

تعیین کارایی و سازوکار حذف مواد رنگزای Acid Orange 7 (AO7) و Reactive Black 5 (RB5) با استفاده از پودر آهن از محیط های آبی:

مطالعه سنتتیک

علیرضا رحمانی^۱

منصور ضرابی^{*۲}

mansor62@gmail.com

محمد رضا سمرقندی^۳

عباس افخمی^۴

سعید عزیزیان^۵

حمید رضا غفاری^۶

تاریخ پذیرش: ۸۸/۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۲۵

چکیده

فاضلاب های صنایع نساجی و رنگرزی به دلیل دارا بودن انواع آلاینده های آلی و غیر آلی، یکی از عمده ترین منابع آلاینده محیط زیست به شمار می روند. تا کنون روش های مختلفی از قبیل انعقاد و لخته سازی، ازن زنی، فرآیند فنتون و سایر روش ها برای تصفیه این نوع از فاضلاب ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از پودر آهن به عنوان یک ماده ارزان قیمت و موثر که به آسانی در دسترس بوده و مورد استفاده قرار می گیرد، جهت حذف دو نوع ماده رنگزای AO7 و RB5 در سیستم ناپیوسته استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل pH (۳، ۵، ۷، ۹) و (۱۱)، زمان تماس (۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰ دقیقه)، میزان پودر آهن (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ g/L) و غلظت اولیه رنگ (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ mg/L) می باشد. همچنین نتایج حاصل از مطالعات سنتتیک با استفاده از نمودار های معادله

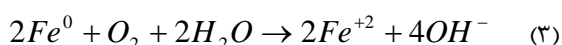
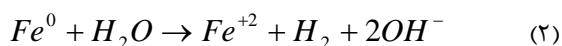
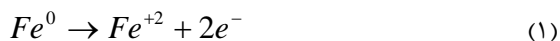
- ۱- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی البرز، کرج، ایران* (مسئول مکاتبات).
- ۳- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.
- ۴- استاد گروه شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه بوعلی سینای همدان، همدان، ایران.
- ۵- استاد گروه شیمی فیزیک، دانشکده شیمی، دانشگاه بوعلی سینای همدان، همدان، ایران.
- ۶- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران.

های سنتیک شبه درجه اول، شبه درجه دوم و شبه درجه اول اصلاح شده مقایسه گردید. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که کارایی حذف هر دو نوع رنگ با افزایش زمان تماس و میزان پودر آهن نسبت مستقیم و با افزایش pH نسبت معکوس دارد. افزایش غلظت اولیه رنگ باعث افزایش کارایی حذف رنگ AO7 گردیده، درحالی که در خصوص رنگ RB5، باعث کاهش کارایی حذف رنگ شد. همچنین تطبیق نتایج حاصل از آزمایشات بر روی معادلات سنتیک نشان داد که سنتیک حذف رنگ AO7 ($t^2 > 0.9798$) و رنگ RB5 ($t^2 > 0.9776$) از معادله شبه درجه اول پیروی می کند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از آزمایش ها، استفاده از پودر آهن به عنوان یک ماده ارزان قیمت و موثر در جهت حذف مواد رنگزا از فاضلاب های صنایع نساجی و رنگرزی پیشنهاد می گردد.

واژه های کلیدی: پودر آهن، Reactive Black 5, Acid Orange 7، سیستم ناپیوسته، سنتیک واکنش .

مقدمه

که این نوع فاضلاب ها به طور مناسبی تصفیه شود. روش های متداول از قبیل انعقاد و لخته سازی، فرآیندهای بیولوژیکی و رسوب دهی شیمیایی قادر نیستند به طور مناسبی این نوع از فاضلاب ها را تصفیه کنند (۱۰). از طرف دیگر فرآیندهای تصفیه پیش رفته از قبیل فرآیند فنتون، روش های فتوکاتالستی، ازن زنی و ... علی رغم کارایی مناسب، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی باشد. آهن صفر ظرفیتی از جمله عناصری است که با فراوانی بسیار زیاد در پوسته زمین یافت می شود. پودر آهن یک نوع عامل احیا کننده می باشد که به دلیل ارزان بودن، دسترسی آسان و موثر بودن تا کنون برای حذف انواع مختلفی از آلاینده ها از قبیل حشره کش ها، EDTA (۱۱)، تری کلرواتیلن (۱۲)، نیترات (۱۳)، ترکیبات نیترو بنزن (۱۴)، فنل (۱۵)، و سایر آلاینده های آلی و غیر آلی مورد استفاده قرار گرفته است. در محیط های آبی پودر آهن بر طبق واکنش های زیر اکسید شده و الکترون آزاد تولید می کند (۱۳ و ۱۶):

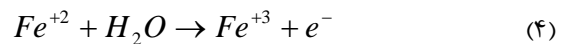


واکنش های بالا نشان می دهد که در هر واکنش دو الکترون آزاد تولید می شود که به عنوان عوامل احیا کننده عمل می کند. از طرف دیگر Fe^{+2} در محیط های آبی بر

گسترش روز افزون صنایع که در آن از انواع مختلفی از رنگ ها استفاده می شود، باعث شده است که فاضلاب حاصل از این صنایع بسیار رنگی بوده و همچنین حاوی طیف گسترده ای از مواد آلی غیر قابل تجزیه بیولوژیکی باشد (۱). این گونه فاضلاب ها به دلیل دارا بودن انواع مختلفی از آلاینده ها، یکی از منابع عمده آلوده کننده محیط زیست به شمار می رود (۲). فاضلاب های رنگی در صنایع مختلفی از جمله صنایع نساجی و رنگرزی، صنایع داروسازی، صنایع غذایی، تولید مواد آرایشی و بهداشتی، کاغذ سازی، چرم سازی و صنایعی از این قبیل تولید می شود (۳). اغلب رنگ های مورد استفاده در این صنایع از نوع رنگ های سنتتیک می باشند. معمولاً رنگ های سنتتیک به انواع رنگ های اسیدی، رنگ های راکتیو، رنگ های مستقیم، رنگ های بازی و سایر گروه ها تقسیم بندی می شود (۴). رنگ های آزو یکی از بزرگترین گروه رنگ های سنتتیک را به خود اختصاص داده که دارای یک یا تعداد بیشتری بانده آزو -N-N- می باشد (۵). تخمین زده می شود که سالانه در حدود ۵۰٪ رنگ های تولیدی در جهان (۷۰۰۰۰۰ تن) از نوع آزو باشد (۶ و ۷). در فرآیندهای رنگرزی، در حدود ۱۵ درصد از کل رنگ تولید شده وارد فاضلاب می شود و فاضلاب های رنگی به این صورت تشکیل می گردند (۸). رنگ های آزو به دلیل حلالیت بالا، هزینه کم، پایداری و تنوع رنگی بسیار زیاد در انواع مختلفی از صنایع مورد استفاده قرار می گیرد (۹). بنابراین با توجه به مخاطرات مربوط به رهاسازی فاضلاب های رنگی بدون اعمال فرآیندهای مناسب تصفیه به محیط زیست، ضروری است

غلظت 1000 mg/L از هر دو نوع رنگ تهیه گردید و سپس محلول های کاربردی با غلظت های 25 ، 50 ، 75 و 100 mg/L به صورت روزانه از محلول استوک تهیه شد. پودر آهن با اندازه موثر 150 میکرون (شرکت مرک آلمان) و بدون هیچ گونه عمل تصفیه مورد استفاده قرار گرفت. جهت تعیین حداکثر طول موج جذب، ابتدا محلول رنگ با غلظت 100 mg/L از هر دو نوع رنگ ساخته شد و سپس نمونه ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Shimadzo-1700, Japan) UV/VIS در محدوده طول موج 100 تا 800 نانومتر اسکن گردید و به این ترتیب حداکثر طول موج جذب برای هر دو نوع رنگ تعیین شد. با این روش حداکثر طول موج جذب برای رنگ های **Acid Orange 7** و **Reactive Black 5** به ترتیب 487 و 599 نانومتر به دست آمد. جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی کارایی حذف رنگ، یکی از پارامترها تغییر داده شده و سایر پارامترهای ثابت نگه داشته شد و به این صورت کارایی حذف، محاسبه گردید. در قسمت نتایج نحوه بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آورده شده است. برای مثال، جهت بررسی تاثیر میزان پودر آهن بر روی کارایی حذف، ابتدا 200 سی سی محلول رنگ با غلظت ثابت 50 mg/L در $\text{pH}=7$ برداشت گردید، سپس به ترتیب مقادیر $1/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 g/L پودر آهن به محلول اضافه شده و بر روی همزن مغناطیسی با سرعت 200 rpm (Hanna-Hi 190M, Singapore) چرخانده شد و بعد از زمان تماس 2 ساعت، مقدار باقی مانده رنگ با استفاده از اسپکتروفوتومتر در حداکثر طول موج جذب اندازه گیری گردید. این کار برای سایر پارامترها نیز تکرار شده است (۱۹). شمای کلی پایلوت مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است.

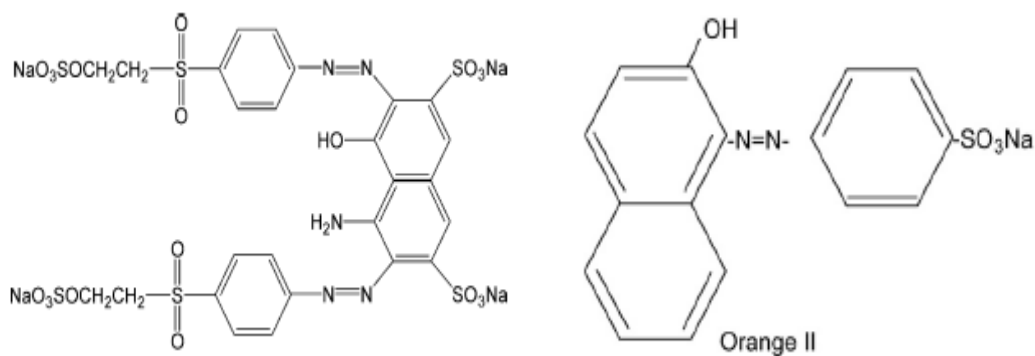
طبق واکنش های زیر به Fe^{+3} تبدیل شده و رسوب تشکیل می گردد (۱۷):



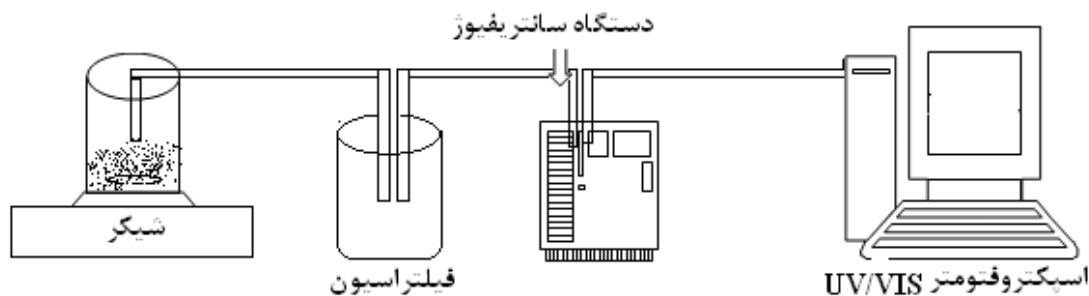
با تشکیل یون آهن سه ظرفیتی، زنجیره انتقال الکترون متوقف می شود. دلیل این امر تشکیل رسوب آهن سه ظرفیتی می باشد. برای غلبه بر این مشکل و تمیز نگه داشتن سطح آهن فلزی، معمولا واکنش ها در محیط های اسیدی انجام می گیرد (۱۸). با توجه به مشکلاتی که در مورد رنگ های در محیط نیست مورد اشاره قرار گرفت و همچنین مزایای آهن صفر ظرفیتی و کارایی بسیار بالای آن در حذف ترکیبات آلی (۱۲-۱۵)، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی کارایی حذف دو نوع رنگ آزو شامل **AO7** و **RB5** می باشد. هر دو نوع رنگ از گروه رنگ های آزو می باشد که یکی به عنوان شاخص یا اندیکاتور رنگ های آزو اسیدی و دیگری به عنوان شاخص رنگ های آزو راکتیو انتخاب گردیده است. در نهایت داده های حاصل از آزمایش ها با استفاده از معادله های سنتیک شبه نوع اول، شبه نوع دوم و شبه نوع اول اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت تا بهترین نوع معادله سنتیکی مشخص گردد.

مواد و روش ها

رنگ های مورد نظر از شرکت الوان ثابت (همدان، ایران) با درجه خلوص 97% تهیه گردید. ساختار شیمیایی رنگ های مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است. پارامترهای مختلفی از جمله pH (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱)، زمان تماس (۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰ دقیقه)، میزان پودر آهن ($1/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 g/L) و غلظت اولیه رنگ (25 ، 50 ، 75 و 100 mg/L) مورد بررسی قرار گرفت. جهت تنظیم pH (Sartorius PP-50) از اسید سولفوریک و سود یک نرمال استفاده گردید. جهت تهیه محلول رنگ، ابتدا محلول استوک با



شکل ۱- ساختار شیمیایی RB5 (b) و AO7 (a)



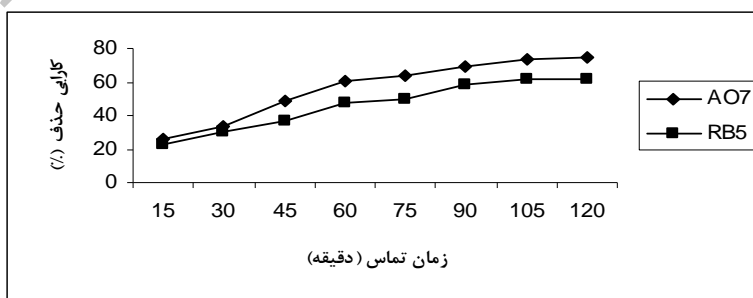
شکل ۲- شمای کلی پیلوت مورد استفاده در این تحقیق

نتایج و بحث

۱- تاثیر زمان تماس

گرفت. نمودار ۱ نتایج حاصل از تاثیر زمان تماس بر روی کارایی حذف رنگ را نشان می دهد. همان طوری که مشخص می باشد، با افزایش زمان تماس کارایی حذف رنگ افزایش می یابد و در فاصله زمانی ۱۰۵ تا ۱۲۰ دقیقه به تعادل می رسد.

جهت بررسی تاثیر زمان تماس، ۲۰۰ میلی لیتر محلول رنگ با غلظت ۵۰ mg/L در pH=7 در تماس با میزان پودر آهن ۱/۵ g/L قرار داده شد و نمونه برداری در فواصل زمانی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ دقیقه انجام

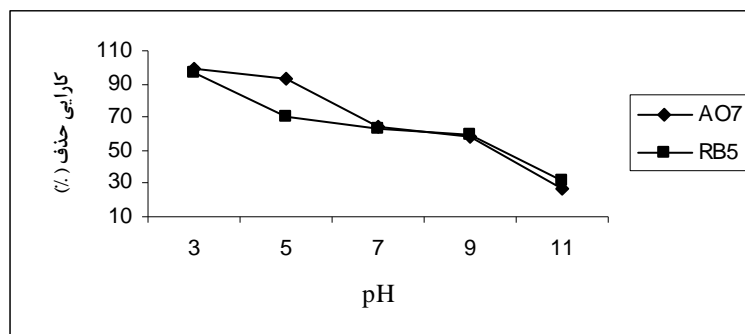


نمودار ۱- تاثیر زمان تماس بر روی کارایی حذف رنگ (pH=7، غلظت رنگ = ۵۰ mg/L و میزان پودر آهن = ۱/۵ g/L)

۲-تاثیر pH بر روی کارایی حذف رنگ

نتایج نشان داد که با افزایش pH کارایی حذف رنگ کاهش می یابد. همچنین حداکثر حذف رنگ در pH=۳ بدست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات زانگ و همکاران مطابقت دارد (۱۰).

در این مطالعه کارایی حذف رنگ در pH های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ۲۰۰ میلی لیتر محلول رنگ با غلظت ۵۰ mg/L در تماس با میزان پودر آهن ۱/۵ g/L قرار داده شد و در زمان تماس ثابت ۱۲۰ دقیقه نمونه برداری شده و غلظت باقی مانده رنگ مشخص گردید. نمودار ۲ تاثیر pH بر روی کارایی حذف رنگ را نشان می دهد.

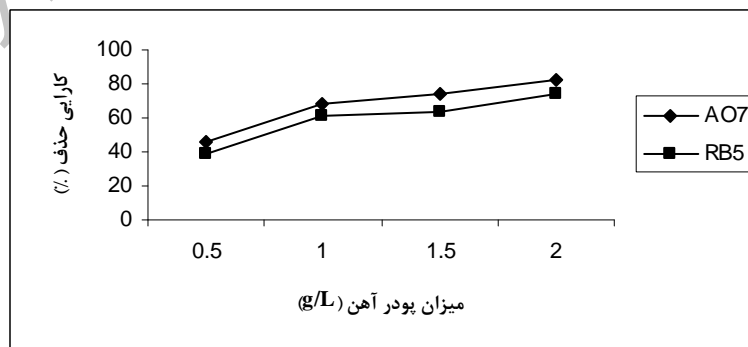


نمودار ۲-تاثیر pH بر روی کارایی حذف رنگ (غلظت رنگ = ۵۰ mg/L، زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و میزان پودر آهن = ۱/۵ g/L)

۳-تاثیر میزان پودر آهن

داده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش میزان پودر آهن کارایی حذف رنگ افزایش می یابد و حداکثر حذف در این مطالعه در میزان پودر آهن ۲ g/L به دست آمد.

جهت بررسی تاثیر میزان پودر آهن، محلول رنگ با غلظت ۵۰ mg/L در pH=۷ در تماس با پودر آهن با غلظت های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ g/L قرار داده شد و بعد از زمان تماس ۱۲۰ دقیقه نمونه برداری شده و غلظت نهایی رنگ تعیین گردید. نتایج حاصل از تاثیر میزان پودر آهن در نمودار ۳ نشان

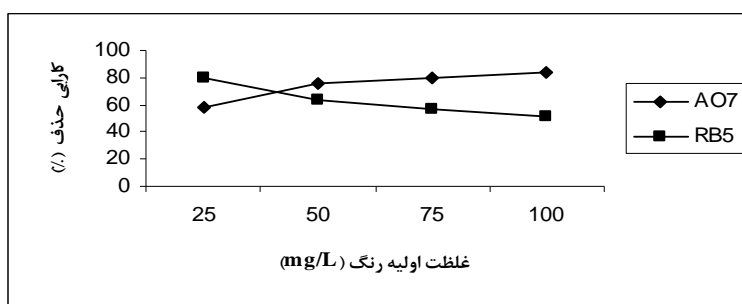


نمودار ۳-تاثیر دوز پودر آهن بر روی کارایی حذف رنگ (pH=۷، غلظت رنگ = ۵۰ mg/L و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه)

۴-تاثیر غلظت اولیه رنگ

غلظت اولیه رنگ های مورد استفاده اثر متفاوتی بر روی کارایی حذف رنگ نشان داد به طوری که با افزایش غلظت اولیه رنگ RB5 کارایی حذف رنگ کاهش، و با افزایش غلظت اولیه رنگ AO7 کارایی حذف رنگ افزایش داشته است.

جهت بررسی تاثیر غلظت اولیه رنگ بر روی کارایی حذف رنگ، آزمایش ها در غلظت های اولیه ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ mg/L از رنگ های مورد نظر در pH=7، میزان پودر آهن ۱/۵ g/L و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه انجام گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در نمودار ۴ نشان داده شده است. افزایش



نمودار ۴-تاثیر غلظت اولیه رنگ بر روی کارایی حذف (pH=7، زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و میزان پودر آهن = ۱/۵ g/L)

۵-معادلات سنتیک

تطابق دادن نتایج آزمایش ها بر روی معادله شبه درجه اول را نشان می دهد.

در این مطالعه جهت بررسی سنتیک حذف رنگ های RB5 و AO7 از سه نوع معادله سنتیک شبه درجه اول^۱، شبه درجه دوم^۲ و شبه درجه اول اصلاح شده^۳ استفاده گردید.

۵-۱ معادله سنتیک شبه درجه اول

شکل غیر خطی معادله شبه درجه اول در زیر نشان داده شده است (۲۰):

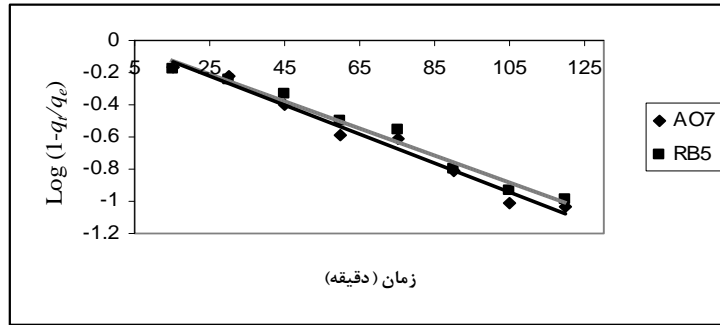
$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (5)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۵) در محدوده $t=0 \sim t$ و $q_t=0 \sim q_t$ رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{Log}\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = -\frac{k_1}{2.303}t \quad (6)$$

در این رابطه q_e و q_t به ترتیب مقدار ماده جذب شده بر حسب (mg/g) در حالت تعادل و در زمان t می باشد و k_1 نیز ثابت سرعت بر حسب (1/min) می باشد. نمودار ۵ نتایج حاصل از

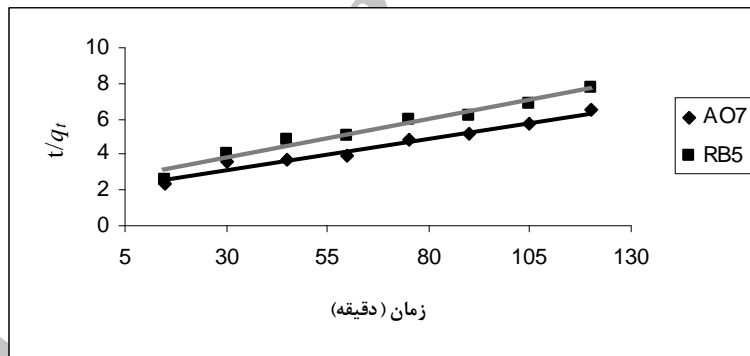
- 1 - Pseudo-first order
- 2- Pseudo-second order
- 3- Modified pseudo-first order



نمودار ۵- نتایج حاصل از تطابق داده های خام بر روی معادله شبه درجه اول

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (۸)$$

در این رابطه k_2 ثابت سرعت بر حسب (g/mg min) می باشد. با رسم مقادیر t/q_t در مقابل زمان تماس می توان مقادیر k_2 و q_e را به ترتیب از طریق شیب و عرض از مبدا منحنی بالا به دست آورد. نمودار ۶ نتایج حاصل از تطابق دادن نتایج آزمایش ها بر روی معادله شبه درجه دوم را نشان می دهد.



نمودار ۶- نتایج حاصل از تطابق داده های خام بر روی معادله شبه درجه دوم

با انتگرال گیری از رابطه (۹) در محدوده $t=0 \sim q_t=0$ رابطه زیر به دست می آید:

$$\ln\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) + \frac{q_t}{q_e} = -k_m t \quad (۱۰)$$

با رسم مقادیر $\ln\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) + \frac{q_t}{q_e}$ در مقابل زمان، می توان مقدار k_m را از طریق شیب معادله بدست آورد. نمودار ۷ نتایج حاصل از تطابق دادن نتایج آزمایش ها بر روی معادله شبه درجه اول اصلاح شده را نشان می دهد.

۵-۲- معادله شبه درجه دوم

رابطه کلی معادله شبه درجه دوم به صورت زیر می باشد:

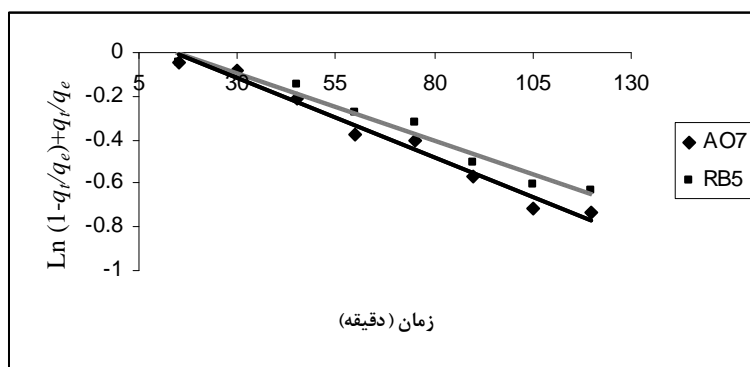
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (۷)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۷) در محدوده $t=0 \sim t$ و $q_t=0 \sim q_t$ رابطه زیر بدست خواهد آمد:

۵-۳- معادله شبه درجه اول اصلاح شده

معادله شبه درجه اول اصلاح شده نخستین بار به صورت تجربی توسط یانگ و همکاران مطرح گردیده است (۲۱). عزیزیان و همکاران معادله فوق را به صورت نظری و به شکل زیر بیان کرده اند (۲۲).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_m \frac{q_e}{q_t} (q_e - q_t) \quad (۹)$$



نمودار ۷- نتایج حاصل از تطابق داده های خام بر روی معادله شبه درجه اول اصلاح شده

در جدول ۱ و ۲ به ترتیب پارامترهای معادلات سینتیک برای رنگ AO7 و RB5 نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای معادلات سینتیک برای رنگ AO7

R^2	q_e	$k_m(1/min)$	$k_2(g/mg\ min)$	$k_1(1/min)$	
۰/۹۷۹۸	۲۰/۴۴۹	-----	-----	۰/۰۲۰۷	معادله شبه درجه اول
۰/۹۶۷۳	۲۸/۲۴۸	-----	۶×۱۰^{-۴}	-----	معادله شبه درجه دوم
۰/۹۷۷	۲۳/۸	۰/۰۰۷۲	-----	-----	معادله اصلاح شده شبه درجه اول

جدول ۲- پارامترهای معادلات سینتیک برای رنگ RB5

R^2	q_e	$k_m(1/min)$	$k_2(g/mg\ min)$	$k_1(1/min)$	
۰/۹۷۷۶	۱۷/۲۷۸	-----	-----	۰/۰۱۹۳	معادله شبه درجه اول
۰/۹۶۴۸	۲۲/۷۷۹	-----	$۷/۸۴۲۸ \times ۱۰^{-۴}$	-----	معادله شبه درجه دوم
۰/۹۷۱۲	۲۰/۷	۰/۰۰۶۲	-----	-----	معادله اصلاح شده شبه درجه اول

نتیجه گیری

آلی و غیر آلی خواهد شد (۱۳ و ۱۸). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس و میزان پودر آهن، کارایی حذف رنگ افزایش می یابد. علاوه بر آن افزایش غلظت اولیه ماده رنگزای AO7 باعث افزایش کارایی حذف گردید، در حالی که در مورد ماده رنگزای RB5 افزایش غلظت اولیه رنگ، کاهش بازده حذف را نشان می دهد. دلیل این امر می تواند به خاطر پیچیده بودن ساختار رنگ RB5 در مقایسه با رنگ AO7 باشد

در این بررسی کارایی پودر آهن در حذف دو نوع ماده رنگزای AO7 و RB5 به عنوان یک ماده موثر و ارزان قیمت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که با کاهش pH محلول، کارایی حذف رنگ افزایش می یابد. در pH پایین، سطح پودر آهن تمیز نگه داشته شده بنابراین بر روی سطح پودر آهن رسوب تشکیل نمی شود. در این حالت زنجیره انتقال الکترون ادامه یافته، باعث کاهش مواد

- Chemical Engineering Journal, 150(1):90-95.
7. Olak F, Atar N, Olgun A., 2009, Biosorption of acidic dyes from aqueous solution by *Paenibacillus macerans*: Kinetic, thermodynamic and equilibrium studies., Chemical Engineering Journal, 150(1):122-130.
 8. Merzouk B, Gourich B, Sekki A, Madani K, Vial C, Barkaoui M., 2009, Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electro-coagulation process, Chemical Engineering Journal, 149(1-3):207-214.
 9. Ong S-A, Uchiyama K, Inadama D, Yamagiwa K., 2009, Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland, Journal of Hazardous Materials, 165(1-3): 696-703.
 10. Zhang H, Zhang J, Zhang C, Liu F, Zhang D., 2009, Degradation of C.I. Acid Orange 7 by the advanced Fenton process in combination with ultrasonic irradiation, Ultrasonics Sonochemistry, 16(3):325-330.
 11. Gyliene O, Vengris T, Stoncius A, Nivinskiene O., 2008, Decontamination of solutions containing EDTA using metallic iron, Journal of Hazardous Materials, 159(2-3):446-451.
 12. Kim H, Hong H-J, Lee Y-J, Shin H-J, Yang J-W., 2008, Degradation of trichloroethylene by zero-valent iron immobilized in cationic exchange membrane, Desalination, 223(1-3):212-220.
 13. Chen Y-M, Li C-W, Chen S-S., 2005, fluidized zero valent iron bed reactor (۱۰۲). نتایج حاصل از مطالعات سنتتیک نیز نشان داد که سنتتیک حذف هر دو ماده رنگزای AO7 و RB5 از معادله شبه درجه اول پیروی می کند.
- در مجموع با توجه به نتایج حاصل، استفاده از پودر آهن به عنوان یک ماده موثر در جهت تصفیه فاضلاب های رنگی پیشنهاد می گردد.
- منابع**
1. Mok YS, Jo J-O, Whitehead JC., 2008, Degradation of an azo dye Orange II using a gas phase dielectric barrier discharge reactor submerged in water, Chemical Engineering Journal, 142:56-64.
 2. Renganathan S, Thilagaraj WR, Miranda LR, Gautam P, Velan M., 2006, Accumulation of Acid Orange 7, Acid Red 18 and Reactive Black 5 by growing *Schizophyllum commune*, Bioresource Technology, 97:2189-2193.
 3. Lu C-S, Chen C-C, Mai F-D, Li H-K., 2009, Identification of the degradation pathways of alkanolamines with TiO₂ photocatalysis, Journal of Hazardous Materials, 165(1-3):306-316.
 4. Ji P, Zhang J, Chen F, Anpo M, 2009, Study of adsorption and degradation of acid orange 7 on the surface of CeO₂ under visible light irradiation, Applied Catalysis B: Environmental, 85(3-4):148-154.
 5. Atia AA, Donia AM, Al-Amrani WA., 2009, Adsorption/desorption behavior of acid orange 10 on magnetic silica modified with amine groups, Chemical Engineering Journal, 150(1):55-62.
 6. Rauf MA, Qadri SM, Ashraf S, Al-Mansoori KM., 2009, Adsorption studies of Toluidine Blue from aqueous solutions onto gypsum,

19. AWWA, 1992, Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 20 th.
20. Azizian S., 2004, Kinetic models of sorption: a theoretical study, Journal of Colloids and Interface Science, 276:47-52.
21. Yang X, Al-Duri B., 2005, Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon, Journal of Colloids and Interface Science, 287:25-34.
22. Azizian S, Bashiri H., 2008, Adsorption kinetics at solid/solution interface: Statistical rate theory at initial times of adsorption and close to equilibrium, Langmuir, 24:11669-11676.
- for nitrate removal, Chemosphere, 59(6):753-759.
14. Xu W, Li P, Fan J., 2008, Reduction of nitrobenzene by the catalyzed Fe/Cu process, Journal of Environmental Sciences, 20(8):915-921.
15. Sanchez I, Stüber F, Font J, Fortuny A, Fabregat A, Bengoa C., 2007, Elimination of phenol and aromatic compounds by zero valent iron and EDTA at low temperature and atmospheric pressure, Chemosphere, 68(2):338-344.
16. Choe S, Liljestrand HM, Khim J., 2004, Nitrate reduction by zero-valent iron under different pH regimes, Applied Geochemistry, 19:335-342.
17. Son H-S, Im J-K, Zoh K-D., 2009, A Fenton-like degradation mechanism for 1,4-dioxane using zero-valent iron (Fe⁰) and UV light, Water Research, 43(5):1457-1463.
18. Huang YH, Zhang TC., 2004, Effects of low pH on nitrate reduction by iron powder, Water Research, 38:2631-2642.

Archive of SID