

# حذف سرب از محلول‌های آبی با استفاده از خاکستر برگ نخل در سیستم جذب ناپیوسته

حبیب‌اله یونسی<sup>۴</sup>

زهرا مهربانی<sup>۳</sup>

نادر بهرامی‌فر<sup>۲</sup>

علی محمد صنعتی<sup>۱</sup>

پذیرش ۹۱/۱۱/۲۳

دریافت ۹۱/۱۱/۷

## چکیده

در این تحقیق قابلیت خاکستر برگ نخل کبکاب، به‌عنوان یک ماده جاذب ارزان قیمت برای حذف یون سرب از محلول آبی مطالعه شد. متغیرها از قبیل pH، غلظت یون، مقدار جاذب و دما در سیستم ناپیوسته بررسی شد. نتایج نشان داد که pH بهینه برای حذف یون سرب برابر با ۵ بود. همچنین کارایی جذب در مدت ۶۰ دقیقه در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از ۰/۵ گرم در لیتر جاذب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۹/۴۶، ۹۱/۴۷، ۸۰/۴۹، ۶۹/۶۲، ۵۷/۳۴ و ۵۱/۲۹ درصد به دست آمد. این مطالعه نشان داد که با افزایش مقدار جاذب از ۰/۱ تا ۲ گرم در لیتر، میزان جذب افزایش می‌یابد. همچنین بررسی پارامتر گرمایی، نشان دهنده وابسته بودن فرایند جذب به دما بود و نتایج بیانگر ترتیب کارایی جذب به صورت  $40 < 30 < 20$  درجه سلسیوس بود. بر اساس مدل لانگمیر، مقدار ثابت b برابر ۰/۱۵۲ و حداکثر جذب ۳۵/۲ بود. همچنین طبق مدل فروندلیچ، مقدار ثابت n که بیانگر شدت جذب است، برابر ۴/۵ بود. بر اساس مدل سیپس حداکثر جذب برای سرب ۳۱/۵ بود. این مطالعه نشان داد که خاکستر برگ نخل، پتانسیل خوبی برای حذف یون فلزات سنگین از محلول آبی دارد.

واژه‌های کلیدی: جذب سطحی، یون سرب، نخل کبکاب، سیستم ناپیوسته

## Lead Removal from Aqueous Solution Using Date-Palm Leaf Ash in Batch System

A.M. Sanati<sup>1</sup>

N. Bahramifar<sup>2</sup>

Z. Mehrabani<sup>3</sup>

H. Younesi<sup>4</sup>

(Received Jan. 21, 2013 Accepted Feb. 11, 2013)

### Abstract

This study investigates the potential use of date-palm leaf (*Phoenix dactylifera*) ash as an inexpensive adsorbent for the removal of Pb(II) ions. For this purpose, the variables pH, Pb(II) ion concentration, adsorbent dosage, and temperature in the batch system were investigated. The results obtained showed that the optimum pH for the removal of Pb (II) ions from aqueous solutions was equal to 5. Adsorption efficiencies obtained were 99.46, 91.47, 80.49, 69.62, 57.34, and 51.29%, respectively, for Pb(II) concentrations of 50, 100, 150, 200, 250, and 300 mg/l using 0.5 g/l of the adsorbent with a retention time of 60 minutes at 20°C. Increasing the adsorbent dosage from 0.1 to 2 g/l led to increased adsorption rate. Also, thermodynamic investigations showed that the adsorption process was dependent on temperature such that the order of decreasing removal efficiency followed the temperature order 40 °C > 30 °C > 20 °C. Based on the Langmuir model, the value for the constant b was 0.152 and maximum Pb removal was 31.5%. It was concluded that date-palm leaf ash has a good potential for use as an adsorbent to remove toxic heavy metals like lead from aqueous solutions.

**Keywords:** Physical Adsorption, Pb(II) Ions, Date-Palm (*Phoenix dactylifera*), Batch System.

1. Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Persian Gulf Research Center, Persian Gulf University, Boushehr
2. Assist. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor (Corresponding Author) (+98 122) 62530101 n.bahramifar@modares.ac.ir
3. Assist. Prof. of New Technologies, Education Research Center, Tehran
4. Assoc. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor

- ۱- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، پژوهشکده خلیج فارس، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
- ۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور (نویسنده مسئول) ۰۱۲۲۲) ۶۲۵۳۰۱۰ n.bahramifar@modares.ac.ir
- ۳- استادیار گروه تکنولوژی‌های نوین، پژوهشگاه مطالعات آموزش و پرورش، تهران
- ۴- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

افزایش فعالیت‌های صنعتی در سال‌های اخیر، سبب افزایش غلظت فلزات سنگین در محیط زیست به‌ویژه در اکوسیستم‌های آبی شده است. فلزات سنگین از صنایع مختلفی از قبیل آبکاری‌ها، صنایع الکتریکی، نساجی، باتری‌سازی، معدن کاوی، سرامیک و شیشه به محیط زیست تخلیه می‌شوند [۱]. آلودگی فلزات سنگین به دلیل خطراتی که برای انسان و حیات وحش دارد، یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی است. این آلاینده‌ها قابل تجزیه بیولوژیکی هستند و قابلیت تجمع زیستی در طول زنجیره‌های غذایی دارند. یکی از فلزات سنگین خطرناک که به‌طور گسترده‌ای در خاک‌های آلوده، شیرابه‌های اسیدی ناشی از لندفیل‌ها، پساب‌های صنعتی و سوخت مصرفی اتمبیل‌ها وجود دارد، سرب است [۲]. سرب از مسیرهای مختلفی از قبیل تنفس، بلعیدن و نوشیدن قابلیت ورود به بدن و تجمع در آن را دارد. نوشیدن آبی که حاوی سرب حتی در غلظت‌های پایین باشد، در طولانی مدت طیف گسترده‌ای از مشکلات بهداشتی را به‌وجود خواهد آورد که از آن جمله می‌توان به حالت تهوع، کاهش هوشیاری، ایجاد سنگ کلیه، تشنج، کما و اثرات نامحسوس بر سوخت و ساز بدن اشاره کرد [۳].

اخیراً توجه زیادی به روش‌های مختلف حذف این آلاینده‌ها از پساب‌های صنعتی شده است. روش‌های معمول که برای حذف یون‌های فلزات سنگین از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل ته نشست شیمیایی، تبادل یون، استخراج با حلال، فیلتراسیون، اسمز معکوس، الکترودیالیز و جذب سطحی است [۴]. در میان روش‌های مختلف حذف فلزات سنگین، روش جذب سطحی با توجه به کارایی بالا، سهولت کاربرد، در دسترس بودن جذب‌های متنوع و کم هزینه بودن، دارای مزیت است [۵]. اگر چه کرین فعال با توجه به سطح بالایی که دارد، یکی از نویدبخش‌ترین جذب‌ها برای فرایند جذب سطحی به‌شمار می‌آید، اما هزینه فراوری بالایی دارد [۶]. بنابراین نیاز فزاینده‌ای به جذب‌های ارزان، مؤثر و در دسترس برای حذف فلزات سنگین وجود دارد. به‌عنوان مثال با توجه به دسترسی گسترده به مواد پسماند کشاورزی و باغبانی و همچنین هزینه بسیار کم آن‌ها، استفاده از این مواد به‌عنوان جذب، مناسب به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر از پسماندهای گیاهی برای جذب سطحی سرب استفاده گسترده‌ای شده است که شامل: ضایعات درخت سرخس، پوسته برنج، سبوس و برگ ذرت، ساقه توتون، ضایعات درخت نخل ساگو، سبوس گندم، پوست پرتقال و ضایعات چای است [۷-۱۴]. میزان تولید خرما در ایران ۱ میلیون تن در سال است که پس از مصر در دنیا مقام دوم را دارد و از نظر سطح زیر کشت با ۲۴۰ هزار هکتار مقام نخست را به خود اختصاص داده است. درخت خرما گیاهی همیشه سبز است و بعد از ۳ تا ۷ سال، برگ‌های مسن آن خشکیده می‌شوند و باید از

درخت حذف و هرس شوند. هر ساله ضایعات و بقایای گیاهی زیادی در سطح نخلستان‌ها تولید می‌شوند که ناشی از عملیات حذف برگ‌های خشک و دمبرگ‌ها و همچنین جداسازی الیاف درخت است. در هر درخت خرما بسته به رقم و شرایط زراعی در طول سال، حدود ۱۵ تا ۲۵ برگ خشک می‌شود که هر کدام به‌طور متوسط ۱/۵ تا ۲/۵ کیلوگرم وزن دارد. تعمیم این مقدار بقایای گیاهی به چند میلیون اصله نخل موجود در کشور، رقم بزرگی است که نیاز به مدیریت بهره‌وری و استفاده بهینه دارد. یکی از کاربردهای پسماندهای گیاهی، استفاده به‌عنوان منبع انرژی و همچنین استفاده از خاکستر به‌جای مانده به‌عنوان جاذب است.

هدف این مطالعه استفاده از خاکستر برگ نخل کبکاب<sup>۱</sup> به‌عنوان جاذب برای حذف سرب از محلول‌های آبی در سیستم ناپیوسته بود. برای یافتن شرایط بهینه حذف برخی از متغیرها از قبیل pH، دما، مقدار جاذب و غلظت فلز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- تهیه جاذب و مواد شیمیایی مورد نیاز

استان بوشهر با دارا بودن ۱۶ درصد از مجموع سطح زیر کشت خرما در کشور، پس از سیستان و بلوچستان مقام دوم را دارد. برگ‌های سبز و خشک نخل هرس شده ضایعاتی نخل‌های موجود در محوطه دانشگاه خلیج فارس، جمع‌آوری شد. برای برطرف شدن ذرات گرد و غبار سطح برگ‌ها ابتدا با استفاده از آب و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند. برگ‌های شسته شده به مدت ۲۴ ساعت در آن و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. در نهایت برگ‌ها به قطعات کوچک خرد شده و به‌وسیله آن خشک شدند. این برگ‌ها به‌وسیله آسیاب خرد شده و برای آزمایش‌های بعدی در جای خشک نگهداری شدند. قبل از تهیه خاکستر، مواد معدنی برگ‌های سبز و خشک با دستگاه XRF آنالیز شد. تا مشخص شود کدام یک، درصد سیلیس بیشتری دارد.

مواد به‌دست آمده خرد شده در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت سه ساعت به خاکستر تبدیل شدند. خاکستر تهیه شده در ظروف سر بسته مناسب ذخیره شدند تا در زمان لازم در پروسه جذب مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده از قبیل نیترات سرب، هیدروکلریک اسید و هیدرواکسید پتاسیم از شرکت مرک<sup>۲</sup> آلمان به‌صورت معرف‌های استاندارد آنالیز تهیه شد. همچنین در کل مطالعه از آب دیونیزه برای تهیه محلول‌ها استفاده شد. محلول اصلی سرب در غلظت ۱۰۰۰

<sup>1</sup> Phoenix Dactylifera

<sup>2</sup> Merck

میلی گرم در لیتر با استفاده از حل کردن مقدار مشخصی از نیترات سرب در آب دیونیزه شده، به دست آمد. غلظت‌های مختلف مورد نیاز در طول مطالعه از این محلول اصلی تهیه و pH آنها روی ۵ تنظیم شد.

## ۲-۲- مطالعه فرایند جذب در سیستم ناپیوسته

برای بررسی فرایند حذف فلز سرب از محلول‌های آبی، مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی و در سیستم‌های ناپیوسته انجام شد. آزمایش‌های جذب برای بررسی pH محلول، غلظت اولیه سرب، مقدار جذب و دما انجام شد. هر آزمایش در ارلن با حجم ۲۵۰ میلی لیتر که محتوی ۱۰۰ میلی لیتر محلول سرب بود، با شدت اختلاط ۱۲۰ دور در دقیقه و مدت تماس ۶۰ دقیقه انجام شد. نمونه‌های مورد نیاز در هر آزمایش در زمان‌های از پیش تعیین شده (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه) برداشت شد. هر نمونه با استفاده از فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر صاف شده و برای تعیین غلظت تعادلی سرب مورد آنالیز قرار گرفت.

## ۲-۳- شرایط بررسی متغیرهای مورد آزمایش

در ابتدا اثر pH اولیه محلول بر میزان جذب سرب در دامنه ۲ تا ۶ مورد بررسی قرار گرفت. pH هر یک از محلول‌ها با استفاده از سود و اسید کلریدریک ۱ نرمال تنظیم شد. در این مطالعه ۱۰۰ میلی لیتر از محلول فلز با غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر به مدت ۶۰ دقیقه در تماس با ۰/۱ گرم در لیتر از جاذب در دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس) و با سرعت اختلاط ثابت قرار گرفت و در فواصل زمانی ذکر شده، نمونه‌ها برداشت و فیلتر شدند. سپس برای بررسی اثر میزان جاذب بر فرایند جذب، ۱۰۰ میلی لیتر از محلول فلز با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در تماس با مقادیر مختلف جاذب (۱/۳۰، ۰/۵، ۰/۱ و ۲ گرم در لیتر) طبق شرایط ذکر شده در بالا قرار داده شد و نمونه‌های مورد نیاز برای آنالیز در طول زمان تهیه شد. در نهایت برای ارزیابی اثرات دما و غلظت فلز، ۰/۵ گرم از جاذب به ۱۰۰ میلی لیتر از محلول فلز با غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر در سه دمای مختلف ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس اضافه شد و با سرعت اختلاط ثابت به مدت ۶۰ دقیقه طبق طرح ذکر شده نمونه برداری صورت گرفت. میزان جذب فلز توسط خاکستر برگ نخل با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۴]

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)V}{S} \quad (1)$$

که در آن

$q_e$  مقدار فلز جذب شده به ماده جاذب بر حسب میلی گرم بر گرم،  $V$  حجم محلول محتوی فلز بر حسب لیتر،  $C_i$  و  $C_e$  به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی فلز بر حسب میلی گرم در لیتر و  $S$  مقدار ماده جاذب اضافه شده به صورت وزن خشک بر حسب گرم است. همچنین میزان کارایی جذب بر اساس رابطه زیر محاسبه شد [۱۵]

$$R = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

برای مدل سازی ایزوترم جذب سرب با خاکستر از مدل‌های ایزوترم لانگمیر، فروندلیچ و سیپس استفاده شد (جدول ۱). مدل جذب ایزوترم لانگمیر مربوط به جذب تک لایه‌ای می‌شود و فرض می‌کند سطح جاذب دارای مکان‌های با انرژی مساوی است که هر ملکول جذب شونده تنها به یک مکان اختصاص داده می‌شود. معادله لانگمیر به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (3)$$

که در آن

$C_e$  غلظت تعادلی یون‌های فلزی بر حسب میلی گرم در لیتر،  $q_e$  مقدار یون‌های جذب شده بر حسب میلی گرم بر گرم،  $q_m$  بیشینه ظرفیت جذب یون‌های فلزی بر حسب میلی گرم بر گرم،  $b$  ثابت تعادلی جذب لانگمیر بر حسب میلی گرم بر گرم است. ایزوترم جذب چند لایه برای سطوح ناهمگن توسط معادله ایزوترم فروندلیچ به صورت زیر بیان می‌شود [۴]

$$q_e = K_f C_e^n \quad (4)$$

که در آن

$C_e$  غلظت تعادلی یون‌های فلزی بر حسب میلی گرم در لیتر،  $q_e$  مقدار یون‌های جذب شده بر حسب میلی گرم بر گرم،  $n$  و  $K_f$  ثابت‌های فروندلیچ به ترتیب شاخص‌های ظرفیت و شدت جذب هستند. ایزوترم جذب سیپس بر اساس ادغام ایزوترم‌های لانگمیر و فروندلیچ به صورت زیر بیان می‌شود

$$q_e = \frac{q_m K_s C_e^\gamma}{1 + K_s C_e^\gamma} \quad (5)$$

که در آن

$K_f$  ثابت تعادلی جذب سیپس بر حسب یک بر میلی گرم و  $\gamma$  ثابت سیپس و بیانگر شاخص شدت جذب است.

## ۲-۴- آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی

از دستگاه آسیاب شرکت ایران خودساز برای آسیاب برگها استفاده شد. همچنین برای تبدیل برگ به خاکستر از کوره الکتریکی با برنامه ریزی دمایی شرکت نبرترم<sup>۱</sup> استفاده شد. ساختار شیمیایی ماده جاذب خاکستر برگ نخل با استفاده از روش طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس<sup>۲</sup> با دستگاه فیلیپس<sup>۳</sup> مورد آنالیز قرار گرفت. خصوصیات و ترکیب این مواد در جدول ۲ ذکر شده است. غلظت یونهای سرب باقیمانده در محلول پس از فرایند جذب با استفاده از روش طیف سنجی و با دستگاه جذب اتمی مجهز به سیستم شعله محصول شرکت فیلیپس آمریکا مدل PU9400 مورد آنالیز قرار گرفت. هر آنالیز سه مرتبه تکرار شد و میانگین دادههای به دست آمده گزارش شد. ویژگیهای ساختاری سطح جاذب با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی فیلیپس<sup>۴</sup> تصویربرداری شد که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- ساختار فیزیکی و شیمیایی خاکستر برگ نخل

به منظور درک ویژگیهای فرایند جذب، نیاز است ساختار فیزیکی و شیمیایی جاذب مورد استفاده کاملاً شناخته شود. برای این منظور در ابتدا ساختار شیمیایی خاکستر برگ نخل با استفاده از دستگاه XRF مورد آنالیز قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده در جدول ۲.

- <sup>1</sup> Nebertherm B170  
<sup>2</sup> XRF  
<sup>3</sup> Phillips, Axios  
<sup>4</sup> SEM, Phillips XL30, Holland

برگ خشک نسبت به برگ سبز درصد بالاتری سیلیس دارد. به طوری که در برگ سبز ۳/۷ و در برگ خشک ۵/۸۹ درصد بود. مقدار LOI و تقریباً بقیه عناصر نیز کاهش داشتند، در نتیجه بقیه آزمایشها با برگ خشک انجام شد که از نظر محیط زیستی نیز، استفاده از آن منطقی تر است. همان گونه که مشاهده می شود، سیلیس به صورت SiO<sub>2</sub> حدود ۶۱ درصد خاکستر را به خود اختصاص داده است و پس از آن SO<sub>3</sub> با حدود ۹ درصد، بیشترین درصد را داشته است. ترکیبات CaO و K<sub>2</sub>O در مجموع حدود ۱۴ درصد و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و MgO در مجموع حدود ۲/۷ درصد از خاکستر برگ نخل را به خود اختصاص داده اند. بالا بودن میزان سیلیس موجود در خاکستر می تواند سبب استحکام جاذب در فرایند جذب شود تا بتواند در فرایند جذب، ساختار خود را حفظ کند. همچنین این مواد جاذب، به دلیل داشتن استحکام کافی می توانند بازیابی شده و پس از فرایند واجذب یونهای فلزی، مجدداً مورد استفاده قرار گیرند. خصوصیات فیزیکی سطح جاذب با استفاده از تصاویر SEM مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود، سطح ذرات خاکستر برگ نخل دارای خلل و فرج های متعددی است که همین مسئله باعث افزایش نسبت سطح به حجم جاذب شده و در نتیجه می تواند سبب افزایش میزان جذب یونهای فلزی شود. علاوه بر این، این حفرات سبب می شود که فرایند جذب مدت زمانی معین، با نسبتی کمتر از مقدار اولیه (به دلیل دسترسی متفاوت به مکانهای جاذب سطحی و حفرات) ادامه پیدا کند.

جدول ۱- مدل سازی جذب سرب روی خاکستر برگ نخل با استفاده از مدل های ایزوترمی لانگمیر، فروندلیچ و سیپس

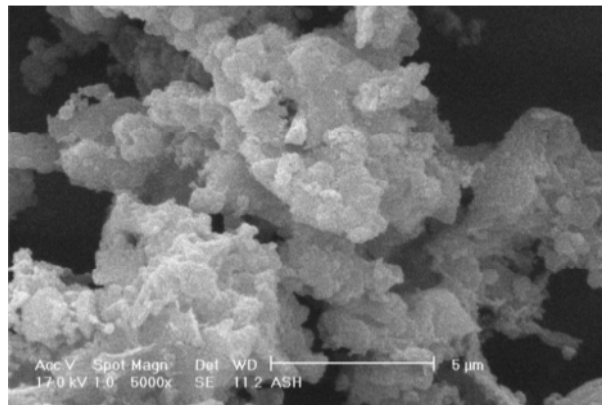
مدل سیپس			مدل فروندلیچ			مدل لانگمیر			دما (درجه سلسیوس)	
R <sup>2</sup>	n	K <sub>s</sub> (l/mg)	q <sub>m</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	n	K <sub>f</sub>	R <sup>2</sup>	b (l/mg)		q <sub>m</sub> (mg/g)
۰/۹۹۷	۱/۱۸	۰/۱۴۳	۲۹/۳	۰/۹۷۰	۴/۶	۹/۷۶	۰/۹۹۶	۰/۱۵۸	۲۸/۱	۲۰
۰/۹۸۶	۰/۷۸	۰/۱۳۰	۳۰/۱	۰/۹۴۸	۴/۱	۹/۴۲	۰/۹۸۴	۰/۱۱۶	۳۱/۸	۳۰
۰/۹۹۰	۰/۲۵	۰/۱۶۲	۳۱/۵	۰/۸۷۰	۴/۵	۱۱/۹۸	۰/۹۲۵	۰/۱۵۰	۳۵/۲	۴۰

جدول ۲- ساختار شیمیایی برگ سبز، خشک و خاکستر برگ نخل بر حسب درصد

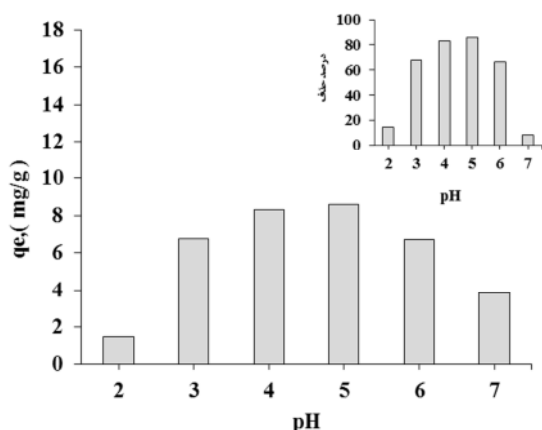
SO <sub>3</sub>	Cl	LOI	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
۰/۰۶	۰/۰۸	۹۳/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۹۲	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۱۹	۳/۷۰	برگ سبز
۰/۰۷	۰/۰۲	۹۱/۷۱	۰	۰/۱۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۹۲	۰/۲۶	۰/۰۶	۰/۱۶	۵/۸۹	برگ خشک
۸/۹۴	۰/۳۶	۱۱/۳۶	۰	۰/۸۴	۶/۴۱	۰/۱۲	۷/۵۷	۲/۰۷	۰/۴۰	۰/۶۳	۶۱/۱۸	خاکستر

L.O.I: کاهش در اثر احتراق

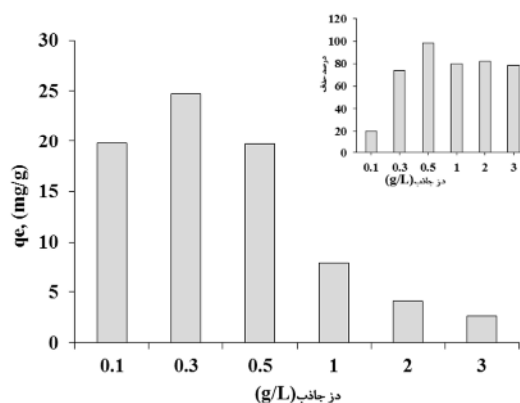
مکان‌های فعال در سطح جاذب، فضای سطحی بیشتری برای جذب وجود دارد و بنابراین نفوذ یون‌های فلزی به مکان‌های جذب راحت‌تر صورت می‌گیرد [۱۹]. سعیدی و همکاران در سال ۱۳۸۸ حذف کادمیم را با ۲ گرم کربن فعال انجام دادند [۲۰]: در صورتی که در مقایسه با مطالعات انجام شده، مقدار جاذب کمتری لازم است و کارایی این ماده بهتر است [۲۱ و ۲۲]، به طوری که در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ حذف سرب به بیش از ۹۰ درصد می‌رسد.



شکل ۱- SEM خاکستر برگ نخل



شکل ۲- تأثیر pH بر میزان جذب یون‌های Pb(II)



شکل ۳- تأثیر میزان جاذب بر جذب یون‌های Pb(II) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و pH ۵

### ۳-۴- اثر غلظت یون‌های فلزی بر فرایند جذب

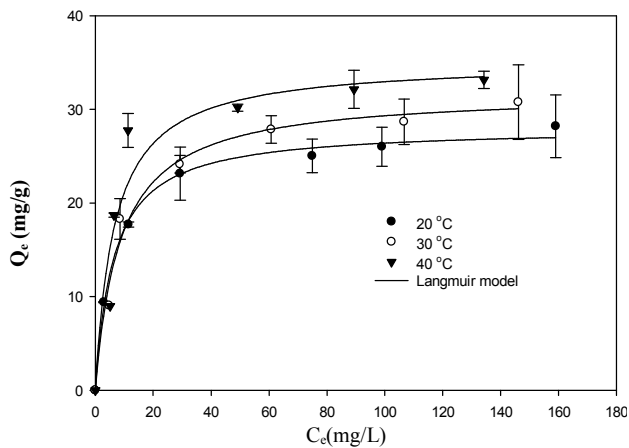
همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش غلظت یون‌های فلزی از کارایی جذب کاسته می‌شود، به گونه‌ای که بیشترین مقادیر جذب برابر با ۹۹/۴۶، ۹۱/۴۷ و ۸۰/۴۹ درصد است که به ترتیب در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سرب به دست آمده است. همچنین نتایج بررسی روند جذب در طول زمان و در غلظت‌های مختلف فلزی نشان می‌دهد که در همه غلظت‌ها در ۱۵ دقیقه ابتدایی، جذب با شدت بیشتری اتفاق افتاده

### ۳-۲- اثر pH بر میزان جذب

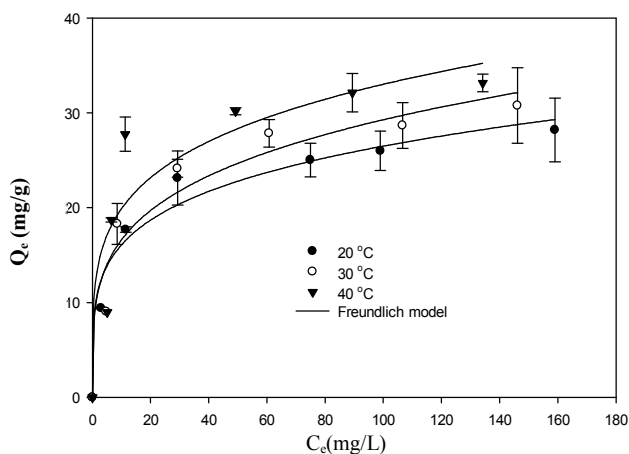
پساب صنایع مختلف که حاوی یون سرب هستند، مقادیر مختلفی از pH دارند. pH محلول به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر در فرایند جذب در این مطالعه در دامنه ۲ تا ۶ و با غلظت یون سرب برابر ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و با میزان جاذب ۰/۱ گرم در لیتر مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش pH از ۲ تا ۵، میزان جذب افزایش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین مقدار qe در pH برابر ۵، برابر با ۸/۵۸ میلی‌گرم در گرم بود که با افزایش بیشتر pH از ۵ تا ۶ مجدداً از میزان جذب آن کاسته شد. پایین بودن میزان جذب فلز در pH‌های اسیدی به دلیل رقابت بین یون‌های فلزی با یون‌های هیدروژن برای تصرف مکان‌های جذب در سطح جاذب است [۱۷]. با افزایش pH، پتانسیل منفی شارژ در سطح جاذب افزایش پیدا می‌کند که همین مسئله باعث افزایش جذب می‌شود. همچنین در pH بالاتر از ۶/۵ هیدروکسید فلزی (Pb(OH)<sub>2</sub>) شکل می‌گیرد که باعث رسوب یون‌های سرب می‌شود، بنابراین مقدار pH بالاتر از ۶ مورد بررسی قرار نگرفت [۱۸].

### ۳-۳- اثر مقدار جاذب بر میزان جذب

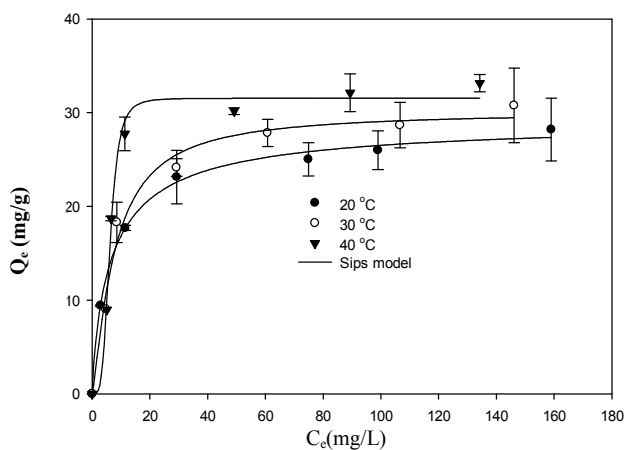
غلظت جاذب یکی از مهم‌ترین پارامترها در فرایند جذب است، زیرا می‌تواند بیانگر ظرفیت جذب آن برای یون فلزی مورد نظر تحت شرایط مورد بررسی باشد [۱۲]. نتایج اثر مقدار جاذب بر جذب یون‌های سرب در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر ۵، در شکل ۳ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار جاذب از ۰/۱ تا ۲ گرم در لیتر میزان جذب افزایش می‌یابد؛ و جذب در همه غلظت‌های جاذب، در ۱۵ دقیقه ابتدایی با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد و پس از آن شدت جذب کاهش می‌یابد و تقریباً با روند یکسانی ادامه پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال در مقدار جاذب ۲ گرم در لیتر، غلظت یون‌های فلزی در ۵ دقیقه ابتدایی به صفر می‌رسد. با افزایش غلظت جاذب با توجه به افزایش



(الف)



(ب)

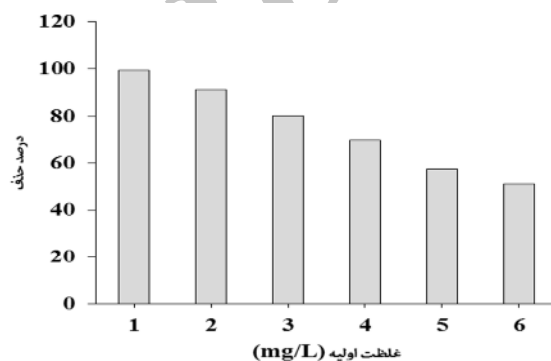


(ج)

شکل ۵- تغییر غلظت تعادلی ( $C_e$ ) یون سرب روی خاکستر برگ نخل با استفاده از مدل‌های ایزوترمی لانگمیر، فروندلیچ و سیپس در pH ۵ و با  $0.5 \text{ g/L}$  میزان جاذب

است. همچنین طبق نتایج مدل فروندلیچ، مقدار ثابت  $n$  که بیانگر شدت جذب است، برای سرب  $4/5$  است. براساس مدل سیپس حداکثر جذب برای سرب  $31/5$  است.

است و پس از آن روند ثابتی را تا پایان ۶۰ دقیقه در پیش می‌گیرد (شکل ۵). شیب اولیه منحنی‌های جذب، نشان دهنده این است که جذب به صورت سطحی اتفاق افتاده و کند شدن فرایند جذب در ادامه به دلیل طولانی‌تر شدن مسیر انتشار یون‌های فلزی به داخل حفرات موجود در سطح جاذب است. در غلظت‌های پایین‌تر سرب، مکان‌های جذب فعال در سطح جاذب، به اندازه کافی در دسترس هستند، بنابراین مشاهده می‌شود که میزان جذب، مستقل از غلظت فلزی است. اما در غلظت‌های بالای سرب، تعداد یون‌های فلزی در مقایسه با مکان‌های جذب فعال بیشتر است، بنابراین درصد حذف یون‌های فلزی وابسته به غلظت اولیه سرب است و با افزایش آن کاهش می‌یابد [۳]. شاه‌محمدی از شلتوک برنج برای حذف غلظت‌های پایین سرب استفاده کرده بود [۱۳]، ولی در این تحقیق از مقدار  $300$  میلی‌گرم در لیتر نیز استفاده شد.



غلظت اولیه (mg/L)

شکل ۴- اثر غلظت اولیه Pb(II) بر کارایی جذب در pH ۵ و با  $0.5 \text{ g/L}$  در لیتر میزان جاذب پس از ۶۰ دقیقه تماس

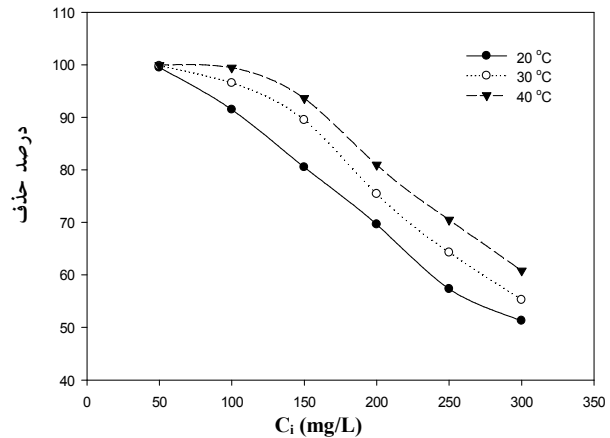
### ۳-۵- کارایی جذب و اثر دما

نتایج نشان می‌دهد که زمان ۶۰ دقیقه برای رسیدن به تعادل پویای یون‌های فلزی بین محیط محلول و جامد در همه غلظت‌ها و همه دماهای مورد آزمایش کافی است. کارایی جذب یون‌های سرب بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، کارایی جذب با افزایش دما افزایش یافته است. همچنین بر اساس این نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که کارایی جذب در غلظت‌های پایین ( $50$  و  $100$  میلی‌گرم در لیتر) در همه دماها بهتر از غلظت‌های بالا است و با افزایش غلظت یون‌های سرب در یک دمای خاص، از کارایی جذب کاسته می‌شود. افزایش دما باعث افزایش سیالیت محلول می‌شود. همچنین می‌تواند بیانگر آنتالپی گرماگیر جذب باشد که در مطالعات دیگر نیز نتایج مشابهی به دست آمده است [۲۳ و ۲۴]. نتایج مدل لانگمیر نشان می‌دهد مقدار ثابت  $b$  برای فلز مورد مطالعه  $0.152$  و حداکثر جذب  $35/2$

افزایش مقدار جاذب، میزان جذب نیز افزایش یافت و بیشترین میزان جذب در مقدار جاذب ۲ گرم در لیتر به دست آمد. بیشترین کارایی حذف در غلظت‌های پایین یون سرب به دست آمد و با افزایش غلظت از کارایی جذب کاسته شد. به طوری که بالاترین درصد حذف ۹۹/۴۶ درصد بود که در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سرب به دست آمد. بررسی پارامتر دمایی نشان داد که فرایند جذب گرماگیر است و با افزایش دما، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد و در بین سه دمای مورد بررسی (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس) دمای ۴۰ درجه سلسیوس بیشترین میزان جذب را دارد. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که خاکستر برگ نخل با توجه به اینکه یک پسماند کشاورزی محسوب می‌شود و سالانه در ایران در مقادیر بالایی تولید می‌شود، می‌تواند به عنوان یک جاذب مناسب و ارزان قیمت برای حذف یون‌های فلزات سنگین همچون سرب از محیط‌های آبی به کار رود.

#### ۵- قدردانی

انجام تحقیق حاضر با استفاده از پشتیبانی مالی دانشگاه تربیت مدرس و ستاد نانو کشور صورت گرفته است. نویسندگان مقاله از آقای دکتر فرشید قربانی استادیار دانشگاه کردستان و سرکار خانم حق دوست، کارشناس آزمایشگاه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، تشکر و قدردانی می‌نمایند.



شکل ۶- کارایی جذب (R) غلظت‌های مختلف سرب در دماهای مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی ویژگی‌های فیزیکی سطح جاذب توسط آنالیز SEM بیانگر خلل و فرج دار بودن سطح جاذب و نسبت سطح به حجم بالا در آن بود. بررسی تعیین ساختار شیمیایی خاکستر برگ نخل توسط آنالیز XRF نشان داد که حدود ۶۱ درصد آن را سیلیس تشکیل می‌دهد که همین مسئله سبب مقاومت آن در خلال فرایند جذب می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که فرایند جذب سطحی توسط جاذب ذکر شده وابسته به pH، مقدار جاذب، غلظت یون‌های سرب و دما است. pH بهینه به دست آمده در فرایند جذب برابر با ۵ بود. همچنین با

#### ۶- مراجع

1. Wang, X.S., Lu, Z.P., Miao, H.H., He, W., and Shen, H.L. (2010). "Kinetics of Pb (II) adsorption on black carbon derived from wheat residue." *J. of Chemical Engineering*, 166 (3), 986-993.
2. Machida, M., Kikuchi, Y., Aikawa, M., and Tatsumoto, H. (2004). "Kinetics of adsorption and desorption of Pb(II) in aqueous solution on activated carbon by two-site adsorption model." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 240, 179-186.
3. Li, X-M., Zheng, W., Wang, D.B., Yang, Q., Cao, J.B., and Yue, X. (2010). "Removal of Pb(II) from aqueous solutions by adsorption onto modified areca waste: Kinetic and thermodynamic studies." *Desalination*, 258, 148-153.
4. Ghorbani, F., Younesi, H., Ghasempouri, S.M., Zinatizadeh, A.A., Amini, M., and Daneshi, A. (2008). "Application of response surface methodology for optimization of cadmium biosorption in an aqueous solution by *Saccharomyces cerevisiae*." *J. of Chemical Engineering*, 145, 267-275.
5. Amini, M., Younesi, H., and Bahramifar, N. (2009). "Statistical modeling and optimization of the cadmium biosorption process in an aqueous solution using *Aspergillus niger*." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 337, 67-73.
6. Marsh, H., and Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*, Elsevier Ltd., UK.
7. Chung, J.S., and Kim, D.J., Ahn, W.S., Ko, J.H., and Cheong, W.J. (2004). "Synthesis, characterization, and applications of organic-inorganic hybrid mesoporous silica." *Korean J. Chem Eng*, 21, 132-139.

8. Zulkali, M.M.D, Ahmad, A.L, Norulakmal, N.H., and Oryza Sativa, L. (2009). "Husk as heavy metal adsorbent: Optimization with lead as model solution." *Bioresource Technology*, 97, 21-25.
9. Singh, K.K., Talat, M., and Hasan, S.H. (2006). "Removal of lead from aqueous solutions by agricultural waste maize bran." *Bioresource Technology*, 97, 2124-2130.
10. Li, W., Zhang, L., Peng, J., Li, N., Zhang, S., and Guo, S. (2008). "Tobacco stems as a low cost adsorbent for the removal of Pb(II) from wastewater: Equilibrium and kinetic studies." *Industrial Crops and Products*, 28, 294-302.
11. Quek, S. Y., Wase, D. A. J., and Forster, C. F. (1998). "The use of sago waste for the sorption of lead and copper." *Pretoria, AFRIQUE DU SUD: Water Research Commision*, 24 (3), 251-256.
12. Bulut, Y., and Baysal, Z. (2006). "Removal of Pb(II) from wastewater using wheat bran." *J. of Environmental Management*, 78, 107-113.
13. Xuan, Z., Tang, Y., Li, X., Liu, Y., and Luo, F. (2006). "Study on the equilibrium, kinetics and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel." *Biochemical Engineering*, 31, 160-164.
14. Amarasinghe, B.M.W.P.K., and Williams, R.A. (2007). "Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater." *Chemical Engineering* 132, 299-309.
15. Liu, S. Y., Gao, J., Yang, Y.J., Yang, Y. C., and Ye, Z. X. (2010). "Adsorption intrinsic kinetics and isotherms of lead ions on steel slag." *J. of Hazardous Materials*, 173, 558-562.
16. Vasconcelos, H.L., Camargo, T.P., Gonçalves, N.S., Neves, A., Laranjeira, M.C.M., and Fávere V.T. (2008). "Chitosan crosslinked with a metal complexing agent: Synthesis, characterization and copper(II) ions adsorption." *Reactive and Functional Polymers*, 68, 572-579.
17. Gerçel, Ö., and Gerçel, H.F. (2007). "Adsorption of lead(II) ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from biomass plant material of Euphorbia rigida." *Chemical Engineering*, 132, 289-297.
18. Baes, C.F., and Mesmer, R.E. (1976). *The hydrolysis of cations*, Wiley, New York.
19. Huang, L.Z., Zeng, G.M., Huang, D.L., Li, L. F., Huang, P.M., and Xia, C.B. (2009). "Adsorption of lead(II) from aqueous solution onto Hydrilla verticillata." *Biodegradation*, 20, 560-651.
20. Saeedi, M., Jamshidi, A., Abessi, O., and Bayat, J. (2009). "Removal of dissolved cadmium by adsorption onto walnut and almond shell charcoal: Comparison with Granular Activated Carbon (GAC)." *J. of Water and Wastewater*, 70, 16-22. (In Persian)
21. Zavvar Mousavi, S. H., and Arjmandi, A. (2009). "Removal of heavy metals from industrial wastewater by sheep gut." *J. of Water and Wastewater*, 73, 63-68. (In Persian)
22. Shamohammadi Heidari, Z. (2010). "Lead removal from aqueous solutions using low-cost adsorbents." *J. Water and Wastewater*, 79, 45-50. (In Persian)
23. Kul, A.R., and Koyuncu, H. (2010). "Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solution by native and activated bentonite: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study." *J. of Hazardous Materials*, 179, 332-339.
24. Chakravarty, S., Mohanty, A., Sudha, T.N., Upadhyay, A.K., Konar, J., and Sircar, J.K. (2010). "Removal of Pb(II) ions from aqueous solution by adsorption using bael leaves (Aegle marmelos)." *J. of Hazardous Materials*, 173, 502-509.