

جذب زیستی تیتان زرد و متیل رد توسط *Sargassum glaucescens*: مطالعه سینتیک، ایزوترم و

ترمودینامیک

چکیده

جلبک قهوه‌ای *Sargassum glaucescens* به‌عنوان یک جاذب ارزان و مؤثر برای حذف رنگ متیل رد (MR) و تیتان زرد (TY) از آب‌های آلوده استفاده شد. اثر متغیرهای مختلف مانند زمان تماس، غلظت رنگ و میزان جاذب و pH و دما روی ظرفیت جذب بررسی شد. بیشترین ظرفیت جذب دورنگ توسط جلبک برای تیتان زرد و متیل رد به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۵۵ میلی مول بر گرم بود. مقادیر ΔH ، ΔS نشان می‌دهند که جذب زیستی رنگ‌بر سطح جاذب *S. glaucescens* خود به خودی، گرماگیر و در جهت افزایش بی‌نظمی است. داده‌های فرآیند با سینتیک درجه دوم توصیف شدند. چند مدل ایزوترم بر داده‌های آزمایشگاهی برازش شد و برای تیتان زرد مدل Radke-Prausnitz و برای متیل رد مدل ایزوترم Hill بهترین همخوانی را داشت.

واژگان کلیدی: جذب زیستی، تیتان زرد، متیل رد، *Sargassum glaucescens*.

رضا تبارکی^{۱*}

عمران عبدی سرتنگ^۲

زهرا عابدینی^۳

سحر یوسفی^۴

۱، ۲، ۳ و ۴. دانشیار شیمی تجزیه، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

*مسئول مکاتبات:

rezatabaraki@yahoo.com

کد مقاله: ۱۳۹۷۰۳۰۵۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۶

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی

ارشد است.

مقدمه

یکی از پیامدهای منفی رشد فناوری مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع حجم زیادی از ترکیبات خطرناک است. محدود شدن منابع آبی و افزایش تقاضا برای آب سالم، نیاز به روش‌های تصفیه مؤثر آب است (Sirnivasan et al., 2010). رنگ‌های سنتزی گروهی از آلاینده‌های آلی هستند که به‌طور گسترده در صنایع نساجی، کاغذ، چاپ و رنگ‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند و پساب ناشی از آن‌ها به‌شدت رنگی است (Aksu, 2005). دفع این مواد در آب‌های جاری نه تنها بر ظاهر بلکه باعث کاهش فتوسنتز نیز می‌گردد. به‌علاوه پساب‌های رنگی ممکن است حاوی مواد شیمیایی باشند که اثرات سمی بر جمعیت‌های میکروبی و اثرات کشنده و سرطان‌زا بر پستانداران داشته باشند (Hamdaoui, 2006)؛ بنابراین تکنولوژی‌های حذف رنگ از آب‌های آلوده، به یک چالش مهم برای فناوری زیست‌محیطی تبدیل شده است (Soon et al., 2011). برای حذف رنگ‌ها از پساب اغلب روش‌هایی نظیر شناورسازی، لخته سازی، الکتروکلخته‌سازی، فیلتراسیون غشایی، تبادل یون، تخریب الکتروشیمیایی، رسوب‌گیری، اوزوناسیون و کربن فعال به کار گرفته شده‌اند. این روش‌ها برای حذف رنگ کاملاً مؤثر نیستند، گران‌قیمت هستند و حجم زیادی لجن تولید می‌کنند (Sirnivasan et al., 2010).

در سال‌های اخیر نشان داده شده است که جذب زیستی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم جهت حذف رنگ و فلز باشد (Vijayaraghavan et al., 2008). انواع مختلفی از جاذب‌های زیستی نظیر باکتری‌ها (Azin and Moghimi., 2018)، قارچ‌ها

(Kaushik et al., 2009)، مخمرها (Asfaram et al., 2018)، جلبک‌ها (Denardin da Rosa et al., 2018) و بقایای کشاورزی (Khataee et al., 2011) به کار گرفته شده‌اند. جلبک‌ها به دلیل رشد سریع در محیط‌های ساده، ارزان و در دسترس بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، همچنین دارای مساحت سطح زیاد و تمایل زیادی برای اتصال به رنگ/فلز دارند (Aksu and Tezer, 2005). دیواره سلولی جلبک‌ها شامل گروه‌های عاملی مختلفی مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، آمینو و فسفات است که نقش مهمی در حذف آلودگی ایفا می‌کنند (Srinivasan et al., 2010).

در این مطالعه، جذب زیستی رنگ‌های تیتان زرد و متیل رد توسط جلبک قهوه‌ای *Sargassum glaucescens* بررسی شد. اثر متغیرهای مختلف مانند غلظت رنگ، میزان جاذب و pH بر ظرفیت جذب بررسی شد. مدل‌های ایزوترم مختلف بر داده‌های آزمایشگاهی برازش شدند. همچنین مدل‌های سینتیکی مانند سینتیک شبه درجه اول، سینتیک شبه درجه دوم و نفوذ بین‌ذره‌ای مقایسه شدند. پارامترهای ترمودینامیکی جذب زیستی مانند انرژی آزاد گیبس ΔG ، آنتالپی ΔH و آنتروپی ΔS نیز تعیین شدند.

مواد و روش‌ها

جاذب جلبک قهوه‌ای *S. glaucescens* از شهر چابهار (واقع در جنوب شرقی ایران منتهی به سواحل دریای عمان) جمع‌آوری شد. جلبک ابتدا دو بار با آب شیر سپس دو بار با آب مقطر شستشو داده شد. بعد از خشک شدن، جلبک به صورت پودر با اندازه تقریبی ۰/۳۵۵-۰/۵ میلی‌متر الک و برای مراحل بعدی آزمایش نگه‌داشته شد. غلظت‌های مختلف رنگ از رقیق‌سازی محلول ذخیره 10^{-3} مولار تهیه گردید. غلظت رنگ با دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis مدل Bio (Varian) 300 ساخت کشور استرالیا اندازه‌گیری شد. تنظیم pH محلول با استفاده از سود و اسید کلریدریک رقیق و با دستگاه pH متر مدل متروهم ۷۸۰ ساخت کشور سوئیس انجام گرفت.

آزمایش‌ها جذب زیستی در یک ارلن مایر ۱۰۰ میلی‌لیتری حاوی رنگ با به‌کارگیری همزن مغناطیسی انجام گرفت. جهت بررسی اثرات شرایط مختلف بر فرآیند جذب زیستی، آزمایش‌ها در شرایط مختلف pH مقدار جاذب و غلظت رنگ انجام گرفت. اثر pH بین مقادیر ۲-۷ و مقدار جاذب در گستره ۱ - ۰/۱ گرم بر لیتر انجام شد. بعد از به تعادل رسیدن آزمایش، جاذب با استفاده از سانتریفیوژ به مدت ۵ دقیقه از سوسپانسیون جدا و غلظت رنگ باقیمانده اندازه‌گیری گردید. ظرفیت جذب رنگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$q_{eq} = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad \text{رابطه ۱:}$$

q_{eq} میزان رنگ جذب‌شده در واحد جرم جاذب (میلی مول بر میلی‌لیتر)، V حجم محلول (لیتر)، C_0 غلظت اولیه رنگ (میلی مول بر میلی‌لیتر)، C_e غلظت تعادلی رنگ (میلی مول بر میلی‌لیتر) و m مقدار جاذب (گرم) است.

آزمایشات سینتیکی در یک ارلن ۵۰۰ میلی‌لیتری حاوی متیل رد و تیتان زرد با غلظت 10^{-5} مول بر لیتر و میزان جاذب ۰/۲ گرم بر لیتر و pH برابر ۲ در دمای اتاق انجام گرفتند. در بازه‌های زمانی مشخص، نمونه‌گیری انجام، نمونه صاف و غلظت رنگ باقیمانده تعیین گردید. داده‌های به‌دست‌آمده با مدل سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و نفوذ بین‌ذره‌ای برازش شدند:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$q_t = k_{id} t^{\frac{1}{2}} + C \quad \text{رابطه ۴:}$$

که در آن q_e و q_t بیان‌گر مقدار رنگ جذب‌شده در زمان تعادل و زمان t ، k_1 ثابت سرعت مرتبه یک^{-۱} (دقیقه)، k_2 ثابت سرعت مرتبه دوم (میلی‌گرم دقیقه/گرم) و K_{id} ثابت نفوذ بین‌ذره‌ای (میلی مول بر گرم دقیقه^{۱/۲}) و C عرض از مبدأ است. مطالعه ترمودینامیکی در دماهای مختلف انجام شد، بدین منظور ۰/۰۱ گرم از جاذب خشک‌شده به ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول رنگ با غلظت مشخص با pH برابر ۲ افزوده شد. ارلن مایر در حمام آب روی یک همزن قرار داشت و بعد از ۵۰ دقیقه (زمان موردنیاز برای رسیدن به تعادل) غلظت رنگ باقیمانده تعیین گردید. انرژی آزاد گیبس (ΔG کیلوژول بر مول) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad \text{رابطه ۵:}$$

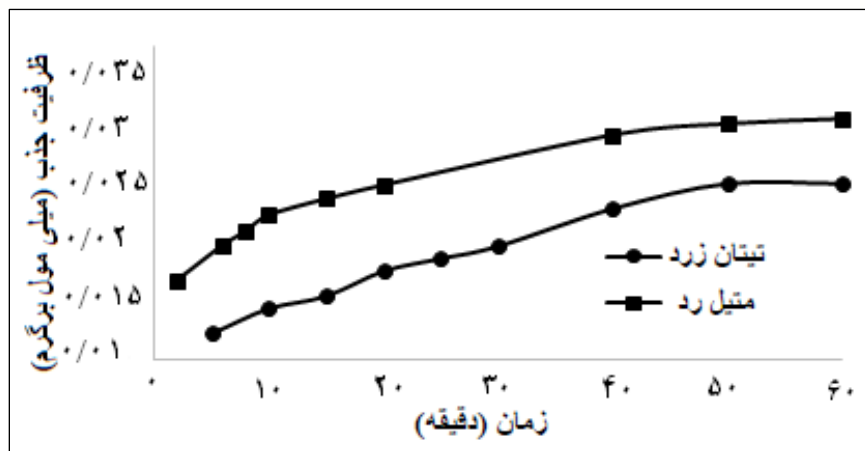
R ثابت جهانی گازها (مول.کلوین/ژول)، T دما (کلوین)، K ثابت تعادل است. ارتباط بین انرژی آزاد گیبس ΔG° ، آنتروپی ΔS° و تغییرات آنتالپی ΔH° به صورت زیر (رابطه ۶) است:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این پژوهش، برای بیان ارتباط نتایج جذب سطحی رنگ مدل‌های ایزوترم Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Redlich-Peterson, Hill, Sips, Harkin-Jura, Toth, Fritz-Schlunder, Koble-Corrigan, Liu, Radke-Prausnitz استفاده شدند (Rangabhashiyam *et al.*, 2014). داده‌های تعادلی جذب سطحی با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی به این مدل‌ها برازش شدند. بسته به این‌که چگونه مدل ایزوترم خطی شود به صورت‌های مختلفی تابع توزیع خطای اصلی تغییر می‌کند. این امر انتخاب بهترین ایزوترم برازش شده را مشکل می‌کند؛ بنابراین، استفاده از مدل‌های غیرخطی برای برازش داده‌های آزمایشگاهی ارجح است (Ho *et al.*, 2005). توابع خطا نیز برای ارزیابی همخوانی معادلات با داده‌های آزمایشگاهی به کار می‌روند. در این مطالعه چندین تابع خطا بررسی شدند. جزییات مدل‌های غیرخطی ایزوترمها و توابع خطا توسط Rangabhashiyam بحث شده‌اند (Rangabhashiyam *et al.*, 2014).

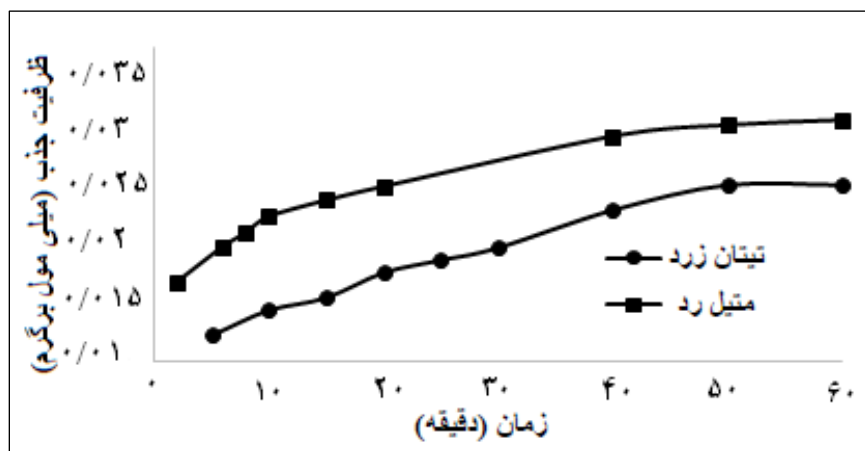
نتایج

فرآیندهای جذب زیستی با استفاده از جلبک به شدت به pH وابسته هستند. pH محلول‌ها ممکن است به واسطه چندین مکانیزم مانند پروتون‌دار شدن، پروتون زدایی رنگ و تغییر خواص سطح جاذب فرآیند جذب زیستی را تحت تأثیر قرار دهند. اثر pH در گستره ۲ تا ۷ در دمای ۲۵ درجه، غلظت رنگ 10^{-5} مولار و میزان جاذب ۰/۲ گرم بر لیتر بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، جذب زیستی هر دورنگ با افزایش pH کاهش می‌یابد. بیشترین جذب زیستی هر دورنگ در pH اسیدی (۲-۳) رخ می‌دهد زیرا در pH اسیدی سطح جاذب دارای بار مثبت می‌شود و با جاذبه الکترواستاتیکی رنگ آنیونی را جذب خود می‌کند (Kousha *et al.*, 2012). یک جاذب خوب باید با سرعت غلظت زیادی از رنگ را در زمان کوتاهی جذب کند (Mall *et al.*, 2006). ظرفیت جذب زیستی به صورت تابعی از زمان تماس، برای دورنگ، در شکل ۲ مشخص شده است. بعد از گذشت زمان ۵۰ دقیقه، فرآیند به تعادل می‌رسد و این زمان به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد. در ابتدای فرآیند تعداد سایت‌های خالی در دسترس زیاد است، در ادامه تعداد سایت‌ها کاهش می‌یابد و جذب زیستی هم کاهش می‌یابد.



شکل ۱: اثر pH بر ظرفیت جذب جلبک.

(میزان جاذب ۰/۲ گرم بر لیتر، غلظت رنگ: 10^{-5} مول بر لیتر، دما: ۲۵ درجه سانتی گراد، زمان تماس: ۶۰ دقیقه).

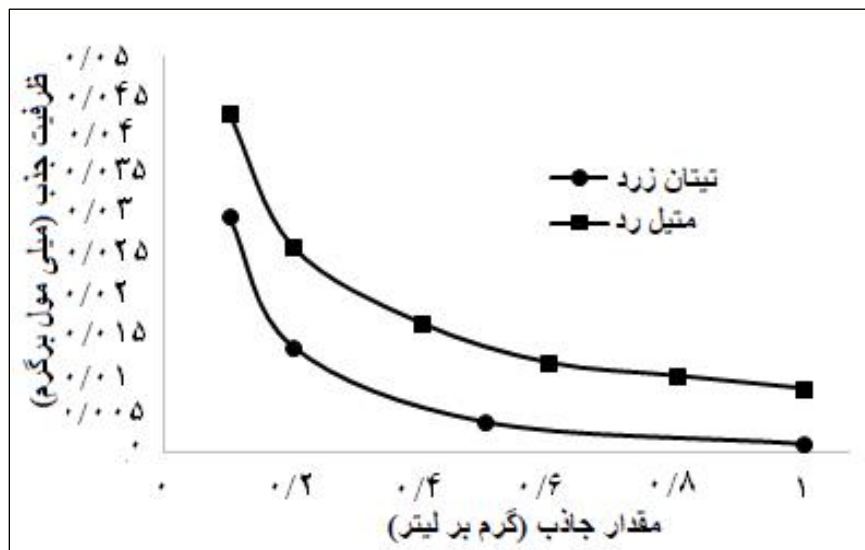


شکل ۲: اثر زمان تماس بر ظرفیت جذب جلبک.

(pH ۲، میزان جاذب ۰/۲ گرم بر لیتر، غلظت رنگ: 10^{-5} مول بر لیتر، دما: ۲۵ درجه سانتی گراد).

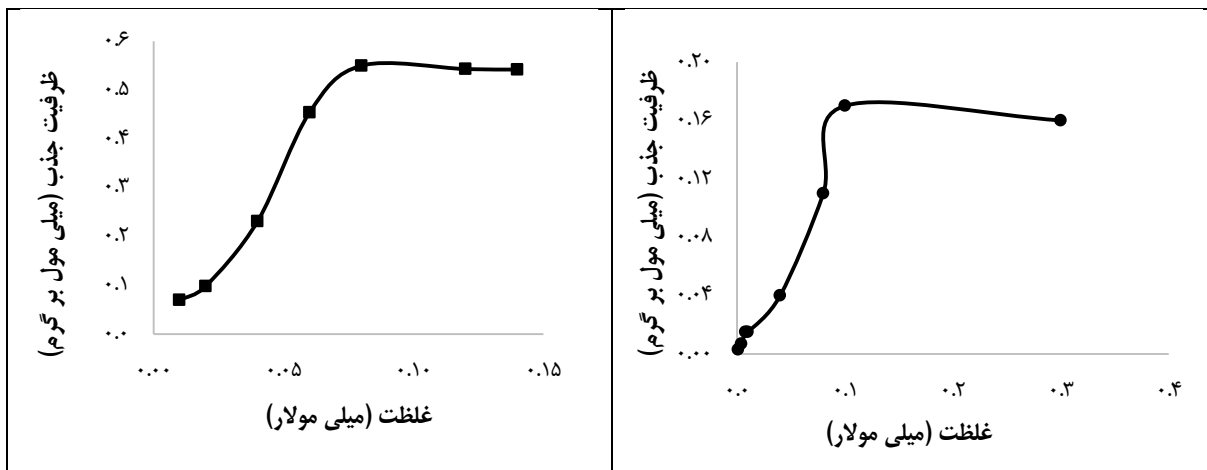
اثر میزان جاذب در محدوده (۰/۱-۱) گرم بر لیتر) برای هر دورنگ، در 100 میلی لیتر از رنگ با غلظت 10^{-5} مولار در pH و زمان بهینه موردبررسی قرار گرفت. شکل ۳ نشان می دهد که ظرفیت جذب زیستی با افزایش میزان جاذب کاهش می یابد. با افزایش میزان جاذب (درحالی که غلظت رنگ ثابت است)، میزان جذب افزایش می یابد ولی میزان جذب در واحد وزن جاذب کاهش می یابد. نتایج مشابه برای جذب زیستی رنگ های دیگر گزارش شده است (El Nemer et al., 2006; Tsai et al., 2010).

اثر غلظت رنگ بر ظرفیت جذب در گستره 10^{-4} - 10^{-6} مولار بررسی شد. ظرفیت جذب زیستی با افزایش غلظت اولیه رنگ تا 10^{-4} افزایش یافت (شکل ۴). حداکثر ظرفیت جذب زیستی برای تیتان زرد و متیل رد به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۵۵ میلی مول بر گرم به دست آمد.



شکل ۳: اثر میزان جاذب بر ظرفیت جذب جلبک.

(pH ۲ غلظت رنگ: 10^{-5} مول بر لیتر، زمان تماس: ۵۰ دقیقه، دما: ۲۵ درجه سانتی‌گراد).



ب

الف

شکل ۴: اثر غلظت اولیه رنگ بر ظرفیت جذب جلبک.

(الف TY و ب MR) (pH ۲، زمان تماس: ۵۰ دقیقه، میزان جاذب: ۰/۱ گرم بر لیتر، دما: ۲۵ درجه سانتی‌گراد).

بحث و نتیجه‌گیری

مقادیر ثابت و میزان R2 سه مدل سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و نفوذ بین‌ذره‌ای در جدول ۱ لیست شده‌اند. جذب زیستی تیتان زرد و متیل رد توسط جلبک، با سینتیک شبه درجه دوم به‌خوبی توصیف و ظرفیت جذب تخمینی از مدل با داده‌های آزمایشگاهی به‌خوبی همخوانی داشت. در مورد نفوذ بین‌ذره‌ای ضرایب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹ بودند که می‌توان نتیجه گرفت که سیستم جذب زیستی رنگ-جلبک توسط

جذب - شیمیایی کنترل می‌شود و احتمالاً واکنش‌های تبادل در سطح رخ می‌دهند تا زمانی که تمام سایت‌های فعال سطح اشغال شوند. سپس، مولکول‌های رنگ برای برهم‌کنش‌های بعدی به درون جاذب نفوذ می‌کنند؛ بنابراین، فرآیند جذب زیستی رنگ‌ها فرآیندی پیچیده و دربرگیرنده لایه‌مرزی و نفوذ بین‌ذره‌ای است. به‌رحال نفوذ رنگ در میان توده زیستی آهسته‌تر از انتقال رنگ از توده محلول به سطح خارجی جاذب زیستی است (Ozer et al., 2006). ظرفیت جذب زیستی رنگ متیل رد توسط جلبک *S. glaucescens* بیشتر از تیتان زرد است، چون اندازه متیل رد کوچک‌تر از تیتان زرد است.

جدول ۱. پارامترهای سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و مدل نفوذ بین‌ذره‌ای برای جذب زیستی TY و MR

مدل	شبه درجه اول		شبه درجه دوم		بین‌ذره‌ای		نفوذ R^2
	k_1	R^2	k_2	R^2	k_{id}	C	
TY	۰/۰۴۳	۰/۹۰۲	۲/۳۰	۰/۹۸۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۹۸۵
MR	۰/۰۶۹	۰/۹۷۹	۸/۵۵	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	۰/۹۵۵

داده‌های آزمایشگاهی جذب زیستی توسط چهارده مدل ایزوترم بررسی و توابع خطا برای هر یک مشخص شدند. جدول ۲ مقادیر پارامترهای این ایزوترم‌ها را برای هر دورنگ نشان می‌دهد. برای تیتان زرد مدل Radke–Prausnitz و برای متیل رد مدل Hill بهترین همخوانی را داشت. نتایج پارامترهای ترمودینامیکی در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر منفی انرژی آزاد گیبس نشان می‌دهد که جذب زیستی این دورنگ روی جلبک قهوه‌ای به‌صورت خودبه‌خودی و مقادیر مثبت تغییرات آنتالپی نشان‌دهنده گرماگیر بودن فرآیند است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای ایزوترمهای مختلف و توابع خطا.

Model	پارامتر	TY	MR	تابع خطا	TY	MR
Langmuir	Q_0	۰/۲۲۶	۱/۰۱۷	SSE	۰/۰۰۴	۰/۰۲۷
	K_L	۱۱/۹۸۶	۱۰/۰۵۳	R^2_{adj}	۰/۸۷۳	۰/۸۸۱
Freundlich	K_f	۰/۳۴۱	۲/۱۶۴	SSE	۰/۰۰۶	۰/۰۳۹
	n	۱/۹۸۷	۱/۵۶۴	R^2_{adj}	۰/۷۷۸	۰/۸۲۴
Dubinin-Radushkevich	Q_m	۰/۲۲۹	۱/۰۲۸	SSE	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶
	K	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	R^2_{adj}	۰/۸۶۹	۰/۸۸۵
Harkin-Jura	A_H	۰/۰۰۴	۰/۰۶۰	SSE	۰/۰۱۵	۰/۰۹۲
	B_2	۰/۳۷۶	۰/۶۸۸	R^2_{adj}	۰/۴۸۹	۰/۵۹۰
Redlich-Peterson	K_{RP}	۰/۶۴۹	۷/۸۰۲	SSE	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴
	a_{RP}	۳۰/۹۶۶	۶۵/۶۴۰	R^2_{adj}	۰/۹۴۵	۰/۹۳۴
	g	۲/۲۲۸	۲/۱۶۱			
Hill	q_{sH}	۰/۱۶۸	۲/۵۸۴	SSE	۰/۰۰۱	۰/۰۱۰
	n_H	۳/۵۱۶	۲/۸۲۳	R^2_{adj}	۰/۹۵۰	۰/۹۵۳
	K_D	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱			
Sips	q_{ms}	۰/۲۱۰	۰/۷۴۵	SSE	۰/۰۰۳	۰/۰۱۸
	K_s	۲۵/۴۷۸	۶۴/۴۱۰	R^2_{adj}	۰/۸۸۸	۰/۹۱۶
	m_s	۱/۲۲۹	۱/۴۳۸			
Toth	K_T	۰/۱۶۴	۶/۴۳۱	SSE	۰/۰۰۱	۰/۰۷۵

	A_T	۰/۰۰۰۰۱	۱۷/۸۷۸	R^2_{adj}	۰/۹۶۲	۰/۶۴۴
	T_T	۱۳/۰۳۴	۱۰/۳۱۵			
Radke-Prausnitz1	q_{mRPI}	۴/۷۶۱	۲۰/۴۵۹	SSE	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱
	K_{RPI}	۰/۴۶۱	۰/۴۷۲	R^2_{adj}	۰/۹۱۵	۰/۹۰۰
	m_{RPI}	۱۰/۶۳۹	۱۳/۴۰۱			
Radke-Prausnitz2	q_{mRPII}	۰/۰۵۵	۰/۱۲۰	SSE	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴
	K_{RPII}	۳۰/۲۲۵	۶۴/۹۳۶	R^2_{adj}	۰/۹۴۴	۰/۹۳۴
	m_{RPII}	۲/۲۶۲	۲/۱۵۵			
Radke-Prausnitz3	q_{mRPIII}	۱/۵۲۴	۴/۸۶۳	SSE	۰/۰۰۱	۰/۰۷۵
	K_{RPIII}	۰/۰۰۰۱	۷/۸۹۰-	R^2_{adj}	۰/۹۶۸	۰/۶۴۴
	m_{RPIII}	۶/۶۹۵-	۱۲/۲۱۶-			
Fritz-Schlunder	q_{mFS}	۰/۰۵۶	۰/۱۲۱	SSE	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴
	K_{FS}	۲۹/۷۹۰	۶۴/۶۸۸	R^2_{adj}	۰/۹۴۴	۰/۹۳۳
	m_{FS}	۲/۲۵۴	۲/۱۵۴			
Koble-Corrigan	a	۵/۳۳۵	۴۱/۴۷۱	SSE	۰/۰۰۳	۰/۰۱۸
	b	۲۵/۴۵۳	۵۴/۶۳۶	R^2_{adj}	۰/۸۸۸	۰/۹۱۲
	n	۱/۲۲۸	۱/۳۹۶			
Liu	Q_{max}	۰/۷۴۶	۰/۲۰۹	SSE	۰/۰۱۸	۰/۰۰۳
	K_L	۶۳/۶۹۷	۲۵/۲۷۷	R^2_{adj}	۰/۹۱۵	۰/۸۸۷
	n_L	۱/۴۳۵	۱/۲۲۷			

Q_0 : ظرفیت پوشش تک لایه، K_L : ثابت تعادل لانگمیر، K_F : ثابت تعادل فروندلیش، n: نما در ایزوترم فروندلیش، Q_m : حداکثر ظرفیت پوشش ایزوترم دوبینین-رادشکوویچ، K: ثابت تعادل دوبینین-رادشکوویچ، B_2 ، A_H : ثابت‌های ایزوترم هارکین-جارا، K_{RP} : ثابت تعادل ردلیچ-پترسن، a_{RP} : ثابت ایزوترم ردلیچ-پترسن، g: نما در ایزوترم ردلیچ-پترسن، q_{SH} : حداکثر ظرفیت پوشش ایزوترم هیل، K_D : ثابت تعادل هیل، n_H : ثابت ایزوترم هیل، q_{ms} : حداکثر ظرفیت پوشش ایزوترم سیپس، K_s : ثابت تعادل سیپس، n_s : ثابت ایزوترم سیپس، K_T : ثابت تعادل توٹ، T_T : نما در ایزوترم توٹ، q_{mRPI} ، q_{mRPII} ، q_{mRPIII} : حداکثر ظرفیت پوشش در معادلات سه‌گانه رادکه-پرازینیتز، K_{RPI} ، K_{RPII} ، K_{RPIII} : ثابت تعادل در معادلات سه‌گانه رادکه-پرازینیتز، m_{RPII} ، m_{RPI} ، m_{RPIII} : نما در معادلات سه‌گانه رادکه-پرازینیتز، q_{mFS} : حداکثر ظرفیت پوشش ایزوترم فریتز، K_{FS} : ثابت تعادل فریتز، m_{FS} : ثابت ایزوترم فریتز، n، b، a: ضرایب ایزوترم کوبله-کارلیگان، Q_{max} : حداکثر ظرفیت پوشش ایزوترم لیو، K_L : ثابت تعادل لیو.

نتایج مطالعه کنونی قابلیت جلبک قهوه‌ای *S. glaucescens* برای حذف رنگ‌های تیتان زرد و متیل رد را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد جذب زیستی این دورنگ بعد از گذشت زمان ۵۰ دقیقه به تعادل رسیده و داده‌های سینتیکی جذب زیستی با مدل سینتیک شبه درجه دوم همخوانی دارد. نتایج نشان می‌دهد که جلبک قهوه‌ای *S. glaucescens* می‌تواند به‌عنوان جاذب ارزان‌قیمت برای حذف رنگ جایگزین روش‌های متداول گران‌قیمت کنونی شود.

جدول ۳. پارامترهای ترمودینامیکی جذب زیستی MR و TY توسط جلبک.

رنگ	T (K)	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (J mol ⁻¹)
TY	۲۹۸	۱۰/۱۵۸-	۳/۹۶۷	۴۷/۳۱
	۳۰۸	۱۰/۵۵۰-		
	۳۱۸	۱۱/۱۰۴-		
MR	۲۹۳	۰/۳۶۱-	۴/۳۵۵	۱۵/۸
	۳۰۳	۰/۲۵۲-		
	۳۱۳	۰/۶۵۴-		
	۳۲۳	۰/۷۵۳-		

منابع

- Aksu, Z. and Tezer, S., 2005.** Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. *Process Biochemistry*, 40:1347–1361.
- Aksu, Z., 2005.** Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process Biochemistry*, 40:997–1026.
- Asfaram, A., Ghaedi, M., Dashtian, K., and Ghezelbash, G. R., 2018.** Preparation and Characterization of $Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$ Nanoparticles Supported on Dead Cells of *Yarrowia lipolytica* as a Novel and Efficient Adsorbent/Biosorbent Composite for the Removal of Azo Food Dyes: Central Composite Design Optimization Study. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6:4549–4563.
- Azin, E., Moghimi, M., 2018.** Efficient mycosorption of anionic azo dyes by *Mucor circinelloides*: Surface functional groups and removal mechanism study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6:4114-4123.
- Denardin da Rosa, A. L., Carissimi, E., Dotto, G. L., Sander, H. and Feris, L. A., 2018.** Biosorption of rhodamine B dye from dyeing stones effluents using the green microalgae *Chlorella pyrenoidosa*. *Journal of Cleaner Production*, 198:1302-1310.
- Daneshvar, N., Khataee, A. R., Rasoulifard, M. H. and Pourhassan, M., 2007.** Biodegradation of dye solution containing Malachite Green: optimization of effective parameters using Taguchi method. *Journal of Hazardous Materials*, 143:214–219.
- El Nemr, A., Abdelwahab, O., Khaled, A. and El Sikaily, A., 2006.** Biosorption of Direct Yellow 12 from aqueous solution using green alga *Ulva lactuca*. *Chemistry and Ecology*, 22:253–266.
- Ertugrul, S., San, N. O. and Dönmez, G., 2009.** Treatment of dye (Remazol Blue) and heavy metals using yeast cells with the purpose of managing polluted textile wastewaters. *Ecological Engineering*, 35:128–134.
- Hamdaoui, O., 2006.** Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick. *Journal of Hazardous Materials*, B135:264–273.
- Ho, Y. S. and McKay, G., 1999.** Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34:451–465.
- Kaushik, P. and Malik, A., 2009.** Fungal dye decolorization: recent advances and future potential. *Environment International*, 35:127-141.
- Khataee, A. R. and Dehghan, G., 2011.** Optimization of biological treatment of a dye solution by macroalgae *Cladophora* sp. using response surface methodology. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering*, 42, 26–33.
- Kousha, M., Daneshvar, E., Dopekar, H., Taghavi, D. and Bhatnagar, A., 2012.** Box–Behnken design optimization of Acid Black 1 dye biosorption by different brown macroalgae. *Chemical Engineering Journal*, 179:158–168.
- Mall, I. D., Srivastava, V. C. and Agarwal, N. K., 2006.** Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash–kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Dyes and Pigments*, 69:210–223.
- Özer, A., Akkaya, G. and Turabik, M., 2006.** Biosorption of Acid Blue 290 (AB 290) and Acid Blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*. *Journal of Hazardous Materials*, 135:355-364.
- Pandey, A., Singh, P. and Iyengar, L., 2007.** Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 59:73-84.
- Rangabhashiyam, S., Anu, N., Giri Nandagopal, M. S. and Selvaraju, N., 2014.** Relevance of isotherm models in biosorption of pollutants by agricultural byproducts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2:398-414.
- Soon, A. N. and Hameed, B. H., 2011.** Heterogeneous catalytic treatment of synthetic dyes in aqueous media using Fenton and photo-assisted Fenton process. *Desalination*, 269:1-16.

- Srinivasan, A. and Viraraghavan, T.,** 2010. Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: a review. *Journal of Environmental Management*, 91:1915–1929.
- Tsai, W. T. and Chen, H. R.,** Removal of malachite green from aqueous solution using low-cost chlorella-based biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 175:844–849.
- Vijayaraghavan, K. and Yun, Y. S.,** 2008. Bacterial biosorbents and biosorption, *Biotechnology Advance*, 26:266–291
- Weber, W. and Morris, J.,** 1963. Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89:31–60.

