

key words

Zinc ion
Adsorption
Gracilaria algae
Corticata species
Aqueous solution
Kinetic behavior

Removal of Heavy Metal Zinc from Aqueous Solution by the Algae *Gracilaria Corticatae*

Kamal Heidari¹, Dariush Jafari^{2*}, Nahid Babaei³, Morteza
Esfandyari⁴

1-Department of Chemical Engineering, Bushehr Branch, Islamic
Azad University, Bushehr, Iran

2-Department of Chemical Engineering, Bushehr Branch, Islamic
Azad University, Bushehr, Iran

3-Department of Fisheries and Natural Resources, Bushehr Branch,
Islamic Azad University, Iran

4-Assistant professor of chemical engineering, University of Bojnord,
Bojnord, Iran

Abstract

Research subject :Zinc is one of the most dangerous organic components in industrial wastewaters, which pollutes the environment as a result of human activities and various industrial operations. In the present study, the adsorbent prepared from *Gracilaria Corticatae* algae was used for the first time to recover and remove heavy metal zinc and equilibrium study of the process were done.

Research approach :In the current work, the effect of important parameters such as initial pH of solution, adsorbent dosage, and contact time were investigated on the adsorption efficiency of the process. Additionally, Langmuir and Freundlich two-parameter adsorption isotherm models were used to model the equilibrium zinc adsorption.

Main results :The results showed that according to the calculated correlation coefficient, Freundlich isotherm was better than the Langmuir in fitting the experimental data. The highest point-to-point correlation coefficient for adsorbent percentage was achieved at 3 g/ml adsorbent dosage with contact time of 360 min and pH=7 and the lowest one was at 4 g/ml adsorbent dosage with contact time of 360 min and PH=7. However, the highest adsorption rate was observed for the adsorbent dosage of 4 g/ml with contact time of 420 min and pH=9 and the lowest adsorption percentage was achieved at the adsorbent dosage of 2 g/ml with contact time of 300 min and pH=5. The maximum and minimum adsorption percentages were 76.88 mg/g and 49.23 mg/g, respectively.

*To whom correspondence should be addressed:
dariush.jafari@yahoo.com

پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای
سال چهارم، شماره ۱، نسخه ۱
بهار ۱۳۹۹، صفحه ۵۱-۴۳

حذف فلز سنگین روی از محلول آبی به کمک جلبک قرمز دریایی گراسیلاریا کورتیکاتا

کمال حیدری^۱، داریوش جعفری^{۲*}، ناهید بابایی^۳، مرتضی اسفندیاری^۴

۱- کارشناس ارشد گروه مهندسی شیمی، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
۳- عضو هیئت علمی گروه منابع طبیعی و شیلات، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
۴- عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، برای بازیابی و حذف فلز سنگین روی از محلول آبی برای اولین بار از جلبک قرمز دریایی گراسیلاریا کورتیکاتا (*Gracilaria Corticata*) به عنوان جاذب استفاده شده و مطالعه تعادلی فرایند انجام گرفت. در این بررسی، اثر پارامترهای مهمی نظیر pH اولیه محلول، مقدار جاذب و زمان تماس بر بازدهی جذب فرایند بررسی شد. به منظور بررسی رفتارهای تعادلی فرایند از مدل‌های ایزوترم جذب دو پارامتری لانگمر و فرویندلیش برای مدل‌سازی میزان جذب فلز روی توسط جلبک گراسیلاریا کورتیکاتا استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به ضریب همبستگی محاسبه شده، ایزوترم فرویندلیش نسبت به لانگمر عملکرد بهتری در برازش داده‌های آزمایشی جذب فلز روی توسط جلبک دارد. بالاترین ضریب همبستگی به صورت نقطه به نقطه برای درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min و pH=۷ و پایین‌ترین ضریب همبستگی به صورت نقطه به نقطه برای درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۴ g/ml با زمان تماس ۴۲۰ min و pH=۹ و پایین‌ترین درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۲ g/ml با زمان تماس ۳۰۰ min و pH=۵ تعیین شد. بیشینه درصد جذب تعیین شده برای جلبک قرمز گراسیلاریا کورتیکاتا ۷۶/۸۸ mg/g و کمینه جذب ۴۹/۲۳ mg/g تعیین شد.

کلمات کلیدی

یون روی
جذب سطحی
جلبک گراسیلاریا کورتیکاتا
محلول آبی
رفتار تعادلی

*عهده دار مکاتبات:

dariush.jafari@yahoo.com

۱ مقدمه

حفظ محیط زیست از آلودگی های ناشی از صنایع و فناوری های نوین یکی از نگرانی های امروزی به دلیل به خطر انداختن سلامت انسان و بهداشت عمومی جامعه است [۱]. تمایل زیاد فلزات سنگین به ماندگاری، چرخش و خاصیت تجمع پذیری در زنجیره غذایی از مهم ترین عواملی است که اهمیت این موضوع را دوچندان می کند. این فلزات در اثر فرایندهای مختلف صنعتی مانند ذوب و استخراج وارد محیط زیست می شوند [۲]. تاکنون روش های مختلفی برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب های صنعتی به کار گرفته شده است که از آن جمله می توان به تبادل یونی، ترسیب شیمیایی، اسمز معکوس و جذب سطحی اشاره نمود. روش های فیزیکی و شیمیایی نیازمند سرمایه گذاری بالا و هزینه های بهره برداری زیادی هستند [۳]. برخی از این روش ها نیازمندی های قانونی برای دفع پساب در محیط را فراهم نمی کنند و همچنین مشکلات دفع لجن را به همراه دارند؛ این در حالی است که همواره استفاده از روش های کم هزینه برای حذف فلزات سنگین به صورت کاملاً برجسته ای مورد توجه بوده است [۴]. جذب به کمک جاذب های زیستی همانند سبوس گندم، پودر جلبک و جلبک زنده با توجه به کارایی و کاربرد آسان به عنوان روش مناسب برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب های صنعتی مطرح شده است [۶]. جلبک ها، آب ها را از آلودگی های مواد آلی و فلزات سنگین پاک می نمایند و به عنوان شاخص زیست محیطی مطرح هستند. جلبک ها دارای ترکیبات ضد میکروبی بوده و در دیواره سلولی آنها غیر از سلولز مواد دیگری از جمله آلزینات وجود دارند که نقش کلیدی در جذب بیولوژیکی کاتیون های فلزی ایفا می کنند. جلبک ها را می توان برای پالایش و حفظ محیط زیست استفاده نمود که علاوه بر آن باعث اشتغال زایی و رونق اقتصادی منطقه ای هم می شود. در پژوهشی توسط اشرف و همکاران [۷] حذف فلزات مس، سرب، نیکل و روی توسط پوست گیاه موز انجام شد. در مطالعه ای توسط پاتل و همکاران [۸] برای حذف کادمیم و روی از محیط های آبی دو نوع پوسته برنج و نخودفرنگی مورد بررسی قرار گرفت. سواری و همکاران [۹] در پژوهشی به بررسی تأثیر فلز سنگین روی بر سه گونه جلبک کلارلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*)، سندسموس ابلیکس (*Scenedesmus obliquus*) و آنابلا فلوس-آکوا (*Anabaena flos-aquae*) پرداختند. در این مقاله دو جلبک کلارلا ولگاریس و سندسموس ابلیکس از شاخه جلبک های سبز و جلبک آنابلا فلوس-آکوا از شاخه جلبک های سبزآبی به صورت خالص و انفرادی در شرایط نوری و گرمایی برای مدت ۹۶ ساعت استفاده شده و تحت تأثیر فلز سنگین روی قرار گرفتند. پس از

مدت مذکور براساس روش تحلیل پروبیت، مقادیر EC10، EC50 و EC90 تعیین شدند. مقدار EC50 جلبک های فوق به ترتیب ۰/۱۳۴، ۰/۰۴۷ و ۰/۰۹۳ میلی گرم در لیتر محاسبه شد و مشخص شد که جلبک سندسموس ابلیکس نسبت به سایر جلبک ها از مقاومت بیشتری برخوردار است.

جلبک قرمز گراسیلاریا گونه کورتیکاتا کاربرد فراوانی در تولید آگار، لوازم آرایشی-بهداشتی، مواد اولیه دندان پزشکی، استفاده جهت غذای ماهیان آکواریومی، تهیه روغن و تولید اسیدهای چرب ضروری، تهیه سوخت به ویژه در تهیه الکل، تولید افزودنی (ادویه و چاشنی غذا)، استفاده جهت درمان های دارویی گیاهی، تولید صابون و به عنوان رطوبت گیر دارد. در تحقیق حاضر برای اولین بار از جلبک گراسیلاریا کورتیکاتا برای جذب فلز روی از محلول آبی استفاده شده و رفتار تعادلی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و روش ها

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق شامل سولفات روی ($Zn(so_4).7H_2O$) (شرکت مرک (Merck)، آلمان)، هیدروکسید سدیم (شرکت مرک، آلمان)، اسید کلریدریک (شرکت مرک، آلمان) و آب دوبار تقطیر شده (شرکت اطلس شیمی، ایران) هستند.

وسایل مورد استفاده در این تحقیق شامل دستگاه جذب اتمی شعله ای برای تعیین مقدار یون های باقیمانده درون محلول، آن جهت خشک نمودن جاذب (جلبک)، ترازو جهت توزین جاذب و مواد شیمیایی، شیکر برای یکنواخت سازی جاذب درون محلول، pH متر (-WTW Inolab) برای تنظیم نمودن pH محلول ها، کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ برای فیلتر کردن جاذب درون محلول بعد از اتمام هر آزمایش، کیف بوختر برای جداسازی جاذب از محلول، آسیاب برای آسیاب کردن جلبک با شماره الک مورد نظر، بالن ژوژه برای تهیه محلول و ارلن مایر برای انجام آزمایشات بوده است.

۲-۲ تهیه توده سلولی

در این مقاله از جلبک قرمز گراسیلاریا گونه کورتیکاتا به عنوان زی جاذب استفاده شد. این جلبک از سواحل شهر بوشهر (۵۰ درجه و ۲۸ دقیقه شمال ۵۰ درجه و ۵۸ درجه شرقی) جمع آوری شد. به منظور تهیه زی جاذب، ابتدا نمونه ها را با استفاده از آب دوبار تقطیر شده شسته تا شن، ماسه و مواد زائد از آن جدا شوند. سپس به مدت ۴۸ ساعت در معرض نور خورشید قرار داده تا به طور کامل خشک شوند. این نمونه ها در آزمایشگاه به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به طور پیوسته برای خشک سازی نهایی قرار داده شد. به کمک آسیاب با شماره مش الک ۲۵ μm خرد و دانه بندی شد. پس از خشک شدن،

آزمایش اول به مدت ۳۰۰ دقیقه (۵ ساعت)، آزمایش دوم به مدت ۳۶۰ دقیقه (۶ ساعت) و برای آزمایش سوم به مدت ۴۲۰ دقیقه (۷ ساعت) هم زده شد. برای تعیین میزان pH ارلن حاوی جلبک و محلول ۴۰ ppm چند مرحله از pH سنج استفاده شد. برای این کار حین اضافه کردن اسید HCl ۰/۱ نرمال یا باز NaOH ۰/۱ و اختلاط با هم‌زن، حسگر pH سنج درون ارلن‌مایر حاوی جلبک و محلول ۴۰ ppm قرار داده شد و تا تنظیم pH بر عدد مورد نظر اسید یا باز به آن اضافه شد. برای هر آزمایش بعد از تنظیم pH مورد نظر و اتمام زمان اختلاط روی شیکر، محلول درون بشر قبل از گذاشتن در دستگاه جذب اتمی تکان داده شد و سپس برای تشخیص میزان جذب فلز روی در دستگاه جذب اتمی قرار داده شد. برای هر آزمایش درصد حذف فلز روی توسط معادله (۱) و ظرفیت جذب یا مقدار یون‌های جذب‌شده به ازای وزن جاذب خشک q_e (mg/g) توسط معادله (۲) تعیین شد:

$$R = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)}{w} \times V \quad (2)$$

که در این روابط C_o و C_e به ترتیب غلظت اولیه و غلظت نهایی فلز روی در محلول (mg/ml) و V حجم محلول (ml)، w جرم جاذب (g)، R راندمان حذف (درصد) و q_e ظرفیت جذب بر حسب (mg/g) است.

۲-۶ ایزوترم جذب

برای بررسی رفتار ایزوترمی فرایند جذب یون روی با استفاده از جلبک قرمز گراسیلاریا کورتیکاتا داده‌های آزمایش با استفاده از مدل‌های ایزوترمی لانگمر و فرویندلیش مورد بررسی قرار گرفتند. ایزوترم لانگمر برای بررسی جذب تک‌لایه بر روی سطح همگن مناسب بوده، حال آنکه ایزوترم فرویندلیش جذب چندلایه بر سطح همگن را نشان می‌دهد. شکل خطی مدل لانگمر و فرویندلیش به ترتیب در معادله‌های (۳) و (۴) و (۵) (جدول ۱) ارائه شده است.

در اینجا k_f و n ثابت‌های مدل فرویندلیش، q_m و k_L به ترتیب مقدار ظرفیت تک‌لایه جذب سطحی (mg/g) و انرژی جذب (g/l) هستند که جزء ثابت‌های مدل لانگمر به شمار می‌روند.

۳ نتایج و بحث

در این مقاله به منظور بررسی بازده جذب گراسیلاریا کورتیکاتا، آزمایش‌ها در مقدار جاذب ۲، ۳ و ۴ گرم بر میلی‌لیتر، pH ۵، ۷ و ۹ و زمان‌های تماس ۳۰۰، ۳۶۰ و ۴۲۰ دقیقه انجام شد. در شکل (۱) درصد جذب بر حسب زمان تماس و pH در مقدارهای جاذب ۲، ۳ و ۴ گرم بر میلی‌لیتر نشان داده شده است. همانطور که

جلبک‌ها به هم می‌چسبیدند و ذرات بزرگتری ایجاد می‌شد که این امر به دلیل وجود اسیدهای آلزینات در جلبک و خاصیت چسبندگی آن بود. بنابراین لازم بود نمونه‌ها بعد از خشک شدن کامل دوباره با دستگاه الک به همان اندازه قبلی دانه‌بندی شوند.

۲-۳ تهیه محلول‌ها

به منظور تهیه محلول ۴۰ ppm روی، ۰/۱۷۵۹ g سولفات روی در یک لیتر آب دوبار تقطیرشده حل شده، pH محلول تعیین و دمای آن معادل دمای محیط تنظیم شد. برای تهیه محلول اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال مقدار ۸/۳۳ میلی‌لیتر از اسید کلریدریک با آب دوبار تقطیرشده به حجم یک لیتر رسانده شد. محلول هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال با اختلاط ۴ گرم سود با آب دوبار تقطیرشده برای دستیابی به حجم یک لیتر حاصل شد.

۲-۴ اندازه‌گیری فلز روی

به منظور اندازه‌گیری فلز روی باقیمانده درون محلول‌ها از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (Plus SpectrAA-10, Varian) استفاده شد. برای تحلیل نمونه‌ها، دستگاه جذب اتمی شعله‌ای به وسیله محلول‌های استاندارد روی کالیبره شد. سپس لامپ‌های هالوکاتیودی مربوط به یون فلز مورد نظر ۳۰ دقیقه قبل از تحلیل نمونه‌ها روشن شد تا لامپ‌های هالوکاتیودی به اندازه کافی گرم شوند. پمپ دستگاه روشن شد و محلول از طریق مکش، به مشعل (Burner) دستگاه منتقل شد. سپس محلول موجود در مشعل دستگاه توسط سوخت استیلن- هوا آمیخته شد. با تابش لامپ‌های هالوکاتیودی مربوط به فلز مورد نظر مقدار غلظت فلزی باقی‌مانده درون محلول اندازه‌گیری و ثبت شد.

۲-۵ روش آزمایش

در این تحقیق از جلبک قرمز دریایی گراسیلاریا به عنوان زی‌جاذب برای حذف کاتیون (فلز روی) از سامانه پیوسته استفاده شد. اثر پارامترهایی مانند pH (۵، ۷ و ۹) و مقادیر مختلف جاذب (۲، ۳ و ۴ گرم) در زمان ماندگاری (۵، ۶ و ۷ ساعت) در دمای آزمایشگاه (حدود 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد) بررسی شد. غلظت اولیه محلول روی مورد استفاده ۴۰ ppm بود و مدل‌های جذبی دوپارامتری لانگمر و فرویندلیش برای بررسی رفتار تعادلی جذب استفاده شد.

مقدار ۱۰۰ ml محلول ۴۰ ppm سولفات روی با استفاده از پیپت درون ارلن‌مایر ۵۰۰ ml ریخته و سپس برای آزمایش مرحله اول مقدار ۲ g، برای آزمایش مرحله دوم مقدار ۳ g و برای آزمایش سوم مقدار ۴ g جلبک خشک‌شده درون ارلن‌مایر حاوی محلول ۴۰ ppm ریخته شد. ارلن‌مایر حاوی جلبک و محلول ۴۰ ppm روی دستگاه شیکر با دور ۴۰۰ rpm (برای تمامی آزمایش‌ها دور هم‌زن ثابت بود) قرار داده شد و برای

جدول ۱. معادلات خطی ایزوترم های جذب و پارامترهای آن ها

Table 1. Linear equations of adsorption isotherms and their parameters

Adsorption Isotherm	Equation Number
$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{k_L q_m}\right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$	(3)
$\text{Ln}q_e = \text{Ln}k_f + \frac{1}{n} \text{Ln}C_e$	(4)
$R_1 = \frac{1}{1 + k_L C_0}$	(5)

از شکل مشخص است با افزایش مقدار جاذب در زمان تماس و pH یکسان درصد جذب افزایش پیدا کرد. **۳-۱ اثر pH در جذب فلز سنگین روی با استفاده از جلبک گراسیلاریا کورتیکاتا**

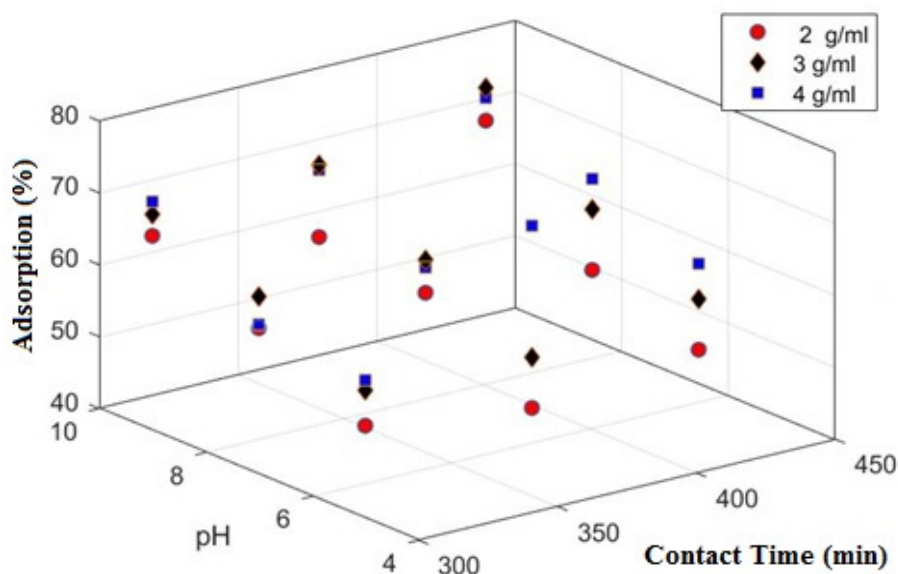
pH اولیه محلول یکی از پارامترهای مهم در جذب یون فلزات سنگین از فاضلاب و محلول های آبی است [۱۰]. مطالعه اثر pH اولیه در شرایطی نظیر مقدار جاذب g/l ۲ ml، زمان تماس ۳۰۰ min، غلظت اولیه یون روی ۴۰ ppm و دمای $298/15 K$ انجام شد. نتایج نشان داد که بازدهی جذب یون روی در pH برابر با ۵ کم بود و با افزایش pH اولیه محلول، افزایش یافت و بیشینه درصد جذب یون روی در pH برابر با ۹ به دست آمد. در pH های پایین بازدهی جذب یون روی به وسیله زی جاذب مذکور پایین بود، زیرا مقدار یون هیدروژن (+H) درون محلول بسیار زیاد و در رقابت با یون روی برای قرارگیری بر مراکز فعال زی جاذب بود. در نتیجه با اشغال مراکز فعال زی جاذب و به دلیل نیروی دافعه بین یون هیدروژن و روی، از قرارگیری یون روی

بر مراکز فعال زی جاذب تهیه شده از جلبک قرمز گراسیلاریا کورتیکاتا ممانعت شد. با افزایش pH، تعداد بارهای منفی بر روی سطح زی جاذب افزایش یافت [۲۴]. در نتیجه سطح کافی و مناسب برای جذب یون روی فراهم شد و بازدهی جذب یون روی افزایش نشان داد. با افزایش دوباره pH بازدهی جذب یون روی به وسیله زی جاذب مذکور کاهش یافت. زیرا در این حالت غلظت یون هیدروکسید (-OH) درون محلول افزایش یافته و با یون فلز روی کمپلکس تشکیل داده و برای قرارگیری بر مراکز فعال جاذب با یون روی رقابت می کند. در نتیجه بازدهی جذب فرایند مجدد کاهش می یابد [۱۱]. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده، pH بهینه برای بازیابی و حذف یون فلز سنگین روی از محلول آبی ۹ تعیین شد [۱۲].

جدول (۲) اثر pH، مقدارهای مختلف جاذب و زمان های مختلف تماس بر درصد جذب را نشان می دهد. با استفاده از جدول (۲) مشخص شد که بالاترین درصد جذب مربوط به استفاده از pH های برابر ۹ و پایین-

از شکل مشخص است با افزایش مقدار جاذب در زمان تماس و pH یکسان درصد جذب افزایش پیدا کرد. **۳-۱ اثر pH در جذب فلز سنگین روی با استفاده از جلبک گراسیلاریا کورتیکاتا**

pH اولیه محلول یکی از پارامترهای مهم در جذب یون فلزات سنگین از فاضلاب و محلول های آبی است [۱۰]. مطالعه اثر pH اولیه در شرایطی نظیر مقدار جاذب g/l ۲ ml، زمان تماس ۳۰۰ min، غلظت اولیه یون روی ۴۰ ppm و دمای $298/15 K$ انجام شد. نتایج نشان داد که بازدهی جذب یون روی در pH برابر با ۵ کم بود و با افزایش pH اولیه محلول، افزایش یافت و بیشینه درصد جذب یون روی در pH برابر با ۹ به دست آمد. در pH های پایین بازدهی جذب یون روی به وسیله زی جاذب مذکور پایین بود، زیرا مقدار یون هیدروژن (+H) درون محلول بسیار زیاد و در رقابت با یون روی برای قرارگیری بر مراکز فعال زی جاذب بود. در نتیجه با اشغال مراکز فعال زی جاذب و به دلیل نیروی دافعه بین یون هیدروژن و روی، از قرارگیری یون روی



شکل ۱. تأثیر زمان تماس و pH بر روی درصد جذب در غلظت های مختلف مقدار جاذب

Figure 1. The effect of contact time and pH on the adsorption percentage at different adsorbent dosages

جدول ۲. اثر pH، مقدار جاذب و زمان تماس بر درصد جذب

Table 2. Effect of pH, adsorbent dosage and contact time on adsorption percentage

Adsorbent Dosage (g/ml)	Contact Time (min)	pH	Final Concentration (mg/lit)	Adsorption Percentage
2	300	5	18.825	52.937
	300	7	15.542	60.312
	300	9	13.2	67.00
	360	5	20.103	49.742
	360	7	16.125	59.687
	360	9	15.475	61.312
	420	5	19.125	52.187
	420	7	17.1	57.25
	420	9	11.5	71.812
3	300	5	16.85	57.875
	300	7	14.067	64.75
	300	9	12.002	69.995
	360	5	17.275	56.812
	360	7	14.3	64.25
	360	9	11.475	71.312
	420	5	16.325	59.187
	420	7	13.775	65.562
	420	9	9.403	76.492
4	300	5	16.325	59.262
	300	7	15.675	60.812
	300	9	11.25	71.875
	360	5	10.1	75.083
	360	7	14.275	63.187
	360	9	11.725	70.684
	420	5	14.3	64.25
	420	7	12.053	69.867
	420	9	9.975	75.062

جدول ۳. مقایسه ضرایب رگرسیون برای درصد جذب در مقابل pH
Table 3. Comparison of regression coefficients for percentage of adsorption versus pH

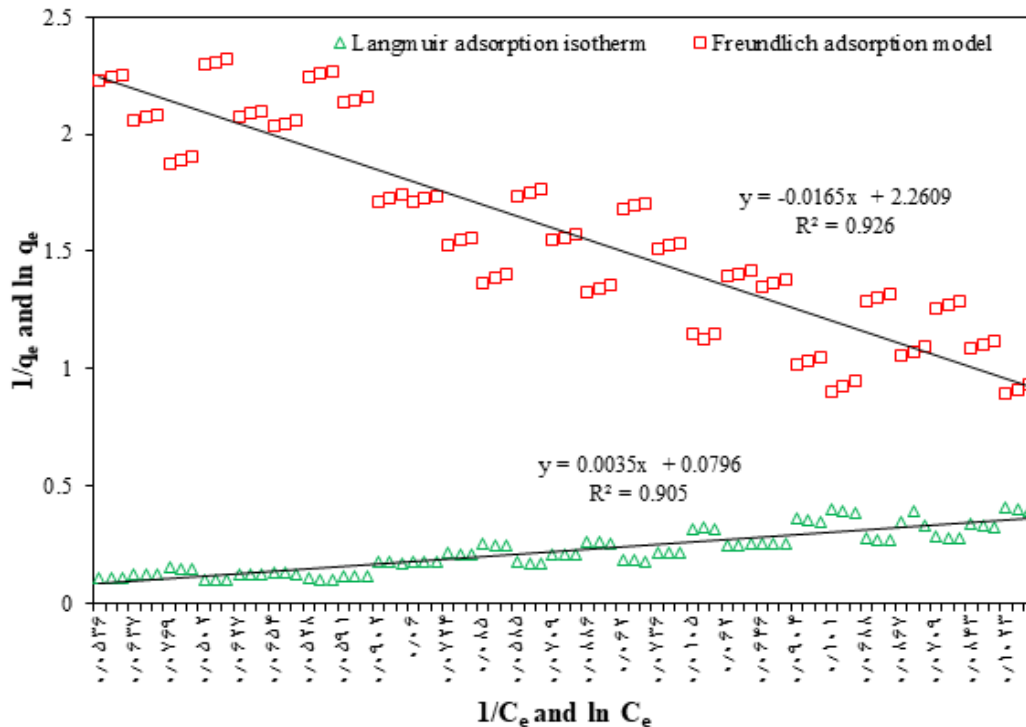
Adsorbent Dosage (g/ml)	Contact Time (min)	pH	R ²
2	300	5	0.994
	360	7	0.848
	420	9	0.925
3	300	5	0.987
	360	7	0.995
	420	9	0.975
4	300	5	0.835
	360	7	0.119
	420	9	0.991

مربوط به مقدار جاذب ۴ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min و pH=۷ تعیین شد.

۲-۳ نوع ایزوترم جذب

ایزوترم جذب یکی از فاکتورهای مهم در طراحی سامانه های جذب است. ایزوترم جذب به منزله فاکتور اساسی برای تعیین ظرفیت جاذب و بهینه سازی مصرف جاذب مورد نظر است. در این پژوهش از دو مدل ایزوترمی جذبی لانگمر و فرویندلش استفاده شده است و نتایج آن در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) و مقایسه مقادیر ضریب همبستگی برای مدل

ترین درصد جذب مربوط pH های برابر ۵ بود. همچنین مشاهده شد که با افزایش میزان pH درصد جذب افزایش یافت. به علاوه، کمترین میزان جذب مربوط به مقدار جاذب ۲ g/ml در pH=۵ و زمان تماس ۳۰۰ min بوده و بیشترین میزان جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml در pH=۹ و زمان تماس ۴۲۰ min بود. جدول (۳) مقایسه ضرایب رگرسیون را برای درصد جذب در مقابل pH نشان می دهد که بالاترین ضریب رگرسیون برای درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min و pH=۷ و پایین ترین درصد جذب



شکل ۲. مقایسه دو مدل لانگمر و فرویندلش

Figure 2. Comparison of Langmuir and Freundlich models

که بالاترین درصد جذب مربوط به استفاده از pH های برابر ۹ و پایین‌ترین درصد جذب مربوط به استفاده از pH های ۵ بود. با مقایسه نقطه به نقطه اثر زمان بر درصد جذب، بالاترین درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml با زمان تماس ۴۲۰ min، به میزان ۷۶/۸۷۵ درصد محاسبه شد و پایین‌ترین درصد مربوط به مقدار جاذب ۲ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min، به میزان ۴۹/۲۲۵ درصد محاسبه شد. اما از نمودار به صورت فشرده مشخص شد که بالاترین درصد جذب مربوط به زمان های ۴۲۰ min است. با مقایسه نقطه به نقطه اثر مقدار جاذب بر درصد جذب، بالاترین

فرویندلیش (۰,۹۲۶) و مدل لانگمر (۰,۹۰۵) مشخص شد که جذب از مدل فرویندلیش به دلیل ضریب همبستگی بالاتر، تبعیت می‌کند. به این معنی که جذب فلز سنگین روی مکان‌هایی از زی‌جاذب که دارای سطح ناهمگنی هستند، اتفاق می‌افتد. مکان‌های جذب در این ایزوترم به طور کامل همگن نبوده و مقدار کل ماده جذب‌شده بر تمامی انواع مکان‌های جذب یکسان است. همچنین فرایند جذب بر روی جاذب به صورت چند لایه انجام شده است.

۳-۳ بررسی تحلیل وردایی (Variance)

جدول (۳) تحلیل وردایی میزان جذب را در سطح

جدول ۴. بررسی تحلیل وردایی میزان جذب

Table 3. Analysis of variance of adsorption rate

Variation Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean of Squares	F test	Significance
Corrected Model	760.51	26	29.25	24.33	0.001
Intercept	16508.96	1	16508.96	13730.47	0.001
pH	376.89	2	188.44	156.73	0.001
Algae	181.01	2	90.51	75.27	0.001
Time	19.3	2	9.62	8.03	0.001
pH * Algae weight	58.11	4	14.53	12.08	0.001
pH * Time	14.21	4	3.55	2.95	0.028
Algae weight * Time	30.22	4	7.55	6.28	0.001
pH * Algae weight * Time	80.75	8	10.09	8.39	0.001
Error	64.92	54	1.20		
Total	17334.40	81			

درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml و زمان تماس ۴۲۰ min، مقدار ۷۶/۸۷۵ درصد محاسبه شد و پایین‌ترین درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۲ g/ml و زمان تماس ۳۶۰ min، مقدار ۴۹/۲۲۵ درصد محاسبه شد. همچنین از روی نمودار به صورت فشرده مشخص شد که بالاترین درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۴ g/ml بود. با توجه به ضرایب همبستگی مدل لانگمر و فرویندلیش، مدل فرویندلیش بر مدل لانگمر ارجحیت داشت.

اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار می‌دهد. در سطح اطمینان ۹۵ درصد سطح معناداری به دست آمده که برای میزان جذب با مقدار ۰/۰۵ مقایسه شد و با توجه به اینکه سطح معناداری از ضریب خطای مورد نظر (۰/۰۵) کمتر بود، گروه‌های pH و زمان و وزن جلبک و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه تفاوت معناداری با یکدیگر نشان داد.

نتیجه‌گیری

بالاترین ضریب همبستگی به صورت نقطه به نقطه برای درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۳ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min و pH=۷، مقدار ۰/۹۹۵۰ محاسبه شد و پایین‌ترین درصد جذب مربوط به مقدار جاذب ۴ g/ml با زمان تماس ۳۶۰ min و pH=۷، مقدار ۰/۱۱۹۱ محاسبه شد. اما از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد

مراجع

- [1] Barros A.J.M., Prasad S., Leite V.D., Souza A.G., Biosorption of Heavy Metals in Upflow Sludge Solumns, *Bioresource Technology*, 98, 1418-1425, 2017.
- [2] Paulino A.T., Simionato J.I., Garcia J.C., Nozaki J., Characterization of chitosan and Chitin Produced from Silkworm Crystals, *Carbohydrate Polymers*, 64, 98-103, 2006.
- [3] Tech E.T., Evaluation of Wastewater Treatment Contaminated with Formaldehyde by Using Activated Carbon Prepared From Cypress Leaf, *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2, 23-27, 2014.
- [4] Saeed A., Iqbal M., Bioremoval of Cadmium from Aqueous Solution by Black Gram Husk (*Cicer Arientinum*), *Water Research*, 37, 3472-3480, 2003.
- [5] Javaid A., Bajwa R., Shafique U., Anwar J., Removal of Heavy Metals by Adsorption on *Pleurotus Ostreatus*, *Biomass and Bioenergy*, 35, 1675-1682, 2011.
- [6] Kucukgulmez A., Celik M., Yanar Y., Sen D., Polat H., Kadak A.E., Physicochemical Characterization of Chitosan Extracted from *Metapneaus Stebbingi* Shells, *Food Chemistry*, 126, 1144-1148, 2011.
- [7] Ashraf M.A., Wajid A., Mahmood K., Maah M.J., Yusoff I., Low Cost Biosorbent Banana Peel (*Musa Sapientum*) for the Removal of Heavy Metals, *Scientific Research and Essays*, 6, 4055-4064, 2011.
- [8] Patel K.P., Tank S., Patel K.M., Patel P., Removal of Cadmium And Zinc Ions from Aqueous Solution by Using Two Type of Husks, *APCBEE Procedia*, 5, 141-144, 2013.
- [9] Savari A., Kochenien P., Naser A.M., Falahi M., The Effect of Heavy Metal on *Chlorella Vulgaris*, *Scenedesmus Obliquus* and *Anabaena Flos-Aquae*, 2004.
- [10] Katsoyiannis I.A., Zouboulis A.I., Removal of Arsenic from Contaminated Water Sources by Sorption onto Iron-Oxide-Coated Polymeric Materials, *Water Research*, 36, 5141-5155, 2002.
- [11] Knorr D., Use of Chitinous Polymers in Food: A Challenge for Food Research and Development, *Food Technology*, USA, 1984.
- [12] Bhainsa K.C., Souza S. D., Removal of Copper Ions by the Filamentous Fungus, *Rhizopus Oryzae* From Aqueous Solution, *Bioresource Technology*, 99, 3829-3835, 2008.