

## Efficiency of Spirogyra at Bioadsorption of Heavy Metals such as Chromium, Copper, and Zinc from Aquatic Environments

Sayadi M.H.\* *PhD*, Shekari H.<sup>1</sup> *MSc*

\*Environment Department, Natural Resources & Environment Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>1</sup>Environment Department, Natural Resources & Environment Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

### Abstract

**Aims:** Heavy metal pollution is a worrisome environmental problem around the world. This study aimed at evaluating the efficiency of spirogyra to remove heavy metals such as chromium (Cr), copper (Cu), and zinc (Zn) from the aquatic environments.

**Materials & Methods:** The present experimental research was carried out on spirogyra of aqueducts in Birjand. The experimental method was considered one-factor-at-a-time. Effect of pH parameters, adsorbent dosage, contact time, initial concentration of Cr, Cu, and Zn at adsorption of heavy metals by spirogyra and Kinetic models, and Langmuir adsorption isotherms, Freundlich, and Temkin were examined.

**Findings:** The highest percentage of Cr (84.48%) and Cu (76.85%) removal occurred at pH 3 and 5, respectively with initial concentration of 20mg/l Cr and Cu at 15 and 40 minutes, respectively, in 3g algae biomass. Also, the highest Zn removal efficiency (89.26%) occurred at pH=5, initial concentration of 20mg/l, and adsorbent dosage of 2g/l over a 20 minutes period. Adsorption of Cr, Cu, and Zn were followed by Langmuir model with correlation coefficient 0.9983, 0.9924, and 0.9977, respectively. According to the kinetics results, the adsorption of Cr, Cu, and Zn were followed by pseudo second model with coefficients of 0.9922, 0.9767, and 0.9953, respectively.

**Conclusion:** Spirogyra has a high ability to remove chromium, copper, and zinc from aquatic environments.

### Keywords

Chromium [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68002857>];

Copper [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68003300>];

Zinc [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68015032>];

Kinetics [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68007700>]

---

\*Corresponding Author

Tel: +98 (56) 32254068

Fax: +98 (56) 32254066

Post Address: Natural Resources & Environment Faculty, University of Birjand, Amirabad Pardis, 5 Kilometers Kerman Road, Birjand, South Khorasan. Postal code: 9719113944

[mh\\_sayadi@birjand.ac.ir](mailto:mh_sayadi@birjand.ac.ir)

Received: February 05, 2017

Accepted: July 04, 2017

ePublished: June 21, 2018

## عملکرد جلبک اسپیروژیر در جذب زیستی فلزات سنگین کروم، مس و روی از محیط‌های آبی

محمدحسین صیادی \* PhD

گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حسین شگری MSc

گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

**اهداف:** آلودگی ناشی از فلزات سنگین، یک مشکل زیست‌محیطی نگران‌کننده در سراسر جهان است. هدف این پژوهش، بررسی عملکرد جلبک اسپیروژیر در جذب زیستی فلزات سنگین کروم، مس و روی از محیط‌های آبی بود.

**مواد و روش‌ها:** پژوهش تجربی حاضر روی جلبک اسپیروژیر از قنات‌های شهرستان بیرجند اجرا شد. طرح آزمایش به صورت یک عامل در زمان در نظر گرفته شد. تاثیر پارامترهای pH، مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه فلزات کروم، مس و روی بر میزان جذب توسط جلبک اسپیروژیر و مدل‌های سینتیک و ایزوترم‌های جذب لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** بیشترین درصد حذف کروم (۸۴/۴۸٪) و مس (۷۶/۸۵٪) به ترتیب در pH های ۳ و ۵، با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کروم و مس، در مدت زمان ۱۵ و ۴۰ دقیقه و مقدار ۳ گرم در لیتر زیست‌توده جلبک اسپیروژیر رخ داد. همچنین بالاترین راندمان حذف روی (۸۹/۲۶٪) در pH برابر با ۵، با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و مقدار جاذب ۲ گرم در لیتر طی مدت زمان ۲۰ دقیقه به دست آمد. جذب کروم، مس و روی از مدل لانگمویر با مقادیر ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۹۹۸۳، ۰/۹۹۲۴ و ۰/۹۹۷۷ پیروی کردند. طبق نتایج سینتیک، جذب کروم، مس و روی از مدل شبه درجه دوم به ترتیب با مقدار ضرایب ۰/۹۹۲۲، ۰/۹۷۶۷ و ۰/۹۹۵۳ تبعیت کردند.

**نتیجه‌گیری:** جلبک اسپیروژیر، توانایی بالایی در حذف عناصر کروم، مس و روی از محیط‌های آبی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** کروم، مس، روی، سینتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۳

\* نویسنده مسئول: mh\_sayadi@birjand.ac.ir

### مقدمه

صنایع، فلزات سنگین بسیاری نظیر سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، مس (Cu)، نیکل (Ni)، کروم (Cr) و روی (Zn) را وارد محیط می‌کنند [1]. پساب صنایعی نظیر آبکاری فلزات، کاغذ، کارخانه‌های تولید مقوا و صنعت کود از منابع تولید مس هستند. یون‌های مس در کبد تجمع می‌یابند و باعث مشکلاتی برای روده و کبد می‌شوند. همچنین این عنصر برای جانوران آبی حتی در غلظت‌های بسیار کم هم سمی است [2]. روی، عنصر ضروری و لازم برای متابولیسم در بدن انسان بوده، اما مصرف آن در مقادیر ۵۰۰-۱۰۰۰ میلی‌گرم در روز، سمی و سرطان‌زا شناخته شده است [3]. عنصر کروم از طریق تخلیه پساب‌های صنایع تولید رنگ، آبکاری فلزات، دباغی، نساجی، کارخانه‌های شیمیایی و تصفیه سنگ معدن وارد محیط زیست می‌شود [4]. از روش‌های مختلف حذف فلزات سنگین می‌توان به اسمز معکوس، تبادل یونی، انعقاد، اکسیداسیون و الکترودیالیز اشاره نمود [5]. عوارض جانبی فلزات سنگین روی محیط زیست و افزایش آنها از طریق زنجیره غذایی سبب توسعه تحقیقات در زمینه دستیابی به تکنیک‌های کارآمد و کم‌هزینه در زمینه تصفیه فاضلاب شده است [6, 7].

اهمیت و اعتبار یافتن جذب زیستی در طول سال‌های اخیر به دلیل دوستدار محیط زیست بودن آن، عملکرد بسیار خوب و هزینه کم در

حذف فلزات سنگین بوده است [8]. پژوهش در زمینه مواد جاذب جدید به خصوص جلبک‌ها به دلیل ظرفیت بالای جذب و در دسترس بودن آنها در مقادیر تقریباً نامحدود گسترش یافته است [9]. جلبک‌ها با توجه به حضور پلی‌ساکاریدها، پروتئین یا چربی روی سطح دیواره‌های سلولی‌شان که حاوی گروه‌های عاملی کاربردی نظیر آمین، هیدروکسیل، کربوکسیل و سولفات است، می‌توانند مکان‌های مناسب برای اتصال فلزات را فراهم آورند [10]. فنگ و آلدريج [11] جذب فلزات سنگین توسط جلبک سبز دریایی *اکلونیا ماکسیما (Ecklonia maxima)* را بررسی کرده و بیان نموده‌اند که این جلبک توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین داشته است. پژوهش لیو و همکاران [12] روی زیست‌توده جلبک قهوه‌ای در حذف عناصر سنگین کادمیوم، مس، نیکل و روی قابلیت و کارایی بالای این جلبک را در حذف نشان داده است. بنا بر مطالب ذکر شده، هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد جلبک اسپیروژیر در جذب زیستی فلزات سنگین کروم، مس و روی از محیط‌های آبی بود.

### مواد و روش‌ها

در پژوهش تجربی حاضر، جلبک اسپیروژیر از قنات‌های شهرستان بیرجند جمع‌آوری و با آب مقطر شسته و برای کاهش مقدار آب و حذف خاک آن توسط کاغذ صافی فیلتر شد. سپس به مدت ۴ روز در معرض نور آفتاب قرار گرفت و پس از آن طی ۲۴ ساعت به وسیله آون در دمای ۷۰°C خشک شد. در پایان، جلبک‌های خشک شده الک شد تا ذرات با اندازه دلخواه حاصل شود [13].

**آزمایش‌های جذب:** طرح آزمایش به صورت یک عامل در زمان در نظر گرفته شد. ابتدا محلول‌های استوک کروم، مس و روی (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) با استفاده از حل کردن نمک‌های دی‌کرومات پتاسیم، نیترات مس و نیترات روی در آب بدون یون و سپس محلول‌های استاندارد برای انجام آزمایش از طریق رقیق‌نمودن محلول استوک تهیه شد.

پارامترهای مختلف از جمله مقدار pH، مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه کروم، مس و روی مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر pH بر جذب با دامنه ۸-۲ بررسی شد. برای مشخص کردن تاثیر مقدار جاذب بر جذب کروم، مس و روی، مقادیر مختلف جاذب در محدوده ۶-۱ گرم در لیتر، مطالعه و تعیین زمان تعادل و سینتیک جذب در بازه زمانی ۶۰-۱۰ دقیقه انجام شد. تاثیر غلظت اولیه کروم، مس و روی در محدوده ۵۰-۵ میلی‌گرم در لیتر بر میزان جذب آنها در pH، مقدار جاذب و زمان تماس بهینه مراحل قبل انجام گرفت. ظرفیت تعادلی جاذب با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

$q_e$ : مقدار یون‌های فلزی جذب شده به ازای واحد جرم جاذب

$C_0$ : غلظت اولیه یون‌های فلزی موجود در محلول بر حسب میلی‌گرم در لیتر

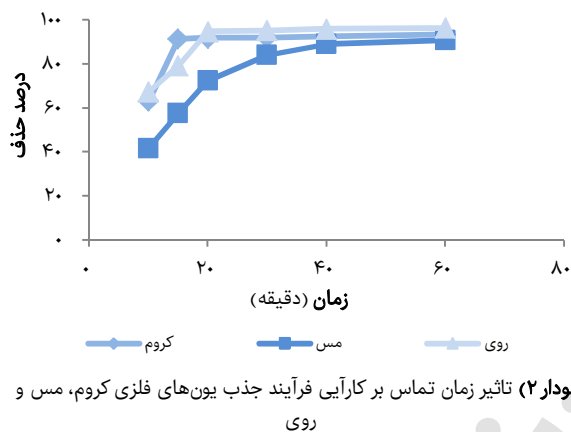
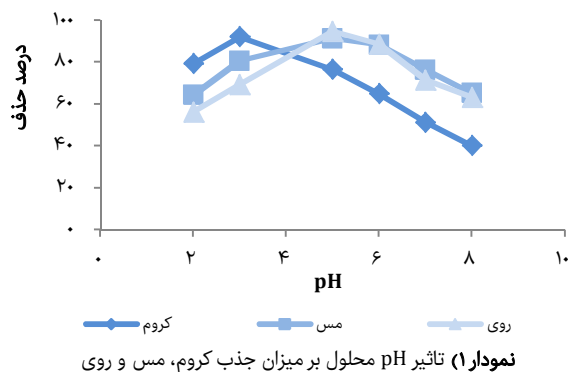
$C_e$ : غلظت تعادلی یون‌های فلزی در محلول بر حسب میلی‌گرم در لیتر

$V$ : حجم محلول بر حسب لیتر

$m$ : وزن جاذب بر حسب گرم

برای محاسبه درصد حذف کادمیوم و سرب (R%) از معادله زیر استفاده شد:

عملکرد جلبک اسپیروژیر در جذب زیستی فلزات سنگین کروم، مس و روی از محیط‌های آبی ۲۴۳  
برای کروم و ۵ برای عناصر مس و روی)، سرعت جذب در دقایق اولیه بالا بود و با گذشت زمان تماس، راندمان حذف تقریباً ثابت باقی ماند. بیشترین درصد حذف کروم، روی و مس به ترتیب در ۱۵، ۲۰ و ۴۰ دقیقه به دست آمد (نمودار ۲).



**تاثیر مقدار جاذب بر راندمان حذف عناصر کروم، مس و روی:** در تاثیر مقادیر مختلف ماده جاذب (جلبک اسپیروژیر) بر حذف کروم، مس و روی در شرایط pH (۳ برای کروم و ۵ برای عناصر مس و روی) و زمان تماس (۱۵، ۲۰ و ۴۰ دقیقه به ترتیب برای کروم، روی و مس)، مقدار بهینه برای کروم و مس ۳ گرم در لیتر و برای روی ۲ گرم در لیتر مشخص شد. مقادیر بهینه جاذب توانست از مس، کروم و روی به ترتیب ۹۲/۳۲، ۹۵/۱۲ و ۹۶/۴۵٪ را حذف نماید (نمودار ۳).

**تاثیر غلظت اولیه کروم، مس و روی بر میزان جذب آنها:** در تاثیر غلظت اولیه کروم، مس و روی بر میزان جذب آنها در شرایط pH (۳ برای کروم و ۵ برای عناصر مس و روی)، زمان تماس (۱۵، ۲۰ و ۴۰ دقیقه به ترتیب برای کروم، روی و مس) و مقدار جاذب (برای کروم و مس ۳ گرم در لیتر و برای روی ۲ گرم در لیتر)، با افزایش غلظت یون‌های کروم، مس و روی، راندمان جذب کاهش یافت. با افزایش غلظت اولیه یون‌های فلزی کروم، مس و روی، ظرفیت جذب آنها توسط جاذب افزایش پیدا کرد (نمودار ۴).

**تعیین مدل ایزوترم جذب کروم، مس و روی:** با استفاده از نتایج آزمایش‌های جذب، منحنی‌های ایزوترم، رسم و ضرایب ثابت و همبستگی ایزوترم‌های جذب ارائه شد (جدول ۱؛ نمودار ۵).

**سینتیک جذب:** ضرایب مربوط به مدل‌های سینتیک شبه درجه یک و دو تعیین شد (جدول ۲؛ نمودار ۶).

$$\%R = \left[ \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right] \times 100$$

**ایزوترم‌های جذب:** به منظور بررسی رفتار جاذب، معادلات و ایزوترم‌های مختلفی وجود دارد که در این پژوهش ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ، تمکین مورد استفاده قرار گرفت [14, 15, 16]. معادله خطی لانگمویر به صورت معادله زیر بیان شد:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_m} + \frac{C_e}{q_m}$$

$C_e$ : غلظت تعادلی فلز در محلول بر حسب میلی‌گرم در لیتر  
 $q_e$ : مقدار فلز جذب شده به ازای واحد وزن جذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم

$q_m$  و  $K_L$ : ثابت‌های ایزوترم لانگمویر  
معادله خطی ایزوترم جذب فروندلیچ به صورت زیر است:

$$\text{Log} q_e = \text{Log} K_f + \frac{1}{n} \text{Log} C_e$$

$n$  و  $K_f$ : ثابت‌های فروندلیچ  
 $C_e$ : غلظت ماده جذب‌شونده در فاز مایع پس از رسیدن به حالت تعادل بر حسب میلی‌گرم بر لیتر  
 $q_e$ : مقدار ماده جذب‌شده در واحد جرم جاذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم  
ایزوترم تمکین به صورت معادله خطی زیر است:

$$q_e = B_T \text{Ln} K_T + B_T \text{Ln} C_e$$

$K_T$  و  $B_T$ : ثابت‌های این ایزوترم هستند که با استفاده از نمودار  $q_e$  بر حسب  $\text{Ln} C_e$  می‌توان مقادیر آنها را به ترتیب از عرض از مبدا و شیب نمودار تعیین نمود.

**سینتیک جذب:** معادلات سینتیک شبه درجه یک و دو به ترتیب براساس معادلات زیر هستند:

$$\text{Log} (q_e - q_t) = \text{Log} (q_e) - \frac{K_1}{2.303} t$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e} + \frac{1}{q_e}$$

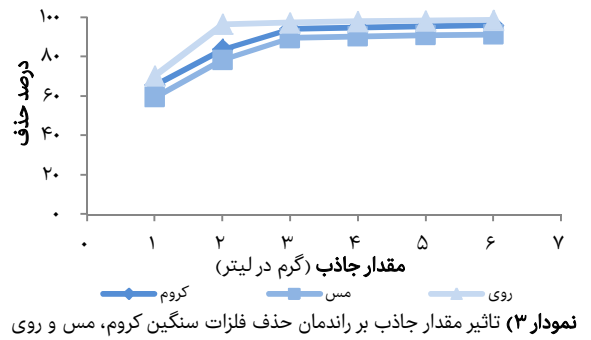
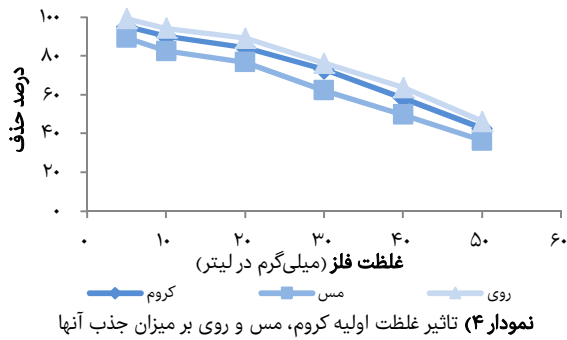
$q_e$ : مقدار املاح جذب‌شده در حالت تعادل (میلی‌گرم بر گرم)  
 $q_t$ : مقدار املاح جذب‌شده در زمان (میلی‌گرم بر گرم) است.  
 $K_1$  و  $K_2$ : ثابت‌های سرعت تعادلی سینتیک درجه اول و دوم هستند.

ضرایب همبستگی توسط نرم‌افزار Excel براساس داده‌های حاصل از بررسی مدل‌های ایزوترمی به دست آمد.

## یافته‌ها

**تاثیر pH محلول بر میزان جذب کروم، مس و روی:** در مس و روی با افزایش pH، کارایی فرآیند حذف افزایش یافت، به طوری که بالاترین راندمان حذف مس و روی در pH برابر با ۵ حاصل شد. همچنین کارایی فرآیند حذف کروم با افزایش pH محلول از ۳ به ۸ کاهش یافت و بیشترین درصد حذف در pH برابر با ۳ با مقدار ۹۲/۱۴ صورت پذیرفت (نمودار ۱).

**تاثیر زمان تماس بر کارایی فرآیند جذب یون‌های کروم، مس و روی:** در تاثیر زمان تماس بر میزان جذب یون‌های فلزی کروم، مس و روی با استفاده از جلبک اسپیروژیر در شرایط pH‌های بهینه (۳)

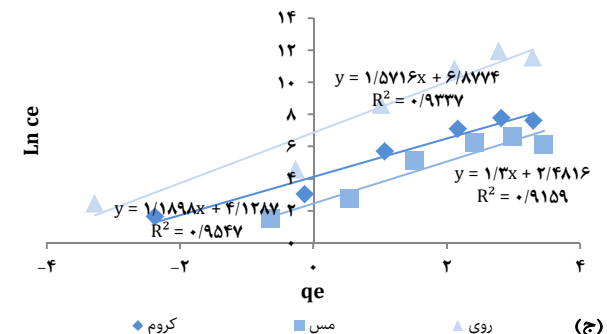
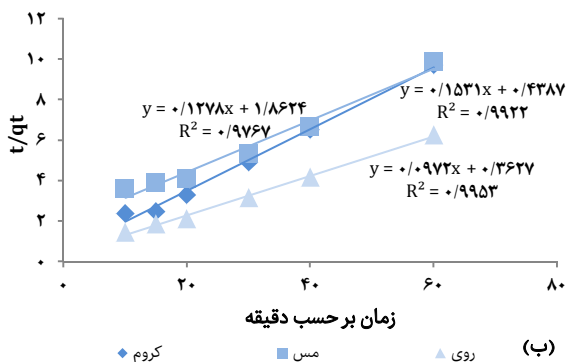
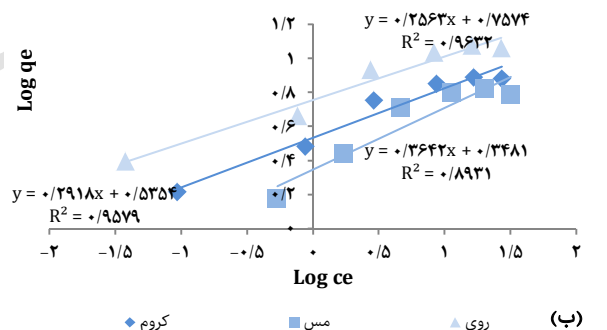
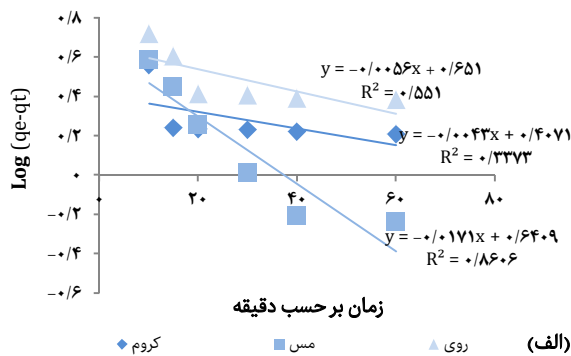
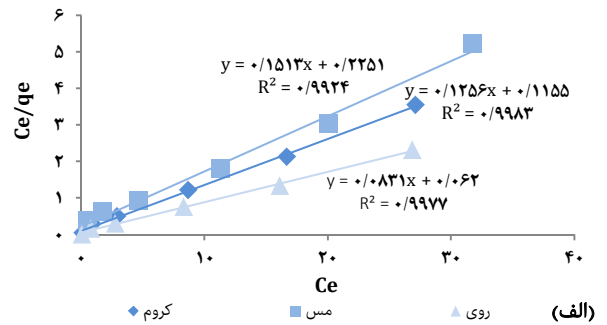


جدول (۱) ثابت‌های جذب و ضرایب همبستگی مدل‌های ایزوترمی جذب

فلز سنگین	لانگمویر			فروندلیچ			تمکین		
	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	q <sub>m</sub>	K <sub>L</sub>	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	n	K <sub>F</sub>	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	B <sub>T</sub>	K <sub>T</sub>
کروم	۰/۹۹۸۳	۷/۹۶	۱/۰۸	۰/۹۵۷۹	۳/۴۲	۳/۴۳	۰/۹۵۴۷	۱/۱۸	۳۲/۱۳
مس	۰/۹۹۲۴	۶/۶	۰/۶۷	۰/۸۹۳۱	۲/۷۴	۲/۲۲	۰/۹۱۵۹	۱/۳	۶/۷۴
روی	۰/۹۹۷۷	۱۲/۰۳	۱/۳۴	۰/۹۶۳۲	۳/۹	۵/۷۲	۰/۹۳۳۷	۱/۵۷	۷۹/۵۲

جدول (۲) ضرایب مدل‌های سینتیک جذب

فلز سنگین	سینتیک شبه درجه اول			سینتیک شبه درجه دوم		
	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	q <sub>e</sub>	K <sub>1</sub>	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	q <sub>e</sub>	K <sub>2</sub>
کروم	۰/۳۳۷۳	۲/۵۵	۰/۰۰۹	۰/۹۹۲۲	۶/۵۳	۰/۰۵۳
مس	۰/۸۶۰۶	۴/۳۷	۰/۰۳۹	۰/۹۷۶۷	۷/۸۲	۰/۰۰۸
روی	۰/۵۵۱	۴/۴۷	۰/۰۱۲	۰/۹۹۵۳	۱۰/۲۸	۰/۰۲۶



نمودار (۶) تحلیل سینتیک جذب شبه درجه دوم و اول کروم، مس و روی توسط جلبک اسپیروژیر؛ الف) تحلیل سینتیک جذب شبه درجه اول کروم، مس و روی توسط جلبک اسپیروژیر؛ ب) تحلیل سینتیک جذب شبه درجه دوم کروم، مس و روی توسط جلبک اسپیروژیر

نمودار (۵) تحلیل ایزوترم‌های تعادلی جذب کروم، مس و روی روی جلبک اسپیروژیر براساس مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین  
الف- تحلیل ایزوترم‌های تعادلی جذب کروم، مس و روی روی جلبک اسپیروژیر براساس مدل لانگمویر؛ ب- تحلیل ایزوترم‌های تعادلی جذب کروم، مس و روی روی جلبک اسپیروژیر براساس مدل فروندلیچ؛ ج- تحلیل ایزوترم‌های تعادلی جذب کروم، مس و روی روی جلبک اسپیروژیر براساس مدل تمکین

بحث

پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد جلبک اسپیروژیر در جذب زیستی فلزات سنگین کروم، مس و روی از محیط‌های آبی انجام

داده‌اند که با افزایش غلظت اولیه یون‌های فلزی، راندمان حذف کاهش یافته است.

نتایج حاصل از آزمون مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین نشان داد که ضرایب همبستگی بالایی برای ایزوترم‌های مورد بررسی وجود داشت، اما طبق داده‌ها، مدل لانگمویر برای کروم، مس و روی دارای بالاترین ضرایب همبستگی بود که مقادیر آن به ترتیب ۰/۹۹۸۳، ۰/۹۹۲۴ و ۰/۹۹۷۷ بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های فرآیند جذب عناصر کروم، مس و روی به وسیله جلبک اسپیروژیر از مدل لانگمویر نسبت به سایر مدل‌ها بهتر پیروی می‌کند. مطالعه شنگ و همکاران<sup>[27]</sup> با عنوان جذب سرب، مس، کادمیوم، روی و نیکل توسط زیست‌توده جلبک دریایی نشان داده است که جذب مس و روی از مدل لانگمویر پیروی می‌کند و نتایج این تحقیق با آن مطابقت داشت. همچنین نتایج این مرحله از پژوهش با مطالعات گوپتا و راستوگی<sup>[21]</sup> که نشان داده است جذب کروم با جلبک سبز ادوگانیم از مدل لانگمویر تبعیت می‌کند، همخوانی داشت.

سینتیک جذب به منظور درک بهتر دینامیک جذب یون‌های فلزی روی سطوح جاذب و یافتن مدلی به منظور برآورد میزان جذب با زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، سینتیک جذب کروم، مس و روی از مدل سینتیک شبه درجه دوم پیروی کرد. نتایج این پژوهش با مطالعات کاردیکیان و همکاران<sup>[28]</sup> روی جلبک‌های *آلو فاسیتا* و سارگاسوم در جذب زیستی مس، *آپیراتیکول* و *پاواسانت*<sup>[29]</sup> در جذب زیستی فلزات سنگین (روی) به وسیله جلبک سبز کالریا و ساری و تونز<sup>[23]</sup> در جذب زیستی کروم توسط جلبک قرمز مشابهت داشت که نشان داده‌اند سینتیک جذب فلزات سنگین مورد بررسی از مدل سینتیک شبه درجه دوم تبعیت می‌کند. به طور کلی نتایج این پژوهش بیانگر قابلیت بسیار بالای زیست‌توده جلبک اسپیروژیر در حذف فلزات سنگین کروم، مس و روی از محلول‌های آبی بود که خود یک ماده طبیعی و سازگار با محیط زیست است.

پژوهش حاضر محدودیتی نداشت. پیشنهاد می‌شود عملکرد این جاذب، مقابل سایر آلاینده‌های محیط زیست مورد مطالعه قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

جلبک اسپیروژیر، توانایی بالایی در حذف عناصر کروم، مس و روی از محیط‌های آبی دارد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از مسئولان محترم دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست و مسئول آزمایشگاه آلودگی دانشگاه بیرجند خانم غفوری و همچنین آقای دکتر حاجی مسئول آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد بیرجند برای فراهم کردن بخشی از مواد و وسایل و همچنین از زحماتی که برای انجام این مطالعه انجام داده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

**تعارض منافع:** موردی وجود نداشته است.

**سهم نویسندگان:** محمدحسین صیادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۵٪)؛ حسین شکری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۴۵٪)

**منابع مالی:** مقاله حاصل بخشی از طرح پژوهشی دانشگاه بیرجند با معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری بوده است.

شد. نتایج حاصل از تاثیر pH محلول نشان داد که کارایی حذف فلزات سنگین کروم، مس و روی، وابستگی زیادی به pH داشتند. در فرآیند جذب، وجود دو یون  $H^+$  و  $OH^-$  تعیین‌کننده بار سطحی است<sup>[17]</sup>. در pHهای مختلف، اتصال یون‌های فلزی به دیواره سلولی جلبک‌ها متغیر بوده، بنابراین کارایی فرآیند جذب برای عناصر کروم، مس و روی، کاهش را نشان داده است<sup>[18]</sup>. در این تحقیق بیشترین میزان جذب برای کروم در pH برابر با ۳ و برای عناصر مس و روی در pH برابر با ۵ به دست آمد. مطالعه آجایی و چوپا<sup>[3]</sup> با عنوان جذب زیستی مس و روی از محلول‌های آبی توسط جلبک سبز دریایی *چیتومورفا لینیوم* (*Chaetomorpha linum*) نشان داده که بالاترین راندمان حذف مس و روی در pH برابر با ۵ صورت گرفته است و نتایج این پژوهش با آن همخوانی داشت. نتایج پژوهش ستینکایا و همکاران<sup>[19]</sup> تحت عنوان بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های جذب زیستی فلزات سنگین در برخی جلبک‌ها نشان داده که بالاترین حذف کروم در pH برابر با ۳ اتفاق افتاده است که با نتایج این مطالعه مطابقت داشت.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در نمودارهای مربوط به زمان تماس و درصد حذف مشخص شد که در دقایق اول، میزان جذب به دلیل وجود محل‌های خالی روی سطح جاذب، بالا بوده، اما با گذشت زمان، این محل‌های خالی به وسیله یون‌های فلزی کروم، مس و روی اشغال شده و مقدار رشد جذب کاهش یافته است<sup>[20]</sup>. براساس نتایج، زمان بهینه به منظور جذب عناصر کروم، روی و مس برای جلبک اسپیروژیر به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۴۰ دقیقه بود، به طوری که در این زمان‌ها راندمان جذب به بیش از ۹۰٪ رسید. گوپتا و راستوگی<sup>[21]</sup> با استفاده از جلبک سبز ادوگانیم در حذف کروم شش‌ظرفیتی و لیبو و همکاران<sup>[12]</sup> با استفاده از زیست‌توده جلبک قهوه‌ای در حذف یون‌های کادمیوم، مس، نیکل و روی به نتایج مشابه با نتیجه این مرحله از این پژوهش دست یافته‌اند.

نتایج مرحله تاثیر مقدار جاذب بر میزان جذب یون‌های کروم، مس و روی نشان‌دهنده این بود که با افزایش مقدار جاذب، درصد حذف افزایش یافت تا جایی که با افزایش مقدار جاذب، راندمان حذف تقریباً ثابت ماند. دلیل این امر افزایش تعداد جایگاه‌های فعال در دسترس برای جذب یون است<sup>[22]</sup>. مقدار بهینه جاذب به منظور حذف یون‌های کروم و مس ۳ گرم در لیتر و برای روی ۲ گرم در لیتر در نظر گرفته شد که این مقادیر به ترتیب دارای راندمان حذف ۹۴/۱۲، ۸۹/۳۲ و ۹۶/۴۵ بودند. نتایج این پژوهش با مطالعه ساری و تونز<sup>[23]</sup> با استفاده از جلبک قرمز همخوانی داشت. همچنین در مطالعه فنگ و آلدریچ<sup>[11]</sup> روی جذب فلزات سنگین توسط جلبک خشک‌شده *اکلونیا ماکسیما*، با افزایش مقدار جاذب، کارایی حذف افزایش یافته است.

با افزایش غلظت اولیه کروم، مس و روی، میزان درصد حذف این فلزات سنگین کاهش یافت. این امر به علت محدودیت‌های مکان‌های جذب جاذب و اشباع شدن آنها در غلظت‌های بالای یون‌های فلزی بوده است<sup>[24]</sup>. در تحقیقات انجام‌شده روی جذب یون‌های فلزات سنگین توسط جلبک‌های مختلف، اغلب تاثیر غلظت اولیه فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است که در بیشتر موارد نتایج این پژوهش با نتایج این بررسی‌ها مطابقت داشت و نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین در محلول، راندمان حذف کاهش یافت. مطالعه رومر و همکاران<sup>[25]</sup> تحت عنوان بررسی مقایسه‌ای جذب زیستی فلزات سنگین با استفاده از جلبک‌های مختلف و مطالعات تران و همکاران<sup>[26]</sup> در حذف فلزات سنگین نتایج مشابه با پژوهش حاضر داشته است و نشان

- properties of solids and liquids part I solids. *J Am Chem Soc.* 1916;38(11):2221-95.
- 15- Freundlich HMF. Over the adsorption in solution. *J Phys Chem.* 1906;57:385-471.
- 16- Temkin MI, Pyzhev V. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst. *Acta Phys Chim. USSR.* 1940;12(1):217-22.
- 17- Lu J, Li Y, Yan X, Shi B, Wang D, Tang H. Sorption of atrazine onto humic acids (HAs) coated nanoparticles. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2009;347(1-3):90-6.
- 18- Tunali S, Akar T, Safa Özcan A, Kiran I, Özcan A. Equilibrium and kinetics of biosorption of lead (II) from aqueous solutions by *Cephalosporium aphidicola*. *Sep Purif Technol.* 2006;47(3):105-12.
- 19- Çetinkaya Dönmez G, Aksu Z, Öztürk A, Kutsal T. A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. *Process Biochem.* 1999;34(9):885-92.
- 20- Alowitz MJ, Scherer MM. Kinetics of nitrate, nitrite and Cr (VI) reduction by iron metal. *Environ Sci Technol.* 2002;36(3):299-306.
- 21- Gupta VK, Rastogi A. Biosorption of hexavalent chromium by raw and acid-treated green alga *Oedogonium hatei* from aqueous solutions. *J Hazard Mater.* 2009;163(1):396-402.
- 22- Chen S, Yue Q, Gao B, Xu X. Equilibrium and kinetic adsorption study of the adsorptive removal of Cr (VI) using modified wheat residue. *J Colloid Interface Sci.* 2010;349(1):256-64.
- 23- Sari A, Tuzen M. Biosorption of total chromium from aqueous solution by red algae (*Ceramium virgatum*): Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *J Hazard Mater.* 2008;160(2-3):349-55.
- 24- Jung Y, Choi J, Lee W. Spectroscopic investigation of magnetite surface for the reduction of hexavalent chromium. *Chemosphere.* 2007;68(10):1968-75.
- 25- Romera E, González F, Ballester A, Blázquez ML, Muñoz JA. Comparative study of biosorption of heavy metals using different types of algae. *Bioresour Technol.* 2007;98(17):3344-53.
- 26- Tran HT, Vu ND, Matsukawa M, Okajima M, Kaneko T, Ohki K, et al. Heavy metal biosorption from aqueous solutions by algae inhabiting rice paddies in Vietnam. *J Environ Chem Eng.* 2016;4(2):2529-35.
- 27- Sheng PX, Ting YP, Chen JP, Hong L. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: Characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *J Colloid Interface Sci.* 2004;275(1):131-41.
- 28- Karthikeyan S, Balasubramanian R, Iyer CS. Evaluation of the marine algae *Ulva fasciata* and *Sargassum* sp. for the biosorption of Cu (II) from aqueous solutions. *Bioresour Technol.* 2007;98(2):452-5.
- 29- Apiratikul R, Pavasant P. Batch and column studies of biosorption of heavy metals by *Caulerpa lentillifera*. *Bioresour Technol.* 2008;99(8):2766-77
- 1- Gupta VK, Rastogi A. Equilibrium and kinetic modelling of cadmium (II) biosorption by nonliving algal biomass *Oedogonium* sp. from aqueous phase. *J Hazard Mater.* 2008;153(1-2):759-66.
- 2- Fagundes-Klen MR, Veit MT, Borba CE, Bergamasco R, De Lima Vaz, LG, Da Silva EA. Copper biosorption by biomass of marine alga: Study of equilibrium and kinetics in batch system and adsorption/desorption cycles in fixed bed column. *Water Air Soil Pollut.* 2010;213(1-4):15-26.
- 3- Ajjabi LC, Chouba L. Biosorption of Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> from aqueous solutions by dried marine green macroalga *Chaetomorpha linum*. *J Environ Manag.* 2009;90(11):3485-9.
- 4- Li H, Bi Sh, Liu L, Dong W, Wang X. Separation and accumulation of Cu (II), Zn (II) and Cr (VI) from aqueous solution by magnetic chitosan modified with diethylenetriamine. *Desalination.* 2011;278(1-3):397-404.
- 5- Pan R, Cao L, Zhang R. Combined effects of Cu, Cd, Pb, and Zn on the growth and uptake of consortium of Cu-resistant *Penicillium* sp. A1 and Cd-resistant *Fusarium* sp. A19. *J Hazard Mater.* 2009;171(1-3):761-6.
- 6- Şahan T, Ceylan H, Şahiner N, Aktaş N. Optimization of removal conditions of copper ions from aqueous solutions by *Trametes versicolor*. *Bioresour Technol.* 2010;101(12):4520-6.
- 7- Ahluwalia SS, Goyal D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresour Technol.* 2007;98(12):2243-57.
- 8- Xuejiang W, Ling C, Siqing X, Jianfu Z, Chovelon JM, Renault NJ. Biosorption of Cu (II) and Pb (II) from aqueous solutions by dried activated sludge. *Miner Eng.* 2006;19(9):968-71.
- 9- Klimmek S, Stan HJ, Wilke A, Bunke G, Buchholz R. Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel and zinc by algae. *Environ Sci Technol.* 2001;35(21):4283-8.
- 10- Rajfur M, Klos A, Waclawek M. Algae utilization in assessment of the large Turawa Lake (Poland) pollution with heavy metals. *J Environ Sci Health Part A.* 2011;46(12):1401-8.
- 11- Feng D, Aldrich C. Adsorption of heavy metals by biomaterials derived from the marine alga *Ecklonia maxima*. *Hydrometallurgy.* 2004;73(1-2):1-10.
- 12- Liu Y, Cao Q, Luo F, Chen J. Biosorption of Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> ions from aqueous solutions by pretreated biomass of brown algae. *J Hazard Mater.* 2009;163(2-3):931-8.
- 13- Lee YC, Chang SP. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresour Technol.* 2011;102(9):5297-304.
- 14- Langmuir I. The constitution and fundamental