

# حذف رنگ راکتیو قرمز از فاضلاب توسط خاکستر اصلاح شده گیاه حنظل

محمد رضا رضایی کهخا<sup>۱</sup>، جمشید پیری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا و عضو هیئت علمی گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، ایران  
r.rezaei.k@gmail.com (۰۵۴۲) ۲۲۵۳۵۲۵ (نویسنده مسئول)

۲- دانشجوی دکترا و مربی گروه آب و خاک، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران

(دریافت ۹۳/۳/۲۴ پذیرش ۹۳/۷/۲۳)

## چکیده

فاضلاب‌های رنگی اثرات زیان‌آور بسیار جدی بر محیط زیست دارند. افزایش شدت رنگ باعث کاهش میزان ورود نور به محیط آبی و تغییر رشد گیاهان و بی‌مهرگان می‌شود. روش‌های بسیاری برای حذف ترکیبات رنگی از فاضلاب وجود دارد که از آنها می‌توان به جداسازی غشایی، فرایندهای اکسیداسیون، انعقاد و تصفیه بی‌هوازی اشاره کرد. همه این روش‌ها هزینه‌بری بالایی دارند. فرایندهای بیوجذب از جمله روش‌های کارا، مؤثر و ارزان قیمت برای حذف بسیاری از آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، ترکیبات فنلی، رنگ‌ها و غیره است. در این تحقیق استفاده از یک بیوجاذب به نام خاکستر گیاه حنظل برای حذف رنگ راکتیو قرمز برای نخستین بار مورد بررسی قرار گرفت. برای افزایش راندمان حذف، سطح خاکستر گیاه به وسیله هیدروکسید سدیم اصلاح شد. اندازه‌گیری‌ها و میزان حذف به وسیله اسپکتروفتومتر انجام شد. همچنین اثر پارامترهای مؤثر بر حذف رنگ مانند غلظت اولیه رنگ، دز جاذب، pH و زمان جذب نیز بهینه شد. مطابق نتایج بهترین شرایط حذف رنگ در غلظت اولیه  $90 \pm 0/01$  میلی‌گرم در لیتر، دز جاذب برابر  $1/75 \pm 0/01$  گرم در لیتر، pH معادل ۲ و زمان ۷۰ دقیقه به دست آمد. بررسی‌های انجام شده نشان داد ایزوترم جذب از معادله فروندلیچ پیروی می‌کند. همچنین در بهترین شرایط جذب، ظرفیت جذب جاذب برابر  $36$  میلی‌گرم در لیتر در pH برابر با ۲ به دست آمد. نتایج نشان داد که خاکستر اصلاح شده حنظل، جاذب مؤثری برای حذف رنگ از فاضلاب‌های رنگی است.

**واژه‌های کلیدی:** رنگزای قرمز، راندمان حذف، بیوجذب، خاکستر اصلاح شده، حنظل

## ۱- مقدمه

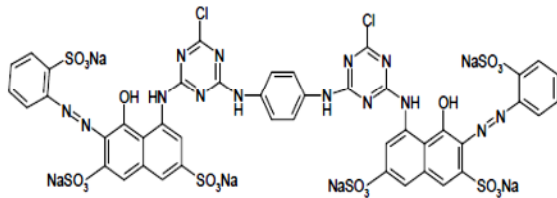
استفاده شده است [۴]. تمامی این روش‌ها هزینه‌های زیادی در خرید، نگهداشت و استفاده مجدد به سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب تحمیل می‌کنند. امروزه جذب بیولوژیکی، به‌عنوان یک روش پرمصرف در حذف مواد رنگزا از فاضلاب مورد توجه است. این روش توانایی حذف ترکیبات آلی و غیر آلی نظیر فلزات، مواد رنگزا و ترکیبات تولید کننده بو را دارند. جرم بیولوژیکی مورد استفاده ممکن است جلبک، باکتری، قارچ، لجن تولیدی فرایند تصفیه فاضلاب، محصولات فرعی فرایند تخمیر در صنایع و یا پسماندهای محصولات کشاورزی باشد. مهم‌ترین مزایای فناوری بیوجذب تأثیر آن در کاهش غلظت مواد رنگزا از پساب صنایع نساجی تا مقادیر بسیار پایین و همچنین قیمت پایین آن است [۴]. بیوجاذب‌های فراوانی برای حذف مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پوست موز، شلتوک برنج و ساقه نیشکر از این موارد است [۵، ۶ و ۷]. حنظل گیاهی است گلدار از تیره کدو و از سرده سیتروولوس، گونه کولوسیتیز-سی<sup>۱</sup> و نام علمی آن سیتروولوس

امروزه آلودگی آب‌های سطحی با مواد رنگی و فاضلاب‌های رنگی تولیدی کارخانه‌های نساجی یکی از نگرانی‌های جدی پژوهشگران محیط زیست است. تحقیقات نشان داده ۴۷ تا ۸۷ درصد از رنگزاهای فاضلاب‌های نساجی قابل تجزیه بیولوژیکی است [۱]. ورود فاضلاب‌های رنگی به محیط‌های آبی، بر اکوسیستم منطقه و حیات وحش، اثرات مهم و غیر قابل جبرانی می‌گذارد. مهم‌ترین اثر فاضلاب‌های رنگی کاهش فتوسنتز گیاهان آبی از راه مانعیت از عبور نور است که به نوبه خود رشد گیاهان و بی‌مهرگان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین ورود ترکیبات رنگی به سیستم‌های تصفیه آب و حوضچه‌های ته‌نشینی بر کارایی روش‌های مرسوم تصفیه اثر می‌گذارد و باعث کاهش راندمان و اختلال در عملکرد تصفیه‌خانه‌ها می‌شود [۲].

روش‌های مختلفی برای حذف ترکیبات رنگی به‌کار می‌رود که شامل انواع روش‌های اکسایش پیشرفته مانند ازن زنی، فرایند فنتون، فرایند فتوکاتالیستی و روش‌های جذب سطحی است [۳]. همچنین روش‌های مبتنی بر فیلترهای غشایی و اسمز معکوس نیز

<sup>1</sup> C. Colocynthis

روش رقیق‌سازی معمول توسط آب دوبار تقطیر از محلول استاندارد ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر این رنگزا تهیه شد. مطالعات جذب در طول موج ۵۳۰ نانومتر انجام پذیرفت.



شکل ۱- رنگزای راکتیو قرمز ۱۲۰ (بیس منو کلروتری آزین-اس)

### ۲-۳- مطالعات جذب

آزمایش‌های بیوجذب، درون بشر ۵۰۰ سی‌سی و بر روی همزن با سرعت ثابت ۲۰۰ دور در دقیقه انجام شد. حجم محلول ۵۰ سی‌سی و غلظت اولیه رنگ ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و غلظت اولیه بیوجذب ۰/۶ گرم در لیتر در نظر گرفته شد. برای تعیین شرایط بهینه رنگبری، عوامل مؤثر در حذف رنگ مانند pH، زمان، غلظت رنگزا و غلظت جذب مورد بررسی قرار گرفت. برای جداسازی جذب از محلول مادر بعد از سپری شدن زمان تماس مورد نظر، نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد و سپس فیلتراسیون محلول به وسیله کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ انجام شد. کلیه اندازه‌گیری‌ها ۲۴ ساعت پس از اتمام آزمایش‌های جذب به روش اسپکتروفتومتری انجام گرفت. راندمان حذف رنگزا توسط رابطه ۱ محاسبه شد

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \quad (1)$$

همچنین مقدار رنگ جذب شده بر روی جذب بر اساس رابطه ۲ تعیین شد

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{M} \quad (2)$$

که در این روابط  $C_0$  و  $C_t$  به ترتیب غلظت اولیه رنگ قبل و بعد از تعادل،  $M$  جرم جذب و  $V$  حجم محلول است.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تأثیر pH

تأثیر pH در رنگبری رنگ قرمز در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با افزایش pH به مقدار ۲ به

کولوسیتیز<sup>۱</sup> است. میوه آن دارای خواص دارویی متعددی است و در هند از میوه و دانه‌های آن به‌عنوان مسهل استفاده می‌شود و از ریشه آن نیز در موارد استسقاء، یرقان، بیماری‌های مجاری ادرار و روماتیسم استفاده می‌شود. علاوه بر آن میوه گیاه داروی درمان کننده سم مار است. این گیاه به‌صورت خودرو در بسیاری از زمین‌های کشاورزی می‌روید و عمده رشد آن در مناطق گرم و خشک است [۸ و ۹].

در این پژوهش برای حذف رنگزای راکتیو قرمز از خاکستر اصلاح شده گیاه استفاده شد. همچنین اثر عوامل تأثیرگذار بر حذف رنگزا مانند: pH، مقدار جذب، غلظت اولیه رنگ و زمان بر کارایی جذب بررسی شد. برای مشخص کردن ایزوترم جذب، از معادلات جذب فروندلیچ و لانگمیر استفاده شد.

### ۲- مواد و روش‌ها

#### ۲-۱- آماده‌سازی جذب

میوه سبز گیاه حنظل که به‌طور تصادفی از مزارع بخش مرکزی شهرستان زابل جمع‌آوری شده بود، ابتدا برای زدودن آلودگی‌های احتمالی شسته شد و تا اندازه تقریبی ۱ سانتی‌متر مربع خرد شد و سپس داخل فور در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفت. برای به‌دست آوردن جذب اصلاح شده، گیاه خشک شده در محلول سدیم هیدروکسید ۳۰ درصد حجمی به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد. به‌طور نسبی جرم گیاه دو برابر هیدروکسید سدیم در نظر گرفته شد تا اثرات اصلاح جذب در میزان جذب بررسی شود. در مرحله بعد، محلول مجدداً به مدت ۱۲ ساعت درون آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و سپس در کوره الکتریکی در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد. خاکستر به‌دست آمده در دسیکاتور سرد شد و به‌منظور از بین بردن ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها با محلول ۲ درصد اسید کلریدریک و آب دوبار تقطیر، چندین مرتبه شستشو داده شد. خاکستر اصلاح شده به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شد و سپس آسیاب شد. جذب تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس در دسیکاتور نگهداری شد [۱۰].

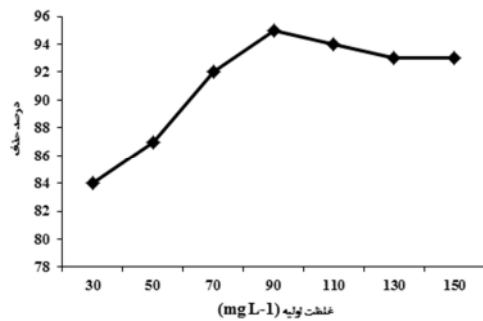
#### ۲-۲- آماده‌سازی رنگزا

رنگ راکتیو قرمز ۱۲۰ از شرکت مرک<sup>۲</sup> آلمان خریداری شد (شکل ۱). محلول‌های استاندارد با غلظت ۳۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر با

<sup>1</sup> Citrulluscolocynthis

<sup>2</sup> Merck

ممکن است با نیروهای شناوری که برای غلبه بر مقاومت انتقال جرم بین محیط جامد و آبی مورد نیاز است، مرتبط باشد [۱۱].



شکل ۴- اثر غلظت اولیه بر رنگبری رنگ راکتیو قرمز (غلظت بیوجاذب ۱/۷۵ گرم در لیتر، زمان ۶۰ دقیقه، pH برابر ۲، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)

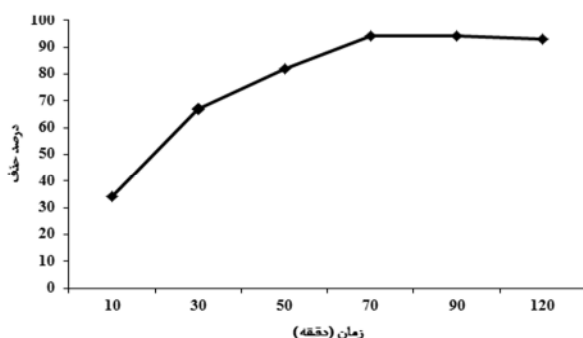
### ۳-۴- تأثیر زمان تماس

برای به دست آوردن زمان بهینه جذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، آزمایش‌ها در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بر اساس شکل ۵ از آزمایش‌ها نشان داد با افزایش زمان به بالاتر از ۷۰ دقیقه، افزایش چشمگیری در میزان حذف رنگ رخ نمی‌دهد. به نظر می‌رسد با گذشت زمان به دلیل تجمع رنگزا در محل‌های جذب، سرعت جذب کاهش می‌یابد [۱۲].

### ۴- بررسی ایزوترم جذب

#### ۴-۱- مدل فروندلیچ

ایزوترم فروندلیچ با فرض یک سطح ناهمگن با توزیع غیر یکنواختی از گرمای جذب در روی سطح به دست می‌آید. شکل

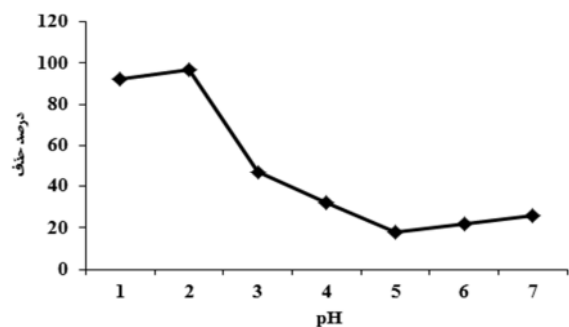


شکل ۵- اثر زمان تماس بر رنگبری رنگ راکتیو قرمز (غلظت اولیه ۹۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت بیوجاذب ۱/۷۵ گرم در لیتر، pH برابر ۲، زمان ۶۰ دقیقه، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)

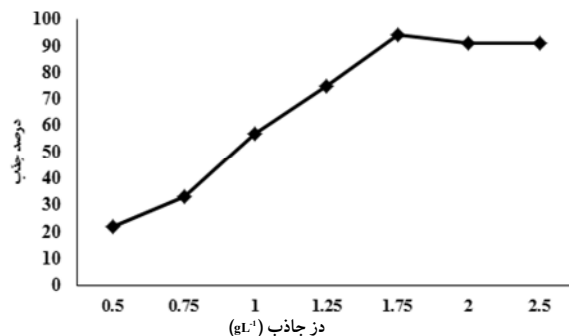
بعد، کاهش در میزان جذب رنگ رخ می‌دهد، به طوری که در pH برابر ۲، بیشترین مقدار حذف رخ داد و حدود ۹۴ درصد از رنگبری مشاهده شد.

### ۳-۲- تأثیر دز جاذب

برای بررسی تأثیر دز جاذب بر روی رنگبری رنگ قرمز ۱۲۰، مقدار ۰/۵ تا ۲/۵ گرم از جاذب به مدت ۱ ساعت در pH برابر ۲ و غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم در لیتر جاذب در تماس قرار گرفت. نتایج مطابق شکل ۳ نشان داد با افزایش دز جاذب بازده حذف رنگزا افزایش می‌یابد، به طوری که در غلظت ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر ۸۷/۱ درصد حذف مشاهده شد و با افزایش دز جاذب به ۱/۷۵ گرم در لیتر، این میزان به ۹۴ درصد رسید.



شکل ۲- اثر pH بر رنگبری رنگ راکتیو قرمز (غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم در لیتر غلظت بیوجاذب ۰/۶ گرم در لیتر، زمان ۶۰ دقیقه، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)



شکل ۳- اثر دز جاذب بر رنگبری رنگ راکتیو قرمز (غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، pH برابر ۲، زمان ۶۰ دقیقه، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)

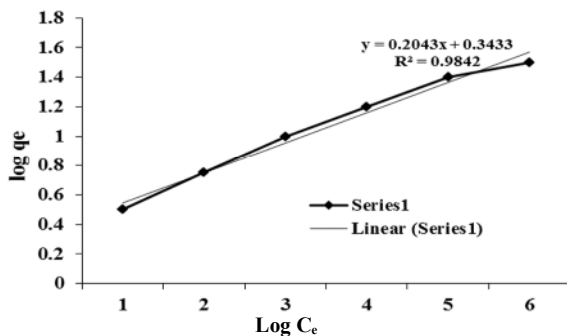
### ۳-۳- تأثیر غلظت اولیه رنگ

غلظت اولیه رنگ در ظرفیت جاذب مؤثر است. برای بررسی این پارامتر، غلظت‌های ۳۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر رنگ مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۴ با افزایش غلظت اولیه به بیشتر از ۹۰ میلی‌گرم در لیتر، از میزان درصد حذف رنگ کاسته شد. این پدیده

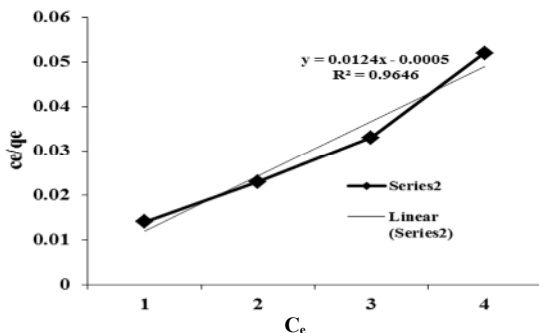
جدول ۱- پارامترهای ایزوترم فروندلیچ و لانگمیر

مدل لانگمیر			مدل فروندلیچ		جذب شونده
$R^2$	$K_L$	$Q_0$ (میلی گرم در گرم)	$R^2$	n	$K_F$
۰/۹۴	۰/۲۸	۳۶	۰/۹۸	۶/۲	۲/۱

(جدول ۱). با توجه به ضریب همبستگی مدل فروندلیچ، ایزوترم مناسب جذب رنگزا بر روی خاکستر اصلاح شده حفظ بود که ممکن است به دلیل توزیع یکنواخت یا تک لایه‌ای مکان‌های فعال روی جاذب باشد (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶- ایزوترم جذب فروندلیچ برای جذب رنگ راکتیو قرمز بر روی جاذب مورد مطالعه (غلظت اولیه ۹۰ میلی گرم در لیتر، غلظت بیوجاذب ۱/۷۵ گرم در لیتر، pH برابر ۲، زمان ۷۰ دقیقه، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)



شکل ۷- ایزوترم جذب لانگمیر برای جذب رنگ راکتیو قرمز بر روی جاذب مورد مطالعه (غلظت اولیه ۹۰ میلی گرم در لیتر، غلظت بیوجاذب ۱/۷۵ گرم در لیتر، pH برابر ۲، زمان ۷۰ دقیقه، حجم محلول ۵۰۰ میلی لیتر)

## ۵- بحث

در این پژوهش حذف رنگ راکتیو قرمز از محیط‌های آبی به وسیله یک بیوجاذب ارزان قیمت و در دسترس بررسی شد. برای اصلاح سطح جاذب و افزایش کارایی جاذب، نمونه‌ها تبدیل به خاکستر شد

خطی رابطه فروندلیچ به صورت زیر است

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (3)$$

که در آن

$K_F$  ظرفیت جذب در غلظت واحد،  $1/n$  شدت جذب سطحی،  $C_e$  غلظت تعادلی بر حسب ppm و  $q_e$  مقدار رنگزای جذب شده در حالت تعادل بر حسب میلی گرم بر گرم است. از نمودار خطی  $\log(q_e)$  در مقابل  $\log(C_e)$ ،  $K_F$  و  $n$  می‌توانند تعیین شوند.  $1/n$  بیانگر نوع ایزوترم است که مقدار مناسب آن  $0 < 1/n < 1$  است و سایر مقادیر در اندازه‌گیری‌های ایزوترم جذب نامناسب است.

## ۴-۲- مدل لانگمیر

در مدل لانگمیر جذب به صورت تک لایه‌ای فرض می‌شود. یکنواختی سطح و حذف اثرات متقابل مولکول‌های جذب شده از دیگر فرضیات این مدل است [۱۳]. معادله لانگمیر به صورت خطی به شکل زیر بیان می‌شود

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (4)$$

که در این رابطه

$q_e$  مقدار رنگزای جذب شده به ازای هر گرم جاذب بر حسب میلی گرم در گرم و  $C_e$  بر حسب میلی گرم در لیتر غلظت تعادلی رنگزا در حالت تعادل است.  $Q^0$  و  $b$  پارامترهای لانگمیراند که به ترتیب مربوط به حداکثر ظرفیت جذب و انرژی همبستگی جذب‌اند. نموداری از  $\frac{C_e}{q_e}$  در مقابل  $C_e$  خط راستی از شیب  $\frac{1}{Q^0}$  و محل تقاطع  $\frac{1}{bQ^0}$  را نشان می‌دهد.

اطلاعات تعادلی به دست آمده از جذب رنگزای انتخابی روی جاذب نشان داد که این فرایند جذب رنگزا با مدل فروندلیچ تناسب بیشتری دارد. مقدار ثابت‌های لانگمیر  $q_{max}$  و  $b$  از معادله نمودار  $C_e/q_e$  در مقابل  $C_e$  و نیز مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) آن به دست آمد

و سطح آن به وسیله هیدروکسید سدیم تغییر داده شد. در این پژوهش عوامل مؤثر بر راندمان حذف نظیر pH، دز جاذب، غلظت اولیه رنگ و زمان تماس بهینه شدند. بررسی اثر عامل pH بر کارایی حذف رنگ راکتیو قرمز توسط جاذب تهیه شده نشان داد که محیط‌های اسیدی بهترین محیط برای حذف رنگ‌های آنیونی هستند. در pH‌های اسیدی، جاذب‌های الکترواستاتیکی بین بارهای مثبت سطح جاذب و بارهای منفی رنگ آنیونی افزایش می‌یابد و افزایش راندمان حذف رنگ نتیجه این برهمکنش‌ها است. این داده‌ها به علت تمایل زیاد بارهای مثبت سطح جاذب در pH اسیدی به جاذب الکترواستاتیکی با رنگ‌های آنیونی است [۱۲]. نتایج مشابهی در سایر پژوهش‌ها وجود دارد. در پژوهش‌هایی که بر روی حذف رنگزای مستقیم با کمک جاذب‌های بیولوژیکی نظیر پوست پرتقال و پوسته تخم مرغ شده است، نتایج مشابهی در رابطه با حذف رنگزاهای آنیونی در pH‌های اسیدی به دست آمده است [۱۳]. همچنین در پژوهش دیگری که بر روی حذف رنگزاهای مستقیم و راکتیو صورت گرفت، pH برابر ۲ بهترین راندمان حذف را نشان داد و مهم‌ترین عامل در راندمان حذف رنگزا شناخته شد. اردجانی و همکاران با بررسی اثر pH در جذب مستقیم رنگ قرمز ۸۰ از محلول آبی به وسیله جاذب پوسته بادام دریافتند که با افزایش pH از ۳ تا ۱۲، ظرفیت جذب ۲۰/۵ به ۱۸/۸ میلی‌گرم بر گرم کاهش یافته است. آنها همچنین نشان دادند که حداکثر جذب رنگ در pH برابر ۳ مشاهده شد. بنابراین pH برابر ۳ به عنوان pH بهینه انتخاب شد [۱۴].

همچنین دز جاذب، غلظت اولیه رنگ و زمان، عوامل دیگر تأثیرگذار در رنگبری رنگ راکتیو قرمز بود. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش دز جاذب و غلظت اولیه تا یک مقدار مشخص (دز جاذب ۱/۷۵ گرم در لیتر و غلظت اولیه ۹۰ میلی‌گرم در لیتر) راندمان حذف رنگ افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر دز جاذب و غلظت اولیه، میزان جذب افزوده نشد. علت این امر اشباع سطح جاذب و کاهش حفره‌ها و مکان‌های مسئول جذب رنگ است؛ به طوری که بعد از طی زمان مشخصی به علت رسیدن به حالت تعادل، افزایش چشمگیری مشاهده نمی‌شود. در پژوهش‌های مشابهی که بر روی حذف مواد رنگزا توسط بیوجاذب‌ها صورت گرفته است، نتایج مشابهی در رابطه با غلظت رنگزا و میزان حذف به دست آمده است [۱۹-۱۵]. در پژوهشی که بر روی متیلن‌بلو در غلظت‌های ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر صورت گرفته است، نتایج نشان داد که ظرفیت جذب با افزایش غلظت رنگزا افزایش می‌یابد [۲۰]. سائولک و همکاران مشاهده نمودند که مقدار رنگ جذب

شده در واحد وزن جاذب با افزایش جرم ماده جاذب کاهش می‌یابد [۲۱]. در این پژوهش مقدار جذب رنگ ۵ تا ۱۱/۶۴ میلی‌گرم در گرم برای افزایش غلظت جاذب از ۲ تا ۸ گرم در لیتر کاهش یافته بود. در حالی که درصد حذف رنگ با افزایش غلظت جاذب از ۲ تا ۸ گرم از ۴۸/۲۶ درصد به ۷۹/۹۲ درصد افزایش نشان داده بود. آنها علت این کاهش در مقدار رنگ جذب شده با افزایش جرم جاذب را به علت وجود سایت‌های جذب باقیمانده غیر اشباع در خلال واکنش جذب ارزیابی کردند. در حقیقت نشان داده شد که هنگامی که مقدار جاذب افزایش می‌یابد، یک افزایش کم در جذب متناسب با افزایش جاذب رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دز جاذب، سطح تماس جاذب و رنگزا افزایش یافته و در نتیجه بازده حذف افزایش می‌یابد. هرچند افزایش دز جاذب باعث افزایش حذف رنگزا می‌شود، اما این افزایش منجر به کاهش ظرفیت جذب می‌شود. این پدیده را می‌توان به استفاده از سطح در دسترس در شکل غیر اشباع جاذب نسبت داد. نتایج نشان داد الگوی جذب در شکل غیر اشباع جاذب باعث استفاده نامطلوب از فضاهای موجود می‌شود. بررسی ایزوترم جذب رنگزای انتخابی روی جاذب اصلاح شده مورد مطالعه نشان داد که فرایند جذب رنگزا با هر دو مدل فروندلیچ و لانگمیر تناسب دارد. اما تا حدی میزان تناسب با مدل فروندلیچ بیشتر است. مقدار ضریب فروندلیچ  $k_f$  و  $1/n$  از نمودار خطی  $\log q_{eq}$  در مقابل  $\log C_{eq}$  به همراه ضریب تعیین آنها نیز داده شده است. با توجه به ضریب تعیین مربوطه، مدل فروندلیچ تناسب بسیار خوبی با فرایند جذب دارد. بنابراین فرایند جذب با مدل فروندلیچ تناسب بیشتری دارد. این امر می‌تواند به دلیل توزیع یکنواخت یا تک لایه‌ای مکان‌های فعال روی جاذب باشد [۲۱].

#### ۶- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های انجام شده نتایج مناسبی از حذف رنگزای قرمز ۱۲۰ توسط جاذب خاکستر اصلاح شده گیاه حنظل نشان می‌دهد. میزان حذف رنگزا با کاهش غلظت اولیه رنگزا و pH و با افزایش زمان تماس و غلظت جاذب افزایش می‌یابد. معادلات ایزوترم به کار رفته برای توصیف داده‌های تعادلی نشان می‌دهد نتایج با ایزوترم فروندلیچ ( $R^2 = 0.987$ ) تطابق دارد. در نهایت، از آنجا که خاکستر اصلاح شده حنظل جذب قابل قبولی از خود نشان داد و با توجه به ارزان بودن جاذب‌های طبیعی، می‌توان از این مواد به عنوان جایگزینی مناسب برای جاذب‌های گران‌قیمت مرسوم استفاده نمود.

## ۷- مراجع

1. Paul, J., Rawat, K. P., Sarma K. S. S., and Sabharwal, S. (2011). "Decoloration and degradation of reactive Red-120 dye by electron beam irradiation in aqueous solution." *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 982-987.
2. Royer, B., Cardoso, N. F., Lima, E. C., Vaghetti, J. C. P., Simon, N. M., Calvete, T., and Veses, R. C. (2009). "Applications of Brazilian-pine fruit shell in natural and carbonized forms as adsorbents to removal of methylene blue from aqueous solutions - kinetic and equilibrium study." *J. Hazardous Materials*, 164, 1213-1222.
3. Lima, E.C., Royer, B., Vaghetti, J. C. P., Simon, N. M., Cunha, B. M., Pavan, F. A., Benvenuti E. V., Cataluna-Veses R., and Airoldi, C. (2008). "Application of Brazilian pine-fruit shell as a biosorbent to removal of reactive red 194 textile dye from aqueous solution kinetics and equilibrium study." *J. Hazardous Materials*, 155, 536-550.
4. Hoseinzadeh, E., and Shokoohi, R. (2010). "Biosorption process for heavy metal removing from aqueous solution." *Omransab*, 35, 32-43. (In Persian)
5. Annadurai, G., Juang, R. S., and Lee D. J. (2002). "Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions." *J. Hazard. Matter.*, 92 (3), 263-274.
6. Malik, P. K. (2003). "Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: A case study of Acid Yellow 36." *Dyes and Pigments*, 56(3), 239-249.
7. Chen, B., Hui, C. W., and McKay, G. (2001). "Film-pore diffusion modeling and contact time optimization for the adsorption of dyestuffs on pith." *Chemical Engineering Journal*, 84(2), 77-94.
8. Demirbas, A. (2009). "Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review." *J. of Hazardous Materials*, 98 (1), 234-237.
9. Ong S. T., Lee, C. K., and Zainal, Z. (2007). "Removal of basic and reactive dyes using ethylenediamine modified rice hull." *Bioresource Technology*, 98(15), 2792-2799.
10. Vijayaraghavan, K., and Yun Y. S. (2008). "Biosorption of reactive black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of brown sea weed *Laminaria* sp." *Dyes Pigments*, 76, 726-732.
11. Alver, E., and Metin, A.Ü. (2012). "Anionic dye removal from aqueous solutions using modified zeolite adsorption kinetics and isotherm studies." *Chem. Eng. J.*, 200-202, 59-67.
12. Greluk, M., and Hubicki, Z. (2010). "Kinetics, isotherm and thermodynamic studies of reactive black 5 removal by acid acrylic resins." *Chemical Engineering Journal*, 162(3), 919-926.
13. Shu, H. M., and Chang, H. F. (2005). "Effects of gap size and UV dosage on decolorization of C.I acid blue 113 wastewater in the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process." *J. of Hazardous Materials*, 118 (3), 205-211.
14. Doulati Ardejani, F., Badii, K., Limaee, N.Y., Shafaei, S.Z., and Mirhabibi, A.R. (2008). "Adsorption of Direct Red 80 dye from aqueous solution onto almond shells: Effect of pH, initial concentration and shell type." *J. Hazard. Mater.*, 151(2-3), 730-737.
15. Ong, S. T., Lee, C. K., and Zainal, Z. (2007). "Removal of basic and reactive dyes using ethylenediamine modified rice hull." *Bioresource Technology*, 98 (15), 2792-2792.
16. Greluk, M., and Hubicki, Z. (2010). "Kinetics, isotherm and thermodynamic studies of reactive black 5 removal by acid acrylic resins." *Chem. Eng. J.*, 162, 919-926.
17. Pagga, U., and Brown, D. (1986). "The degradation of dyestuffs: Part II. Behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests." *Chemosphere*, 15(4), 479-491.
18. Santhy, K., and Selvapathy, P. (2006). "Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon." *Bioresource Technology*, 97, 1329-1336.
19. Bhattacharyya, K. G., and Sharma, A. (2005). "Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on neem (*Azadirachta indica*) leaf powder." *Dyes and Pigments*, 65, 51-59.
20. Ghanizadeh, G., and Asgari, G. (2012). "Adsorption kinetics and isotherm of methylene blue and its removal from aqueous solution using bone charcoal." *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 102(1), 127-142.
21. Sulak, M.T., Demirbas, E., and Kobya, M. (2007). "Removal of Astrazon Yellow 7GL from aqueous solutions by adsorption onto wheat bran." *Bioresource Technol.*, 98(13), 2590-2598.