

# جذب زیستی فلزات سنگین کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی با استفاده از جلبک اسپروژیر

محمد حسین صیادی<sup>۱\*</sup> و حسین شکری<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند

(Hosseinshekari93@gmail.com)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷

## چکیده

هدف از انجام این پژوهش بکارگیری جلبک اسپروژیر و بررسی عملکرد آن در جهت حذف فلزات سنگین کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی است. در این پژوهش طرح آزمایش به صورت عاملی در زمان در نظر گرفته شد. تأثیر pH، زمان تماس، مقدار جاذب و غلظت اولیه کادمیوم و سرب بر میزان جذب بررسی و مقادیر بهینه این پارامترها تعیین شد. نتایج نشان داد که ۳ گرم در لیتر جلبک اسپروژیر می‌تواند ۸۳/۵ درصد کادمیوم را در مدت زمان ۳۰ دقیقه با غلظت اولیه ۲ میلی‌گرم در لیتر در pH=۶ حذف کند؛ همچنین این جلبک با مقدار ۴ گرم در لیتر توانایی حذف ۷۵/۸۴ درصد سرب را در pH=۵، با غلظت اولیه ۲ میلی‌گرم در لیتر طی مدت زمان ۴۰ دقیقه را دارد. بررسی روابط ایزوترمی و سینتیکی نشان داد که فرآیند جذب کادمیوم و سرب توسط جلبک اسپروژیر از مدل فروندلیچ با مقادیر ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۹۹۱۴ و ۰/۹۸۱۶ و مدل سینتیکی شبه درجه دوم به ترتیب با مقادیر ضرایب همبستگی ۰/۹۹۱۳ و ۰/۹۸۷۲ تبعیت می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که جلبک اسپروژیر می‌تواند به عنوان جاذب مؤثر و دوستدار محیط‌زیست در حذف عناصر کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی استفاده شود.

## کلیدواژه

ایزوترم‌های جذب، جلبک اسپروژیر، کادمیوم، سرب، محیط‌های آبی.

## ۱. سرآغاز

کادمیوم از جمله فلزات سنگینی است که به وسیله منابع مختلف به محیط‌زیست، گیاهان و در نهایت زنجیره غذایی انسان‌ها و حیوان‌ها راه یافته و منجر به خسارت‌های جدی می‌شود. عنصر کادمیوم به طور گسترده از پساب صنایعی از قبیل صنایع آبکاری فلزات، کود فسفاته، استخراج معادن، رنگ‌ها، صنایع باتری سازی (باتری‌های کادمیوم-نیکل)، صنایع آلیاژی و فولاد وارد چرخه محیط‌زیست می‌شود (Mobasherpour et al., 2011; Sayadi et al., 2015). کادمیوم به سادگی به وسیله ریه و دستگاه گوارش

فلزات سنگین در نتیجه رشد روزافزون صنعت وارد محیط‌زیست شده‌اند. سمیت زیاد فلزات سنگین حتی در غلظت‌های کم نیز منجر به ایجاد نگرانی‌های جهانی شده است (Sayadi et al., 2017). اکثر فلزات سنگین از طریق دخالت در واکنش‌های بیولوژیک سلول‌های موجودات زنده باعث اختلال در فعالیت‌های متابولیکی می‌شوند، برای مثال فلزات سنگینی نظیر سرب، کادمیوم، جیوه، کروم، مس و نیکل را می‌توان نام برد (Cheremisinoff, 2002).

جذب زیستی فلزات سنگین به وسیلهٔ ماکرو جلبک کلرپا لنتیلیفرا را بررسی و بیان کردند که این ماکرو جلبک توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین را دارد. نتایج پژوهش Edris و همکاران (۲۰۱۴) با عنوان جذب زیستی کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی توسط جلبک کلرلا ولگاریس کارایی بالای این جلبک را در حذف آلاینده‌ها نشان داد.

در این تحقیق از پودر زیست توده جلبک اسپروژیر که به‌طور فراوان در قنات‌ها و استخرهای آب شیرین یافت می‌شود به‌عنوان مادهٔ جاذب استفاده شد. هدف از انجام این مطالعه ارزیابی پتانسیل جلبک اسپروژیر در حذف فلزات سنگین کادمیوم و سرب با تکیه بر فاکتورهای pH، زمان تماس، غلظت آلاینده و مقدار جاذب است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. آماده‌سازی جلبک اسپروژیر

زیست توده تازه از قنات‌های شهرستان بیرجند جمع‌آوری شد. سپس با آب مقطر شسته و برای کاهش مقدار آب آن و حذف خاک توسط کاغذ صافی فیلتر شد. زیست توده بعد از این به مدت ۴ روز در معرض نور خورشید قرار گرفت و به‌دنبال آن به وسیلهٔ آن در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. در نهایت زیست توده الک شد تا ذرات با اندازهٔ بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میکرون جداسازی شود (Lee and Chang, 2011).

### ۲.۲. آزمایش‌های جذب کادمیوم و سرب

در این پژوهش، طرح آزمایش به‌صورت عاملی در زمان در نظر گرفته شد. نخست محلول‌های استوک کادمیوم و سرب (۱۰۰۰ میلی‌گرم گرم در لیتر) با استفاده از حل کردن نیترات کادمیوم و نیترات سرب در آب بدون یون تهیه شد. سپس محلول‌های استاندارد به‌منظور انجام آزمایش‌ها با استفاده از رقیق‌کردن محلول استوک تهیه شد.

نخست به‌منظور تعیین pH بهینه، در ۶ ارلن مایر مقدار

انسان جذب می‌شود و در بدن انسان تجمع یافته، باعث از کار افتادن کلیه، انقباضات ماهیچه‌ای و حالت تهوع می‌شود؛ همچنین به بیماری‌هایی نظیر سرطان ریه و پروستات، کم‌خونی و برونشیت ناشی از آن می‌توان اشاره کرد. دفع کادمیوم خیلی کند صورت می‌گیرد و نیمهٔ عمر بیولوژیکی این عنصر در بدن انسان بین ۱۰ تا ۳۰ است (Gupta and Nayak, 2012). در میان یون‌های فلزی مختلف موجود در فاضلاب‌ها سرب یکی از متداول‌ترین فلزات است. این عنصر سمی و کشنده به‌طور عمده در استخوان‌ها، مغز، کلیه و ماهیچه‌ها جمع می‌شود. صدمه به اندام‌هایی نظیر کبد، کلیه و قلب، اختلال‌های یادگیری و رفتاری در کودکان و اختلال در سیستم ایمنی از دیگر آثار مخرب فلز سنگین سرب است (Sayadi and Torabi, 2009). روش‌های مختلفی از قبیل فیلتراسیون، تصفیهٔ الکتروشیمیایی، اکسیداسیون، اسمز معکوس، انعقادسازی و تبادل یونی برای حذف و جداسازی یون‌های فلزات سنگین از محیط‌های آبی استفاده می‌شوند. اغلب این روش‌ها دارای معایب و محدودیت‌هایی نظیر زمان‌بر بودن، کارایی کم، هزینه‌های بالای عملیاتی و تولید آلاینده‌های ثانویه است. (Sajadi et al., 2016; Arsiya et al., 2017). حذف زیستی فلزات سنگین از محیط‌ها و منابع آبی راهکاری مؤثر و سازگار با محیط‌زیست است؛ از دلایل این امر می‌توان به کارایی و راندمان بالا حذف، هزینه پایین فرایند و امکان تولید مقادیر زیاد جاذب اشاره کرد (Flouty and Estephane, 2012). فرایند حذف بیولوژیکی آلاینده‌ها به‌وسیلهٔ موجوداتی نظیر باکتری‌ها، قارچ‌ها، تک سلولی‌ها و جلبک‌ها صورت می‌گیرد (Iyer et al., 2005). اما به‌علت وجود ترکیبات پلی ساکاریدی در دیوارهٔ سلولی جلبک‌ها و فراوانی آن‌ها در اکوسیستم‌های مختلف، این موجودات از قابلیت بالاتری در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی برخوردارند؛ این امر سبب شده که به استفاده از جلبک‌ها در فرایند جذب زیستی بیشتر توجه شود (Rajfur et al., 2011). Apiratikul و Pavasant (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای

موجود در محلول بر حسب میلی گرم در لیتر،  $C_e$  غلظت تعادلی یون‌های فلزی در محلول بر حسب میلی گرم در لیتر،  $V$  حجم محلول بر حسب لیتر و  $m$  وزن جاذب بر حسب گرم است. و به منظور محاسبه درصد حذف کادمیوم و سرب (%R) از معادله (۲) استفاده شد.

$$\%R = \left[ \frac{C_i - C_e}{C_i} \right] \times 100 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در این رابطه  $C_i$  غلظت اولیه فلز و  $C_e$  غلظت تعادلی یون‌های فلزی است.

### ۳.۲. ایزوترم‌های جذب

امروزه برای بررسی جذب سطحی و توصیف رفتار جاذب، معادله‌ها و ایزوترم‌های مختلفی توسعه پیدا کرده است. در این پژوهش ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین استفاده شدند.

معادله خطی لانگمویر به صورت معادله (۳) بیان می‌شود.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در این معادله،  $C_e$  غلظت تعادلی فلز در محلول بر حسب میلی گرم در لیتر،  $q_e$  مقدار فلز جذب شده به ازای واحد وزن جاذب بر حسب میلی گرم بر گرم،  $k_L$  و  $q_m$  ثابت‌های ایزوترم لانگمویر هستند.

معادله خطی ایزوترم جذب فروندلیچ به صورت معادله (۴) است.

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_F + \frac{1}{n} \text{Log } C_e \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن  $K_F$  و  $n$  ثابت‌های فروندلیچ،  $C_e$  غلظت ماده جذب شونده در فاز مایع پس از رسیدن به حالت تعادل بر حسب میلی گرم بر لیتر و  $q_e$  مقدار ماده جذب شده در واحد جرم جاذب بر حسب میلی گرم بر گرم است.

ایزوترم تمکین به صورت معادله خطی زیر بیان می‌شود.

$$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e \quad \text{معادله (۵)}$$

$K_T$  و  $B_T$  ثابت‌های این ایزوترم هستند که با استفاده از نمودار  $q_e$  بر حسب  $\ln C_e$  می‌توان مقادیر آن‌ها را به ترتیب با عرض از مبدأ و شیب نمودار تعیین کرد.

۵۰ میلی لیتر از محلول کادمیوم با غلظت اولیه ۳ میلی گرم در لیتر و در ۶ ارلن دیگر مقدار ۵۰ میلی لیتر از محلول‌های حاوی سرب با غلظت اولیه ۳ میلی گرم در لیتر ریخته و با استفاده از محلول‌های ۰/۱ نرمال  $\text{NaOH}$  و  $\text{HNO}_3$  در pHهای ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ تنظیم شد، سپس به هر کدام مقدار ۳ گرم در لیتر جاذب اضافه شد. محلول‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه روی دستگاه شیکر قرار گرفت و از کاغذ واتمن عبور داده شد و در نهایت غلظت سنجی این محلول‌ها توسط دستگاه جذب اتمی صورت گرفت.

برای بررسی زمان تماس بهینه، ۳ گرم در لیتر از جاذب مورد مطالعه برداشته و در ۵۰ میلی لیتر از محلول‌های کادمیوم و سرب ۳ میلی گرم در لیتر تحت شرایط pH بهینه در مدت زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه مخلوط شد و مقادیر جذب یون‌های کادمیوم و سرب به وسیله جاذب طی این زمان‌ها توسط دستگاه جذب اتمی سنجیده شد.

برای مشخص کردن مقدار بهینه جاذب، مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ گرم در لیتر به ۵۰ میلی لیتر از محلول‌های کادمیوم و سرب ۳ میلی گرم در لیتر اضافه شد. این مرحله در pH و زمان تماس بهینه صورت گرفت. در پایان پس از فیلتر شدن و جداسازی فاز جامد اندازه‌گیری میزان جذب به وسیله دستگاه جذب اتمی انجام شد.

به منظور تعیین غلظت بهینه یون‌های کادمیوم و سرب، محلول‌های ۵۰ میلی لیتری با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۳ و ۵ میلی گرم در لیتر از کادمیوم و سرب آماده و آزمایش‌ها تحت شرایط pH، زمان و مقدار جاذب بهینه انجام شد. غلظت فلزات باقیمانده در محلول‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

با استفاده از معادله (۱) ظرفیت تعادلی جاذب محاسبه شد.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \text{معادله (۱)}$$

که در این رابطه  $q_e$  مقدار یون‌های فلزی جذب شده به ازای واحد جرم جاذب،  $C_0$  غلظت اولیه یون‌های فلزی

## ۴.۲. سینتیک جذب

سینتیک جذب به منظور تعیین مکانیسم کنترل فرایندهای جذب سطحی استفاده می‌شود.

معادله‌های سینتیک شبه درجه یک و دو به ترتیب بر اساس معادله‌های ۶ و ۷ بیان می‌شوند.

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - \frac{K_1}{2.303} t \quad (۶)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (۷)$$

که در این معادله‌ها،  $q_e$  برابر مقدار املاح جذب شده در حالت تعادل  $q_t$  (mg/g)، مقدار املاح جذب شده در زمان  $t$  (mg/g) و  $k_1$  و  $k_2$  ثابت‌های سرعت تعادلی سینتیک درجه اول و دوم هستند.

## ۳. نتایج و بحث

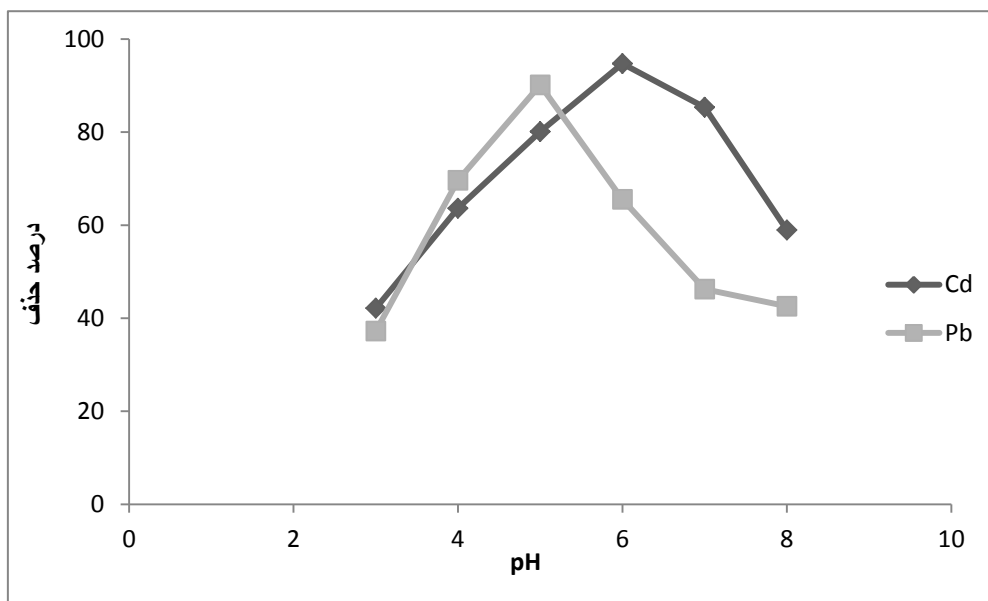
### ۳.۱. تأثیر pH محلول بر میزان جذب یون‌های

#### کادمیوم و سرب

نتایج مربوط به تأثیر pH محلول بر میزان جذب یون‌های کادمیوم و سرب در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداقل راندمان جذب کادمیوم و سرب به ترتیب برابر با ۴۲/۱۵ و ۳۷/۱۵ درصد بوده که در pH=۳ اتفاق افتاده است. با افزایش میزان pH روند جذب کادمیوم و سرب حالت صعودی پیدا می‌کند و سپس در pH‌های

بالتر از ۶ و ۵ کارایی فرایند جذب کادمیوم و سرب به ترتیب کاهش می‌یابد، لذا pH=۶ برای کادمیوم و pH=۵ برای سرب به عنوان pH بهینه مشخص شد.

یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در فرایند جذب، pH است. اتصال یون‌های فلزی به دیواره سلولی جلبک‌ها، در pH‌های مختلف متغیر بوده و راندمان جذب برای فلزات سنگین در pH‌های پایین و بالا کاهش می‌یابد (Tunali et al., 2006). رقابت بین کاتیون و پروتون برای اشغال محل‌های اتصال بیان می‌دارد که در pH پایین جذب فلزات سنگینی نظیر کادمیوم، مس، نیکل و کبالت کاهش می‌یابد (Deng & Wang, 2012). در این پژوهش بیشترین جذب در دو دامنه pH، ۶ و ۷ مشاهده شد و کاهش میزان جذب در pH‌های بالا به علت تشکیل رسوب هیدروکسید کادمیوم است (Ghasemi et al., 2011). نتایج تحقیق Prasad و Meitei (۲۰۱۳) با عنوان جذب زیستی سرب و کادمیوم بر زیست توده اسپیرودلا پولیبریزا نشان دادند بالاترین راندمان حذف سرب و کادمیوم در pH=۴ صورت گرفته است. بررسی Sulaymon و همکاران (۲۰۱۴) با عنوان جذب زیستی فلزات سنگین نشان می‌دهد که با افزایش pH از ۳ به ۵، میزان حذف فلز افزایش می‌یابد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد.

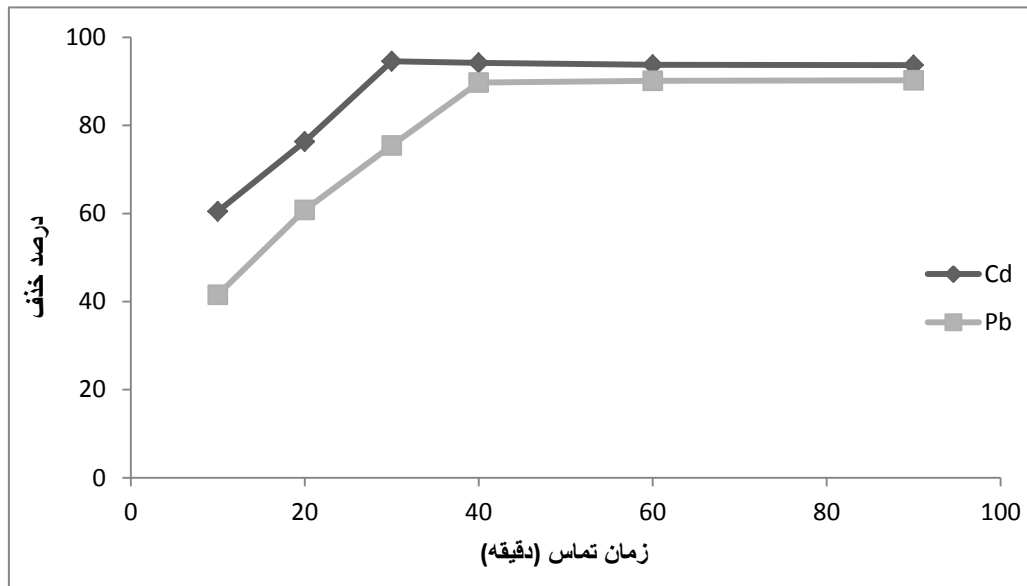


شکل ۱. تأثیر pH محلول بر میزان جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب

بیشترین میزان جذب در زمان‌های اولیه صورت گرفته است که این امر نشان دهنده سرعت و توانایی بالای جاذب در حذف یون‌های کادمیوم و سرب است.

### ۲.۳. تأثیر زمان تماس بر میزان جذب یون‌های کادمیوم و سرب

شکل ۲، تأثیر زمان تماس بر راندمان حذف کادمیوم و سرب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است،



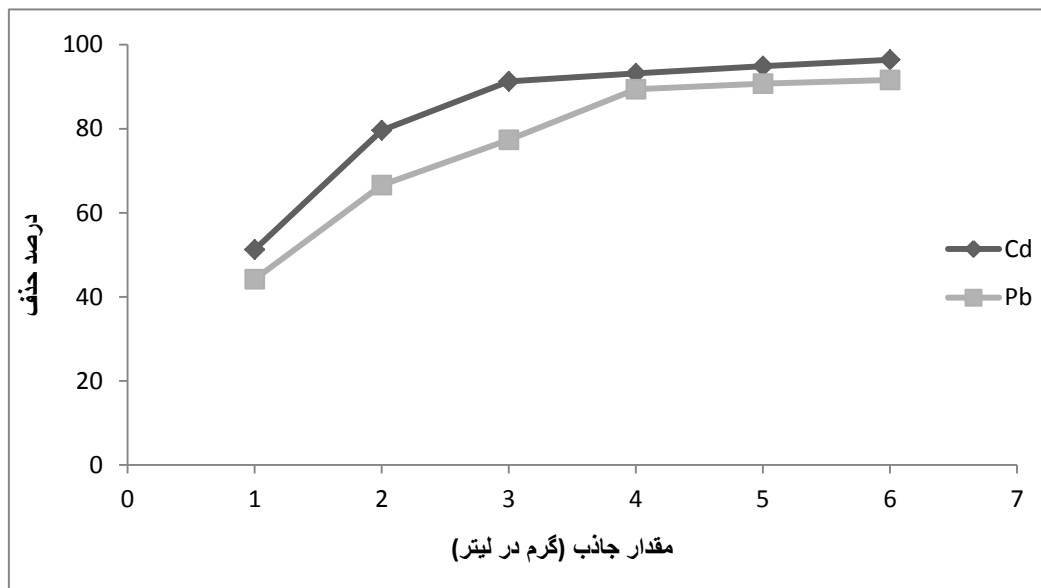
شکل ۲. تأثیر زمان تماس بر میزان جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب

بیشترین میزان حذف تا ۳۰ دقیقه اتفاق افتاده است و بعد از آن جذب محسوسی صورت نگرفته است.

### ۳.۳. تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب یون‌های کادمیوم و سرب

نتایج حاصل از تأثیر مقادیر مختلف جاذب در شکل ۳ نشان داده می‌شود. بر طبق این نتایج با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب یون‌های کادمیوم و سرب افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش جاذب، تعداد مکان‌های جذب قابل دسترس افزایش می‌یابد. اما این روند تا حد مشخصی از جاذب در برابر غلظت معینی از کادمیوم و سرب ادامه می‌یابد و پس از آن با افزایش مقدار جاذب تغییر محسوسی در میزان جذب مشاهده نمی‌شود.

طبق نتایج بیشترین راندمان حذف در مدت زمان تماس ۳۰ دقیقه برای کادمیوم و ۴۰ دقیقه برای سرب بدست آمد. میزان جذب بالاتر در زمان‌های اولیه به دلیل وجود محل‌های فعال زیاد و خالی در سطح جاذب مد نظر است که با گذشت زمان این محل‌های خالی توسط یون‌های کادمیوم و سرب اشغال شده و منجر به کاهش ظرفیت جذب می‌شود (Yazdanbakhsh et al., 2011). نتایج حاصله از پژوهش Edris و همکاران (۲۰۱۴) با عنوان جذب زیستی کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی به وسیله زیست توده جلبک کلرلاولگاریس بیان می‌کند که سرعت واکنش در ابتدا سریع و ۹۰ درصد کادمیوم و سرب در ۲۰ دقیقه اول جذب شد و روند جذب پس از گذشت ۵۰ دقیقه به حالت تعادل می‌رسد. مطالعه Tran و همکاران (۲۰۱۶) با عنوان جذب زیستی فلزات سنگین از محلول‌های آبی توسط جلبک در مزارع برنج نشان داد که



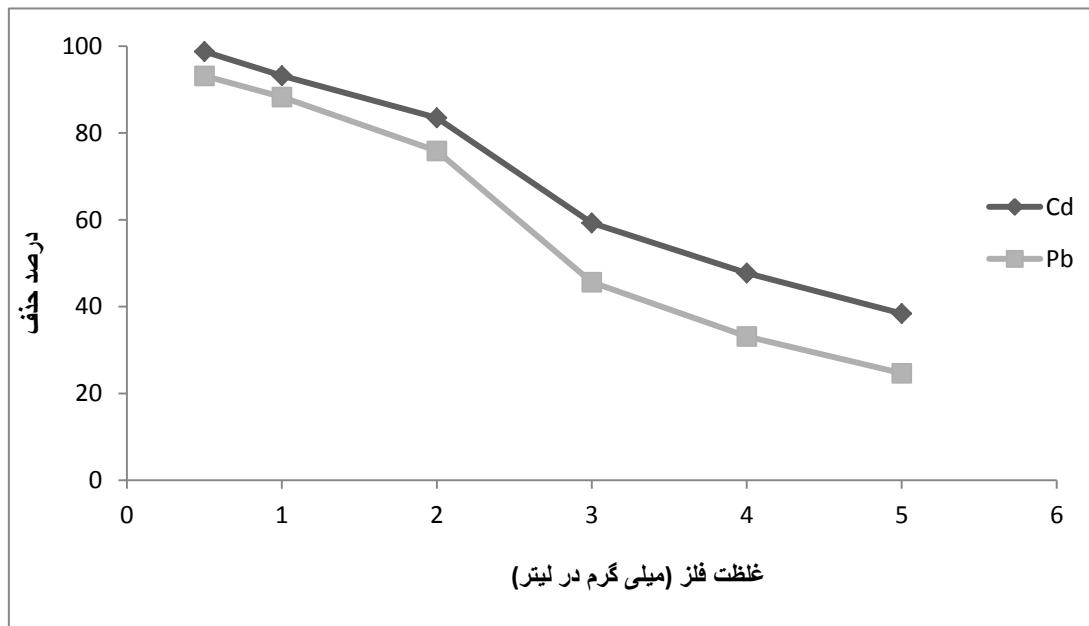
شکل ۳. تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب

جذب در سطح جاذب است (Ozer and Ozer, 2004). در مطالعه حاضر با افزایش غلظت اولیه کادمیوم و سرب راندمان حذف این فلزات سنگین کاهش می‌یابد. در واقع نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که کارایی حذف کادمیوم و سرب با غلظت اولیه آن رابطه عکس دارد؛ دلیل این امر آن است که جاذب‌ها دارای تعداد محل‌های فعال محدودی هستند که در غلظت‌های بالا اشباع می‌شود، لذا با کاهش غلظت اولیه کادمیوم و سرب مقدار یون‌های فلزی موجود در محلول کاهش می‌یابد در نتیجه جاذب درصد بالایی از یون‌ها را جذب می‌کند (Shekari et al., 2017). نتایج این پژوهش با نتایج Mirghaffari و همکاران (۲۰۱۵) با عنوان جذب زیستی کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی بوسیله زیست توده میکرو جلبک سبز همخوانی دارد. Sulaymon و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای با عنوان جذب زیستی رقابتی سرب، کادمیوم، مس و آرسنیک با استفاده از جلبک نشان دادند با افزایش غلظت اولیه فلز سنگین، راندمان حذف کاهش می‌یابد.

در این تحقیق با افزایش مقدار جاذب، از ۱ به ۶ گرم در لیتر میزان راندمان حذف افزایش می‌یابد. این روند افزایشی حذف کادمیوم و سرب به دلیل افزایش تعداد مکان‌های فعال در دسترس جذب است (Deng et al., 2001). مطالعه Hackbarth و همکاران (۲۰۱۴) با عنوان جلبک دریایی پلوتیا کانالیکولاتا به عنوان مبدل کاتیون طبیعی برای جداسازی یون‌های کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی نشان داد راندمان حذف با افزایش مقدار جاذب افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از مطالعات Esposito و همکاران (۲۰۰۱) با این پژوهش مطابقت داشته و نشان می‌دهد که افزایش مقدار جاذب باعث افزایش کارایی حذف می‌شود.

### ۳.۴. تأثیر غلظت اولیه کادمیوم و سرب بر میزان جذب

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت یون‌های کادمیوم و سرب راندمان حذف کاهش می‌یابد. به طوری که در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر به کمترین میزان خود می‌رسد. دلیل این امر بخاطر کاهش مکان‌های فعال

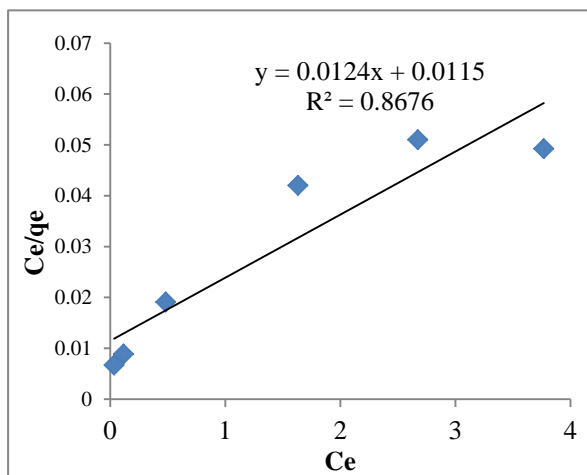


شکل ۴. تأثیر غلظت اولیه کادمیوم و سرب بر میزان جذب آن‌ها

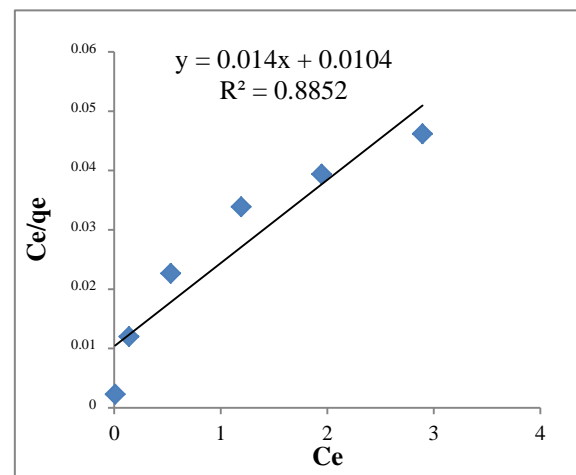
زمان تماس بهینه با غلظت‌های اولیه متفاوت از کادمیوم و سرب صورت گرفت. ضرایب ثابت و ضرایب همبستگی ایزوترم‌های جذب در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۵.۳. تعیین مدل ایزوترم جذب

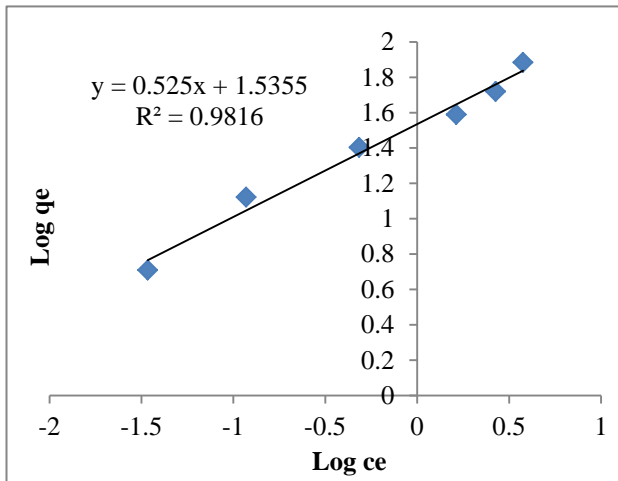
در این مطالعه ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین استفاده شدند. آزمایش‌های لازم به‌منظور بررسی ایزوترم‌های جذب با ایجاد شرایط پایه pH، میزان جاذب و



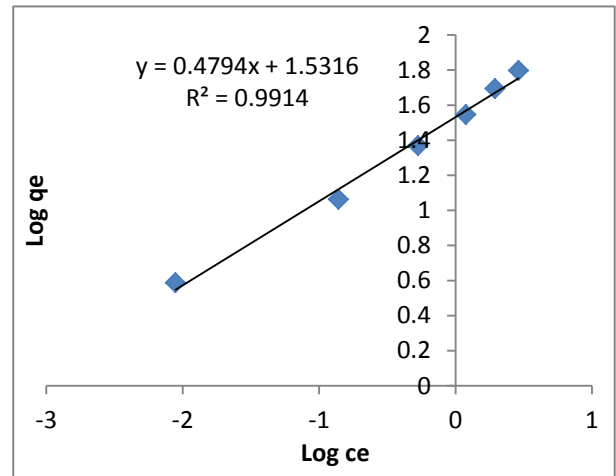
شکل ۶. ایزوترم لانگمویر برای جذب سرب توسط جلبک اسپیروژیر



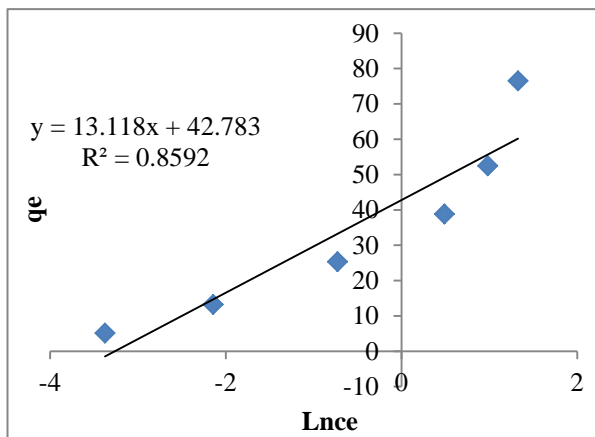
شکل ۵. ایزوترم لانگمویر برای جذب کادمیوم توسط جلبک اسپیروژیر



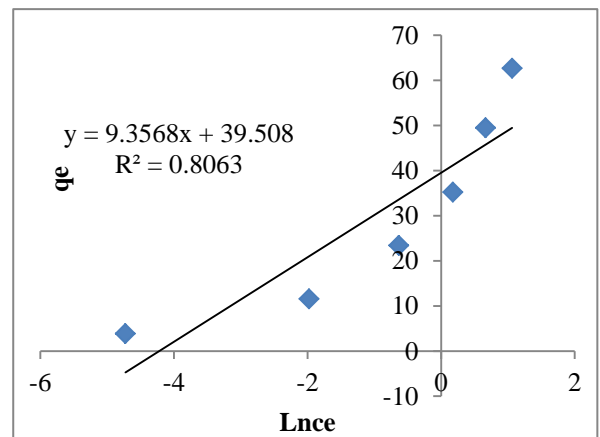
شکل ۸. ایزوترم فروندلیچ برای جذب سرب توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۷. ایزوترم فروندلیچ برای جذب کادمیوم توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۱۰. ایزوترم تمکین برای جذب سرب توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۹. ایزوترم تمکین برای جذب کادمیوم توسط جلبک اسپروژیر

جدول ۱. ثابت‌های جذب و ضرایب همبستگی مدل‌های ایزوترمی جذب

تمکین			فروندلیچ			لانگمویر			فلز سنگین
$K_T$	$B_T$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$	$K_L$	$q_m$	$R^2$	
۶۸/۱۹	۹/۳۵	۰/۸۰۶۳	۳۴/۰۰۹	۲/۰۸	۰/۹۹۱۴	۱/۳	۷۱/۴۲	۰/۸۸۵۲	کادمیوم
۲۶/۰۸	۱۳/۱۱۸	۰/۸۵۹۲	۳۴/۳۱	۱/۹	۰/۹۸۱۶	۱/۰۷	۸۰/۶۴	۰/۸۶۷۶	سرب

بالاترین ضریب همبستگی است که مقدار ضرایب به ترتیب ۰/۹۹۱۴ و ۰/۹۸۱۶ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های تعادلی فرآیند جذب عناصر کادمیوم و سرب توسط جلبک اسپروژیر از مدل فروندلیچ بهتر پیروی می‌کند. پژوهش Montzer-Rahmati و همکاران

نتایج آزمون‌های مدل‌های ایزوترمی جذب لانگمویر، فروندلیچ و تمکین که در شکل‌های ۵ الی ۱۰ نشان داده شده است بیان می‌کند که ضرایب همبستگی بالایی برای تمامی ایزوترم‌های مطالعه شده وجود دارد؛ اما بر طبق داده‌ها، مدل فروندلیچ برای کادمیوم و سرب دارای

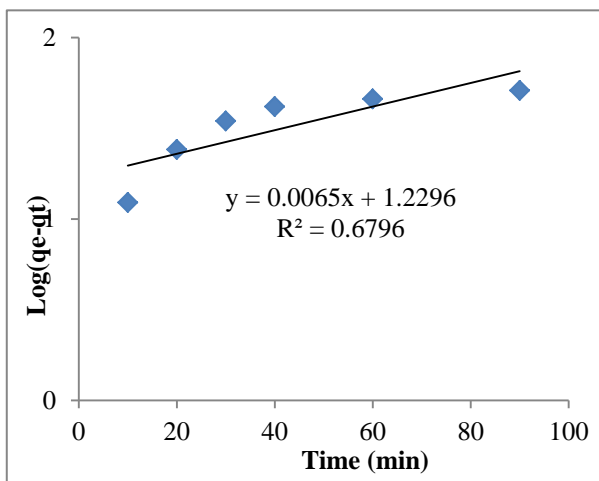


کادمیوم و سرب از مدل فروندلیچ بهتر پیروی می‌کند؛ مقادیر ضرایب مدل فروندلیچ برای کادمیوم و سرب به ترتیب ۰/۹۹۱ و ۰/۹۷۹۸ است.

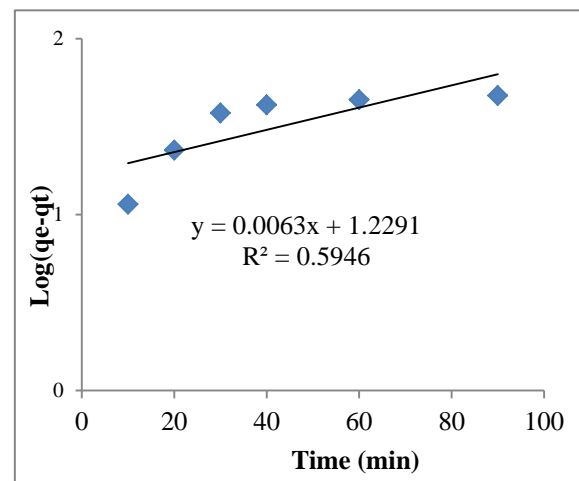
### ۳.۶. سینتیک جذب

به منظور بررسی سینتیک جذب کادمیوم و سرب از دو مدل سینتیکی شامل مدل‌های سینتیکی شبه درجه اول و شبه درجه دوم که نتایج آن در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است، استفاده شد. ضرایب مربوط به مدل‌های سینتیک شبه درجه یک و دو در جدول شماره ۲ قابل مشاهده است.

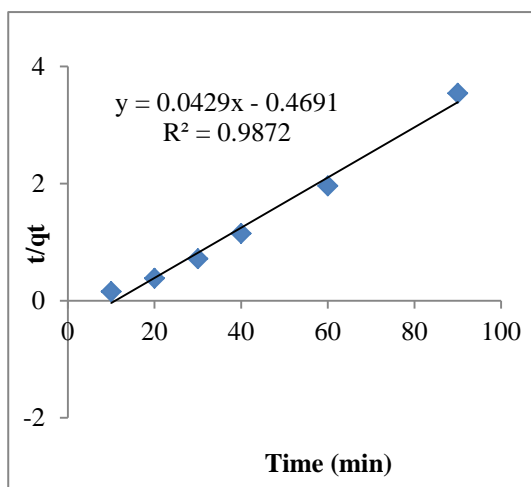
(۲۰۱۱) با عنوان مطالعه سینتیکی و تعادلی درباره جذب زیستی یون‌های کادمیوم، سرب و نیکل از محلول‌های آبی توسط جلبک قهوه‌ای سالم و اصلاح شده که در آن مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوپینین-راشکوچ بررسی شد، نشان داد که جذب کادمیوم و سرب از مدل فروندلیچ بهتر تبعیت می‌کند و مقادیر ضرایب همبستگی برای کادمیوم و سرب ۰/۹۹ بیان شده است. همچنین نتایج مطالعه Addel-Aty و همکاران (۲۰۱۳) با عنوان جذب زیستی کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی به وسیله زیست توده جلبک آناپنا اسفیریکا آب شیرین بیان می‌کند که داده‌های جذب



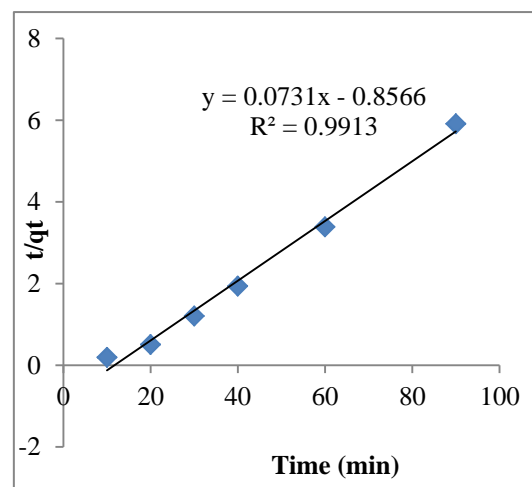
شکل ۱۲. سینتیک درجه اول برای جذب سرب توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۱۱. سینتیک درجه اول برای جذب کادمیوم توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۱۴. سینتیک درجه دوم برای جذب سرب توسط جلبک اسپروژیر



شکل ۱۳. سینتیک درجه دوم برای جذب کادمیوم توسط جلبک اسپروژیر

جدول ۲. ضرایب مدل‌های سینتیک جذب

سینتیک شبه درجه دوم			سینتیک شبه درجه اول			فلز سنگین
$K_2$	$q_e$	$R^2$	$K_1$	$q_e$	$R^2$	
۰/۰۰۶	۱۳/۶۷	۰/۹۹۱۳	۰/۰۱۴	۱۶/۹۴	۰/۵۹۴۶	کادمیوم
۰/۰۰۳	۲۳/۳۱	۰/۹۸۷۲	۰/۰۱	۱۶/۹۶	۰/۶۷۹۶	سرب

دقیقه با غلظت اولیه ۲ میلی‌گرم در لیتر و مقدار جاذب ۴ گرم در لیتر رخ می‌دهد. مقایسه مدل‌های ایزوترمی لانگمویر، فروندلیچ و تمکین نشان دادند که فرایند جذب کادمیوم و سرب از مدل فروندلیچ بهتر پیروی می‌کند. همچنین نتایج بدست آمده از مطالعات سینتیک نشان داد که حذف کادمیوم و سرب از مدل سینتیک شبه درجه دوم تبعیت می‌کند. در مجموع نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند که جلبک اسپروژیرکاری و توانایی بالایی در حذف عناصر سنگین کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی را دارد.

#### تشکر و قدردانی

مقاله حاصل بخشی از طرح پژوهشی دانشگاه بیرجند با معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری است. نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین محترم دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست و مسئول آزمایشگاه آلودگی دانشگاه بیرجند سرکار خانم غفوری و همچنین جناب 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 کنند.

سینتیک جذب در این پژوهش به خوبی از مدل شبه درجه دوم پیروی می‌کند به طوری که مقدار ضرایب همبستگی آن به ترتیب برای کادمیوم و سرب ۰/۹۹۱ و ۰/۹۸۷ است. نتایج پژوهش *Pavasant* و *Apiratikul* (۲۰۰۸) با عنوان مطالعه ستونی و ناپیوسته جذب زیستی فلزات سنگین توسط ماکرو جلبک کلریا لنتیلیفرا نشان داد که حذف کادمیوم و سرب از مدل سینتیک شبه درجه دوم پیروی می‌کند و مقادیر ضریب همبستگی به ترتیب ۱/۰۰ و ۰/۹۹۹ بیان شده است. همچنین مطالعه *Sulaymon* و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که سینتیک جذب کادمیوم و سرب از مدل شبه درجه دوم پیروی می‌کند و مقدار ضرایب همبستگی سینتیک شبه درجه دو کادمیوم و سرب به ترتیب ۰/۹۹۸ و ۰/۹۹۹ است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه پارامترهای مؤثر بر میزان جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب از محلول‌های آبی به وسیله جلبک اسپروژیر بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان دادند که در شرایط بهینه بالاترین راندمان حذف کادمیوم (۸۳/۵٪) در pH برابر با ۶، با غلظت اولیه ۲ میلی‌گرم در لیتر و مقدار جاذب ۳ گرم در لیتر در مدت ۳۰ دقیقه و بالاترین راندمان حذف سرب (۷۵/۸۴٪) در pH برابر با ۵ در مدت زمان ۴۰

#### منابع

- Abdel-Aty, A.M., Ammar, N.S., Abdel Ghafar, H.H. and Ali, R.K. 2013. Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass. *J. Advanced Research* 4: 367-374.
- Apiratikul, R. and Pavasant, P. 2008. Batch and column studies of biosorption of heavy metals by *Caulerpalentillifera*. *Bioresource Technology* 99: 2766-2777.
- Arsiya, F., Sayadi, M.H. and Sobhani, S., 2017. Green synthesis of palladium nanoparticles using *Chlorella vulgaris*. *Materials Letters* 186: 113-115.

- Cheremisinoff, N.P. 2002. Handbook of water and wastewater treatment technologies. Butterworth-Heinemann, Technology & Engineering.
- Deng, H., Lu, J., Li, G., Zhang, G. and Wang, X. 2001. Adsorption of methylene blue on adsorbent materials produced from cotton stalk. *Chemical Engineering Journal* 172(1): 326-34.
- Deng, X. and Wang, P. 2012. Isolation of marine bacteria highly resistant to mercury and their bioaccumulation process. *Bioresource Technology* 121: 342-347.
- Edris, G., Alhamed, Y. and Alzahrani, A. 2014. Biosorption of Cadmium and Lead from Aqueous Solutions by *Chlorella vulgaris* Biomass: Equilibrium and Kinetic Study. *Arab Journal Science Energy* 39: 87-93.
- Esposito, A., Pagnanelli, F., Lodi, A., Solicio, C. and Veglio, F. 2001. Biosorption of heavy metals by *Sphaerotilus natans*: an equilibrium study at different pH and biomass concentrations. *Hydrometallurgy* 60: 129-141.
- Flouty, R. and Estephane, G. 2012. Bioaccumulation and biosorption of copper and lead by unicellular algae *Chlamydomonas reinhardtii* in single and binary metal systems. *J. Environmental Management* 11: 106-114.
- Ghasemi, M., Keshtkar, A.R., Dabbagh, R. and Jaber Safdari, S. 2011. Biosorption of uranium in a continuous flow packed bed using *Cystoseira* indic biomass. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering* 8: 65-74.
- Gupta, V.K. and Nayak, A. 2012. Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Chemical Engineering Journal* 180: 81-90.
- Hackbarth, F.v., Girardi, F., Guelli, S.M.A., Augusto, A., Boaventura, R.A.R. and Vilar, V.J.P. 2014. Marine macroalgae *Pelvetia canaliculata* (Phaeophyceae) as a natural cation exchanger for cadmium and lead ions separation in aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal* 242: 294-305.
- Iyer, A., Mody, K. and Jha, B. 2005. Biosorption of heavy metals by a marine bacterium. *Marine Pollutant Bulletin* 50(3): 340-343.
- Lee, Y.C. and Chang, Sh.P. 2011. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresource Technology* 102: 5297-5304.
- Meitei, M.D. and Prasad, M.N.V. 2013. Lead (II) and cadmium (II) biosorption on *Spirodela polyrhiza* (L.) Schlegel biomass. *J. Environmental Chemical Engineering* 1: 200-207.
- Mirghaffari, N., Moeini, E. and Farhadian, O. 2015. Biosorption of Cd and Pb ions from aqueous solutions by biomass of the green microalga, *Scenedesmus quadricauda*. *J. Applied Phycology* 27(1): 311-320.
- Mobasherpour, I., Salahi, E., and Pazouki, M. 2011. Removal of divalent cadmium cations by means of synthetic nano crystallite hydroxyapatite. *J. Desalination* 266 (1-3): 142-148.
- Montazer-Rahmati, M.M., Rabbani, P., Abdolali, A. and Keshtkar, A.R. 2011. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of cadmium, lead, and nickel ions from aqueous solutions by intact and chemically modified brown algae. *J. Hazardous Materials* 185: 401-407.
- Ozer, A., and Ozer, D. 2004. The adsorption of Copper(II) ions on to dehydrate wheat bran (DWB): determination of the equilibrium and thermodynamic parameters. *J. process Biochemistry* 39: 162-169.
- Rajfur, M., Klos, A. and Waclawek, M. 2011. Algae utilization in assessment of the large Turawa lake (Pland) pollution with heavy metals. *J. Environmental Science and Health Part A* 46: 1401-1408.
- Sajadi, F., Sayadi, M.H. and Hajiani, M., 2016. Optimization study of adsorption process of Cadmium by synthesized silver nanoparticles using *Chlorella vulgaris*. *Journal of Birjand University of Medical Sciences*, 23(2): 119-129.
- Sayadi, M.H., Rezaei, M.R. and Rezaei A., 2015. Sediment Toxicity and Ecological Risk of Trace Metals from Streams Surrounding a Municipal Solid Waste Landfill. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 94 (5): 559-563.
- Sayadi, M.H., Rezaei, A. and Sayyed M.R.G., 2017. Grain size fraction of heavy metals in soil and their relationship with land use. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* 7(1): 1-11.
- Sayadi, M.H. and Torabi, S., 2009. Geochemistry of soil and human health: A review. *Pollution Research* 28(2): 257-262.
- Shekari, H., Sayadi, M.H., Rezaei, M.R. and Allahresani, A., 2017. Synthesis of nickel ferrite/titanium oxide magnetic nanocomposite and its use to remove hexavalent chromium from aqueous solutions. *Surface and interface* 8: 199-205.

Sulaymon, A.H., Ismail, I., Mostafa, T. and Sulaymon, A. 2014. Biosorption of Heavy Metals: A Review. *J. Chemical Science and Technology* 4: 74-102.

Sulaymon, A.H., Mohammed, A.A. and Al-Musawi, T.J. 2013. Competitive biosorption of lead, cadmium, copper, and arsenic ions using algae. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 3011-3023.

Tran, H.T., Vu, N.D., Matsukawa, M., Okajima, M., Kaneko, T., Ohki, K. and Yoshikawa, Sh. 2016. Heavy metal biosorption from aqueous solutions by algae inhabiting rice paddies in Vietnam. *J. Environmental Chemical Engineering* 4: 2529-2535.

Tunali, S., Akar, T., Ozcan, A.S., Kiran, I. and Ozcan, A. 2006. Equilibrium and kinetics of biosorption of lead (II) from aqueous solutions by *Cephalosporium aphidicola*. *Separation and Purification Technology* 47(3): 105-112.

Yazdanbakhsh, M., Tavakkoli, H. and Hosseini, S.M. 2011. Characterization and evaluation catalytic efficiency of  $\text{La}_0.5\text{Ca}_0.5\text{NiO}_3$  nanopowders in removal of reactive blue 5 from aqueous solution. *J. Desalination* 281(23): 388-95.