

جذب رنگ‌های اریتروزین و کارموزین قرمز از محلول‌های آبی با جاذب نانو اکسید مس:

بررسی سینتیکی و ترمودینامیکی

محمد کاظم محمدی

مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه شیمی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

## Adsorption of erythrosine and carmosine red dyes from aqueous solutions with nano copper oxide adsorbent: kinetic and thermodynamic study

Mohammad Kazem Mohammadi

Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Chemistry, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

### Abstract

In this study, copper oxide has been successfully used as a good and inexpensive adsorbent to remove erythrosine and carmosine red dyes from several aqueous solutions. The effect of various parameters such as pH, dye concentration, adsorbent amount, contact time and temperature on the removal process was investigated. The isothermal adsorption data can be interpreted with the Langmuir and Freundlich isotherm models. Values higher than 43.103 K and 10.162 mg / L for erythrosine and red carmosine indicate that copper oxide has a greater affinity for dyes than other adsorbents

**Keywords:** Copper nano oxide, erythrosine, red carmosine, adsorption

Received: 2022/01/22

Accepted: 2022/05/04

### چکیده

در این مطالعه، اکسید مس به‌عنوان یک جاذب خوب و ارزان برای حذف رنگ‌های اریتروزین و کارموزین قرمز از چندین محلول آبی با موفقیت معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای مختلف مانند pH، غلظت رنگ، مقدار جاذب، زمان تماس و دما بر فرآیند حذف بررسی شد. داده‌های هم‌دما جذب را می‌توان با مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ تفسیر کرد. مقادیر  $K$  بالاتر از ۴۳/۱۰۳ و ۱۰/۱۶۲ میلی‌گرم در لیتر برای اریتروزین و کارموزین قرمز نشان می‌دهد که اکسید مس در مقایسه با سایر جاذب‌ها میل ترکیبی بیشتری برای رنگ‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: نانو اکسید مس، اریتروزین، کارموزین قرمز، جذب.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴

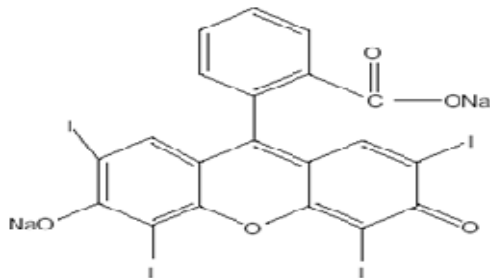
نویسنده مسئول: محمد کاظم محمدی

نشانی: اهواز، مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانو مواد، گروه شیمی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

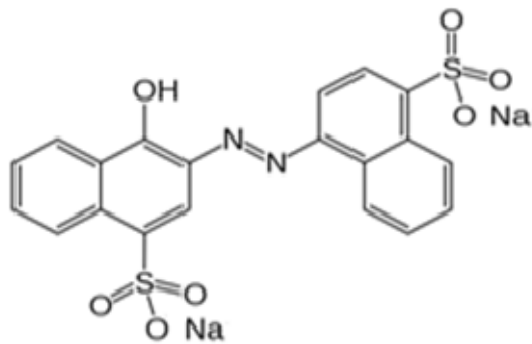
پست الکترونیکی: mkmohamadi@gmail.com

## ۱. مقدمه

قابل تولید هستند، کاربرد صنعتی گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. مصرف روزانه انبوه رنگ‌های مصنوعی توسط انسان، علاقه به یافتن خواص سمی آن‌ها را افزایش داده است. در قرن حاضر، مشخص شده است که برخی از این رنگ‌ها می‌توانند برای سلامتی افراد مضر باشند و در برخی موارد حتی می‌توانند بسته به مقدار دریافت شده، منجر به سرطان و تولد نوزادان با جهش ژنتیکی شود [۷، ۸]. این یافته‌ها علاقه به توسعه روش‌های کمی دقیق و مورد اطمینان برای تعیین این رنگ‌های مصنوعی و متابولیت‌های مشتق شده در تولید محصولات غذایی و نوشیدنی‌ها را افزایش داده است. تاکنون موارد زیادی در مورد استفاده از ترکیبات نانو ساختار برای حذف آلاینده‌های رنگی از محلول‌های آبی مانند استفاده از نانو منگنز اکسید [۹]، نانو بتونیت [۱۰] نانو آهن اکسید (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TSC) [۱۱]، نانو کیتوسان [۱۲] گزارش شده است. نانو اکسیدهای فلزی به دلیل داشتن مساحت سطح بالا، کاربردهای بالقوه‌ای در تصفیه آب دارند. در این تحقیق، از نانو اکسید مس به عنوان جاذب برای حذف کارموزین قرمز و اریتروزین از آب استفاده گردید.



شکل ۱- ساختار مولکولی اریتروزین



شکل ۲- ساختار مولکولی کارموزین قرمز

رنگ‌های حاصل از پساب صنایع نساجی، کاغذ، چرم، مواد غذایی، آرایشی و بهداشتی، پلاستیک و صنایع دارویی، منبع اصلی آلودگی آب هستند [۱]. بیش از ۱۰۰۰۰ نوع رنگ با تولید سالانه بیش از ۱۰۵۷۷ تن در سراسر جهان به صورت تجاری تولید شده که حدود ۵۰ درصد آنها رنگ‌های آزو هستند و ۱۰-۱۵ درصد رنگ‌های تولید شده در سراسر جهان در جریان‌های آب تخلیه یا وارد می‌شوند [۲]. این رنگ‌ها نه تنها از نظر زیبایی ناخوشایند هستند، بلکه نفوذ نور را کاهش می‌دهند و مانع فتوسنتز در گیاهان آبی می‌شوند [۳] برخی از رنگ‌ها و محصولات تجزیه آن‌ها در آب‌های سطحی بسیار سرطان‌زا گزارش شده‌اند، اما بسیاری از رنگ‌های آلی برای انسان مضر و سمی هستند. به میکرو ارگانیزم‌ها بنابراین حذف مؤثر رنگ از پساب‌های رنگ از نظر زیست‌محیطی مهم است. بیشتر رنگ‌ها مولکول‌های مقاوم هستند که در برابر هضم هوازی مقاوم هستند. آن‌ها همچنین در نور، گرما و عامل اکسیدکننده پایدار هستند [۴]. درمان‌های متعددی مانند تصفیه بیولوژیکی، انعقاد یا لخته سازی، تصفیه ازن، اکسیداسیون شیمیایی، فیلتراسیون غشایی، تخریب فوتوکاتالیستی و جذب، توسعه یافته‌اند. روش‌های جذب نسبتاً ساده، کارکرد آسان، مؤثرتر و کم‌هزینه‌تر از سایر فناوری‌ها هستند [۵]. اریتروزین یا اسید قرمز ۵۱ (جرم مولکولی: ۸۷۹/۸۶) یک رنگ مصنوعی محلول در آب است که اغلب به عنوان رنگ خوراکی استفاده می‌شود (شکل ۱). مصرف بیش از حد آن می‌تواند باعث حساسیت به نور شود و بر سطح هورمون تیروئید تأثیر بگذارد و در برخی موارد منجر به پرکاری تیروئید شود. حداکثر سطح مجاز اریتروزین ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در برخی مواد غذایی است [۶]. کارموزین قرمز یا قرمز اسیدی ۱۴ (جرم مولکولی: ۲۰۲/۴۴) رنگ آزو مصنوعی است که به‌طور تجاری برای اهدافی که غذا پس از تخمیر حرارت می‌یابد استفاده می‌شود (شکل ۲). رنگ‌های آزو مصنوعی به دلیل تولید ارزان و طیف وسیع رنگ‌هایی که در مقایسه با رنگ‌های طبیعی

آبی رقیق HCl و یا NaOH (۰/۰۱ مولار تا ۱ مولار) تنظیم شد. درصد حذف اریتروزین و کارموزین قرمز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

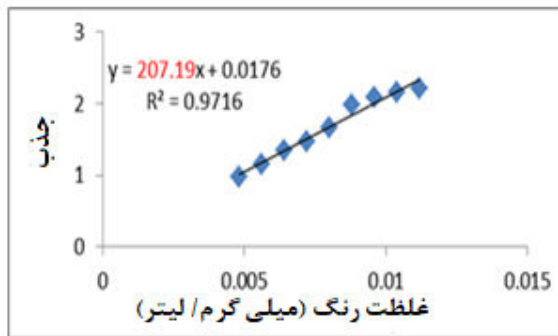
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e).V}{w} \quad (1)$$

که در آن  $C_0$  و  $C_e$  برحسب میلی‌گرم / لیتر به ترتیب غلظت فاز مایع رنگ در حالت اولیه و تعادل هستند.  $V$  حجم محلول (L) و  $w$  جرم جاذب مورد استفاده برحسب گرم است [۱۴].

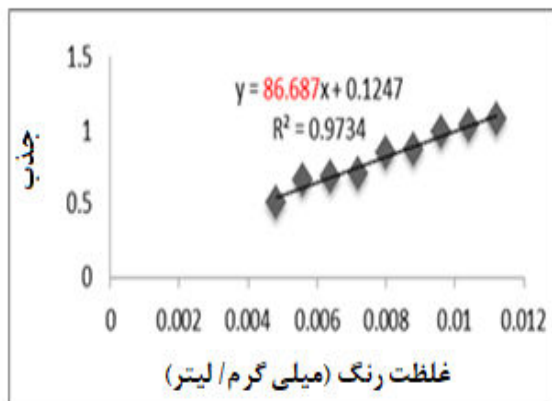
### ۳. بحث و نتیجه‌گیری

#### ۳.۱. کالیبراسیون اریتروزین و کارموزین قرمز

به‌منظور محاسبه غلظت نمونه از هر آزمایش، منحنی کالیبراسیون رنگ‌های اریتروزین و کارموزین قرمز به دست آمد. قانون بیر در غلظت‌های اولیه تجربی رنگ‌ها رعایت شد؛ بنابراین، غلظت نمونه‌های رنگ را می‌توان از مقادیر حداکثر جذب مربوطه محاسبه کرد. منحنی‌های کالیبراسیون در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی کالیبراسیون کارموزین قرمز



شکل ۴- منحنی کالیبراسیون اریتروزین

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. جاذب‌ها

در این مطالعه از نانو مس اکسید CuO به‌عنوان جاذب برای حذف رنگ اریتروزین و کارموزین قرمز از پساب نساجی در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد.

### ۲.۲. رنگ

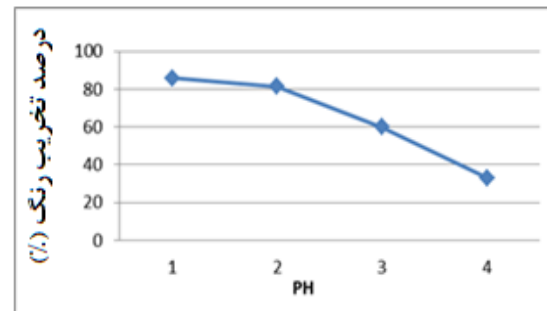
رنگ قرمز کارموزین و اریتروزین تجاری از شرکت شیمیایی آلد ریچ (سنت لویس، مویالات متحده آمریکا) تهیه و بدون خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. محلولی از آزو رنگ کارموزین و اریتروزین در آب دیونیزه تهیه شد. سایر مواد شیمیایی همگی دارای درجه تجزیه‌ای از شرکت مرک بودند. برای تهیه کلیه محلول‌ها از آب مقطر دیونیزه استفاده شد. تنظیم pH با استفاده از محلول‌های رقیق اسید هیدروکلریک و هیدروکسید سدیم انجام شد [۱۳]. اندازه‌گیری اسیدیته محلول توسط یک pH متر مدل (Metrohm-827) انجام شد. فرآیند هم زدن محلول‌های مخلوط جاذب و رنگ با استفاده از همزن (model-Orbital L) و همچنین رنگ‌ها توسط دستگاه اطیف سنج نوری UV-Vis دو پرتویی مدل (UV mini 1240) تعیین شد.

### ۲.۳. جذب

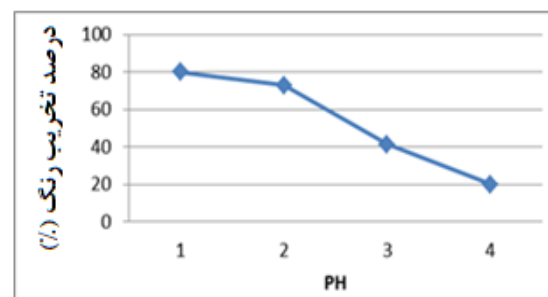
تأثیر متغیرهایی مانند pH، مقدار جاذب، زمان تماس، غلظت اولیه رنگ و دما بر حذف جذبی اریتروزین و کارموزین قرمز مورد بررسی قرار گرفت. در هر آزمایش جذب، ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگی با غلظت و pH مشخص به ۷۰۰ میلی‌گرم جاذب در دمای ثابت کنترل‌شده اضافه شد. سپس مخلوط‌ها در سانتریفیوژ با دور ۴۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شدند. هر ۱۵ یا ۳۰ دقیقه نمونه‌ها از همزن خارج می‌شد و جاذب با سانتریفیوژ با دور ۴۰۰۰ به مدت ۶ بار از محلول جدا شدند. به منظور تعیین غلظت باقیمانده رنگ، مقدار جذب محلول رویی قبل و بعد از فرآیند، با طیف سنج نوری اندازه‌گیری شد. داده‌های تجربی به‌دست آمده در زمان‌ها، دماها و غلظت‌های مختلف به مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا پارامترهای ایزوترم فرآیند جذب در مقادیر بهینه همه متغیرها محاسبه شود. pH با افزودن محلول‌های

## ۳.۲. اثر pH

به منظور بررسی اثر pH بر جذب رنگ‌های اریتروزین و کارموزین قرمز بر روی نانو اکسیدمس CuO، آزمایش‌هایی در غلظت اولیه رنگ ۸ میلی‌گرم / لیتر با جرم جاذب ۷۰۰ میلی‌گرم در ۱۵۰ میلی‌لیتر در دمای اتاق  $25 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه در زمان تعادل انجام شد. نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- تأثیر pH بر حذف اریتروزین در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰۰ دور در دقیقه،  $0.733$  گرم جاذب در ۱۰۰ میلی لیتر محلول رنگی ۸ میلی‌گرم / لیتر

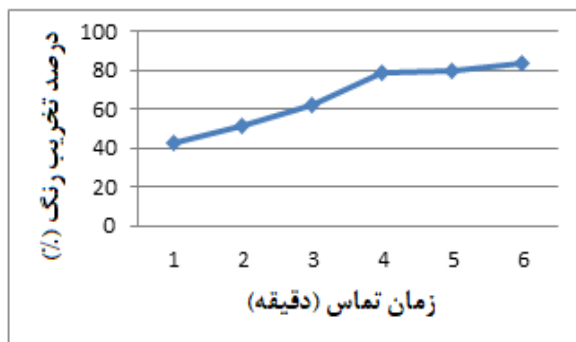


شکل ۶- تأثیر pH بر حذف کارموزین قرمز: دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه  $0.733$  گرم جاذب در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگی ۸ میلی‌گرم / لیتر.

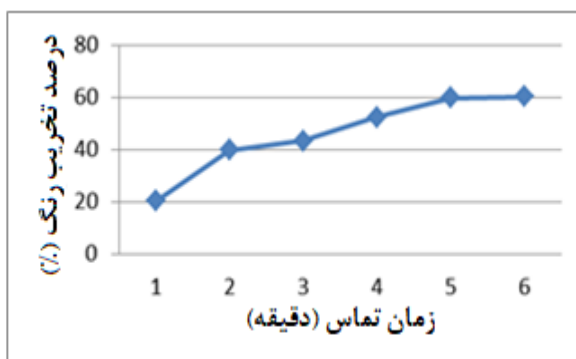
اثر pH در محدوده ۴-۱۲ بر حذف کارموزین قرمز و اریتروزین با استفاده از محلول‌های ۰/۰۱ مول / لیتر HCl یا NaOH برای تنظیم pH، با غلظت اولیه رنگ‌ها در محلول ۸ میلی‌گرم بر لیتر بررسی شد. همان‌طور که شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد، درصد جذب با کاهش pH افزایش یافته و در  $pH=4$  به حداکثر می‌رسد و سپس در pH‌های بالاتر کاهش می‌یابد. در pH‌های بالاتر، مکان‌های سطح جاذب با بار منفی بالا به دلیل دافعه الکترواستاتیکی، به نفع جذب نمونه پرتون زدایی شده نیست [۱۵-۱۸].

## ۳.۳. تأثیر زمان تماس

تشخیص زمان تماس تعادلی برای طراحی فرآیند جذب ضروری است و جذب سریع از جمله پارامترهای مطلوب است. نتایج اثر زمان تماس بر حذف رنگ‌های اریتروزین و کارموزین قرمز در غلظت‌های مختلف در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش زمان تماس، راندمان حذف رنگ نیز افزایش می‌یابد. در دقایق اولیه آزمایش، رنگ به سرعت حذف شد و غلظت‌های بالای رنگ در چند دقیقه حذف گردید و سپس حذف رنگ به‌طور مداوم با افزایش زمان تماس تا  $83/52$  و  $60/2$  درصد در ۹۰ دقیقه برای اریتروزین و کارموزین قرمز افزایش یافت. با توجه به نتایج، ۹۰ دقیقه به‌عنوان زمان تماس بهینه به دست آمد. در این زمان به دلیل اشباع شدن محل‌های جذب روی جاذب، راندمان حذف رنگ تغییری نخواهد داشت [۸].



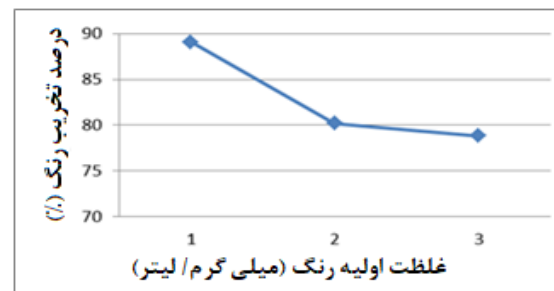
شکل ۷- اثر زمان تماس برای غلظت ppm ۸ اریتروزین.  $pH=4$ ، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و  $0.733$  گرم جاذب در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ.



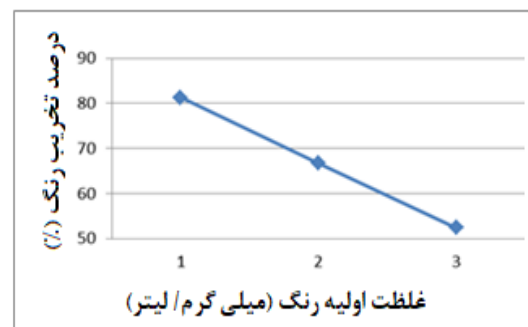
شکل ۸- اثر زمان تماس برای غلظت ppm ۸ کارموزین قرمز.  $pH=4$ ، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و  $0.733$  گرم جاذب در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ.

## ۳. ۴. تأثیر غلظت‌های مختلف بر حذف رنگ

شرایط تعادل در ۹۰ دقیقه برای غلظت‌های ۴، ۸ و ۱۲ میلی گرم در لیتر رنگ حاصل شد. اثر غلظت اولیه رنگ بر توانایی نانو اکسیدمس CuO در جذب رنگ از محلول نشان داد که درصد حذف رنگ اریتروزین و کارموزین قرمز با افزایش غلظت اولیه رنگ کاهش می‌یابد. در مطالعه حاضر، آزمایش‌های جذب برای بررسی اثر غلظت اولیه رنگ با تغییر آن از ۴ تا ۱۲ میلی‌گرم در لیتر، با حفظ مقدار ۰/۷۳۳ گرم نانو اکسید مس CuO انجام شده و نتایج به‌دست آمده در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت رنگ از ۴ به ۱۲ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف از ۸۹/۱ درصد به ۷۸/۸۴ درصد کاهش می‌یابد؛ و ۸۱/۳۳٪ تا ۵۲/۴٪ برای اریتروزین و کارموزین قرمز به ترتیب. کاهش راندمان حذف را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که همه جاذب‌ها دارای تعداد محدودی مکان‌های فعال بودند که بیش از یک غلظت معین اشباع می‌شدند [۱۳].



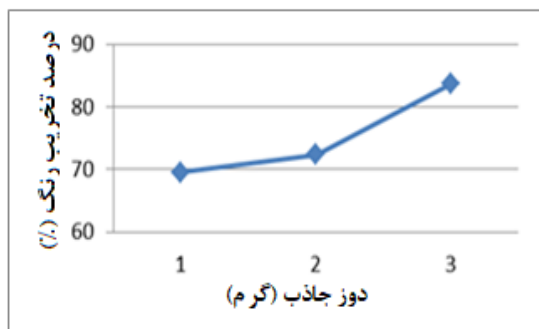
شکل ۹- اثر غلظت‌های مختلف اریتروزین در pH=۴، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور بر دقیقه و ۰/۷۳۳ گرم جاذب در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ.



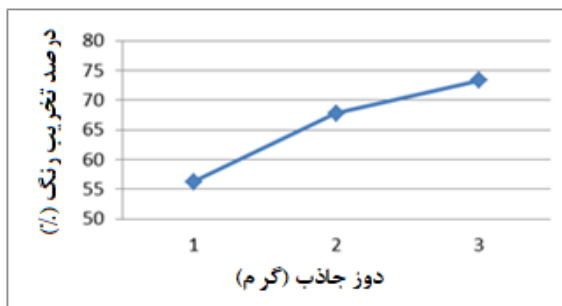
شکل ۱۰- اثر غلظت‌های مختلف کارموزین قرمز در pH=۴، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و ۰/۷۳۳ گرم جاذب در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگی.

## ۳. ۵. تأثیر غلظت جاذب بر حذف رنگ

جذب رنگ روی جاذب با تغییر مقدار جاذب (۰/۷، ۰/۵ و ۰/۹ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر) در محلول آزمایش با حفظ غلظت اولیه رنگ (۸ میلی‌گرم در لیتر)، دما (۲۵±۱) درجه سانتی‌گراد) و pH=۴ مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در زمان‌های مختلف تماس به مدت ۹۰ دقیقه انجام شد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش غلظت جاذب، درصد جذب افزایش یافته و زمان تعادل کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت نانو اکسید مس CuO از ۰/۵ گرم به ۰/۹ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر، جذب از ۶۹/۴۷ به ۸۳/۶٪ و ۵۶/۲۲ به ۷۳/۲۷٪ برای اریتروزین و قرمز کارموزین در زمان تعادل (۹۰ دقیقه) به ترتیب افزایش یافت. افزایش در جذب با غلظت جاذب را می‌توان به افزایش سطح جاذب و در دسترس بودن مکان‌های جذب بیشتر نسبت داد.



شکل ۱۱- اثر غلظت‌های مختلف اکسید مس در pH=۴، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و غلظت اولیه رنگ ۸ میلی‌گرم / لیتر در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگی اریتروزین.



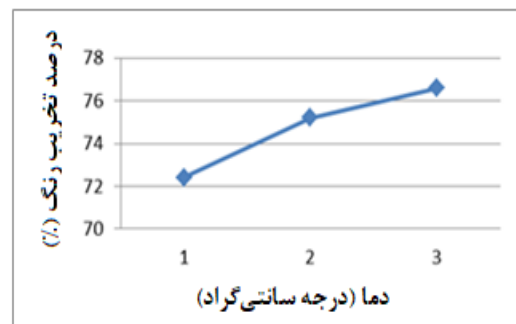
شکل ۱۲- اثر غلظت‌های مختلف اکسید مس در pH=۴، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و غلظت اولیه رنگ ۸ میلی‌گرم / لیتر در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ کارموزین قرمز.

## ۳-۶. تأثیر دما بر حذف رنگ

برای بررسی اثر دما، آزمایش‌ها برای جاذب در دمای ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مشاهده شد که نانو اکسید مس  $\text{CuO}$  ۷۲/۸ تا ۷۴/۰ درصد اریتروزین را حذف کرد، اما در مورد کارموزین قرمز، حذف رنگ ۷۲/۴ تا ۷۶/۵۹ درصد بود. نتیجه در شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. تمام آزمایش‌ها به مدت ۹۰ دقیقه انجام شد. تعادل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای هر دورنگ هنگام کار با جاذب نانو مس اکسید مس  $\text{CuO}$  به دست آمد.



شکل ۱۳- اثر دماهای مختلف بر حذف اریتروزین با  $\text{pH} = 4$  و  $25^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و غلظت اولیه رنگ ۸ میلی‌گرم / لیتر در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ.



شکل ۱۴- اثر دماهای مختلف بر حذف کارموزین قرمز با  $\text{pH} = 4$  و  $25^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۱۸۰ دور در دقیقه و غلظت اولیه رنگ ۸ میلی‌گرم / لیتر در ۱۵۰ میلی‌لیتر محلول رنگ.

## ۳-۷. ایزوترم جذب

مطالعه داده‌های ایزوترم برای کشف ظرفیت جذب جاذب‌های مختلف مهم است. به منظور بررسی ایزوترم جذب، دو ایزوترم تعادلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت: ایزوترم های لانگمویر و فروندلیچ برای مطالعه داده‌های تجربی در مطالعات جذب برای درک میزان و درجه مطلوبیت جذب استفاده می‌شوند.

## ۳-۷-۱. ایزوترم لانگمویر

تئوری لانگمویر فرض می‌کند که جذب محدود به تشکیل پوشش تک لایه‌ای بر روی سطح جاذب همگن است. معادله خطی لانگمویر در زیر آورده شده است:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_a} V_m + C_e/V_m \quad (2)$$

جایی که  $q_e$  مقدار جذب شده در هر جرم جاذب برحسب میلی‌گرم/گرم،  $C_e$  غلظت محلول رنگ در حالت تعادل برحسب میلی‌گرم/لیتر،  $K_a$  و  $V_m$  ثابت لانگمویر هستند.  $V_m$  و  $K_a$  به ترتیب ثابت لانگمویر مربوط به ظرفیت و انرژی جذب هستند. مقادیر  $V_m$  و  $K_a$  نشان داده شده در جدول (۲) از شیب‌ها و بریدگی‌های نمودار (شکل‌های ۱۵ و ۱۶) تعیین شدند. ویژگی‌های اساسی ایزوترم لانگمویر را می‌توان با یک ثابت بدون بعد به نام پارامتر تعادلی  $RL$  بیان کرد که با معادله زیر تعریف می‌شود.

$$RL = 1/(1 + K_a C_0) \quad (3)$$

$RL$  شکل ایزوترم و مطلوب بودن یا نبودن آن را طبق معیارهای زیر نشان می‌دهد

جدول ۱-  $RL$  شکل ایزوترم

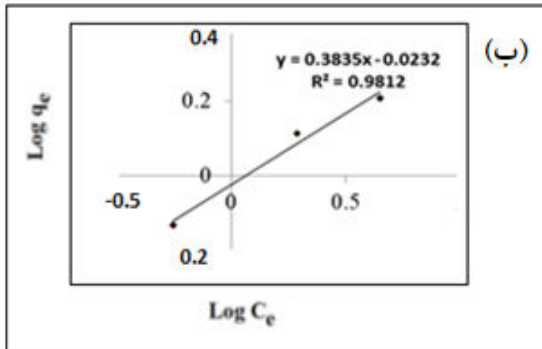
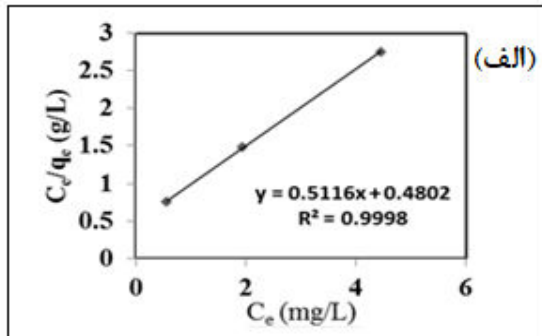
مقادیر $RL$	جذب
$RL > 1$	نامطلوب
$RL = 1$	خطی
$0 < RL < 1$	مطلوب
$RL = 0$	تغییرناپذیر

مقدار ضریب همبستگی  $R^2 = 0.9998$  و  $R^2 = 0.8474$  برای اریتروزین و کارموزین به دست آمده از توصیف لانگمویر نشان می‌دهد که از معادله لانگمویر خطی پیروی می‌کند [۱۹-۲۴].

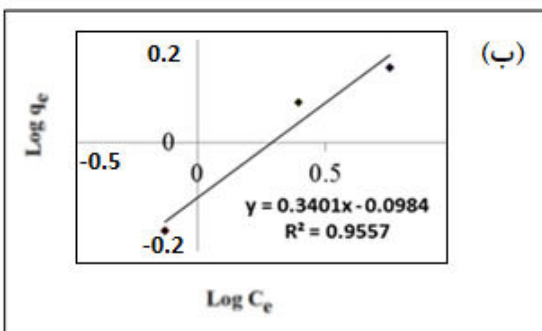
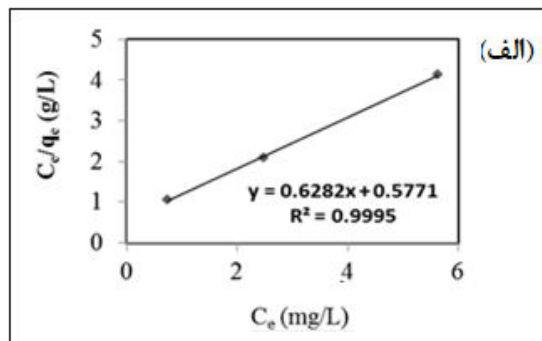
## ۳-۷-۲. ایزوترم فروندلیچ

مدل فروندلیچ بر این فرض استوار است که جذب چندلایه بر روی سطح جاذب ناهمگنی که دارای مکان‌های غیر برابر در دسترس با انرژی‌های جذب مختلف است، رخ می‌دهد. شکل خطی عبارت فروندلیچ ثابت‌های  $K$  و  $n$  را به دست می‌دهد از این رو:

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$



شکل ۱۵- نمودار ایزوترم لانگمویر (الف) و فروندلیچ (ب) برای جذب رنگ اریتروزین.



شکل ۱۶- نمودار ایزوترم لانگمویر (الف) و فروندلیچ (ب) برای جذب رنگ کارموزین قرمز.

#### ۴. نتیجه‌گیری

جاذب نانو اکسید مس CuO با ویژگی‌های خاصی مانند در دسترس بودن، ارزان بودن و مساحت سطح زیاد، برای حذف رنگ‌هایی مانند اریتروزین و کارموزین قرمز از محلول آبی

جایی که  $q_e$  مقدار جذب شده در هر گرم جاذب برحسب میلی‌گرم / گرم،  $C_e$  غلظت محلول رنگ در حالت تعادل برحسب میلی‌گرم / لیتر،  $K_f$  و  $1/n$  ثابت‌های فرویدلیچ هستند که به ظرفیت جذب و شدت جذب مربوط می‌شوند. به ترتیب جاذب مقادیر  $K_f$  و  $1/n$  به ترتیب از بریدگی و شیب محاسبه شده در جدول (۱) آورده شده است. مقدار  $n$  بزرگ‌تر از  $n=2/6075$  و  $n=2/940$  است که نشان می‌دهد هر دورنگ به‌خوبی جذب می‌شوند. این نتیجه با یافته‌های مربوط به مقدار  $R_L$  مطابقت زیادی دارد [۲۱].

جدول ۲- معادلات و نتایج محاسبات ایزوترم‌ها

ایزوترم	پارامتر	مقدار اریتروزین	مقدار کارموزین
لانگمویر	$R_L$	۹۹۹۸/۰	۰/۹۹۹۵
	$b$ (L/mg)	۱/۰۶۰۵۴	۰/۰۲۴۱۵
	$V_m$ (mg/g)	۱/۹۵۴۶	۱/۵۹۱۸
	$R^2$	۰/۲۹۱۴۹	۰/۵۶۶۸
فروندلیچ	$R_L$	۰/۹۸۱۲	۰/۹۵۵۷
	$K_f$ (mg/g)	۴۳/۱۰۳	۱۰/۱۶۲
	$n$	۲/۶۰۷۵	۲/۹۴۰

مقادیر  $K$  بالاتر از  $۴۳/۱۰۳$  و  $۱۰/۱۶۲$  میلی‌گرم در لیتر برای اریتروزین و کارموزین قرمز نشان می‌دهد که اکسید مس در مقایسه با سایر جاذب‌ها میل ترکیبی بیشتری برای رنگ‌ها دارد. مقدار کمیت جذب  $n$  برابر  $۲/۶۰۷۵$  و  $۲/۹۴۰$  برای اریتروزین و کارموزین است، مشاهده می‌شود که جاذب نانو اکسید مس CuO، ناهمگن است، یعنی  $۱ < n < ۱۰$ .

از جدول ۱، مقدار  $b$  بالاتر از  $۱/۰۶۰۵۴$  نشان می‌دهد که به نظر می‌رسد مقدار اریتروزین در واحد وزن اکسید مس به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از کارموزین قرمز است. با این حال، ضریب همبستگی برای ایزوترم فروندلیچ بالاتر از لانگمویر است که احتمالاً جذب چندلایه بیشتر از جذب تک لایه را نشان می‌دهد.

- equilibrium, and thermodynamic *Chemical Biochemical Engineering Quarterly*. **21** (2007) 219.
- [18] C. Ng, J. N. Losso, W. E. Marshall, R. M. Rao Freundlich adsorption isotherms of agricultural by-product-based powdered activated carbons in a geosmin-water system *Bioresource technology*. **85** (2002) 131.
- [19] C. Namasivayam, D. Arasi Removal of congo red from wastewater by adsorption onto waste red mud *Chemosphere*. **34** (1997) 401.
- [20] X.-j. Hu, J.-s. Wang, Y.-g. Liu, X. Li, G.-m. Zeng, Z.-l. Bao, et al. Adsorption of chromium (VI) by ethylenediamine-modified cross-linked magnetic chitosan resin: isotherms, kinetics and thermodynamics *Journal of hazardous materials*. **185** (2011) 306.
- [21] H. Tang, C. Chang, L. Zhang Efficient adsorption of Hg<sup>2+</sup> ions on chitin/cellulose composite membranes prepared via environmentally friendly pathway *Chemical Engineering Journal*. **173** (2011) 689.
- [22] B. Samiey, A. R. Toosi Adsorption of malachite green on silica gel: Effects of NaCl, pH and 2-propanol *Journal of hazardous materials*. **184** (2010) 739.
- [23] X. Bai, Z.-f. Ye, Y.-f. Li, L.-c. Zhou, L.-q. Yang Preparation of crosslinked macroporous PVA foam carrier for immobilization of microorganisms *Process Biochemistry*. **45** (2010) 60.
- [24] L. Jin, R. Bai Mechanisms of lead adsorption on chitosan/PVA hydrogel beads *Langmuir*. **18** (2002) 9765.

آن استفاده می‌شود. داده‌های تجربی مطابق با ایزوترم‌های جذب فروندلیچ بود. نتایج نشان می‌دهد که جذب به‌کاررفته پتانسیل قابل توجهی به‌عنوان جاذب برای حذف رنگ دارد. مقادیر K بالاتر از ۴۳/۱۰۳ و ۱۰/۱۶۲ میلی‌گرم در لیتر برای اریتروزین و کارموزین قرمز نشان می‌دهد که اکسید مس در مقایسه با سایر جاذب‌ها میل ترکیبی بیشتری برای رنگ‌ها دارد.

## مرجع‌ها

- [1] P. J. W. S. Grau, Technology Textile industry wastewaters treatment. **24** (1991) 97.
- [2] T. A. Gad-Allah, S. Kato, S. Satokawa, T. Kojima Treatment of synthetic dyes wastewater utilizing a magnetically separable photocatalyst (TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): parametric and kinetic studies *Desalination*. **244** (2009) 1.
- [3] Y. Bulut, N. Gözübenli, H. Aydın Equilibrium and kinetics studies for adsorption of direct blue 71 from aqueous solution by wheat shells *Journal of hazardous materials*. **144** (2007) 300.
- [4] G. Z. Kyzas, N. K. J. J. o. C. Lazaridis, I. Science Reactive and basic dyes removal by sorption onto chitosan derivatives. **331** (2009) 32.
- [5] V. Poots, G. McKay The specific surfaces of peat and wood *Journal of Applied Polymer Science*. **23** (1979) 1117.
- [6] Y. S. Al-Degs, R. Abu-El-Halawa, S. S. Abu-Alrub Analyzing adsorption data of erythrosine dye using principal component analysis *Chemical engineering journal*. **191** (2012) 185.
- [7] T. Ma, G. Yang. New Edition Handbook of Food Additives. Beijing Chinese Agriculture Publishing Press; 1989.
- [8] H. Tsuji, F. Yagi, H. Hattori, H. J. J. o. C. Kita Self-condensation of n-butyraldehyde over solid base catalysts *Journal of Catalysis*. **148** (1994) 759.
- [9] M. A. Islam, I. Ali, S. A. Karim, M. S. H. Firoz, A.-N. Chowdhury, D. W. Morton, et al. Removal of dye from polluted water using novel nano manganese oxide-based materials *Journal of Water Process Engineering*. **32** (2019) 100911.
- [10] A. S. Mahmoud Effect of nano bentonite on direct yellow 50 dye removal; Adsorption isotherm, kinetic analysis, and thermodynamic behavior *Progress in Reaction Kinetics Mechanism*. **47** (2022) 14686783221090377.
- [11] A. A. Alqadami, M. Naushad, M. A. Abdalla, M. R. Khan, Z. A. Alothman Adsorptive removal of toxic dye using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TSC nanocomposite: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies *Journal of Chemical Engineering Data*. **61** (2016) 3806.
- [12] H. Rezaei, A. Razavi, A. Shahbazi Removal of Congo red from aqueous solutions using nano-chitosan *Environmental Resources Research*. **5** (2017) 25.
- [13] B. Van der Bruggen, C. Vandecasteele Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry *Environmental pollution*. **122** (2003) 435.
- [14] P. C. Singer Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products *Water Science Technology*. **40** (1999) 25.
- [15] D. B. Mosqueda-Jimenez, P. M. Huck Effect of biofiltration as pretreatment on the fouling of nanofiltration membranes *Desalination*. **245** (2009) 60.
- [16] F. Gottschalk, T. Sonderer, R. W. Scholz, B. Nowack Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO<sub>2</sub>, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different regions *Environmental science technology*. **43** (2009) 9216.
- [17] R. Rajoriya, B. Prasad, I. Mishra, K. Wasewar Adsorption of benzaldehyde on granular activated carbon: kinetics,