C/C_0 تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (شرایط عمل: فیلم فتوکاتالیست ZnO/Steel تحت تاریکی، $\Delta V=4V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 80
شکل 3-37- مقایسه مقادیر C/C_0 تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (شرایط عمل: فیلم فتوکاتالیست ZnO/Steel تحت تابش نور UV، $\Delta V=4V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 80
شکل3-38- اثر اختلاف پتانسیل‌های مختلف بر ثابت سرعت ظاهری (k_{obs}) در سیستم EAP (شرایط عمل: الکترود ZnO/Steel ، تحت تابش نور UV، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 81
شکل3-39- اثر جنس الکترود کار بر ثابت سرعت ظاهری (k_{obs}) در سیستم EAP (شرایط عمل: فتوکاتالیست ZnO تحت تابش نور UV، $\Delta V=4\ V$، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$) 82
شکل 3-40- طیف نمونه تیتانیم دی‌اکسید مرک (نمونه اولیه) 86
شکل 3-41- تصویر SEM نمونه‌ی تیتانیم دی‌اکسید مرک (ماده‌ی اولیه) 87
شکل 3-42- تصاویر SEM از روی سطح فلز استیل ضدزنگ (الف) قبل از تثبیت تیتانیم‌دی‌اکسید (ب) بعد از تثبیت تیتانیم‌دی‌اکسید 88
شکل 3-43- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند PC (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=0\ V$) 90
شکل 3-44- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند EO (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تاریکی، $\Delta V=4V$) 92
شکل 3-45- اثر غلظت‌های اولیه مختلف ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در رنگزدایی از محلول حاوی آن طی فرآیند EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel تحت تابش نورUV، $\Delta V=4\ V$) 94
شکل 3-46- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف PC، EO و EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 5\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 95
شکل 3-47- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف EO،PC و EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 10\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 95
شکل 3-48- مقایسه میزان رنگزدایی از محلول حاوی ماده‌ی رنگزای Reactive Navy Blue SP-BR در سه سیستم مختلف EO،PC و EAP (شرایط عمل: الکترود TiO_2/Steel، $[Reactive\ Navy\ Blue\ SP\text{-}BR]_0 = 15\ mg\ l^{-1}$، برای سیستم‌های EO و EAP مقدار $\Delta V=4\ V$) 96