



کاربرد جاذب زیستی جلبک *Champia kotschyana* Harvey برای حذف کادمیوم: مکانیسم‌ها و عوامل موثر

مریم منتی^۱، پروانه تیشه‌زن^{۲*}، عبدالرحیم هوشمند^۳، مجید بغدادی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۲- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۳- استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۴- دانشیار، گروه آب و فاضلاب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	یکی از راه‌های جبران کمبود آب به خصوص در بخش کشاورزی، استفاده از آب‌های قابل بازیافت از جمله زه‌آب‌های کشاورزی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی است. از طرف دیگر، حذف آلاینده‌های موجود در این گونه آب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل هزینه بالا و راندمان کم سایر روش‌های حذف آلاینده، روش جذب زیستی با هزینه کم، راندمان خوبی برای حذف آلاینده‌ها از جمله کادمیوم را دارد. در این تحقیق جذب کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جلبک <i>Champia kotschyana</i> Harvey مورد مطالعه قرار گرفت. اثر متغیرهای موثر مانند غلظت یون‌های کادمیوم (۵-۰/۵ میلی‌گرم در لیتر)، مقدار جاذب (۷-۱ گرم در لیتر)، pH محلول (۸-۳) و زمان تماس (۱۰-۹۰ دقیقه) با روش سطح پاسخ مدلسازی شد. طراحی باکس بنکن برای داده‌های تجربی استفاده شد و بهترین سطح متغیرهای مستقل یعنی غلظت اولیه یون کادمیوم، pH، زمان تماس و مقدار جاذب انتخاب شدند. در شرایط بهینه (pH=۴، مقدار جاذب= ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر، زمان تماس= ۳۶/۵۳ دقیقه، غلظت اولیه کادمیوم= ۳/۳ میلی‌گرم در لیتر) ظرفیت جذب و درصد حذف کادمیوم به ترتیب، ۱۱/۳ میلی‌گرم بر گرم و ۸۰/۱۴ به دست آمد. مطالعات سینتیک و ایزوترم نشان داد که مدل سینتیک شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر به خوبی با داده‌های جذب کادمیوم مطابقت دارند. بر طبق نتایج می‌توان از بیومس این جلبک برای جذب کادمیوم از محلول‌های آبی استفاده کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰	
کلید واژه‌ها: کادمیوم، جلبک، جذب سطحی، ایزوترم، سینتیک.	



Application of *Champia kotschyana* Harvey biosorbent for cadmium removal: mechanisms and influencing factors

Maryam Menati¹, Parvaneh Tishehzan^{2*}, Abdolrahim Hooshmand³, Majid Baghdadi⁴

- 1- PhD student, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- 2- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- 3- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- 4- Associated Professor, Department of Environmental Engineering, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received:
08/06/2024

Accepted:
23/09/2024

Available online:
20/11/2024

Keywords:

Cadmium,
Alga,
Adsorption,
Isotherm,
Kinetic

Abstract

One way to compensate for water shortages, especially in the agricultural sector, is to use recyclable water, including agricultural water, domestic and industrial wastewater. On the other hand, removing pollutants in these waters is particularly important. Due to the high cost and low efficiency of other pollutant removal methods, the low-cost biosorption method has good efficiency for the removal of pollutants including cadmium. In this research, the absorption of cadmium from aqueous solutions was studied using the algae *Champia kotschyana* Harvey. The impact of effective variables such as the concentration of cadmium ions (0.5-5 mg/liter), amount of adsorbent (1-7 g/liter), solution pH (3-8) and contact time (90-10 minutes) were modeled with the response surface method. The design of the Box-Behken was used for experimental data and the best level of independent variables, namely the initial concentration of cadmium ion, pH, contact time and adsorbent value, were selected. In optimal conditions (pH=4, amount of adsorbent=1.5 mg/liter, contact time=36.53 minutes, initial concentration of cadmium=3.3 mg/liter), the absorption capacity and percentage of cadmium removal, were obtained 3.11 mg/g and 80.14 respectively. Kinetic and isotherm studies showed that the second-order Kinetic model and the isotherm Langmuir well corresponded to cadmium absorption data. According to the results, the *Champia K.* Harvey alga biomass can be used to adsorb cadmium from aqueous solutions.

* Corresponding author E-mail address: partishehzan@scu.ac.ir

مقدمه

آلودگی آب‌های سطحی و زیرسطحی ناشی از فلزات سنگین یک نگرانی اساسی جهانی است (لین^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). فلزات سنگین توسط فرآیندهای طبیعی از جمله باد، سیل و همچنین از طریق فعالیت‌های انسانی در محیط منتشر می‌شوند. این فلزات از طریق بارش و رواناب به بدن‌های آبی وارد می‌شوند (سلما^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). صنایع مختلف (مانند استخراج و ذوب فلزات، آبکاری الکتریکی، باتری‌سازی، نساجی، پالایشگاهی، پتروشیمی، چرم، آفت‌کش‌ها و مواد شیمیایی) پساب‌های حاوی فلزات را تولید و به آب‌های دریافتی تخلیه می‌کنند که باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی جدی می‌شود (کلکلی^۳ و همکاران، ۲۰۱۱).

آن‌ها می‌توانند از طریق فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و فیزیولوژیکی در محیط انباشته شوند و ممکن است از طریق زنجیره غذایی اثرات سمی روی ارگانسیم‌ها، اکوسیستم‌ها و انسان‌ها داشته باشند (لین و همکاران، ۲۰۲۰). در میان فلزات سنگین غیرقابل تجزیه زیستی موجود در پسماندهای صنعتی، مس، کروم، کادمیوم و نیکل رایج‌ترین فلزات سنگین گزارش شده‌اند. بنابراین به‌عنوان آلاینده‌ها در خاک و بدن‌های آبی گسترده‌تر هستند (احمد^۴ و کبیر^۵، ۲۰۱۳). گفته شده است که غلظت بیش از ۳ (mg/L) کادمیوم باعث ایجاد سمیت می‌شود (تی چونوو^۶ و همکاران، ۲۰۱۲).

کادمیوم به‌طور طبیعی از طریق کانی یا سنگ‌ها آزاد و توسط زنجیره غذایی وارد دستگاه گوارش شده و بر اندام‌هایی مانند قلب، کلیه، کبد و اندام‌های تولید مثل تأثیر می‌گذارد. همچنین، بر رشد، مورفولوژی، متابولیسم سلولی، فتوسنتز در گیاهان و میکروپها تأثیر می‌گذارد و گاهی منجر به مرگ آن‌ها می‌شود (چاف^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). از این‌رو، نیاز مبرمی به حذف موثر فلزات سنگین از منابع مختلف محیطی وجود دارد و از این طریق می‌توان کنترل قرار گرفتن در معرض این فلزات سنگین را در اختیار انسان قرار داد. جذب زیستی را می‌توان به‌عنوان حذف گونه‌های فلزی یا متالوئیدی، ترکیبات و ذرات از محلول توسط مواد بیولوژیکی تعریف کرد. انواع مختلف زیست توده به شکل غیر زنده به دلیل ظرفیت جذب فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گرفته است (تمیل‌سوان^۸ و همکاران، ۲۰۱۱).

در سال‌های اخیر جذب زیستی با استفاده از میکروارگانیسم‌های زنده و غیرزنده برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی، به دلیل سادگی، راندمان خوب، به حداقل رساندن ضایعات ثانویه (شیمیایی یا بیولوژیکی) و هزینه پایین اعتبار مهمی پیدا کرده است. از آنجایی که مواد بیولوژیکی غیر زنده آسان‌تر و ارزان‌تر به دست می‌آیند، استفاده از آن‌ها به‌عنوان جاذب زیستی روشی مقرون به صرفه و موثر برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب بوده است (بلغاریو^۹ و بلغاریو، ۲۰۱۲). از باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، برگ‌های گیاه و بافت‌های ریشه به‌عنوان جاذب زیستی استفاده شده است (تمیل‌سوان و همکاران، ۲۰۱۲). جلبک‌های دریایی در مقادیر بالا در بسیاری از مناطق جهان وجود دارند و نوعی منابع بیولوژیکی مطلوب به‌شمار می‌آیند (پاواسانت^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۶). در بسیاری از مطالعات نشان داده شده که جلبک‌های دریایی به دلیل وجود پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها یا لیپیدها در سطح دیواره‌های سلولی، ظرفیت اتصال فلزی بالایی دارند (ساین^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱).

پژوهش‌های زیادی برای حذف فلزات سنگین با استفاده از بیومس جلبک انجام شده است از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات لی^{۱۲} و چانگ^{۱۳} (۲۰۱۱) استفاده از جلبک‌های سبز *Cladophora* و *Spirogyra* برای جذب سرب و مس، سلیمان^۱

1. Lin
2. Salma
3. Çelekli
4. Ahmed
5. Kabir
6. Tchounwou
7. Chugh
8. Tamilselvan
9. Bulgariu
10. Pavasant
11. Singh
12. Lee
13. Chang

و همکاران (۲۰۱۳) استفاده از جلبک *Cyanophyta* برای حذف آرسنیک، سرب، کادمیوم و مس، فریرا^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، حذف زینک، نیکل و سرب با استفاده از جلبک‌های *Arthrospira (Spirulina) platensis* و *Chlorella vulgaris*، ورما و همکاران (۲۰۱۸)، استفاده از جلبک *S. filipendula*، برای حذف کادمیوم، استفاده از جلبک *Spirulina platensis (SP)* برای حذف مس توسط گاناسوندری^۳ و سنتیل^۴ کومار (۲۰۱۷)، بردولایی^۵ و همکاران (۲۰۱۷)، استفاده از جلبک *Scenedesmus dimorphu* برای حذف کبالت، تیموری و همکاران (۲۰۱۸)، از جلبک قرمز *Gracilaria corticata* برای حذف مس، روی، سرب و کادمیم، پرادهان^۶ و همکاران (۲۰۱۹)، استفاده از میکرو جلبک *Scenedesmus sp* برای حذف کروم شش ظرفیتی، موریرا^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، استفاده از جلبک *Chorella pyrenoidosa* برای جذب مس، یغمائیان و جعفری (۲۰۱۸)، استفاده از جلبک *Chlorella coloniales* برای حذف کبالت، کادمیوم، آرسنیک، آهن و کروم اشاره کرد.

نتایج تحقیق پسوانت^۸ و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که ماکرو جلبک سبز *Caulerpa lentillifera*، برای حذف کادمیوم، مس، سرب و زینک در مدت زمان ۲۰ دقیقه به حالت تعادل رسیده است و با افزایش pH راندمان حذف افزایش داشته است. ایزوترم جذب از لانگمویر و سینتیک جذب از انتشار درون ذره‌ای پیروی می‌کند. حداکثر ظرفیت جذب به ترتیب زینک > کادمیوم > مس > سرب بوده است.

نتایج تحقیق سلیسیو^۹ و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که استفاده از جلبک *Spirulina platensis* برای حذف کادمیوم در مقادیر کمتر از ۲ گرم از جاذب، راندمان جذب بالاتری داشته است. با افزایش مقدار جاذب ظرفیت جذب کاهش یافته است. به نظر می‌رسد که تاکنون از جلبک *Champia kotschyana Harvey* به‌عنوان جاذب برای حذف کادمیوم استفاده نشده است. این جلبک به رنگ سبز ارغوانی، بوته‌ای، در هم پیچیده و ریشه‌ای است. محل رویش این جلبک معمولاً قسمت‌های میانی و پایین بین محدوده جزر و مدی روی سطح بسترهای صخره‌ای است. در این مطالعه، از بیومس جلبک مذکور برای حذف کادمیوم از محلول آبی به عنوان تابعی از pH محلول اولیه، غلظت اولیه کادمیوم، زمان تماس، مقدار جاذب با روش سطح پاسخ بررسی شد که برای طراحی آزمایش‌ها از باکس بنکن^{۱۰} و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^{۱۱} استفاده شد. داده‌های تعادلی و جنبشی مطالعات جذب زیستی با استفاده از دو مدل ایزوترم (لانگمویر^{۱۲} و فروندلیچ^{۱۳}) و دو مدل سینتیک جنبشی (شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم) مدل‌سازی شدند.

مواد و روش‌ها

تهیه جاذب زیستی

نمونه‌های جلبک *Champia k. Harvey* از بانک ذخایر زیستی خلیج فارس تهیه شدند. برای حذف ناخالصی‌ها، چندین بار با آب دیونیزه شسته شده و در آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. بعد از آسیاب کردن در نهایت، زیست توده‌های خشک شده در بطری‌های پلی پروپیلن در دمای اتاق ذخیره شدند تا به عنوان جاذب زیستی پودری مورد استفاده قرار گیرند.

1. Sulaymon
2. Ferreira
3. Gunasundari
4. Senthil Kumar
5. Bordoloi
6. Pradhan
7. Moreira
8. Pasavant
9. Solisio
10. Box-Behnken design
11. Design expert
12. Langmuir
13. Freundlich

تهیه محلول کادمیوم

نمک مورد استفاده برای تهیه محلول استاندارد کادمیوم، نمک نیترات کادمیوم^۱ بود. محلول‌های کادمیوم با رقیق کردن یک گرم در لیتر از محلول استوک کادمیوم تهیه شدند که این محلول با حل کردن مقدار وزنی نیترات کادمیوم (Merck) در آب دوبار تقطیر و دیونیزه شده به دست آمد. هر نمونه آزمایش دارای pH مشخصی بود که تنظیم آن با سود یک مولار^۲ و هیدروکلریدریک اسید^۳ یک مولار صورت گرفت.

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک *Champia kotschyana* Harvey

پس از مطالعه مقالات متعدد و بررسی شرایط، تاثیر پارامترهای pH (۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸)، غلظت‌های اولیه مختلفی از محلول یون کادمیوم (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ میلی‌گرم در لیتر) و زمان تماس (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ دقیقه) بر درصد حذف کادمیوم بررسی شد. برای تهیه محلول استاندارد کادمیوم از نمک Cd(NO₃)₂ استفاده شد. ابتدا محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم آماده و سپس محلول‌هایی با غلظت کمتر از طریق رقیق‌سازی تهیه شد. برای نمونه‌های آزمایش در حجم ۱۰ میلی‌لیتر و از همزن مغناطیسی برای استفاده شد. مقدار حذف کادمیوم توسط این جلبک با دستگاه اسپکتروفتومتر (با طول موج ۳۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری شد.

طراحی آزمایش

برای ارزیابی متغیرهای زمان تماس، مقدار جاذب، غلظت کادمیوم و pH بر راندمان حذف کادمیوم و بهینه‌سازی آن‌ها از روش باکس بنکن و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. در طرح باکس بنکن با روش سطح پاسخ تعداد ۲۹ آزمایش در سه تکرار طراحی شد. تعداد آزمایش‌ها در روش باکس بنکن با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$N = 2K(K - 1) + C_0 \quad (1)$$

که N تعداد آزمایش‌های طراحی شده (۲۹)، K تعداد متغیرها (۴) و C₀ تعداد نقاط مرکزی (۵) است. در طرح باکس بنکن از یک معادله درجه دو برای یافتن تقریب درصد حذف و متغیرهای مختلف استفاده می‌شود. رابطه (۲)، معادله درجه دو باکس بنکن، برای پیش‌بینی نقاط بهینه آزمایش است. در این رابطه ۵ پارامتر متغیر وجود دارد که باید ۱۵ ضریب محاسبه شود، ۴ ضریب برای اثر متغیرهای اصلی، ۴ ضریب برای اثر درجه دو متغیرها و ۶ ضریب برای برهم کنش متغیرها و یک مقدار ثابت متغیرهای مستقل به صورت A، B، C و D بیان شده‌اند.

$$y = \beta + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{14} AD + \beta_{23} BC + BD\beta_{24} + CD\beta_{34} + A^2\beta_{11} + B^2\beta_{22} + C^2\beta_{33} + D^3\beta_{44} \quad (2)$$

که β مقدار ثابت رابطه، $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ و $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}$ ضرایب متغیرهای مستقل، $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}, \beta_{34}$ ضرایب مرتبه دوم و $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}$ ضرایب مرتبه دوم و $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}$ ضرایب مرتبه دوم و $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}, \beta_{34}$ ضرایب اثرات متقابل هستند (به‌تاریخ^۴ و داکا^۵، ۲۰۱۹؛ اسلان^۶ و همکاران^۷ ۲۰۰۷) به منظور تعیین کارایی جذب، از رابطه (۳) برای محاسبه درصد حذف و از رابطه (۴) برای تعیین ظرفیت جذب استفاده می‌شود (کاجیو^۷ و همکاران، ۲۰۲۰).

^۱. Cd(NO₃)₂

^۲. NaOH

^۳. HCL

^۴. Bhateria

^۵. Dhaka

^۶. Asalan

^۷. Kajeiou

$$R\% = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (۳)$$

$$q_e = \frac{V(C_i - C_e)}{m} \quad (۴)$$

که C_i غلظت اولیه (mg/L)، C_e غلظت تعادلی (mg/L)، V حجم محلول (L)، m مقدار جاذب (g) است.

ایزوترم‌های جذب

ایزوترم‌های تعادلی به‌طور گسترده برای بررسی مقادیر یون‌های فلزی جذب شده توسط یک بیومس خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. توزیع یون‌های فلزی بین محلول و بیومس معیاری برای موقعیت تعادل است و می‌تواند با یک یا چند ایزوترم بیان شود. از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به جذب تک لایه لانگمویر^۱ و مدل جذب چند لایه فروندلیچ^۲ اشاره کرد (فاروق^۳ و همکاران، ۲۰۱۰).

سنتیک جذب

چندین مدل جنبشی برای درک رفتار جاذب زیستی و همچنین برای بررسی مکانیسم کنترل سرعت فرآیند جذب در دسترس است. به منظور درک سینتیک جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک مذکور، از دو مدل سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم استفاده شد.

ترمودینامیک جذب

برخی از پارامترهای ترمودینامیکی، یعنی انرژی آزاد گیبس، تغییرات آنتالپی و تغییرات آنتروپی را می‌توان برای تعریف خودبه خودی بودن واکنش جذب، گرمای جذب و تصادفی بودن در رابطه جاذب زیستی-محلول در طول جذب مورد استفاده قرار داد (دیرباز و روستا، ۲۰۱۸).

یافته‌های پژوهش

آنالیز تناسب مدل باکس بنکن

آنالیز واریانس روش سطح پاسخ باکس بنکن

روش سطح پاسخ بر اساس طرح آزمایشی باکس بنکن برای تعیین اثرات ترکیبی چهار پارامتر انتخاب شده بر روی فرآیند جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک مذکور و ایجاد مقادیر بهینه استفاده شد. تعداد بیست و نه آزمایش مطابق جدول (۱) طراحی شد و pH، غلظت اولیه کادمیوم، مقدار بیومس جاذب و زمان تماس در تحقیق گنجانده شد. داده‌ها با یک معادله چند جمله‌ای مرتبه دوم برای حذف یون‌های کادمیوم با *Champia k. Harvey* برازش داده شد و ضرایب معادله رگرسیون محاسبه شد. رابطه بین متغیر پاسخ و متغیرهای آزمون توسط معادلات چند جمله‌ای مرتبه دوم توسط رابطه (۵) توصیف شده است.

¹. Langmuir

². Freundlich

³. Farooq

جدول (۱) طراحی مدل حذف کادمیوم توسط جلبک با استفاده طرح باکس بنکن با چهار متغیر مستقل

ردیف	pH (A)	غلظت اولیه کادمیوم (mg/L) (B)	مقدار جاذب (mg/L) (C)	زمان تماس (min) (D)	درصد حذف
۱	۸	۵	۴	۵۰	۷۴/۵۱
۲	۸	۲/۷۵	۱	۵۰	۷۷/۱۹
۳	۸	۲/۷۵	۴	۹۰	۷۶/۵۹
۴	۸	۲/۷۵	۷	۵۰	۷۸/۲۴
۵	۵/۵	۲/۷۵	۱	۹۰	۷۸/۳۷
۶	۵/۵	۲/۷۵	۷	۹۰	۸۱/۵۱
۷	۵/۵	۲/۷۵	۴	۵۰	۸۵/۲۲
۸	۸	۲/۷۵	۴	۱۰	۷۴/۴۷
۹	۵/۵	۰/۵	۷	۵۰	۸۴/۹۱
۱۰	۵/۵	۰/۵	۱	۵۰	۷۴/۴۶
۱۱	۳	۵	۴	۵۰	۸۱/۱۴
۱۲	۵/۵	۲/۷۵	۱	۱۰	۷۱/۵۳
۱۳	۳	۲/۷۵	۴	۱۰	۷۸/۱۹
۱۴	۵/۵	۵	۱	۵۰	۷۶/۴۸
۱۵	۳	۲/۷۵	۷	۵۰	۸۸/۷۲
۱۶	۳	۰/۵	۴	۵۰	۸۳/۱۷
۱۷	۵/۵	۵	۷	۵۰	۷۶/۳۲
۱۸	۵/۵	۲/۷۵	۴	۵۰	۸۲/۲۲
۱۹	۵/۵	۲/۷۵	۴	۵۰	۸۰/۰۲
۲۰	۸	۰/۵	۴	۵۰	۷۷/۷۶
۲۱	۵/۵	۵	۴	۹۰	۷۶/۵۸
۲۲	۵/۵	۰/۵	۴	۱۰	۷۵/۱۶
۲۳	۵/۵	۲/۷۵	۴	۵۰	۸۴/۷۲
۲۴	۵/۵	۲/۷۵	۷	۱۰	۷۸/۵۵
۲۵	۳	۲/۷۵	۱	۵۰	۸۱/۱۱
۲۶	۳	۲/۷۵	۴	۹۰	۸۴/۷۵
۲۷	۵/۵	۲/۷۵	۴	۵۰	۸۶/۴۹
۲۸	۵/۵	۵	۴	۱۰	۷۰/۷۵
۲۹	۵/۵	۰/۵	۴	۹۰	۷۸/۶۱

$$y = 48.07 + 2.73A + 5.89B + 5.66C + 0.45D - 0.054AB - 0.22AC - 0.01AD - 0.39BC + 0.007BD - 0.008CD - 0.22A^2 - 0.91B^2 - 0.27C^2 - 0.003D^2 \quad (۵)$$

در این معادله A، B، C و D به ترتیب پارامترهای pH، غلظت اولیه کادمیوم، مقدار جاذب و زمان تماس و Y درصد حذف کادمیوم است. جدول (۱) نتایج تجربی حاصل از تمام ترکیبات آزمایش شده از عوامل و پاسخ‌های مربوطه با استفاده از معادله (۵) را نشان می‌دهد (پولات^۱ و سایان^۲، ۲۰۱۹). جدول (۲) نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل درجه دو را نشان می‌دهد. در واقع ANOVA، یک تکنیک تحلیلی برای شناسایی کیفیت مدل و پارامترهای آن است (کیو^۳ و همکاران، ۲۰۱۳).

^۱. Polat

^۲. Sayan

^۳. Qiu

بزرگ بودن مقدار F-value و کوچک بودن مقدار $P < 0/05$ کیفیت مدل را نشان می‌دهد. مقادیر p-value پایین نشان می‌دهد که متغیر نقش مهم‌تری در تأثیرگذاری پاسخ‌ها دارد و مقادیر $p < 0/1$ نشان می‌دهد که اصطلاحات مدل معنی‌دار نیستند (ای^۱ و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول (۲) نتایج آنالیز واریانس ANOVA جذب نیترات توسط جلبک *Champia k. Harvey*

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	p-value
مدل	۶۰۶/۸۸	۱۴	۴۳/۳۵	۱۱۹/۲۴	<0/0001
A	۱۲۲/۳۷	۱	۱۲۲/۳۷	۳۳۶/۶۰	<0/0001
B	۲۷/۸۸	۱	۲۷/۸۸	۷۶/۶۸	<0/0001
C	۷۰/۶۲	۱	۷۰/۶۲	۱۹۴/۲۵	<0/0001
D	۶۴/۲۲	۱	۶۴/۲۲	۱۷۶/۶۵	<0/0001
AB	۰/۳۷۲۱	۱	۰/۳۷۲۱	۱/۰۲	۰/۳۲۸۸
AC	۱۰/۷۶	۱	۱۰/۷۶	۲۹/۵۹	<0/0001
AD	۴/۹۳	۱	۴/۹۳	۱۳/۵۶	۰/۰۰۲۵
BC	۲۸/۱۴	۱	۲۸/۱۴	۷۷/۴۱	<0/0001
BD	۱/۴۲	۱	۱/۴۲	۳/۹۰	۰/۰۶۸۵
CD	۳/۷۶	۱	۳/۷۶	۱۰/۳۵	۰/۰۰۶۲
A ²	۱۲/۳۸	۱	۱۲/۳۸	۳۴/۰۶	<0/0001
B ²	۱۳۹/۰۷	۱	۱۳۹/۰۷	۳۸۲/۵۵	<0/0001
C ²	۳۸/۵۵	۱	۳۸/۵۵	۱۰۶/۰۴	<0/0001
D ²	۱۷۷/۳۶	۱	۱۷۷/۳۶	۴۸۷/۸۸	<0/0001
باقیمانده‌ها	۵/۰۹	۱۴	۰/۳۶۳۵		
عدم برازش	۱/۸۲	۱۰	۰/۱۸۲۴	۰/۲۲۳۴	۰/۹۷۵۱
خطای مطلق	۳/۲۷	۴	۰/۸۱۶۵		
جمع	۶۱۱/۹۷	۲۸			

$$PreR^2=0/9745, AdjR^2=0/9837, R^2=0/9917$$

در نتایج جدول (۲) مقدار F-value برابر با ۱۱۹/۲۴ و مقدار $p\text{-value} < 0/0001$ نشان دهنده کیفیت مطلوب مدل بوده است. با در نظر گرفتن F-value، به ترتیب پارامترهای pH، مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه کادمیوم بر فرآیند جذب کادمیوم بیشترین تاثیر را داشته‌اند (pH < مقدار جاذب < زمان تماس < غلظت اولیه کادمیوم). پارامتر عدم برازش با مقدار ۰/۹۷۵۱ نشان می‌دهد که عدم برازش در مقایسه با خطای خالص و مقدار p معنی‌دار نبوده و حاکی از اهمیت مدل برای پیش بینی داده‌های تجربی است.

مقدار بالای ضریب تعیین تعدیل شده، $AdjR^2 = 0/9837$ نشان می‌دهد که ۹۸/۳۷ درصد از کل تغییرات حذف کادمیوم را می‌توان با مدل انتخاب شده توضیح داد. مقدار بالای ضریب تعیین $R^2 = 0/9917$ و $PreR^2 = 0/9745$ ، نشان دهنده وابستگی و همبستگی بالا بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده پاسخ است (پارمار^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

تجزیه و تحلیل توزیع داده‌ها

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نمودار احتمال نرمال ارزیابی شد شکل (الف)؛ چنین توزیعی از نقاط، نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها به طور یکنواخت و در امتداد یک خط مستقیم است که برآوردی از هم بستگی بالای آن‌ها است (ایی و همکاران،

^۱. Ye

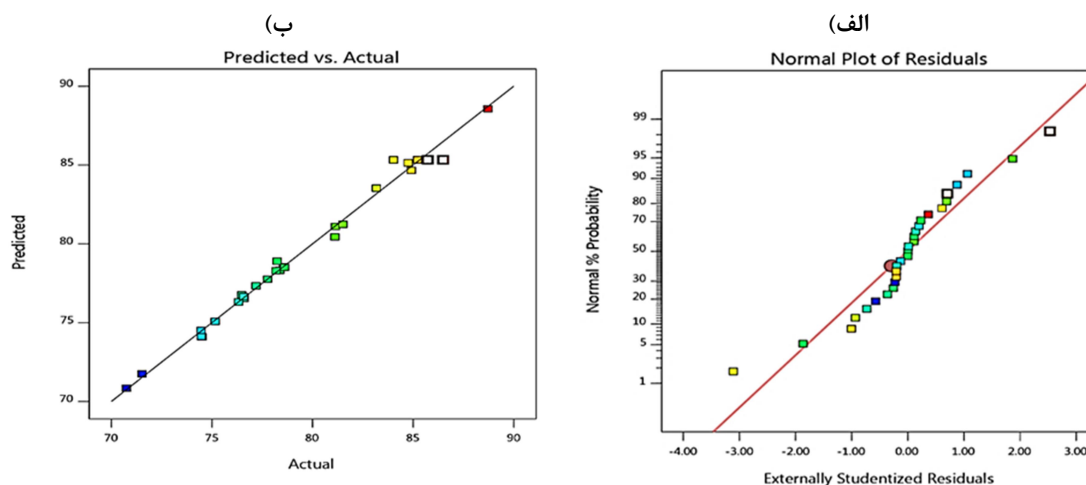
^۲. parmar

شکل (۲۰۱۷) (ب) نمودار مقادیر پیش‌بینی شده درصد حذف کادمیوم در مقابل مقادیر پیش‌بینی را نشان می‌دهد. در این نمودار مقادیر واقعی با نقاط رنگی مربع و مقادیر پیش‌بینی شده با یک خط مستقیم نشان داده می‌شوند که در آن تطابق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای پاسخ مشاهده می‌شود. شکل (۱ ج)؛ آزمون t است که با استفاده از مقدار t ، موارد پرت را پیدا می‌کند. یک نقطه پرت را می‌توان با مقدار t بزرگتر تشخیص داد. ماهیت پراکنده این نمودارها نشان می‌دهد که مدل برای بهینه‌سازی مربوطه مناسب است.

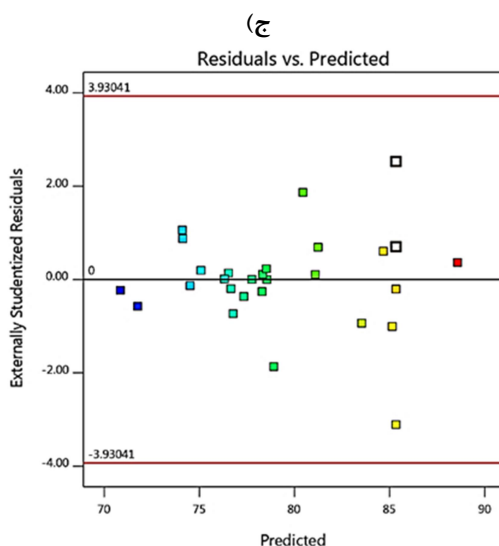
تجزیه و تحلیل اثر پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند جذب

اثر pH و غلظت اولیه بر راندمان حذف کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

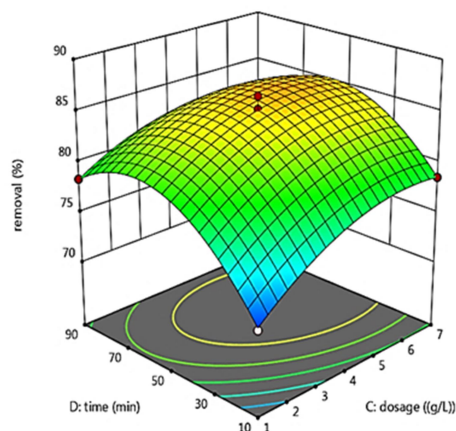
سطح pH یکی از پارامترهای مهم در جذب زیستی یون‌های فلزی از محلول‌های آبی است (کروز^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به نمودار سه بعدی شکل (۲)، درصد حذف کادمیوم با کاهش مقدار pH افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش pH تأثیر مثبتی بر جذب فلز نداشته است، زیرا رقابت بین پروتون‌ها و کاتیون‌های فلزی برای مکان‌های فعال بیومس افزایش یافته است (فرایل^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). بیشترین مقدار جذب در pH ۳ بوده است که ممکن است به دلیل گروه‌های دارای بار منفی‌تر در سطح بیومس باشد که قادر به اتصال یون‌های فلزی با بار مثبت هستند (کانابیران^۳ و سائوراو^۴، ۲۰۱۱). ممکن است با افزایش pH، چگالی بار منفی روی سطح بیومس به دلیل عدم دفع مکان‌های اتصال فلز کاهش یابد، در نتیجه جذب زیستی کادمیوم را کاهش می‌دهد (کروز و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج شکل (۲)، نشان می‌دهد با افزایش غلظت اولیه کادمیوم درصد حذف کادمیوم افزایش و سپس کاهش داشته است. افزایش درصد حذف در غلظت‌های اولیه پایین‌تر بود زیرا غلظت اولیه یون‌های فلزی در محلول نقش محوری به عنوان نیروی محرکه برای غلبه بر انتقال جرم بین فازهای آبی و جامد ایفا می‌کند (پنگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). از طرفی، کاهش سرعت حذف با افزایش غلظت اولیه کادمیوم به این دلیل است که برای یک مقدار جاذب معین، تعداد مکان‌های جذب موجود ثابت می‌شود و در نتیجه تنها مقدار ثابتی از یون‌های فلزی جذب می‌شوند و درصد جذب کاهش می‌یابد (میتی^۶ و پراساد^۷، ۲۰۱۳).



1. Cruz
2. Fraile
3. Saurav
4. Kannabiran
5. Peng
6. Meitei
7. Prasad



شکل (۱) نتایج باکس بنکن برای گراف‌های باقیمانده درصد حذف کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*. الف) نمودار نرمال بودن، ب) نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی، ج) نمودار آزمون t

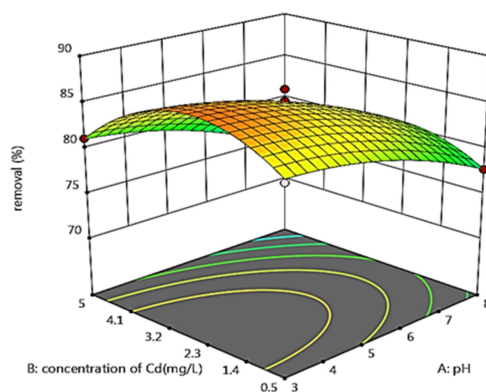


شکل (۲) نمودار سه بعدی اثر غلظت اولیه کادمیوم و pH بر درصد حذف کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

اثر زمان تماس و مقدار جاذب بر راندمان حذف کادمیوم

نمودار سه بعدی شکل (۳)، نشان می‌دهد با افزایش زمان تا ۵۰ دقیقه درصد جذب کادمیوم افزایش و پس از آن کاهش یافته است. این احتمالاً به دلیل این واقعیت است که در ابتدا همه مکان‌های روی سطح جاذب با گروه‌های عملکردی بیشتری در سطح بیومس خالی هستند و برای اتصال و جذب کادمیوم در دسترس قرار دارند. بعد از ۵۰ دقیقه کاهش در سرعت جذب وجود داشت که ممکن است به دلیل انتشار احتمالی کادمیوم جذب شده در محلول باشد. جایی که از طریق فرآیند جذب، جاذب به حالت اشباع می‌رسد و سپس فلز جذب شده تمایل به دفع مجدد به محلول دارد.

با افزایش مقدار جاذب درصد حذف کادمیوم افزایش داشته است. به این دلیل است که مقدار بالاتر جاذب زیستی مکان‌های قابل تعویض و سطح در دسترس بیشتری دارد. نتایج با مطالعات قبلی بر روی جاذب‌های مختلف مطابقت دارد (داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۳). افزایش مقدار بیومس منجر به افزایش میزان تبادل پروتون بین جاذب زیستی و محلول فلزی می‌شود. این افزایش را می‌توان به افزایش کلی در سطح جاذب زیستی نسبت داد، که به نوبه خود باعث افزایش تعداد محل‌های اتصال موجود برای جذب می‌شود (اگیرانی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل (۳) گراف سه بعدی اثر مقدار جاذب و زمان تماس بر درصد حذف کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

ایزوترم لانگمویر

این ایزوترم، جذب تک لایه ماده جذب شونده بر روی سطح جاذب همگن را شبیه سازی می‌کند (جیو^۱ و وانگ^۲، ۲۰۱۹). ثابت‌های ایزوترم لانگمویر معانی فیزیکی خاصی دارند که می‌توانند به خوبی حداکثر ظرفیت و خواص سطحی جاذب را توصیف کنند (فاروق و همکاران، ۲۰۱۰). به منظور تعیین حداکثر ظرفیت جذب داده‌های تجربی با معادله (۶) برازش داده شد.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

که q_m حداکثر ظرفیت جذب (mg/g)، q_e ظرفیت جذب در حالت تعادل (mg/g)، K_L (انرژی جذب)، ضریب میل ترکیبی یون‌های فلزی به بیومس (L/mg) و C_e غلظت یون‌های فلزی در فاز مایع در حالت تعادل (mg/L) است. این ثابت‌ها را می‌توان از طریق عرض از مبدا و شیب نمودار خطی داده‌های تجربی $1/q_e$ در مقابل $1/C_e$ ارزیابی کرد (شکل ۴ الف). برای ایزوترم جذب لانگمویر، فاکتور بدون بعد R_L تعریف شده است. ضریب جدایی که توسط معادله (۷) بیان می‌شود و ثابت اندازه‌گیری مطلوبیت جذب است. اگر R_L بین صفر و یک باشد جذب مطلوب، اگر بزرگتر از یک باشد جذب نامطلوب، اگر برابر یک باشد جذب خطی و اگر برابر با صفر شود جذب برگشت ناپذیر است (جیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). پارامترهای ایزوترم لانگمویر در جدول (۳)، آورده شده است. مقادیر R_L و R^2 برابر با ۰/۴۸ و ۰/۹۵ است که نشان می‌دهد که جذب کادمیوم توسط جلبک از ایزوترم لانگمویر پیروی می‌کند و یک جذب مطلوب است. و برای پیش بینی رفتار جذب مدل مناسبی است. بنابراین، می‌توان گفت جذب کادمیوم توسط جلبک *Champia kotschyana* Harvey تک لایه بوده و به صورت لایه لایه انجام شده است.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad (7)$$

ایزوترم فروندلیچ

معادله (۸) مدل ایزوترم فروندلیچ است که برای برازش داده‌های تجربی استفاده شد، در آن K_f و n ثابت‌های تجربی هستند.

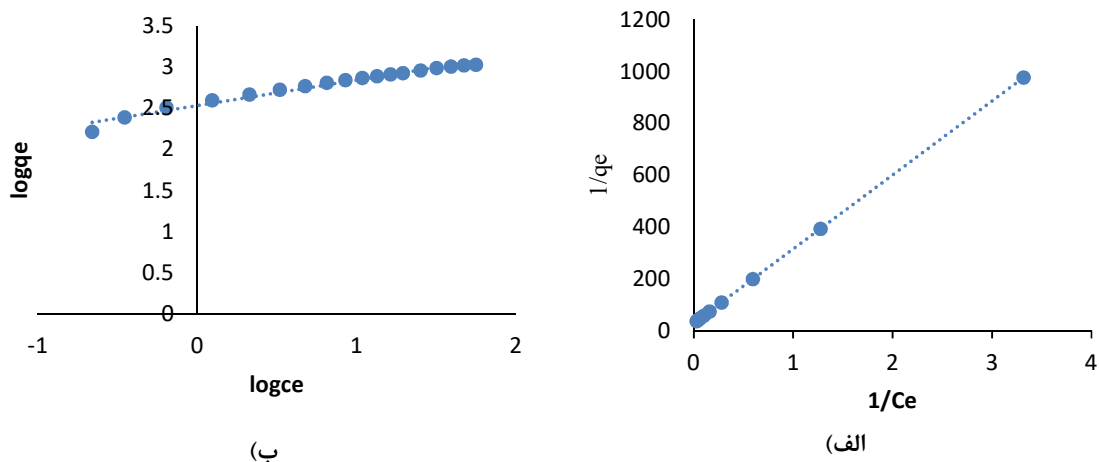
$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (8)$$

مقادیر $n > 1$ بیانگر شرایط جذب مطلوب است (حمید و همکاران، ۲۰۰۸). برای تعیین ثابت‌های K_f و n از شکل خطی معادله برای تولید نمودار $\ln q_e$ در برابر $\ln C_e$ استفاده شد (شکل ۴ الف). K_f و n با توجه به شیب و عرض از مبدا نمودار شکل (۴ب) محاسبه می‌شوند. این نتایج در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به مقدار $n = 11/36$ می‌توان گفت جذب کادمیوم مطلوب بوده است.

1. Guo

2. Waang

3. Gu



شکل (۴) ایزوترم‌های لانگمویر (الف) و فروندلیچ (ب) برای جذب کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

جدول (۳) پارامترهای محاسبه شده ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ

پارامتر	ایزوترم
$= 1R^2$	ایزوترم لانگمویر
$= 0.1K_L$	
$= 0.95RL$	
$= 0.025q_m$	
$= 0.97R^2$	ایزوترم فروندلیچ
$= 238/84K_f$	
$= 11/36n$	

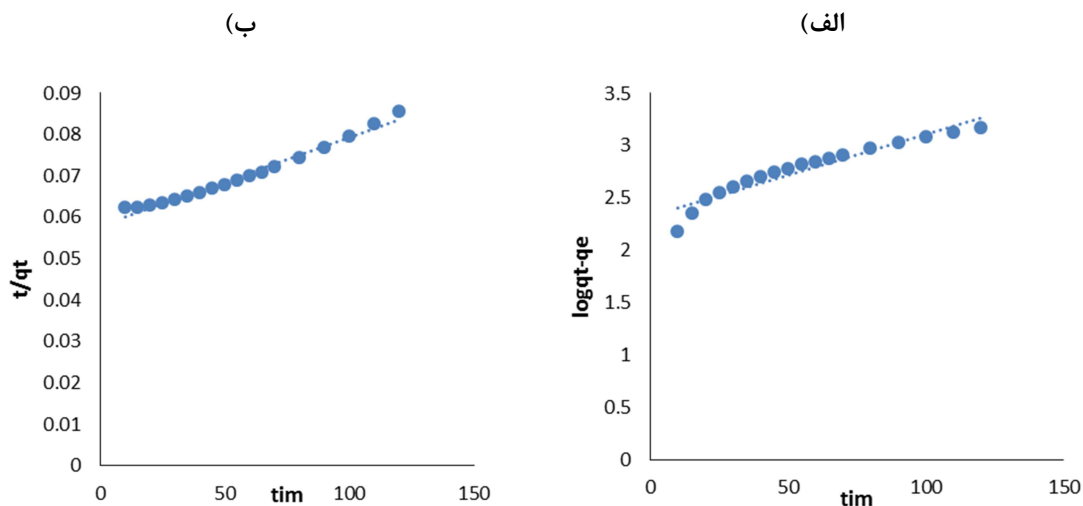
چندین مدل جنبشی برای درک رفتار جاذب زیستی و همچنین برای بررسی مکانیسم کنترل سرعت فرآیند جذب در دسترس است. به منظور درک سینتیک جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*، از دو مدل سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم استفاده شد. سینتیک شبه مرتبه اول با معادله (۹)، محاسبه شد. از شیب و عرض از مبدا نمودار $\log(q_e - q_t)$ (شکل (۵))، در مقابل t برای تعیین K_L ثابت شبه مرتبه اول (min^{-1}) استفاده شد. در بسیاری از موارد، معادله شبه مرتبه اول به خوبی با کل محدوده زمان تماس مطابقت ندارد و به طور کلی در مرحله اولیه فرآیندهای جذب قابل اعمال است (احمد و همکاران، ۲۰۰۷). ثابت سینتیک شبه مرتبه اول (k_1) و q_e محاسبه شده از مدل به همراه ضرایب همبستگی مربوطه در جدول (۴)، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مدل با شبه مرتبه اول مطابقت خوبی ندارد. مشخص شد که مقادیر q_e محاسبه شده با مقادیر q_e تجربی مطابقت ندارد. این نشان می‌دهد که جذب کادمیوم از سینتیک شبه مرتبه اول پیروی نمی‌کند (حمید و همکاران، ۲۰۰۸).

$$\log(q_e - q_t) = \log q_t - \frac{K_L}{2.303} \times t \quad (9)$$

معادله سینتیک شبه مرتبه دوم توسط معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

که در آن ظرفیت جذب تعادلی (q_e) و K_2 ثابت سینتیک شبه مرتبه دوم ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) را می‌توان به صورت تجربی از شیب و عرض از مبدا نمودار t/q_t در مقابل t تعیین کرد. K_2 و q_e محاسبه شده به همراه ضرایب همبستگی مربوطه در جدول (۴)، ارائه شده است.



شکل (۴) سینتیک‌های شبه مرتبه اول (الف) و شبه مرتبه دوم (ب)، برای جذب کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

جدول (۴) پارامترهای سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای جذب کادمیوم توسط جلبک چمپیا

سینتیک پارامتر	شبه مرتبه اول			شبه مرتبه دوم		
	q_e (mg/g)	K_1 (1/min)	R^2	q_e (mg/g)	K_2 (g/g.min)	R^2
	۲/۳۲	۰/۰۰۷۸	۰/۹۱۹۳	۵۲۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰۶۹	۰/۹۷۹۲

نتایج جدول (۴)، نشان می‌دهد ضرایب همبستگی برای مدل جنبشی مرتبه اول پایین بوده است. همچنین، بین مقادیر تجربی q_e و q_e محاسبه شده با مدل سینتیک شبه مرتبه دوم، مطابقت وجود دارد. مقادیر q_e محاسبه شده به دست آمده از مدل سینتیک شبه مرتبه اول مقادیر معقولی را ارائه نمی‌دهد که در مقایسه با مقادیر q_e تجربی بسیار بوده است. در شکل (۵) (ب)، تطابق خوبی از داده‌های تجربی با مدل جنبشی مرتبه دوم برای غلظت‌های مختلف کادمیوم را نشان می‌دهد. از این رو، مدل شبه مرتبه دوم، سینتیک جذب را بهتر نشان می‌دهد.

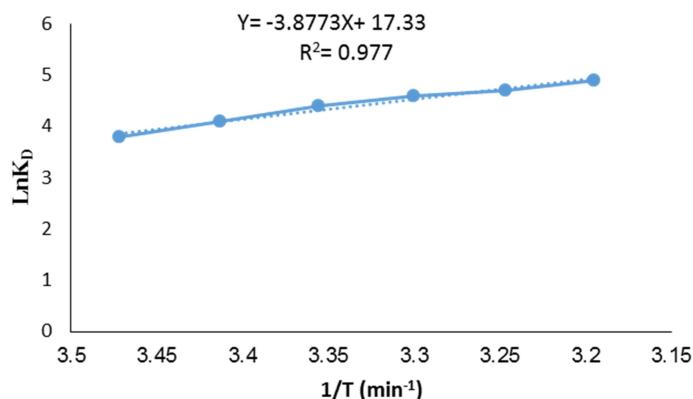
با در نظر گرفتن معادله زیر آنتالپی (ΔH°) و آنتروپی (ΔS°) جذب زیستی به ترتیب از شیب و عرض از مبدا نمودار $\ln K_D$ در مقابل $1/T$ محاسبه می‌شوند (شکل ۶).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_D \quad (11)$$

$$\ln K_D = \left(\frac{\Delta S^\circ}{R} \right) - \left(\frac{\Delta H^\circ}{RT} \right) \quad (12)$$

که R ثابت عمومی گازها (۸/۳۱۴ ژول بر مول)، T دما بر حسب کلوین و K_D ثابت تعادل فرآیند است.

با توجه به نمودار تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG°)، برای جذب زیستی یون کادمیوم در دماهای ۲۸۸، ۲۹۳، ۲۹۸، ۳۰۳، ۳۰۸ و ۳۱۳ درجه کلوین به ترتیب ۴۱/۳۹، ۴۲/۱۱، ۴۲/۸۳، ۴۳/۵۵، ۴۴/۲۷ و ۴۴/۹۸- کیلوژول بر مول محاسبه شد. مقادیر منفی انرژی آزاد گیبس نشان می‌دهد که ماهیت ترمودینامیکی جذب زیستی کادمیوم خودبه خودی و امکان پذیر است. مقدار انرژی آزاد گیبس با افزایش دما کاهش یافته است که نشان می‌دهد امکان جذب زیستی کادمیوم در دماهای بالا کاهش خواهد یافت. مقدار آنتالپی جذب کادمیوم ۰/۳۲۲ کیلوژول بر مول به دست آمده است که مثبت بودن آن نشان می‌دهد ماهیت جذب زیستی کادمیوم گرماگیر است (ساری^۱ و توزن^۲، ۲۰۰۸). که نشان می‌دهد با افزایش دما ظرفیت جذب ماکزیمم افزایش می‌یابد (اسد سنگابی و همکاران، ۱۳۹۴). افزایش ظرفیت جذب در دماهای بالاتر ممکن است به بزرگ شدن اندازه منافذ و یا فعال شدن سطح جاذب نسبت داده شود (فان^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین مثبت بودن مقدار آنتروپی (۰/۱۴۳۶) نشان می‌دهد که جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک چمپیا روند مطلوبی دارد (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۵). گرمای جذب فیزیکی همان مقدار مطلق ΔG° است که در محدوده ۲ تا ۲۱ کیلوژول بر مول، و گرمای جذب شیمیایی مقدار مطلق ΔG° است که در محدوده ۸۰-۲۰۰ کیلوژول بر مول قرار می‌گیرد (سوغونا^۴ و کومار^۵، ۲۰۱۳). بنابراین، احتمالاً فرآیند جذب زیستی کادمیوم یک جذب شیمیایی است. مقدار مطلق ΔG° با افزایش دما افزایش یافته است که می‌تواند نشان دهنده ظرفیت بالای جذب در دماهای بالا باشد.



شکل (۶) نمودار خطی معادله ترمودینامیک جذب زیستی کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey*

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق حذف هزینه‌های سنگین تصفیه آب‌های بازیافتی با استفاده از جاذب‌های ارزان و دوست دار محیط زیست بود. نتایج این مطالعه نشان داد که جلبک *Champia k. Harvey* به عنوان یک جاذب ارزان و در دسترس برای حذف کادمیوم از محلول‌های آبی موثر است. ظرفیت جذب و درصد حذف کادمیوم با استفاده از بیومس جلبک *Champia k. Harvey* در شرایط بهینه (pH=۴، مقدار جاذب= ۱/۵ گرم در لیتر، زمان تماس= ۳۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه، غلظت اولیه کادمیوم= ۳/۳ میلی‌گرم در لیتر) به ترتیب ۱/۳ میلی‌گرم بر گرم و ۸۰/۱۴ درصد بود. داده‌های جذب زیستی به خوبی با مدل لانگمویر مطابقت دارد. دقیق‌ترین مدل برای جذب زیستی کادمیوم شبه مرتبه دوم با سرعت جذب ۱۷/۲۷ است. مقدار جذب کادمیوم توسط جلبک *Champia k. Harvey* در دماهای مختلف متفاوت است به طوری که با افزایش دما مقدار جذب افزایش می‌یابد که نشان

¹ .Sari

² .Tuzen

³ . Fan

⁴ .Sogona

⁵ .Kumar

دهنده گرماگیر بودن واکنش است. منفی بودن بودن مقدار ΔG° خودبه خودی بودن فرآیند جذب را نشان می‌دهد. از طرفی افزایش مقدار مطلق ΔG° با افزایش دما ظرفیت بالای جذب بیومس جلبک در ماهای بالا برای جذب کادمیوم را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت طبق یافته‌های پژوهش، جاذب زیستی *Champia k. Harvey* برای جذب کادمیوم از محیط‌های آبی مناسب است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WE1400.25891) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

مشارکت نویسندگان

مریم منتی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
 پروانه تیشه‌زن: راهنمایی، مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله
 عبدالرحیم هوشمند: راهنمایی، مشاوره، بازبینی متن مقاله
 مجید بغدادی: مفهوم‌سازی، مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج تحلیل آماری.

منابع

- اسدسنگایی، فاطمه؛ سنگی، محمد رضا؛ باقری، بیژن (۱۳۹۴). مطالعه پارامترهای ترمودینامیکی جذب یون‌های فلزی سرب، مس و کادمیوم توسط جاذب‌های گیاهی. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست. ۳(۴۷)، ۹-۱۶.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2013). Recent trends in microbial biosorption of heavy metals: a review. *Biochemistry and Molecular Biology*, 1(1), 19-26.
- Ahmad, A. A., Hameed, B. H., & Aziz, N. (2007). Adsorption of direct dye on palm ash: Kinetic and equilibrium modeling. *Journal of hazardous materials*, 141(1), 70-76.
- Al-Homaidan, A. A., Alabdullatif, J. A., Al-Hazzani, A. A., Al-Ghanayem, A. A., & Alabbad, A. F. (2015). Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(6), 795-800.
- Aslan, N. E. V. Z. A. T., & Cebeci, Y. A. K. U. P. (2007). Application of Box- Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, 86(1-2), 90-97.
- Bazrafshan, E., Zarei, A. A., & Mostafapour, F. K. (2016). Biosorption of cadmium from aqueous solutions by *Trichoderma* fungus: kinetic, thermodynamic, and equilibrium study. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14598-14608. doi.org/10.1080/19443994.2015.1065764.
- Bhateria, R., & Dhaka, R. (2019). Optimization and statistical modelling of cadmium biosorption process in aqueous medium by *Aspergillus niger* using response surface methodology and principal component analysis. *Ecological Engineering*, 135, 127-138.
- Bordoloi, N., Goswami, R., Kumar, M., & Kataki, R. (2017). Biosorption of Co (II) from aqueous solution using algal biochar: Kinetics and isotherm studies. *Bioresource technology*, 244, 1465-1469.
- Bulgariu, D., & Bulgariu, L. (2012). Equilibrium and kinetics studies of heavy metal ions biosorption on green algae waste biomass. *Bioresource technology*, 103(1), 489-493.
- Çelekli, A., & Bozkurt, H. (2011). Bio-sorption of cadmium and nickel ions using *Spirulina platensis*: Kinetic and equilibrium studies. *Desalination*, 275(1-3), 141-147.

- Chugh, M., Kumar, L., Shah, M. P., & Bharadvaja, N. (2022). Algal Bioremediation of heavy metals: An insight into removal mechanisms, recovery of by-products, challenges, and future opportunities. *Energy Nexus*, 100129.
- Dasilva, L. J., de Rezende Pinto, F., do Amaral, L. A., & Garcia-Cruz, C. H. (2014). Biosorption of cadmium (II) and lead (II) from aqueous solution using exopolysaccharide and biomass produced by *Colletotrichum* sp. *Desalination and Water Treatment*, 52(40-42), 7878-7886.
- Dirbaz, M., & Roosta, A. (2018). Adsorption, kinetic and thermodynamic studies for the biosorption of cadmium onto microalgae *Parachlorella* sp. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2302-2309. doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.039
- Egirani, D. E., Poyi, N. R., & Shehata, N. (2020). Preparation and characterization of powdered and granular activated carbon from *Palmae* biomass for cadmium removal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(4), 2443-2454.
- Fan, T., Liu, Y., Feng, B., Zeng, G., Yang, C., Zhou, M., ... & Wang, X. (2008). Biosorption of cadmium (II), zinc (II) and lead (II) by *Penicillium simplicissimum*: Isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of hazardous materials*, 160(2-3), 655-661.
- Farooq, U., Kozinski, J. A., Khan, M. A., & Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents—a review of the recent literature. *Bioresource technology*, 101(14), 5043-5053.
- Ferreira, L. S., Rodrigues, M. S., De Carvalho, J. C. M., Lodi, A., Finocchio, E., Perego, P., & Converti, A. (2011). Adsorption of Ni²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ onto dry biomass of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* and *Chlorella vulgaris*. I. Single metal systems. *Chemical Engineering Journal*, 173(2), 326-333.
- Fraille, A., Penche, S., Gonzalez, F., Blázquez, M. L., Munoz, J. A., & Ballester, A. (2005). Biosorption of copper, zinc, cadmium and nickel by *Chlorella vulgaris*. *Chemistry and Ecology*, 21(1), 61-75.
- Gunasundari, E., & Senthil Kumar, P. (2017). Adsorption isotherm, kinetics and thermodynamic analysis of Cu (II) ions onto the dried algal biomass (*Spirulina platensis*). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 129-144.
- Guo, X., & Wang, J. (2019). Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111850.
- Hameed, B. H., Mahmoud, D. K., & Ahmad, A. L. (2008). Equilibrium modeling and kinetic studies on the adsorption of basic dye by a low-cost adsorbent: Coconut (*Cocos nucifera*) bunch waste. *Journal of hazardous materials*, 158(1), 65-72.
- Kajeiou, M., Alem, A., Mezghich, S., Ahfir, N. D., Mignot, M., Devouge-Boyer, C., & Pantet, A. (2020). Competitive and non-competitive zinc, copper and lead biosorption from aqueous solutions onto flax fibers. *Chemosphere*, 260, 127505.
- Lee, Y. C., & Chang, S. P. (2011). The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresource technology*, 102(9), 5297-5304.
- Lin, Z., Li, J., Luan, Y., & Dai, W. (2020). Application of algae for heavy metal adsorption: A 20-year meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110089.
- Meitei, M. D., & Prasad, M. N. V. (2013). Lead (II) and cadmium (II) biosorption on *Spirodela polyrhiza* (L.) *Schleiden* biomass. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 200-207.
- Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Freire, S. J., Santos, L. V. S., Palladino, F., & Jacob, R. S. (2019). Biosorption of copper ions from aqueous solution using *Chlorella pyrenoidosa*: Optimization, equilibrium and kinetics studies. *Microchemical Journal*, 145, 119-129.
- Parmar, P., Shukla, A., Goswami, D., Patel, B., & Saraf, M. (2020). Optimization of cadmium and lead biosorption onto marine *Vibrio alginolyticus* PBR1 employing a Box-Behnken design. *Chemical Engineering Journal Advances*, 4, 100043.
- Pavasant, P., Apiratikul, R., Sungkhum, V., Suthiparinyanont, P., Wattanachira, S., & Marhaba, T. F. (2006). Biosorption of Cu²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺, and Zn²⁺ using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource technology*, 97(18), 2321-2329.
- Peng, S. H., Wang, R., Yang, L. Z., He, L., He, X., & Liu, X. (2018). Biosorption of copper, zinc, cadmium and chromium ions from aqueous solution by natural foxtail millet shell. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 61-69.
- Polat, S., & Sayan, P. (2019). Application of response surface methodology with a Box-Behnken design for struvite precipitation. *Advanced Powder Technology*, 30(10), 2396-2407.

- Pradhan, D., Sukla, L. B., Mishra, B. B., & Devi, N. (2019). Biosorption for removal of hexavalent chromium using microalgae *Scenedesmus* sp. *Journal of Cleaner Production*, 209, 617-629.
- Qiu, P., Cui, M., Kang, K., Park, B., Son, Y., Khim, E., ... & Khim, J. (2014). Application of Box-Behnken design with response surface methodology for modeling and optimizing ultrasonic oxidation of arsenite with H₂O₂. *Open Chemistry*, 12(2), 164-172.
- Salama, E. S., Roh, H. S., Dev, S., Khan, M. A., Abou-Shanab, R. A., Chang, S. W., & Jeon, B. H. (2019). Algae as a green technology for heavy metals removal from various wastewater. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35, 1-19.
- Sari, A., & Tuzen, M. (2008). Biosorption of cadmium (II) from aqueous solution by red algae (*Ceramium virgatum*): equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of hazardous materials*, 157(2-3), 448-454. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.008.
- Saurav, K., & Kannabiran, K. (2011). Biosorption of Cd (II) and Pb (II) ions by aqueous solutions of novel alkalophilic *Streptomyces* VITSVK5 spp. biomass. *Journal of Ocean University of China*, 10, 61-66.
- Singh, A., Nigam, P. S., & Murphy, J. D. (2011). Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuels. *Bioresource technology*, 102(1), 10-16.
- Solisio, C., Lodi, A., Soletto, D., & Converti, A. (2008). Cadmium biosorption on *Spirulina platensis* biomass. *Bioresource technology*, 99(13), 5933-5937.
- Suguna, M., & Kumar, N. S. (2013). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by polypores biomass.
- Sulaymon, A. H., Mohammed, A. A., & Al-Musawi, T. J. (2013). Competitive biosorption of lead, cadmium, copper, and arsenic ions using algae. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 3011-3023.
- Tamilselvan, N., Saurav, K., & Kannabiran, K. (2011). Biosorption of selected toxic heavy metals using algal species *Acanthopora spicifera*. *Pharmacologyonline*, 1, 518-528.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*, 133-164.
- Teimouri, A., Eslamian, S., & Shabankare, A. (2016). Removal of heavy metals from aqueous solution by red alga *Gracilaria corticata* as a new biosorbent. *Trends in Life Science*, 5(1), 236-243. [In Persian]
- Verma, A., Kumar, S., & Kumar, S. (2017). Statistical modeling, equilibrium and kinetic studies of cadmium ions biosorption from aqueous solution using *S. filipendula*. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(3), 2290-2304.
- Yaghmaeian, K., & Jaafari, J. (2018). Optimization of heavy metal biosorption onto freshwater algae (*Chlorella coloniales*) algae cells using response surface methodology (RSM). *Journal of chemosphere*, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.205. [In Persian]
- Ye, G., Ma, L., Li, L., Liu, J., Yuan, S., & Huang, G. (2017). Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling and optimization of batch flotation of coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*.