

Biosorption of Lead (II) from Aquatic Solutions Using Leaves of *Saccharum Officinarum*

Hadis Tahmasebpour

Master's degree in Environment
Department, Ahvaz Branch, Islamic
Azad University, Ahvaz, Iran.

Maryam Mohammadi

Rouzbahani

* Associate Professor of Environment
Department, Ahvaz Branch, Islamic
Azad University, Ahvaz, Iran.
(Corresponding Author)
Mmohammadiroozbahani@yahoo.com

Abstract

Background & Purpose: Lead (Pb) is one of the most hazardous heavy metals to the environment, organisms, and humans. Effective methods for removing Pb from aqueous solutions include the use of biological adsorbents. This study investigates the biosorption of Pb (II) from aqueous solutions using the leaves of *Saccharum officinarum* (sugarcane).

Materials and Methods: *Saccharum officinarum* leaves were collected from fields in Ahvaz, Iran, and dried at 70°C for 24 hours. Biosorption tests were conducted under varying conditions: pH (2-9), contact time (15-150 minutes, at 15-minute intervals), biomass concentration (0.1-2 g), and initial solution concentration (10-50 mg L⁻¹). Adsorption isotherms were also evaluated.

Results: The removal efficiency of Pb (II) increased with higher bioadsorbent doses and decreased with higher initial solution concentrations. The lowest removal efficiency (34.6%) was observed at 15 minutes, while the highest (71.5%) occurred between 105 and 150 minutes. The maximum Pb (II) removal efficiency (92.3%) was recorded at an initial concentration of 10 mg L⁻¹. The biosorption efficiency increased with rising pH levels, peaking at pH 6. Adsorption isotherm data indicated that the biosorption of Pb (II) by *Saccharum officinarum* leaves adhered well to the Freundlich isotherm model.

Conclusion: The biomass of *Saccharum officinarum* leaves, as an inexpensive and readily available adsorbent, demonstrates significant potential for the removal of Pb (II) from aqueous solutions.

Keywords: Biosorbent, Lead (II) Ion, Biosorption, Sugarcane Leaves

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

► **Citation:** Tahmasebpour H, Mohammadi Rouzbahani M. Biosorption of Lead (II) from Aquatic Solutions Using Leaves of *Saccharum Officinarum*. *Journal of Research in Environmental Health*. 10(2):11-23.

Received: 2024/02/21

Accepted: 2024/08/18

Doi: 10.22038/jreh.2024.24881

بررسی جذب زیستی یون سرب (II) از محلول‌های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر (*Saccharum Officinarum*)

حدیث طهماسب پور

دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

مریم محمدی روزبهانی

دانشیار گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(نویسنده مسئول)

Mmohammadiroozbahani@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: یکی از مهم‌ترین یون‌های فلزی که اثرات فراوانی برای محیط‌زیست و موجودات زنده به‌خصوص انسان دارد، یون سرب است. یکی از روش‌های موثر جهت جذب سرب از محلول‌های آبی، استفاده از جاذب‌های زیستی می‌باشد. این پژوهش با هدف جذب زیستی سرب (II) از محلول‌های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر انجام گردید.

مواد و روش‌ها: برگ گیاه نیشکر جمع‌آوری شده از مزارع اهواز، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس آزمایشات جذب در مقادیر مختلف pH (۲-۹)، زمان تماس (۱۵-۱۵۰) دقیقه به فاصله ۱۵ دقیقه یکبار و مقادیر مختلف بیومس (۲-۱۰) و غلظت اولیه محلول (۵۰-۱۰) میلی گرم برلیتر و همچنین ایزوترم جذب انجام شد.

یافته‌ها: کارایی حذف یون سرب بر روی برگ گیاه نیشکر با افزایش دوز بیوجاذب، افزایش و با افزایش غلظت اولیه محلول کاهش می‌یابد. کمترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به زمان ۱۵ دقیقه (۳۴/۶ درصد) و بیشترین میزان، مربوط به زمان ۱۰۵ تا ۱۵۰ دقیقه (۷۱/۵ درصد) بود. بیشترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر (۹۲/۳ درصد) بود. همچنین با افزایش pH کارایی حذف افزایش و در نهایت در اسیدیته ۶ به حداکثر می‌رسد. داده‌های حاصل از بررسی ایزوترم جذب نشان داد که مکانیسم جذب یون سرب (II) بر بیوجاذب برگ گیاه نیشکر به‌خوبی از ایزوترم فروندلیچ پیروی می‌کند.

نتیجه‌گیری: بیومس برگ گیاه نیشکر به عنوان یک جاذب ارزان و با امکان آماده‌سازی در شرایط مختلف می‌تواند به عنوان یک جاذب در حذف یون سرب (II) از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: بیوجاذب، یون سرب (II)، جذب زیستی، برگ گیاه نیشکر

◀ **استناد:** طهماسب پور ح، محمدی روزبهانی م. بررسی جذب زیستی یون سرب (II) از محلول‌های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر (*Saccharum Officinarum*). فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۱۱-۲۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلوده‌کننده‌های زیست-محیطی، آلودگی‌های ناشی از یون‌های فلزات سنگین موجود در پساب‌های واحدهای صنعتی است (۱). با توجه به این‌که که فلزات سنگین در طبیعت از بین نمی‌روند، حذف و جداسازی آن‌ها از پساب نیاز به تکنولوژی‌های جدید دارد و روش‌های مختلف نظیر رسوب شیمیایی، تیخیر، جذب و تبادل یونی، برای تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین استفاده می‌شود. این روش‌ها در کنار مزایا و معایب، روش‌های پرهزینه‌ای هستند. جذب زیستی فلزات سنگین، تکنولوژی نسبتاً جدیدی است که برای تصفیه‌ی پساب‌های صنعتی به کار می‌رود و هدف از آن، حذف فلزات سمی و پاکسازی محیط زیست و همچنین بازیافت فلزات باارزش است. از مزایای مهم تکنولوژی جذب زیستی، می‌توان به بازده مناسب آن در کاهش غلظت یون‌های فلزات سنگین، قابلیت تولید مجدد جاذب، عدم تولید لجن، امکان بازیافت فلز، ارزان بودن و استفاده از مواد جاذب زیستی مانند جلبک طبیعی که به وفور یافت می‌شوند، اشاره کرد (۲،۳). سرب سمی‌ترین فلزی است که در پساب‌های صنعتی به‌عنوان آلاینده مهم و خطرناک در نظر گرفته می‌شود که از طریق خاک، هوا و آب یا پساب وارد یک محیط می‌شود (۴)، بنابراین پساب‌های صنعتی حاوی میزان بالایی ترکیبات سمی فلز سرب هستند (۵). سرب دارای عوارض گوناگونی مانند اختلال در سنتز هموگلوبین و فعالیت‌های کلیه، ایجاد اختلالات عصبی و رفتاری در کودکان، قولنج سربی، فلج عصبی، ورم کلیه، ایجاد گلبول قرمز هسته‌دار در خون، افزایش فشار اسیداوریک خون، نقرس سربی و نیز سقط-جنین می‌باشد (۶). منابع طبیعی سرب عبارتند از فرسایش خاک، فوران‌های آتشفشانی، اسپری‌های دریا و آتش‌سوزی. برخی از صنایع مانند صنایع فولاد و کارخانه-های باتری‌سازی، آب‌کاری، مهمات‌سازی، صنایع سرامیک و شیشه مهم‌ترین منابع آلودگی سرب می‌باشند. از طرف دیگر، غلظت بالای سرب موجود در اتمسفر همچنین منجر به خطرات پایدار برای سلامتی اکوسیستم‌های آبی و منابع خاک می‌شود (۷).

البته باید توجه داشت که غلظت سرب در پساب صنایع مختلف بسته به نوع فرآیندهای موجود در آن صنعت بسیار متفاوت است. تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با روش‌های حذف سرب مانند استخراج به کمک حلال، ترکیب شیمیایی، شناورسازی یونی، تبادل یونی، جذب روی جامداتی چون کربن فعال، اکسیدهای فلزی و خاک-رس صورت گرفته است (۵).

کشوادی و محمدی‌روزبهانی (۱۴۰۰) گزارش کردند که جلبک پادینا در اسیدیت ۶ به حداکثر برای جذب سرب می‌رسد. در بررسی نتایج مرتبط با زمان مشخص شد که برای جلبک بهترین زمان جذب در ۱۲۰ دقیقه بود. نتایج مقدار دوز جاذب نشان داد که جاذب زیستی جلبک پادینا در مقدار ۰/۱ گرم بر لیتر بیشترین مقدار جذب را دارند و در غلظت اولیه یون فلزی، بیشترین مقدار در مقدار ۱۰ گرم بر لیتر حاصل شد. نتایج مدل ایزوترم هم نشان داد که جذب سرب توسط جلبک پادینا با ایزوترم لانگمویر مطابقت دارد. همچنین مطابق نتایج، هر دو جذب از سینتیک درجه دوم تبعیت می‌کنند (۸). کارایی حذف فلز روی از شیرابه‌ی محل دفن زباله شهر همدان توسط جاذب پوست موز اصلاح‌شده توسط محلول اسیدی نشان داده، بیشترین کارایی حذف فلز روی (۹۲٪) توسط جاذب پوست میوه موز اصلاح‌شده در pH بهینه ۷، زمان تماس ۷۰ دقیقه، مقدار جاذب ۶ گرم بر لیتر و غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر رخ داد و حداکثر ظرفیت جذب جاذب نیز ۳۴ میلی‌گرم بر لیتر تعیین گردید (۹). در تحقیق دیگری چابکی و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند بازده ریزجلبک کلرلا ولگاریس در حذف نیتروژن، فسفر و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از فاضلاب‌های شهری به‌ترتیب ۵۲/۱۲، ۷۹/۱۳ و ۶۹/۶۳ درصد و برای فاضلاب صنعتی ۳۴، ۱۸/۵۰ و ۵۷/۶۶ درصد بوده است. بر اساس یافته‌ها، کارایی جلبک در حذف مقدار اکسیژن مورد نیاز شیمیایی بیشتر و برای نیتروژن کل کمتر از بقیه آلاینده‌ها بود. همچنین در فاضلاب شهری کمترین کارایی در حذف نیتروژن کل بود. کارایی جلبک در حذف آلاینده‌ها در فاضلاب صنعتی بهتر از فاضلاب شهری بود (۱۰).

می‌باشد و در شهرهای جنوبی و جنوب‌غربی مانند اهواز به‌وفور و با پتاسیل بالا وجود دارد، برگ آن به‌عنوان یکی از زائادات این صنعت به شمار می‌آید، بنابراین بازده و کارایی برگ گیاه نیشکر به‌عنوان جاذب زیستی قابل دسترس مورد مطالعه یون فلز سرب (II) از محلول‌های آبی بررسی شد.

روش کار

روش پژوهش

این پژوهش به روش تجربی - آزمایشگاهی بوده است که محلول‌های آلوده به یون سرب (II) جهت جذب بیولوژیکی با استفاده از برگ گیاه نیشکر، تحت شرایط مختلف در آزمایشگاه تخصصی محیط‌زیست واقع در منطقه‌ی ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر، ساخته شد. سپس میزان جذب یون فلزی سرب بعد از هر آزمایش به کمک دستگاه جذب اتمی در طول موج ۲۱۷ نانو متر اندازه‌گیری شد و تاثیر عوامل مختلف بر جذب مورد بررسی قرار گرفت. سپس میزان یون سرب (II) قرائت- شده توسط دستگاه جذب اتمی در هر یک از نمونه‌ها بر حسب درصد محاسبه و به‌طور جداگانه مورد تجزیه- و تحلیل قرار گرفت (۱۵).

نمونه‌برداری و آماده‌سازی جاذب

در این مطالعه برگ گیاه نیشکر، با مراجعه به مزارع نیشکر اهواز در فصل بهار تهیه و جمع‌آوری گردید. در ابتدا برگ گیاه نیشکر را با استفاده از قیچی به قطعات کوچکتر تقسیم نموده و به مدت چند روز در مکان مناسب جهت خشک‌شدن اولیه در دمای محیط قرار داده شد. سپس بیوجاذب به‌دست‌آمده، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و عمل خردسازی با استفاده از یک آسیاب صورت گرفت و سپس در هاون مناسب تمپر و به حالت پودر درآورده شد. بعد الک استاندارد بیوجاذب به اندازه ۰/۳-۰/۲ میلی‌متر برای استفاده در این پژوهش انتخاب گردید. در نهایت برگ گیاه نیشکر جهت محافظت از هرگونه آلودگی و خشک‌شدن درون دسیکاتور قرار گرفت (۱۵).

تاثیر خصوصیات پشم‌سنگ در جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی با استفاده از پسماند پشم‌سنگ نشان داد میزان جذب در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر محلول با اختلاف معنی‌داری بیشتر از سایر غلظت‌ها داشت و کم-ترین میزان در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. کم‌ترین میزان جذب نیکل با اختلاف معنی‌داری در زمان ۵ دقیقه و بیش‌ترین کارایی جذب در زمان ۹۰ دقیقه مشاهده شد. درصد جذب پسماند پشم‌سنگ در ۱۰ گرم در لیتر با اختلاف معنی‌داری بیشتر از دیگر مقادیر جاذب و کم‌ترین درصد جذب جاذب در ۱ گرم در لیتر مشاهده شد (۱۱). همچنین سنول و آرسلان‌گلو (۲۰۲۴)^۱ درمورد حذف یون سرب (II) توسط گیاه موسیر^۲ گزارش کردند که حداکثر ظرفیت جذب یون سرب (II) در pH برابر ۴/۵، غلظت اولیه یون سرب (II) ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان عملیات ۱۴۴۰ دقیقه، غلظت جاذب ۱۰ گرم و دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌دست آمد. داده‌های جذب توسط مدل ایزوترم فروندلیچ نشان‌دهنده‌ی برازش خوب است (۱۲). در مطالعه‌ی دیگری جذب سرب (II) از محلول آبی با استفاده از جاذب‌های زیستی مبتنی بر سلولز تهیه‌شده از ضایعات پوست نارس پاپایا^۳ نشان داد ایزوترم‌های جذب و سینتیک جذب سرب با استفاده از پوست پاپایای نارس از مدل‌های فروندلیچ و شبه مرتبه دوم پیروی کردند که نشان می‌دهد فرآیند جذب شیمیایی رخ داده است (۱۳) گیاه نیشکر^۴ نام یک گونه از سرده نیشکر، تیره غلات، راسته‌ی گندم‌سانان و بومی مناطق معتدل گرم تا مناطق حاره است. وجود رگبرگ‌های ضخیم و لبه‌های دندانه‌دار باعث شده تا این گیاه به‌راحتی در طبیعت قابل تشخیص باشد. برگ این نوع گونه از پهنک و غلاف تشکیل شده است و ساقه‌ها حاوی اسفنج سفید فیبری هستند که در آن شیرهی نیشکر قرار دارد (۱۴). با توجه به مطالب ذکرشده مطالعات متعددی درخصوص حذف فلزات سنگین از منابع آبی انجام شده است اما تاکنون بر روی برگ گیاه نیشکر تحقیقی صورت نگرفته، همچنین با توجه به این‌که نیشکر جز گیاهان بومی استان خوزستان



شکل ۱. مراحل انجام روند پژوهش

تحلیل داده ها

در پژوهش حاضر از آمار توصیفی برای تجزیه و تحلیل داده ها استفاده شد. جذب یون سرب (II) از محلول های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر نیز با استفاده از مدل های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ مورد بررسی قرار گرفت. نرم افزارهای مورد استفاده جهت تجزیه و تحلیل داده ها شامل نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ و اکسل نسخه ۲۰۱۰ و معادلات ایزوترم جذب بودند.

یافته ها

اثر زمان تماس

برای به دست آوردن زمان بهینه جذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، آزمایش ها در زمان های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش زمان، میزان درصد حذف و ظرفیت جذب افزایش خواهد یافت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، کمترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به زمان ۱۵ دقیقه (۳۴/۶ درصد) و بیشترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به زمان های ۱۰۵،

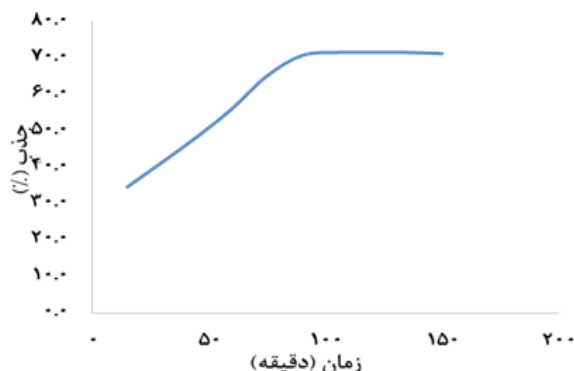
تهیه ی محلول سرب (II)

برای تهیه ی محلول اولیه سرب (II) با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در محیط آزمایشگاه، ۱/۵۶۹ گرم نمک استات سرب با خلوص ۹۹/۹ درصد با آب مقطر بدون یون به حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر رسانده شد (محلول مادر). همچنین به منظور تهیه غلظت های مورد بررسی، محلول های تهیه شده با استفاده از آب مقطر رقیق شدند (۱۶).

آزمایش ها

آزمایش های جذب در pH های مختلف ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹، زمان جذب از ۱۵ تا ۱۵۰ دقیقه به فاصله ۱۵ دقیقه یکبار با ۳ تکرار در هر زمان، مقادیر مختلف بیومس ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی گرم بر لیتر در هر کدام ۳ تکرار و غلظت اولیه سرب ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی گرم بر لیتر با ۳ تکرار در هر غلظت انجام گرفت. نمونه های ۲۰۰ میلی لیتری از محلول یون سرب (II) با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر در تماس با ۰/۱ گرم بر لیتر بیوجاذب برگ گیاه نیشکر، مطابق شرایط ذکر شده قرار داده شد، سپس pH نمونه ها بر روی pH خنثی تنظیم و از دستگاه همزن با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه، برای مخلوط کردن محلول ها و جاذب استفاده گردید. همچنین دمای دستگاه همزن بر روی ۲۵ درجه سانتی گراد تنظیم شد. در ادامه و پس از طی مدت زمان مورد بررسی برای هر نمونه، مخلوط، صاف شد و مقدار یون سرب (II) موجود در محلول زیر صافی به وسیله دستگاه جذب اتمی VARIAN مدل AA240 تعیین گردید (شکل ۱). طول موج دستگاه جذب اتمی برای اندازه گیری فلز سرب ۲۸۳ نانومتر بود. پس از تعیین زمان بهینه، در سایر آزمایشات زمان معادل زمان بهینه در نظر گرفته شد. سپس با تغییر دادن یکی از متغیرها و ثابت نگه داشتن سایر متغیرها، اثر متغیرهای مورد بررسی، مطالعه گردید (۱۷).

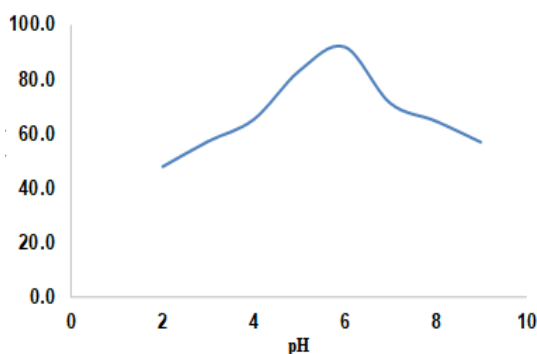
۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۵۰ دقیقه (۷۱/۵ درصد) می باشد (نمودار ۱).



نمودار ۱. بررسی اثر زمان بر میزان درصد جذب یون سرب (II) از محلول های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر

اثر تغییرات میزان pH

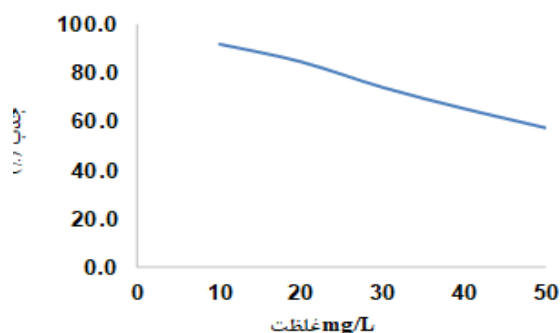
برای به دست آوردن pH بهینه جذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، آزمایش ها در pH های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش pH تا ۶، میزان درصد حذف و ظرفیت جذب افزایش خواهد یافت. پس از آن با افزایش pH، در pH های بالاتر از ۶، میزان درصد حذف و ظرفیت جذب کاهش خواهد یافت. همان طور که در نمودار ۲ مشاهده می شود کمترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به اسیدیته ۲، (۴۸ درصد) و بیشترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به اسیدیته ۶، (۹۲ درصد) به دست آمد. بیشترین مقدار ظرفیت جذب یون سرب (II) نیز، به میزان ۱۸/۴ میلی گرم بر گرم بود.



نمودار ۲. بررسی اثر pH بر میزان درصد جذب یون سرب (II) از محلول های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر

اثر غلظت اولیه سرب (II)

همانطور که در نمودار ۳ مشاهده می شود کمترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر (۵۷/۳ درصد) و بیشترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر (۹۲/۳ درصد) بود. بیشترین ظرفیت جذب یون سرب (II) مربوط به غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر و کمترین ظرفیت جذب یون سرب (II) مربوط به غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بر لیتر به دست آمد.



نمودار ۳. بررسی اثر تغییرات غلظت اولیه بر میزان درصد جذب یون سرب (II) از محلول های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر

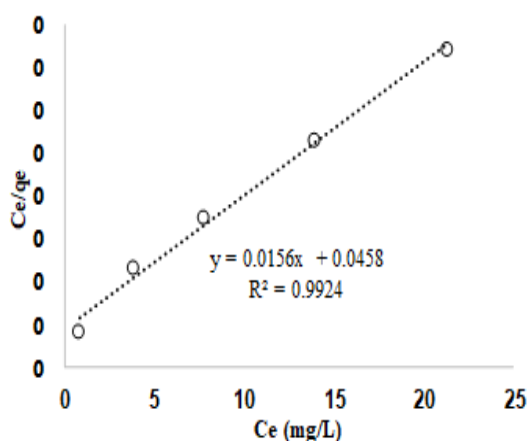
اثر تغییرات غلظت جاذب

همانطور که نمودار ۴ مشاهده می شود کمترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر از بیوجاذب (میزان ۹۰/۹ درصد) و بیشترین میزان درصد حذف یون سرب (II) مربوط به غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر از بیوجاذب برگ گیاه نیشکر (میزان ۹۹/۳ درصد) بود. همچنین بر اساس مطالعات تعادلی و نمودارهای ایزوترم جذب، بیشترین میزان ظرفیت جذب یون سرب (II)، مقدار ۱۸/۲۰ میلی گرم بر گرم به دست آمده است.

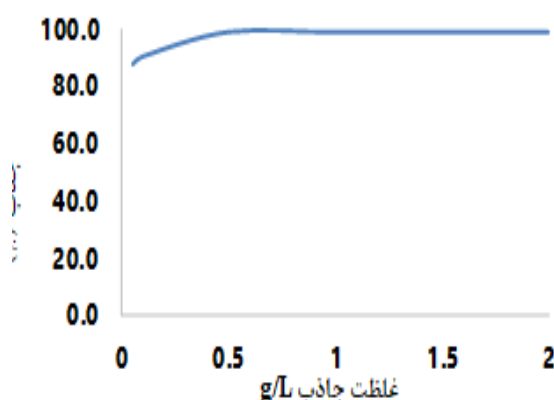
زمان تعادل برحسب میلی گرم بر گرم k و n ثابت‌های فروندلیچ می‌باشند که با رسم نمودار $\text{Log } q_e$ در مقابل $\text{Log } C_e$ به دست می‌آیند. مطالعات تعادلی در یک ارلن مایر به حجم ۲۰۰ سی سی حاوی ۱۰ سی سی غلظت اولیه‌ی هر یک از نمونه‌ها با مقدار اولیه‌ی جذب متفاوت (2 g/100 CC) و اسیدیته ۶، سپس نمونه‌ها جداسازی شده و آنالیز شد و ظرفیت جذب با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد (۱۸).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad \text{رابطه ۴}$$

q_e مقدار جز جذب شده در واحد جرم جسم جذب برحسب میلی گرم بر گرم، C_0 غلظت اولیه در محلول قبل از جذب سطحی بر حسب میلی گرم بر لیتر محلول، C_e غلظت تعادلی ماده جذب شدنی در محلول بعد از جذب سطحی بر حسب میلی گرم بر لیتر، V حجم محلول بر حسب لیتر و M جرم جذب بر حسب گرم می‌باشد. نتایج حاصل از رسم نمودار ۵ نشان دهنده این است که داده‌های تجربی جذب یون سرب (II) بر روی جذب گیاه نیشکر از رابطه‌ی خطی خاص این ایزوترم تقریباً به‌طور مناسبی پیروی می‌کند ($R^2 = 0.9924$).



نمودار ۵. مدل ایزوترم لانگمیر جذب یون سرب (II) از محلول‌های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر



نمودار ۴. بررسی اثر غلظت جاذب بر میزان درصد جذب یون سرب (II) از محلول‌های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر

مطالعات ایزوترم تعادلی

ایزوترم‌های جذب، معادلاتی برای تشریح حالت تعادل جزء جذب شونده بین فاز جامد و سیال می‌باشد. در این تحقیق داده‌های تجربی تعادل جذب با مدل‌های ایزوترم جذب فروندلیچ و لانگمیر مورد بررسی قرار گرفت. معادله خطی ایزوترم لانگمیر به صورت رابطه ۱ بود (۱۸):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K} + \frac{1}{q_m} C_e \quad \text{رابطه ۱}$$

q_e مقدار جزء جذب شده در واحد جرم جسم جذب برحسب میلی گرم بر گرم، C_e غلظت تعادلی ماده‌ی جذب شدنی در محلول بعد از جذب سطحی بر حسب میلی گرم بر لیتر، q_m نشان دهنده ظرفیت جذب و ثابت لانگمیر می‌باشند که از رسم نمودار در مقابل معادله خطی ایزوترم لانگمیر به دست می‌آیند. معادله ایزوترم جذب فروندلیچ به صورت رابطه‌ی ۲ و معادله‌ی خطی آن به صورت رابطه‌ی ۳ به دست آمد (۱۸):

$$q_e = k C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{رابطه ۳}$$

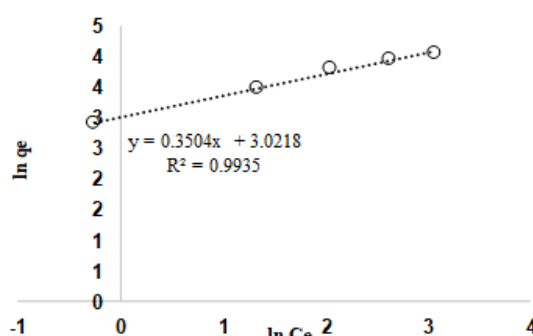
C_e غلظت تعادل میلی گرم در لیتر، q_e ظرفیت جذب در

در این پژوهش، پس از مدت زمان ۱۰۵ دقیقه فرآیند جذب به حالت تعادل رسیده و حداکثر ظرفیت جذب نیز به میزان ۷۱/۵۰ میلی گرم بر گرم به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که منحنی جذب یون بر حسب زمان تماس در فرآیند جذب به دو قسمت زمانی تقسیم می شود. در ابتدای تماس برگ گیاه نیشکر با محلول فلزی سرعت جذب یون فلزی بالا است، که این امر را می توان به فراوانی جایگاه های فعال در دسترس در ابتدای فرآیند جذب نسبت داد. با گذشت زمان و پرشدن جایگاه های جذبی موجود بر روی سطح برگ گیاه نیشکر این فرآیند کندتر می شود و در نهایت تقریباً به مقدار ثابتی میل می کند به طوری که گذشت بیشتر زمان تاثیر چندانی روی بالا رفتن مقدار جذب ندارد (۲۰). زمان تماس یک فاکتور بسیار مهم برای کسب موفقیت در کاربرد عملی یک جاذب و بیانگر سرعت جذب فلزات است (۱۵).

در این پژوهش با افزایش pH تا ۶، میزان درصد حذف و ظرفیت جذب افزایش خواهد یافت. پس از آن با افزایش pH در pH های بالاتر از ۶، میزان درصد حذف و ظرفیت جذب کاهش خواهد یافت. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در فرآیند جذب زیستی، pH است (۹). تغییرات pH بر فعالیت شیمیایی یون های فلزی موجود در محلول و همچنین فعالیت گروه های پایه در سطح بیومس و رقابت یون های فلزی با یکدیگر بسیار موثر است (۱۲). در pH های اسیدی رقابتی بین یون های H^+ موجود در محیط و یون های Pb^{2+} برای جذب شدن بر روی جاذب وجود دارد و باعث کاهش مقادیر جذب می گردد. با افزایش pH، به علت افزایش OH^- در محیط، بازده و ظرفیت جذب کاتیون های Pb^{2+} افزایش می یابد. در pH های بالاتر از ۶، مجموعه های هیدروکسلی قابل حل $Pb(OH)^+$ تشکیل شده و باعث کاهش جذب سرب توسط بیوجاذب برگ گیاه نیشکر می گردد (۵، ۲۱). در تحقیقی در بررسی حذف سرب (II) با استفاده از بیومس آرولا فیلیکولیدس از فاضلاب سنتتیک گزارش شد که بیشترین میزان حذف سرب در pH برابر با ۶ بوده است (۲۲) که با نتایج این تحقیق هم خوانی دارد.

بیشترین ظرفیت جذب یون سرب (II) مربوط به غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر و کمترین ظرفیت جذب یون

برای بررسی مدل ایزوترم فروندلیچ $\log q_e$ بر حسب $\log C_e$ رسم گردید که در نمودار ۶ ارائه شده است. همان طور که در نمودار ۶ مشاهده می گردد، مقدار مناسب $R^2 = 0.9935$ بیانگر این امر است که جذب یون سرب (II) بر روی جاذب برگ گیاه نیشکر از رابطه خطی خاص این ایزوترم به خوبی پیروی می کند. با توجه به نتایج ارائه شده در بررسی تاثیر میزان متغیر غلظت و مقایسه مدل های هم دمایی لانگمویر و فروندلیچ، مقدار ثابت لانگمویر (R^2) در مدل لانگمویر به مقدار ۰/۹۹۲۴ در مقایسه با مقدار ثابت فروندلیچ (R^2) در مدل فروندلیچ به مقدار ۰/۹۹۳۵ مکانیسم جذب یون سرب (II) بر روی جاذب گیاه نیشکر با مدل فروندلیچ بیشتر هم خوانی دارد.



نمودار ۶. مدل ایزوترم فروندلیچ جذب یون سرب (II) از محلول های آبی با استفاده از برگ گیاه نیشکر

بحث

خطر پساب های حاوی فلزات سنگین، یکی از مهم ترین مشکلات زیست محیطی در سراسر جهان می باشد. به منظور پاسخگویی به مقررات شدید زیست محیطی، طیف وسیعی از تکنولوژی ها مانند ته نشینی شیمیایی، انعقاد و لخته سازی تصفیه الکتروشیمیایی، تبادل یونی و فرآیندهای غشایی، برای حذف فلزات سنگین از پساب ها توسعه یافته اند. بر این اساس، بررسی های انجام شده تبادل یونی، جذب سطحی و فرآیندهای غشایی بیشتر از سایر فرآیندهای متداول، به منظور عملیات حذف فلزات سنگین از پساب ها، مورد مطالعه قرار گرفته اند. اما در مورد جذب زیستی باید گفت که این روش به عنوان یک روش موثر و اقتصادی برای پساب های حاوی فلزات سنگین با غلظت های پایین، می باشد (۱۹).

سرب (II) مربوط به غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بر لیتر به دست آمد. در بررسی اثر غلظت اولیه محلول، ابتدا با افزایش غلظت به دلیل افزایش تعداد برخورد یون‌های فلزی سرب با بیوجاذب برگ گیاه نیشکر، یون‌های بیشتری از محلول حذف می‌گردد، اما با ادامه روند افزایش غلظت به دلیل افزایش یون‌های سرب در حال رقابت برای واکنش با گروه‌های فعال سطحی و در نهایت کاهش مکان‌های فعال سطحی و اشباع شدن آن‌ها درصد حذف کاهش و میزان ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. در واقع غلظت اولیه محلول سرب با درصد حذف نسبت معکوس دارد و با افزایش غلظت اولیه، درصد حذف کاهش یافته است. این پدیده به این دلیل است که در غلظت‌های کم نسبت سطح قابل دسترس به غلظت اولیه محلول یون‌های سرب بالا می‌باشد، بنابراین درصد حذف نیز بالا خواهد بود، اما در مورد غلظت‌های بالا برعکس است، زیرا این نسبت کاهش یافته لذا درصد حذف هم به تبع آن کاهش یافته است (۵، ۱۵). جذب و حذف یون‌های فلزات سنگین توسط جاذب‌های گیاهی به میزان زیادی وابسته به غلظت اولیه یون‌های فلزات در محلول می‌باشد. غلظت ابتدایی یون فلزی یکی از عوامل مهم در جذب زیستی فلزات سنگین به شمار می‌آید. با افزایش غلظت یون فلزی، درصد حذف کاهش و ظرفیت جذب افزایش می‌یابد (۱۸).

در بررسی غلظت اولیه محلول، ابتدا با افزایش غلظت به دلیل افزایش تعداد برخورد یون‌های فلزی سرب با جاذب زیستی نیشکر، یون‌های بیشتری از محلول حذف می‌گردد اما با ادامه روند افزایش غلظت به دلیل افزایش یون‌های سرب در حال رقابت برای واکنش با گروه‌های فعال سطحی و در نهایت کاهش مکان‌های فعال سطحی و اشباع شدن آن‌ها درصد حذف، کاهش و میزان ظرفیت جذب، افزایش می‌یابد.

در واقع غلظت اولیه محلول سرب با درصد حذف نسبت معکوس دارد و با افزایش غلظت اولیه، درصد حذف کاهش یافته است. این پدیده به این دلیل است که در غلظت‌های

نسبت سطح قابل دسترس به غلظت اولیه محلول یون‌های سرب بالا است، بنابراین درصد حذف نیز بالا خواهد بود، اما در مورد غلظت‌های زیاد برعکس می‌شود زیرا این نسبت کاهش یافته، لذا درصد حذف هم به تبع آن کاهش یافته است (۵، ۱۵). با افزایش جرم جاذب، نواحی سطحی بیشتری از جاذب در دسترس قرار می‌گیرد و تعداد جایگاه‌های فعال جذب در محلول افزایش یافته و در نتیجه راندمان حذف یون سرب افزایش می‌یابد. علت کاهش ظرفیت جذب این است که با افزایش جرم جاذب در محلول، برخی از جایگاه‌های فعال جذب به دلیل موانع فیزیکی و فضایی مسدود شده و جایگاه‌های فعال جذب در دسترس کاهش می‌یابد (۱۸). افشارنیا و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی حذف سرب از محلول آبی سنتیک به وسیله‌ی خاکستر پسماند غذایی نشان دادند که افزایش غلظت اولیه سرب راندمان حذف را کاهش می‌دهد. راندمان حذف سرب به وسیله خاکستر پسماند مواد غذایی با افزایش pH و دما، افزایش می‌یابد (۲۳) که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد.

در این پژوهش پس از مدت زمان ۱۰۵ دقیقه فرآیند جذب به حالت تعادل رسید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که منحنی جذب یون بر حسب زمان تماس در فرآیند جذب به دو قسمت زمانی تقسیم می‌شود. در ابتدای تماس برگ گیاه نیشکر با محلول فلزی سرعت جذب یون فلزی بالا است که این امر را می‌توان به فراوانی جایگاه‌های فعال در دسترس در ابتدای فرآیند جذب نسبت داد (۱۸). با گذشت زمان و پر شدن جایگاه‌های جذبی موجود بر روی سطح جاذب این فرایند کندتر می‌شود و در نهایت تقریباً به مقدار ثابتی میل می‌کند به طوری که گذشت بیشتر زمان تاخیر چندانی روی بالارفتن مقدار جذب ندارد (۱۵). در تحقیقی حداکثر حذف فلز سنگین سرب در غلظت ۲ گرم بر لیتر اسپیرولینا و غلظت سرب ۲۰ میلی گرم بر لیتر در مدت زمان تماس ۱۸۰ دقیقه به میزان ۸۱/۳۳ درصد بوده است (۲۴).

هم‌چنین در بررسی راندمان حذف سرب از محلول‌های

آبی توسط ریز جلبک کتوسروس و کلرلا نیز نتایج مشابهی گزارش شده است، به طوری که میزان حذف فلز سرب توسط دو جلبک کلرلا و کتوسروس به ترتیب ۷۸ و ۶۰ درصد بود (۲۵) که با نتایج این تحقیق هم خوانی دارد.

پدیده جذب یون سرب با استفاده از بیوجاذب برگیه نیشکر با مدل فروندلیچ هم خوانی بیشتری داشت و داده های تجربی جذب یون سرب (II) بر روی جاذب گیاه نیشکر از رابطه ی خطی خاص ایزوترم لانگمویر تقریباً به طور مناسبی پیروی می کند. مولزاده و همکاران (۲۰۱۵) نیز در خصوص بررسی راندمان حذف سرب از محلول های آبی توسط ریز جلبک کتوسروس و کلرلا نیز به همین نتایج دست پیدا کردند (۲۵). با افزایش میزان جاذب برگ گیاه نیشکر درصد حذف یون سرب از محلول آبی افزایش و ظرفیت جذب کاهش یافت. صنعتی و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی حذف سرب از محلول های آبی با استفاده از خاکستر برگ نخل در سیستم جذب ناپیوسته نیز به همین نتیجه دست پیدا کردند (۲۶). با توجه به این که افزایش در غلظت زیست توده، جذب یون فلزی را در هر گرم از زیست توده کاهش می دهد، یا به عبارتی موجب کاهش ظرفیت جذب و افزایش درصد حذف می شود. با افزایش جرم جاذب، نواحی سطحی بیشتری از جاذب در دسترس قرار می گیرد و تعداد جایگاه های فعال جذب در محلول افزایش یافته و در نتیجه راندمان حذف یون سرب افزایش می یابد. علت کاهش ظرفیت جذب این است که با افزایش جرم جاذب در محلول، برخی از جایگاه های فعال جذب به دلیل موانع فیزیکی و فضایی مسدود شده و جایگاه های فعال جذب در دسترس کاهش می یابد (۱۸). در تحقیقی در مورد جذب بیولوژیکی فلز سنگین سرب توسط ریزجلبک اسپیرولینا از محلول های آبی نتایج نشان داد که ایزوترم لانگمویر برای فلز سرب، بهتر از سایر مدل ها می تواند داده های آزمایشی را برازش کند (۲۴) که با نتایج این تحقیق هم خوانی ندارد. همچنین با بررسی نتایج به دست آمده مشخص شد ظرفیت جذب خاکستر پسماند مواد غذایی نسبت به بسیاری از جاذب های مطالعه شده بیشتر بوده و فرآیند به طور قابل قبولی از ایزوترم فروندلیچ تبعیت می کند (۲۳) که با نتایج این تحقیق هم خوانی دارد. در تحقیق دیگری گزارش شده است جذب فلز سرب توسط

جلبک کلرلا از مدل ایزوترم جذب لانگمویر و جلبک کتوسروس از مدل فروندلیچ تبعیت می نماید (۲۵). ایزوترم جذب یکی از فاکتورهای مهم در طراحی سیستم های جذب می باشد. در واقع ایزوترم جذب چگونگی فعل و انفعال بین جاذب و جسم جذب شونده را تشریح می کند. لذا همواره به عنوان یک فاکتور اساسی جهت تعیین ظرفیت یک جاذب و بهینه نمودن مصرف جاذب مدنظر می باشد (۱۸).

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از برگ گیاه نیشکر به عنوان یک جاذب بیولوژیکی، توانایی بسیار بالایی در جذب یون سرب (II) از محلول های آبی را دارد. علاوه بر این در کنار مزایایی از قبیل پایین بودن هزینه ی بهره برداری، عدم نیاز به نیروی متخصص، در دسترس بودن، کارایی بالا در حذف فلزات از محیط های آبی و قابلیت بازیابی مجدد فلزات بیش از پیش مورد توجه واقع شده اند. بیومس برگ گیاه نیشکر به عنوان یک جاذب ارزان و با امکان آماده سازی در شرایط مختلف می تواند به عنوان یک جاذب در حذف یون سرب (II) از محلول های آبی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می گردد پژوهشگران اندازه ذرات بیوجاذب برگ گیاه نیشکر بر میزان حذف یون سرب (II) و اثر دانه بندی جاذب بر میزان جذب و همچنین استفاده از دیگر عناصر سنگین فلزی در جذب زیستی و مقایسه بیشینه جذب با گونه ی استفاده شده در این مطالعه را بررسی و مطالعه نمایند. از سوی دیگر بازنگری و بروزرسانی نقشه های واحد صنعتی جهت طراحی و ایجاد بسترهای نگهدارنده حاوی نیشکر و عبور دادن فاضلاب های آلوده به سرب از روی آن، استفاده از جاذب برگ گیاه نیشکر به عنوان انتخاب جایگزین کربن فعال تجاری در حذف سرب در تصفیه خانه های صنعتی و انجام طرح در مناطق صنعتی دارای پساب صنعتی حاوی یون سرب (II) توصیه می گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی را از معاونت پژوهشی دانشگاه اعلام می نمایند. شایان ذکر است با توجه به نوع روش این مطالعه در رابطه با حقوق مادی و معنوی جوامع انسانی و آسیب های وارده به حیات وحش هیچ گونه نقشی وجود نداشته است.

علوم و مهندسی محیط‌زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می‌باشد که با کد ۱۰۶۱۲۹۰۴۱۳۱۹۸۰۷۲۱۹۰۲۶۱۶۲۷ در سامانه پژوهشیار ثبت شده است. نویسندگان ۷۰۶۰۵ تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دواگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند

References

1. Akpor, O.B., Ohiobor, G.O. and Olaolu, D.T., 2014. Heavy metal pollutants in wastewater effluents: sources, effects and remediation. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 2(4), pp. 37-43. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20140204.11>
2. Samimi, M. and Shahriari-Moghadam, M. 2024. Bioaccumulation Efficiency Comparison of Heavy Metals in *Verbascum speciosum*, *Acantholimon hohenackeri*, *Acanthophyllum microcephalum*, and *Euphorbia macroclada*, Grown Around Lead and Zinc Mines. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 9(4), pp. 349-360. [In Persian].
3. Tripathi, A. and Ranjan, M.R., 2015. Heavy metal removal from wastewater using low cost adsorbents. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 6(6), p.315. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000315>
4. Hosseinniaee, S., Jafari, M., Tavili, A. and Zare, S. 2024. Evaluation of the Effect of Municipal Waste Compost in Reducing Lead Accumulation in Animal Diet and Organs. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 9(4), pp. 387-402. [In Persian].
5. Dongre, R.S. and Gedam, A. 2019. Comparative study of sponge gourd derived biochar and activated carbon for bio-sorption and desorption of Pb(II) ions. *Materials Today: Proceedings*, 18(1), pp. 887-900. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.521>
6. Adhikari, N., Sinha, N., Narayan, R. and Saxena, D.K., 2001. Lead-induced cell death in testes of young rats. *Journal of Applied Toxicology: An International Journal*, 21(4),

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی

نویسندگان مقاله در راستای کمک های مالی تشکر و قدردانی خود را از مدیریت و معاونت پژوهشی و همکاران محترم این دانشگاه اعلام می نمایند.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله حاصل پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد گروه

pp. 275-277. <https://doi.org/10.1002/jat.754> PMID:11481659

7. Acharya, J., Kumar, U. and Meikap, B.C., 2013. Thermodynamic characterization of adsorption of lead (II) ions on activated carbon developed from tamarind wood from aqueous solution. *South African Journal of Chemical Engineering*, 18(1), pp. 70-76. DOI: <https://hdl.handle.net/10520/EJC145862>.

8. Keshvadi, N. and Mohammadi Roozbahani, M., 2021. Investigation of the Biosorption of Lead (II) from Aqueous Solutions using *Algae Padina australis*. *Journal of Neyshabur University Medical Science*, 9 (2), pp. 81-94. [In Persian].

9. Bahiraei, M., 2023. Investigation of removal of Zinc Metal from leachate Using Modified Banana Skin adsorbent. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 9(2), pp. 133-145. [In Persian].

10. Chaboki, M.J., Najafpoor, A.A., Bonyadi, Z. and Dehghan, A., 2022. Efficiency investigation of *Chlorella vulgaris* algae in removal of nitrogen, phosphorus and chemical oxygen demand from municipal and industrial wastewaters. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 8(1), pp. 59-67. [In Persian].

11. Abolhasani, M.H., Pirestani, N. and Eslami, A., 2021. Survey of Nickel (II) Adsorption in Aqueous Solutions Using Rock Wool Waste. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 6(4), pp. 346-359. [In Persian].

12. Senol, Z.M. and Arslanoglu, H., 2024. Influential biosorption of lead ions from aqueous solution using sand leek (*Allium scorodoprasum* L.) biomass: kinetic and isotherm study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05539-9>
13. Jaihan, W., Mohdee, V., Sanongraj, S., Pancharoen, U. and Nootong, K., 2022. Biosorption of lead (II) from aqueous solution using Cellulose-based Bio-adsorbents prepared from unripe papaya (*Carica papaya*) peel waste: Removal Efficiency, Thermodynamics, kinetics and isotherm analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(7), pp. 103883. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103883>
14. Ekpelikpeze, O.S., Agre, P., Dossou-Aminon, I., Adjatin, A., Dassou, A. and Dansi, A., 2016. Characterization of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivars of Republic of Benin. *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*, 3(5), pp. 147-156. <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2016.305.023>
15. Naddafi, K., Nabizadeh, R., Saeedi, R., Mahvi, A.H., Vaezi, F., Yaghmaeian, K., Ghasri, A. and Nazmara, S., 2007. Biosorption of lead (II) and cadmium (II) by protonated *Sargassum glaucescens* biomass in a continuous packed bed column. *Journal of hazardous materials*, 147(3), pp. 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.122> PMID:17879424
16. Fraji, S., Mohamadi Sani, A., Tajali, F.R., Alizadeh Golestani, H.A.H., Vaezi, F., Yaghmaeian, K., Ghasri, A. and Nazmara S., 2017. Elimination of lead using adsorption by pear peel. *Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (4), pp. 51-59. [In Persian].
17. Sheng, P.X., Ting, Y.P., Chen, J.P. and Hong, L., 2004. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *Journal of Colloid and Interface Science*, 275(1), pp. 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.01.036> PMID:15158390
18. Panday, K.K., Prasad, G. and Singh, V.N., 1986. Use of wollastonite for the treatment of Cu (II) rich effluents. *Water, Air, and Soil Pollution*, 27, pp. 287-296. <https://doi.org/10.1007/BF00649410>
19. Davis, T.A., Volesky, B. and Mucci, A., 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water research*, 37(18), pp. 4311-4330. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00293-8) PMID:14511701
20. da Costa, A.C.A. and Leite, S.G.F., 1991. Metals biosorption by sodium alginate immobilized *Chlorella homosphaera* cells. *Biotechnology Letters*, 13, pp. 559-562. <https://doi.org/10.1007/BF01033409>

21. Vijayaraghavan, K., Jegan, J., Palanivelu, K. and Velan, M., 2004. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution using crab shell particles in a packed bed up-flow column. *Journal of hazardous materials*, 113(1-3), pp. 223-230
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.014> PMID:15363535
22. Balarak, D., Bazrafshan, E. and Kord Mostafapour, F., 2015. Investigation of Pb(II) Removal from Synthetic Wastewater by Using Azolla Filiculoides Biomass. *Journal of Environmental Healyh Engineering*, 2 (3), pp. 224-237. [In Persian].
<https://doi.org/10.18869/acadpub.jehe.2.3.224>
23. Afsharnia, M., Shams, M., Sajjadi, S. and Qasemi, M., 2016. Lead (Pb²⁺) Removal from Synthetic Aqueous Solution Using Food Waste Ash. *Toloo-e-Behdasht*, 15(4), pp. 12-21 [In Persian].
24. Izadi, S. and Sadeghi, M., 2023. Biosorption of lead heavy metal from aqueous solutions using spirulina microalgae. *Journal of Oceanography*, 13(52), pp. 48-63. [In Persian].
25. Molazadeh, P., Khanjani, N., Rahimi, M.R. and Nasiri, A., 2015. Adsorption of Lead by Microalgae *Chaetoceros* Sp. and *Chlorella* Sp. from Aqueous Solution. *Journal of Community Health Research*, 4 (2), pp. 114-127. [In Persian].
26. Sanati, A., Bahramifar, N., Mehraban, Z. and Younesi, H., 2014. Lead removal from aqueous solution using date-palm leaf ash in batch system. *Journal of Water and Wastewater*, 25(4), pp. 51-58. [In Persian].

