Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

Removal of lead ions from aqueous solutions by adsorption operation: A review

Ehsan Salehi [1,*], Mohsen Goodarzi [2], Hamidreza Sanaeepur [3], Einallah Khademian [4]

1,2,3- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak 38156-8-8349, Iran
4-Faculty of Petrochemical Engineering, Amirkabir University of Technology, Mahshahr, 6351-7-13178, Iran
1-Ph.D., Associate Professor of Chemical Engineering
2-M.Sc. Student of Chemical Engineering
3-Ph.D., Assistant Professor of Chemical Engineering
4- M.Sc. of Chemical Engineering

Abstract

Research Subject: In this paper, the adsorbents used to remove lead ion using adsorption operation have been reviewed.

Research Approach: The types of adsorbents used to remove lead ions, the modifications of adsorbents, adsorption conditions, isotherms and adsorption capacity of adsorbents have been investigated and compared based on the literature survey.

Main Results: Modification by impregnation of functional groups has a significant role in increasing the adsorption capacity. The pH of the solution plays an important role in the adsorption of lead ions and generally the adsorption capacity increases by increasing the pH of the solution. Langmuir's isotherm model has been more consistent with the equilibrium data. Among the reviewed adsorbents, carbon-based adsorbents such as activated carbon and graphen-oxide, modified by chemicals such as ammonium persulfate or polyamines, show higher adsorption. Also, biomasses due to their abundance and low prices have the potential to be used as lead ion adsorbents.

Keywords

Lead
Adsorption
Adsorbent
Modification

*To whom correspondence should be addressed:
e-salehi@araku.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

پژوهش‌های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای
سال سوم، شماره ۱، نسخه۱،
بهار ۱۳۹۸، صفحه ۲۸-۳

مروری بر حذف یون سرب از محلول‌های آبی با عملیات جذب سطحی

احسان صالحی [1*]، محسن گودرزی [2]، حمیدرضا سنایی‌پور [3]، عین‌اله خادمیان [4]

۱- اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشیار مهندس شیمی، کد پستی ۳۸۱۵۶-۸-۸۳۴۹
۲- اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی
۳- اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، استادیار مهندسی شیمی
٤- ماهشهر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پتروشیمی، کارشناسی ارشد مهندسی شیمی
کد پستی ۱۳۱۷۸-۷-۶۳۵۱

چکیده

در این مقاله، جاذب های مورد استفاده برای حذف یون سرب با استفاده از عملیات جذب سطحی مرور شده است.

انواع جاذب‌های مورد استفاده برای حذف یون سرب، اصلاح خواص انجام شده روی آن ها، شرایط عملیاتی جذب، همدماها و ظرفیت جذب جاذب ها با مرور مقالات بررسی و مقایسه شده است.

اصلاح جاذب‌ها به روش تلقیح گروه‌های عاملی نقش موثری در افزایش ظرفیت جذب دارد. pH محلول نقش مهمی در جذب یون سرب دارد و عموما با افزایش pH محلول، ظرفیت جذب افزایش می یابد. مدل همدمای لانگمویر تطابق بیشتری با داده‌های تعادلی جذب داشته است. در بین جاذب‌های مرور شده، جاذب‌های پایه کربنی مثل کربن فعال و اکسیدگرافن که توسط مواد شیمیایی مثل آمونیوم پرسولفات یا پلی‌آمین‌ها اصلاح شده‌اند، ظرفیت جذب بیشتری دارند. زیست‌توده‌ها نیز به علت فراوانی و قیمت ناچیز، قابلیت استفاده به‌عنوان جاذب یون سرب را دارند.

واژه‌های کلیدی

سرب
جذب سطحی
جاذب
اصلاح خواص جاذب

* **مسئول مکاتبات:**
e-salehi@araku.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

۱ مقدمه

امروزه به‌دلیل فعالیت‌های فزاینده‌ی کشورها در عرصه‌های متنوع صنعتی، کشاورزی و فناوری، انسان‌ها بیشتر از گذشته در معرض آلاینده‌های فلزات سنگین قرار گرفته‌اند [۱]. فلزات سنگین مانند مس، سرب، روی، کادمیوم و نیکل از شایع‌ترین آلاینده‌های موجود در پساب‌های صنعتی است. حتی مقادیر کم این فلزات می‌تواند برای انسان و محیط‌زیست سمی باشد [۲]. به‌دلیل تخلیه مقادیر زیادی از آلاینده‌های فلزی، فاضلاب‌های صنعتی در محیط و با توجه به اینکه حلالیت یون‌های این فلزات در محیط‌های آبی بسیار زیاد است، این مواد توسط اندام‌های موجودات زنده جذب می‌شوند و خطری جدی برای آن‌ها محسوب می‌شود [۳]. پساب‌های حاصل از فعالیت صنایع متنوع از جمله الکترونیک، آبکاری فلزات و عملیات‌های متالوژیکی، سالانه حجم زیادی از یون‌های فلزات سنگین را وارد طبیعت می‌کند. یون سرب یکی از انواع آلاینده‌هاست که به دلیل گستردگی منابع تولید آن، امروزه به نحو فزاینده‌ای در محیط‌زیست پراکنده شده است. این یون می‌تواند حاصل فعالیت صنایع باتری‌سازی، رنگ، نفت، الکترونیک و حتی تولید چوب و سوختن سوخت‌های فسیلی باشد. یون سرب در تولید بسیاری از محصولات از جمله کارد و چنگال و لوله‌ها از زمان رم باستان مورد استفاده قرار گرفته است؛ زیرا سرب به‌دلیل داشتن نقطه ذوب پایین و خاصیت چکش‌خواری می‌تواند به‌راحتی شکل‌دهی و برای موارد مختلف مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، موارد گزارش شده از مسمومیت با سرب به تدریج از دهه ۱۹۷۰ افزایش یافته است. اخیراً، ارتباط بین میزان بالای یون سرب در خون افراد و کار در معادن به عنوان مشکلی جدی مطرح شده است. حساسیت سرب در کودکان بسیار بالاتر از افراد بالغ است؛ زیرا ۴۰ درصد از سرب وارد شده به بدن کودک جذب اندام‌های خاص شده و سبب اختلال در رشد کودک، کاهش هوش، ناتوانی در یادگیری و افزایش احتمال بروز بیماری‌های قلبی و عروقی می‌شود [٤]. سرب، فلزی خاکستری رنگ با نماد Pb، عدد اتمی ۸۲ و جرم اتمی ۲۰۷/۲ g/mol است که در جدول تناوبی جزء عناصر واسطه به‌حساب می‌آید. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تماس و حتی به‌طور طولانی‌مدت در معرض این آلاینده قرار گرفتن می‌تواند بر عملکرد خون، کلیه، کبد و مغز انسان تأثیرگذار باشد. تقریباً ٤۰ تا ۵۰ درصد سرب ورودی از طریق بینی، جذب ریه می‌شود [۵]. این یون تمایل زیادی به واکنش با آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و زیست‌ملکول‌هایی دارد که حاوی گروه‌های فسفاته و تیول هستند. بنابراین به‌واسطه ترکیب با آن‌ها می‌تواند باعث تغییر تراوایی غشای کلیوی، کبد و حتی سلول‌های مغزی شود [٦]. بنابراین حذف این آلاینده از منابع آبی، موضوعی حیاتی است. حداکثر میزان مجاز یون سرب در آب آشامیدنی ۰/۰۱ mg/L [۷] و همچنین در فاضلاب (پساب) ۰/۱ mg/L است [۸].

روش‌های حذف فلزات سنگین عبارتند از رسوب، جذب سطحی، تبادل یونی، الکترودیالیز و فرایندهای غشایی [۹]. یکی از روش‌های مورد استفاده برای حذف آلاینده سرب، روش رسوب دادن است. البته از معایب این روش می‌توان به گران بودن آن و همچنین تولید مقادیر زیادی رسوب اشاره کرد که خود این رسوب‌ها باید با روش‌های دیگر، جداسازی شوند [۱۰]. بنابراین پیدا کردن روش‌های دیگری که هم با محیط‌زیست سازگارتر بوده و هم کارامد و اقتصادی باشند اهمیت زیادی دارد. روش‌هایی مانند صافش غشایی، جذب سطحی و تبادل یونی از جمله موضوعات مورد علاقه پژوهشگران در این زمینه است [۳, ۱۱]. در این میان، جذب سطحی روشی است که عملیاتی ساده، ارزان و کارآمد دارد. جذب سطحی فرایندی با پیش‌زمینه علمی و تجربی بسیار غنی و از نظر عملیاتی بسیار انعطاف‌پذیر در بهره‌برداری و طراحی است. در فرایند جذب سطحی، جاذب‌ها را می‌توان با استفاده از سازوکارهای ساده انتقال حرارتی (گرماگیری) یا احیاناً شست‌وشوی شیمیایی، احیاء (فروشویی) و دوباره از جاذب استفاده

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

کرد [۱۲]. احیاپذیری و قابلیت استفاده مجدد، فرایندهای جذب سطحی را از دیدگاه اقتصادی مقرون به‌صرفه و توجیه‌پذیر می‌کند. در چند سال گذشته، پیشرفت‌های زیادی برای بهبود عملکرد جذب سطحی صورت گرفته است که از آن جمله به توسعه‌ی جاذب‌های متنوع برای حذف یون سرب می‌توان اشاره کرد. در این مقاله، جاذب‌های مختلف و پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه بررسی خواهد شد.

۲ انواع مواد جاذب برای حذف یون سرب

معمولاً جاذب‌ها را به پنج دسته طبقه‌بندی می‌کنند [۱۳]:

۱) مواد طبیعی مثل خاک اره، چوب و بوکسیت

۲) مواد طبیعی فرآوری شده با هدف توسعه خواص و ساختار آن‌ها مثل کربن فعال، آلومینای فعال یا سیلیکاژل

۳) مواد سنتزی از قبیل رزین‌های پلیمری، زئولیت‌ها یا آلومینوسیلیکات‌ها

٤) ضایعات جامد کشاورزی و محصولات جانبی صنعتی مثل گِل سرخ، ذرات خاکستر (Fly ash)

۵) زیست‌توده‌ها از قبیل کیتوسان، قارچ، زیست‌توده باکتریایی

دسته‌بندی دیگر جاذب‌ها توسط دابروسکی [١٤] ارائه شده است که در جدول ۱ آورده شده است:

۲-۱-۱ کربن فعال

کربن فعال به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب از جمله ساختار متخلخل با سطح داخلی بسیار زیاد، ظرفیت جذب فراوان و دارا بودن سایت‌های جذب متنوع، به‌عنوان یکی از جاذب‌های ایده‌آل برای حذف انواع آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵-۱۷]. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کربن فعال، متأثر از عواملی مانند فرایند تولید، ماده اولیه‌ای که کربن از آن تولید شده (پیش‌ساز) و همچنین نحوه‌ی فعال‌سازی است [۱۸, ۱۹]. برخی از روش‌های اصلاحی برای بهبود خواص کربن فعال، عبارتند از فرایند پلاسما، فرایند اسیدشویی/بازشویی، رسوب شیمیایی و پرتوافکنی با اشعه مایکروویو [۲۰].

برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی، طیف گسترده‌ای از پیش‌سازها، روش‌های تولید و فعال‌سازی به کار گرفته شده است. هسته‌ی زردآلو [۲۱]، چوب بامبو [۲۲]، لاستیک مستعمل [۲۳]، پوست انبه [٢٤]، پوست موز [۲۵]، خاک اره [٢٦]، استخوان گاو [۲۷]، انواع دانه‌ها [۲۸]، گیاهان [۲۹, ۳۰] و تفاله‌های آن‌ها [۱۲, ۳۱, ۳۲] برای ساخت کربن فعالِ مورد استفاده در جذب یون سرب استفاده شده‌اند. این مواد پس از خرد شدن، در دماهای زیاد تبدیل به کربن می‌شوند. برای فعال‌سازی کربن و ایجاد گروه‌های عاملی مختلف بر سطوح آن، از مواد و روش‌های مختلفی استفاده شده است. گاهی پیش از بالا بردن دما، ماده اولیه را در محلول اسیدی [۳۳] یا بازی قرار می‌دهند و گاهی پس از بالا بردن دما اقدام به فعال‌سازی با اسید و باز می‌کنند. با استفاده از آزمون FT-IR مشخص شده که بر اثر فعال‌سازی، گروه‌های عاملی مختلفی همچون

جدول ۱ جاذب‌های پرکاربرد در صنعت [١٤]

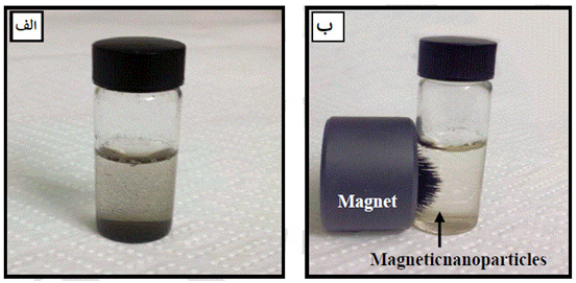
Table1 More common Industrial Adsorbents

جاذب‌های پایه کربنی	جاذب‌های معدنی	دیگر جاذب‌ها
کربن فعال	اکسید فلزات	پلیمرها
کربن فعال لیفی‌شکل	زئولیت‌ها	جاذب‌های کامپوزیتی (کربن‌های معدنی)
غربال‌های کربن مولکولی	آلومینای فعال	جاذب‌های ترکیبی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل بر روی سطوح جاذب‌ها به‌وجود آمده‌اند که در عملیات جذب، نقش مهمی ایفا می‌کنند. برای بهبود عملکرد کربن فعال به‌جز اسیدشویی و بازشویی روش‌های دیگری نیز وجود دارد. پژوهشگران با نشاندن مواد مختلفی همچون زینکون [۳۴] و تارتازین [۳۵] سعی در بهبود کیفیت کربن فعال در جذب یون سرب داشته‌اند. پس از جذب آلاینده‌ها به‌وسیله‌ی کربن فعال، جداسازیِ جاذبِ استفاده شده از محلول نهایی، بحث مهمی است. اگر کربن فعال به صورت پودر باشد، جداسازی، مشکل خواهد بود. یکی از روش‌هایی که برای حل این مشکل به کار می‌رود، استفاده از کربن فعالی است که با نانوذرات مغناطیسی، اصلاح شده باشد. در این روش، پس از ساخت کربن فعال، طی واکنش‌های شیمیایی Fe_3O_4 را روی سطح کربن فعال می‌نشانند. جداسازی کربن فعال حاوی نانوذرات مغناطیسی، با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی امکان‌پذیر است.

برخی پژوهشگران مانند فاتحی و همکارانش [۳۶] برای حذف یون سرب به تولید این نوع از جاذب‌های مغناطیسی پرداختند. فو و همکارانش [۳۷] نیز با ساخت کربن فعال حاوی نانوذرات مغناطیسی که با سیلیکا پوشیده شده و با گروه‌های آمینی فعال شده است، نشان دادند که افزایش گروه‌های آمینی منجر به افزایش جذب یون سرب می‌شود.



شکل ۱ جذب مغناطیسی الف) محلول حاوی جاذب قبل از جداسازی و ب) جداسازی جاذب به‌وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی (آهن‌ربا) [۳۸].

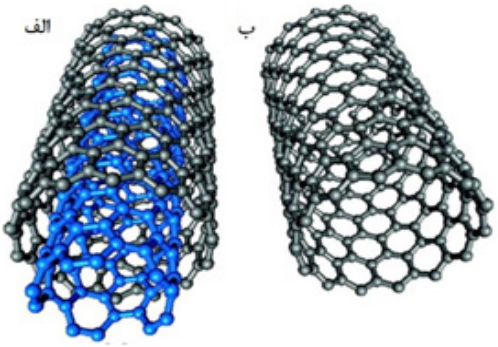
Fig 1 Magnetic adsorption A) Solution containing adsorbent before separation and B) Adsorbent separation by external magnetic field (magnet)

۲-۱-۲ کربن فعال لیفی‌شکل

کربن فعال لیفی‌شکل به دلیل سطح داخلی بیشتر و وزن کمتر نسبت به کربن‌های فعال دانه‌ای‌شکل، توجه محققین را به خود جلب کرده است. با این حال، پژوهش‌های زیادی برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی توسط این نوع از جاذب‌ها انجام نشده است. در پژوهشی که به تازگی انجام شده است، اصلاح کربن فعال لیفی‌شکل به‌وسیله‌ی آمونیوم‌پرسولفات موجب ۱۰ برابر شدن ظرفیت جذب جاذب، نسبت به حالت خالص شده است. این افزایش ظرفیت، به دلیل ایجاد شدن گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار به‌ویژه گروه کربوکسیل در سطح جاذب است [۳۹]. اصلاح این نوع از جاذب‌ها توسط سدیم‌استات، پتاسیم‌استات و لیتیوم‌استات، اگرچه موجب کاهش سطح داخلی کربن‌ها شده اما میزان جذب سرب را به‌دلیل ایجاد گروه عاملی کربوکسیل، افزایش داده است [۴۰]. اثر اکسایش به‌وسیله‌ی اسیدنیتریک هم، بر عملکرد این نوع جاذب مثبت بوده است [۴۱].

۲-۱-۳ نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی از صفحات گرافیتی استوانه‌ای‌شکل تشکیل شده است که می‌تواند به‌صورت تک‌دیواره یا چنددیواره‌ای لوله‌ای شکل باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است [۴۲].



شکل ۲ ساختارهای نانولوله‌های کربنی مربوط به الف) نانولوله کربنی چنددیواره و ب) نانولوله کربنی تک‌دیواره [۴۳].

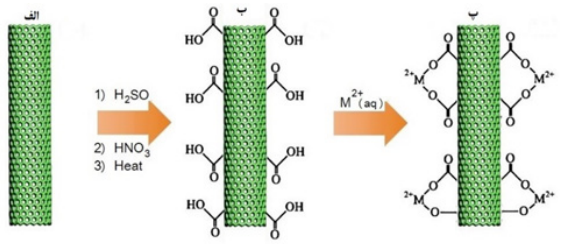
Fig 2 Structures of carbon nanotubes related to A) multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) and B) single-walled carbon nanotubes (SWNTs)

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

به‌کارگیری نانولوله‌های کربنی به‌دلیل خواص استثنایی مانند سطح ویژه زیاد، ضد رسوب خوب، داشتن گروه‌های عاملی تقویتی، تمایل به جذب زیاد یون‌های فلزی و زیست‌سازگاری در جداسازی یون‌های فلزات سنگین بسیار مناسب است [٤٤]. با اینکه از کشف نانولوله‌های کربنی زمان زیادی نمی‌گذرد اما با این حال از پرکاربردترین ساختارهای کربنی هستند. ساختار نانولوله‌ها شبیه استوانه‌ی توخالی با انتهای باز یا بسته است. جاذب‌های معمولی به‌دلیل ابعاد نسبتاً بزرگ، مقاومت زیادی در برابر انتقال جرم ایجاد می‌کنند که همین امر باعث کاهش عملکرد جذب می‌شود. استفاده از نانوجاذب‌ها می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند. لذا پژوهش‌های زیادی در خصوص حذف آلاینده‌ها به وسیله‌ی جاذب‌هایی در ابعاد نانو صورت گرفته است [٤٥]. ابعاد بسیار ریز، سطح ویژه‌ی بسیار زیاد، پایداری شیمیایی و مقاومت مکانیکی بالا و توانایی جذب بسیار خوب، از جمله دلایلی هستند که باعث جلب توجه پژوهشگران برای حذف یون سرب شده است [٤٦, ٤٧].

گروه‌های عاملی مختلفی مثل –CO– ، COOH و –OH با فعال‌سازی شیمیایی به‌وسیله اسید یا اکسایش هوا بر سطح نانولوله کربنی به وجود می‌آید که این گروه‌ها تعداد جایگاه‌های فعال روی سطح نانولوله کربنی را افزایش داده و ظرفیت جذب، افزایش پیدا می‌کنند. شکل ۳ نشان می‌دهد که گروه –COOH می‌تواند بر سطح نانولوله کربنی، کمپلکسی با یون‌های فلزی تشکیل دهد که منجر به افزایش جذب یون‌های سمی بر سطح نانولوله کربنی شود. طبق سازوکار نشان داده شده در شکل ۳ یک پروتون از گروه فنول و یک پروتون از گروه –COOH می‌تواند با یک یون فلز سنگین در محلول آبی جایگزین شود. بنابراین، اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی، روشی مؤثر برای جذب بهتر یون‌های فلزی است [٤٨].

اصلاح و فعال‌سازی نانوله‌های کربنی توسط اسیدنیتریک، تأثیر مثبتی بر عملکرد این جاذب داشته است. هرچه نانولوله‌های کربنی، زمان بیشتری در



شکل ۳ سازوکار جذب یون‌های فلزی بر روی الف) نانولوله کربنی، ب) نانولوله کربنی اصلاح‌شده با –COOH و پ) جذب فلزات توسط نانوله کربنی اصلاح‌شده با –COOH [٤٨]

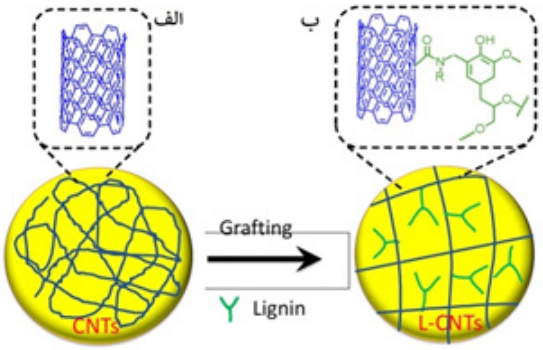
Fig 3 Mechanism of adsorption metal ions onto A) Carbon nanotube, B) Modified carbon nanotube with –COOH (CNTs-COOH) and C) Adsorption of metals by modified carbon nanotube with –COOH (CNTs-COOH)

محلول اسیدی قرار داشته باشد، سطح ویژه و همچنین گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (محتوای اکسیژن) بیشتری ایجاد شده و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [٤٩]. پژوهش‌های کمی نیز در خصوص عامل‌دار کردن نانولوله‌ها با موادی غیر از اسید برای حذف سرب انجام شده است که در یک مورد، استفاده از 1-isatin-3-thiosemicarbazone ظرفیت جذب را به نحو چشمگیری افزایش داده است [٥٠]. یکی از دلایلی که پژوهشگران را به پیوند زدن نانولوله‌های کربنی با سایر مواد، متمایل می‌کند، عدم توزیع مناسب و امکان کلوخه‌ای شدن آن‌ها در آب است. نانولوله‌ها به‌دلیل پیوندهای واندروالس قوی و همچنین عدم وجود گروه‌های عاملی، به خوبی در آب توزیع نمی‌شوند و به هم می‌چسبند. پیوند نانولوله و پلیمر طبیعی لیگنین (Lignin) این مشکل را برطرف کرده و جاذب حاصل از این پیوند، ظرفیت جذب خوبی از خود نشان داده است [٥١].

۲-۱-۴ اکسیدگرافن

اکسیدگرافن، شکل اکسیدشده‌ی گرافن است که پیش از این در پژوهش‌های زیادی به‌عنوان جاذب یون‌های فلزات مختلف به‌کار رفته است [٥٢-٥٤]. علاوه بر سطح ویژه‌ی زیاد، از دیگر دلایل توانایی بالای این ماده در جذب یون فلزات، می‌تواند وجود گروه‌های

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

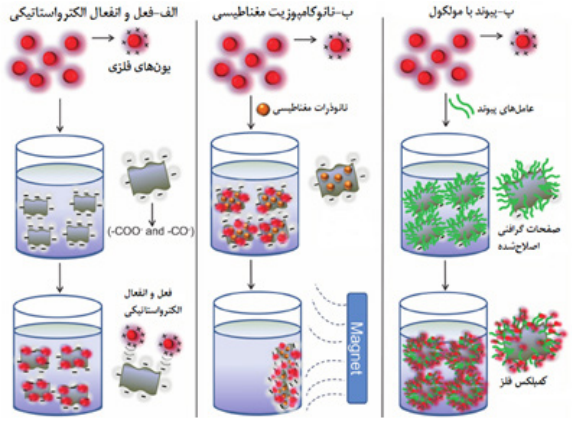


شکل ٤ نانولوله کربنی مربوط به الف) نانولوله‌ی کربنی کلوخه‌شده، ب) نانولوله‌ی کربنی در پیوند با لیگنین [٥١].

Fig 4 Carbon nanotube related to A) Glomerated carbon nanotube, B) Grafted Lignin onto carbon nanotube

عاملی اکسیژن‌دار از قبیل هیدروکسیل، اپوکسی، کربوکسیل، کربونیل و همچنین چگالی زیاد یون منفی در سطح این ماده باشد [٥٥, ٥٦]. شکل ٥ روش‌های مختلف کاربرد مواد گرافنی به عنوان جاذب برای حذف فلزات از محلول‌های آبی را نشان می‌دهد. فرایند جذب می‌تواند با استفاده از اکسیدگرافن اصلاح نشده، گرافن، یا اکسیدگرافن کاهش یافته انجام شود. سازوکار جذب، اغلب به‌دلیل فعل و انفعال الکترواستاتیکی بین صفحات اکسیدگرافن با بار منفی و یون‌های فلزی با بار مثبت است که در قسمت الف شکل ٥ آورده شده است. صفحات گرافن می‌تواند با نانوذرات مغناطیسی با هدف بهبود ظرفیت جذب، اصلاح شود. در نتیجه صفحات اکسیدگرافن و یون‌های فلزی می‌توانند توسط جذب خارجی (آهن‌ربا) از آب جدا شوند که در قسمت ب شکل ٥ آورده شده است. اصلاح صفحات گرافن با مولکول‌های آلی می‌تواند باعث بهبود فرایند جذب شود که در قسمت پ شکل ٥ آورده شده است [٥٧].

از اکسیدگرافن نیز برای حذف یون سرب استفاده شده و در این خصوص مهمترین عامل در جذب یون سرب، ایجاد کمپلکس سطحی قوی بین این یون و گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در سطح جاذب است [٥٨]. بین انواع مختلف اکسیدگرافن، هرچه میزان گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار بیشتر باشد، ظرفیت جذب هم بیشتر



شکل ٥ روش‌های مختلف کاربرد مواد گرافنی به‌عنوان جاذب برای حذف فلزات از محلول‌های آبی [٥٧].

Fig 5 Different methods of graphene material use as adsorbent for removal of metals from aqueous solutions.

بوده و علاوه بر آن سرعت جذب هم بیشتر است [٥٩]. مطالعات نشان داده که اصلاح جاذب توسط اسیدتارتاریک، ظرفیت جذب را افزایش داده که با توجه به وجود دو گروه کربوکسیل و دو گروه هیدروکسیل در ساختار این اسید، چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نیست [٦٠].

از گروه‌های عاملی دیگر مثل تیول هم برای بهبود عملکرد گرافن اکسید در جذب یون استفاده شده که نتیجه مثبت بوده است [٦١]. همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که برخی پلیمرهای حل شونده در آب مثل پلی‌آمین [٦٢] و پلی‌اکریلیک‌اسید هم برای اصلاح این جاذب به‌منظور حذف یون سرب کاربرد داشته‌اند [٦٣]. فان و همکارانش [٦٤] از کامپوزیت کیتوسان مغناطیسی و اکسیدگرافن برای جذب یون سرب از محلول‌های آبی استفاده کردند که ظرفیت جذب کیتوسان با پیوند اکسیدگرافن به ٧٦/٩٤ mg/g افزایش پیدا کرد و نشان‌دهنده این موضوع است که این کامپوزیت برای حذف سرب از پساب‌های صنعتی و کشاورزی بسیار مناسب است.

اکسیدگرافن عامل‌دار شده، به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی آب‌دوست به‌خوبی در آب پخش می‌شود که این موضوع برای جذب یون سرب، مزیت محسوب می‌شود؛

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

اما هنگام جداسازی جاذب از محلول، مشکل محسوب می‌شود. برخی محققین با نشاندن Fe_3O_4 روی سطح اکسیدگرافن، به جاذب، خاصیت مغناطیسی داده‌اند؛ به‌طوری که بعد از عملیات جذب، با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، جاذب را بتوان جمع‌آوری کرد [٦٥, ٦٦].

۳ فلزات، اکسیدهای فلزی و اکسیدهای چندفلزی

۳-۱ فلزات

برخی فلزات مانند طلا به‌دلیل ویژگی‌های ساختاری اتم‌های آن، در جذب برخی فلزات سنگین کارآمد بوده‌اند. البته به‌دلیل گران بودن این فلز، کاربرد چنین جاذبی، از مقیاس‌های آزمایشگاهی فراتر نرفته است [٦٧].

در خصوص جذب یون سرب نیز گزارشی از جذب به‌وسیله‌ی فلزات در دست نیست. با این حال یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی به کمک نظریه تابع چگالی (Density Functional Theory) حاکی از آن است که تمایل یون سرب در جذب شدن بر سطح فلز Ni از فلز Fe و Cr بیشتر است [٦٨].

۳-۲ اکسیدفلزات

اخیراً مطالعات زیادی در مورد کاربرد اکسیدفلزات مثل α-Al_2O_3 [٦٩]، CeO_2 [٧٠]، ZnO [٧١]، CuO [٧٢]، Fe_3O_4 [٧٣] برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی انجام شده است [٧٤]. فرقالی و همکارانش [٧٥] شکل‌های مختلف نانوذرات CuO را مورد آزمایش قرار داده و دریافتند که ریزساختار جاذب بر عملکرد و میزان جذب یون سرب تأثیرگذار است. البته استفاده از نانواکسیدفلزات به‌عنوان جاذب، مشکلاتی به‌همراه دارد که یکی از آن‌ها جداسازی جاذب، بعد از فرایند جذب است. برای حل این مشکل راهکارهایی مثل نشاندن جاذب روی سطح جامد پیشنهاد شده است. به‌عنوان نمونه در پژوهشی، پلیمر پلی‌وینیل پیرولیدون به‌عنوان پایه‌ای برای CeO_2 [٧٦] و سلولزاستات یا کیتوسان اصلاح شده به‌عنوان پایه‌ای برای TiO_2 استفاده شده است [٧٧, ٧٨]. NiO اکسیدفلزی دیگری است که برای سهولت جداسازی، روی پودر کاج نشانده شده است [٧٩]. شایان گفتن است که این ماده یکی از اکسیدهای فلزی است که پژوهش‌های زیادی درخصوص جذب یون سرب بر روی آن انجام شده است. پژوهش‌ها حاکی از آن است که سازوکار غالب در غلظت پایین، واکنش تبادل یونی و در غلظت بالا، رسوب $Pb(OH)_2$ در سطح جاذب است [٨٠]. یکی از نشانه‌های واکنش تبادل یونی، تغییر pH محلول است. کاهش pH نشانگر تبادل یونی بین Pb^{2+} و H^+ است.

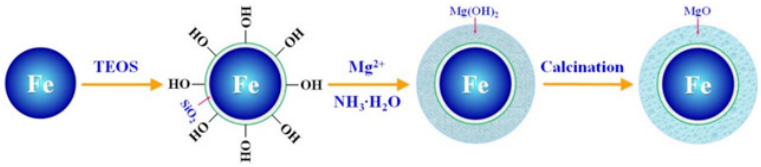
ZnO اکسید فلزی دیگری است که به‌صورت کامپوزیت با جاذب‌های دیگر آمیخته شده و برای جذب Pb^{2+} استفاده شده است. افزودن این ماده به نوعی مخمر، باعث افزایش ظرفیت جذب مخمر تا حدود ۲ برابر شده است [٨١]. همچنین افزودن فلز مس به ساختار ZnO تأثیر بسزایی در توانایی جذب یون سرب داشته است [٨٢].

اکسیدفلزات، فارغ از نقشی که به‌طور مستقیم در جذب یون سرب ایفا می‌کنند، گزینه مناسبی برای افزایش سطح ویژه‌ی سایر جاذب‌ها نیز است. به‌عنوان مثال افزودن نانوذرات ZnO به کانی رسی مونت‌موریلونیت باعث افزایش سطح ویژه‌ی این کانی و به دنبال آن ظرفیت جذب این ماده شده است [٨٣].

MnO_2 نیز ساختاری لایه‌ای داشته که با وارد کردن Al_2O_3 بین لایه‌های این ماده، سطح تماس این ماده با محلول حاوی یون سرب بیشتر شده و جذب بیشتری حاصل شده است [٨٤].

آزمایش جذب یون سرب توسط جاذب نانوهیبریدی MgO/GO نیز نشانگر توانایی اکسیدمنیزیم در افزایش جذب این یون بوده است. MgO با قرار گرفتن بین صفحات اکسیدگرافن باعث کاهش نیروی واندروالسی بین این صفحات شده و در نتیجه اکسیدگرافن، بهتر پخش شده و امکان جذب بیشتری به‌وجود می‌آید [٨٥]. نانوکامپوزیت Fe/MgO باتوجه به ساختار مزومتخلخل و داشتن سطح ویژه و خاصیت جذب مغناطیسی زیاد، برای حذف یون سرب از آب استفاده شده که بیشینه ظرفیت جذب ١٤٧٦/٤ mg/g برای حذف این یون به‌دست آمد. در شکل ٦ طرحی از فرایند تشکیل این

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]



شکل ٦ طرحی از فرایند تشکیل نانوکامپوزیت Fe/MgO [٨٦].

Fig 6 A plan for the formation of Fe/MgO nanocomposites

نانوکامپوزیت آورده شده است [٨٦].

۳-۳ اکسیدهای چندفلزی

پژوهش‌ها در خصوص استفاده از اکسیدهای چندفلزی برای حذف فلزات سنگین دارای سابقه‌ی زیادی است [٨٧]. زیرا جداسازی این مواد پس از اتمام فرایند جذب، به‌وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی به‌سادگی امکان‌پذیر است [٨٨, ٨٩]. ژانگ و همکارانش [٩٠] از نانوکامپوزیت CoFe2O4 و اکسیدگرافن کاهش یافته (Reduced Graphene Oxide) برای حذف سرب از محلول آبی استفاده کردند. میزان جذب سرب بااستفاده از مدل لانگمویر در دمای ٢٥ °C و pH=٥/٣، ٢٩٩/٤ mg/g به دست آمد. به‌دلیل خاصیت مغناطیسی، $CoFe_2O_4$-rGO می‌تواند در میدان مغناطیسی دارای قدرت کم، در زمان ٢ دقیقه به‌طور کامل از آب جدا شود. یکی از دلایل توجه به جاذب‌هایی مانند $CuFe_2O_4$ و $MnFe_2O$ علاوه بر ظرفیت جذب مناسب، خاصیت مغناطیسی این مواد است.

۴ نافلزات و اکسیدهای نافلزی

سیلیکاژل به‌دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی بسیار بالا همواره به‌عنوان ماده‌ی پایه به‌عنوان جاذب مد نظر بوده است. با افزودن ترکیبات و گروه‌های عاملی مختلف به‌ویژه گروه‌هایی که شامل اتم‌هایی مثل S و N و O هستند که می‌توانند گروه‌هایی با بار نسبی منفی باشند، می‌توان خواص این ماده را بهبود بخشید [٩١]. به‌عنوان مثال، افزودن گروه عاملی آمین به انواع مختلف سیلیکاژل موجب افزایش کارایی جاذب می‌شود [٩٢-٩٥].

اصلاح جاذب‌ها به‌وسیله‌ی اسید، متداول است. در پژوهشی با اصلاح سیلیکاژل توسط اتیل دی آمین تری استیک اسید، میانگین قطر حفرات جاذب، افزایش قابل توجهی یافت [٩٦]. ایجاد جاذب‌های ترکیبی بااستفاده از سیلیکاژل نیز از حوزه‌های مورد توجه پژوهشگران است. ترکیب پودر نانوذرات سیلیکاژل با آلژینات [٩٧] و ترکیب سیلیکاژل با گرافن از مواردی است که باعث بهبود ظرفیت جذب سیلیکاژل شده است [٩٨].

۵ زیست‌توده‌ها

در دهه‌ی گذشته زیست‌توده‌ها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. این مواد به‌علت فراوانی در طبیعت و سازگاری با آن و همچنین داشتن صرفه‌ی اقتصادی و ساده بودن روند آماده‌سازی، توانایی زیادی برای استفاده به‌عنوان جاذب فلزات سنگین را دارند. بنابراین تلاش‌های زیادی برای شناسایی جاذب‌های کارآمد زیستی به‌منظور جذب یون سرب صورت گرفته است. برگ درختان از جمله فراوان‌ترین زیست‌توده‌ها هستند که پژوهش‌های زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. برگ درخت کافور [٩٩]، برگ درخت سیدالاشجار [١٠٠] و برگ درخت بکرایی [١٠١] به صورت خشک‌شده و پودرشده به عنوان جاذب، آزمایش شده‌اند. همچنین برگ درخت گز روغنی بعد از بازشویی و اصلاح به‌وسیله‌ی اسیدسیتریک، ظرفیت بالایی در جذب یون سرب از خود نشان داده است [١٠٢].

ساخت کربن فعال از برگ درخت پالم و اصلاح آن به‌وسیله‌ی اسیدسولفوریک منجر به تولید جاذب مناسبی

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

برای جذب یون سرب شده است [۱۰۳]. البته با اصلاح این کربن توسط پلی‌اتیلین‌ایمین، ظرفیت جذب بهتر شده است [۱۰٤].

علاوه بر برگ، پوست درختان نیز می‌تواند به‌عنوان جاذب استفاده شود. از جمله درختانی که از پوست آن‌ها به‌عنوان جاذب یون سرب استفاده شده می‌توان به اقاقیا [۱۰۵] و کاج [۱۰٦] اشاره کرد. علاوه بر درختان، قارچ‌ها [۱۰۷, ۱۰۸] و گیاهان سمی [۱۰۹] هم به‌عنوان جاذب مورد توجه محققان بوده‌اند. پوسته‌ی سخت میوه‌هایی مثل گردو [۱۱۰]، فندق و بادام [۱۱۱]، پسماندهای گیاه پنبه [۱۱۲]، پودر هسته‌ی زیتون [۱۱۳]، پوست خردل [۱۱٤]، پوسته‌ی سویا [۱۱۵]، پسماندهای نارگیل [۱۱٦]، پوست سُرخالو [۱۱۷]، برگ سرخس [۱۱۸]، انواع گلسنگ‌ها [۱۱۹, ۱۲۰]، انواع گیاهان، خزه‌ها و جلبک‌های دریایی [۱۲۱-۱۲۳]، تفاله‌های چای [۱۲٤] و قهوه [۱۲۵] و حتی پولک ماهی [۱۲٦] و تار عنکبوت [۱۲۷] هم در یک دهه‌ی اخیر برای شناسایی جاذب‌هایی ارزان، فراوان و با توانایی جذب زیاد، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جاذب‌های طبیعی گرچه نسبتاً ارزان و فراوان بوده اما برای کارکرد بهتر، می‌توان با اصلاح جاذب‌ها، برخی مشخصات از جمله سطح ویژه و ظرفیت جذب آن‌ها را بهبود بخشید. مثلاً علوفه‌ی ذرت به صورت طبیعی دارای سطح ویژه‌ی ۰/۳۳ m^2/g است. اما بعد از واکنش تفکافت و تبدیل شدن به کربن، سطح ویژه‌ی آن به ۰/۸۲ m^2/g افزایش می‌یابد. همچنین سطح ویژه‌ی کربنِ حاصله از تفکافت، بعد از اصلاح توسط $ZnCl_2$ به‌میزان ۸٤/۷۵ m^2/g می‌رسد. همین روند درباره‌ی ظرفیت جذب هم وجود دارد. علوفه‌ی ذرت به‌صورت طبیعی ظرفیت ۳٤/۸۷ mg/g برای جذب یون سرب دارد اما بعد از تفکافت، ظرفیت جاذب به ۵۰/۵۱ mg/g و بعد از اصلاح توسط $ZnCl_2$ به ۱۱۳/۱۲ mg/g ارتقا می‌یابد. برای علوفه‌ی برنج نیز همین روند وجود دارد [۱۲۸].

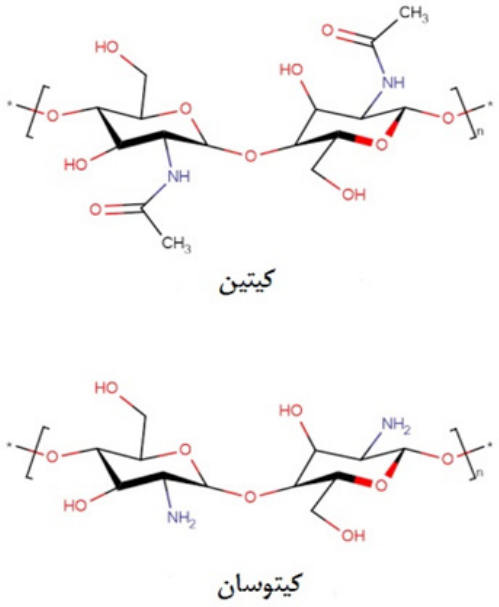
۶ پلیمرها

پلیمرها از جمله موادی هستند که کاربرد آن‌ها در جذب یون‌های فلزی از محلول‌ها رو به افزایش است. در یک دهه‌ی اخیر بررسی عملکرد آن‌ها در خصوص جذب یون سرب، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. در این میان، نقش پلیمرهای طبیعی بسیار آشکار است؛ به‌طوری که بخش مهمی از پژوهش‌ها به بررسی عملکرد و اصلاح این جاذب‌ها معطوف شده است. سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی یکی از پایه‌های اساسی ساخت جاذب است. پژوهشگران با تبدیل سلولز به سلولزاستات و سپس ساخت کامپوزیت سلولزاستات-نانومنگنزدی‌اکسید به جاذبی با ظرفیت جذب بالا دست یافتند [۱۲۹]. ساخت نانوبلور سلولز کربوکسیلاته [۱۳۰] و کامپوزیت مغناطیسی همین جاذب، یکی دیگر از تلاش‌هایی است که برای اصلاح سلولز و بهبود خواص آن انجام شده است که البته ظرفیت جذب نوع غیرمغناطیسی آن بالاتر است [۱۳۱].

پلیمر کیتوسان به‌طور عمده در فرایندهای جذب، کروماتوگرافی و تبادل یونی به دلایل خواص آب‌دوستی (Hydrophilicity)، واکنش‌پذیری، مکانیکی، ظرفیت تشکیل به‌صورت الیاف و ورق استفاده می‌شود [۱۳۲]. از استیل‌زدایی کیتین حاصل شده و نقش آن به‌عنوان جاذب برای حذف طیف متنوعی از آلاینده‌ها در پژوهش‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳۳]. در شکل ۷ ساختار شیمیایی کیتین و کیتوسان آورده شده است [۱۳٤].

اصلاح کیتوسان به‌وسیله‌ی اسیدهای مختلف، باعث افزایش کارایی آن در جذب یون سرب می‌شود [۱۳۵, ۱۳٦]. همچنین ترکیب کیتوسان با مواد دیگر و اصلاح آن متداول است. ترکیب کیتوسان با کانی مونت‌موریلونیت [۱۳۷]، ترکیب با thiosemicarbazide [۱۳۸]، ترکیب با پلی‌آکریونیتریل [۱۳۹]، ترکیب با پلی‌وینیل‌الکل و نانوذرات اکسیدمس [۱٤۰]، ترکیب با تری‌اتیلن‌تترامین و Fe_3O_4 [۱٤۱]، ترکیب با پلی‌اکریل‌آمید و نانوذرات مس [۱٤۲]، ترکیب با اکسیدروی (ZnO) [۱٤۳] از جمله تلاش‌هایی است که برای اصلاح کیتوسان یا اصلاح جاذب‌های دیگر توسط کیتوسان انجام گرفته است. در شکل ۸ ساختار کیتوسان و نانوکامپوزیت کیتوسان و ZnO

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]



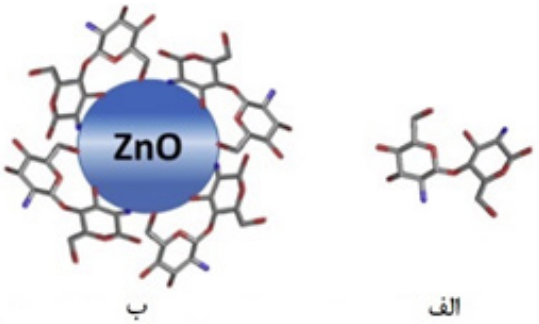
شکل ۷ ساختار شیمیایی کیتین و کیتوسان [۱۳٤].

Fig 7 Chemical structure of chitin and chitosan

آورده شده است [۱٤۳].

یکی دیگر از راه‌هایی که برای بهبود خواص سطحی کیتوسان انجام شده، روش حک اثر یون سرب بر این پلیمر است که با این روش، جذب انتخابی یون سرب از میان چندین یون دیگر بهبود می‌یابد [۱٤٤, ۱٤٥].

علاوه بر پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای سنتزی نیز توانایی زیادی در استفاده به‌عنوان جاذب یون سرب دارند. منومرهای متیل‌بنزن بعد از پلیمری شدن به دو صورت اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با گروه آمین، مورد بررسی قرار گرفتند که نتیجه‌ی اصلاح صورت گرفته چشمگیر بوده و ظرفیت جذب از ٤۸ mg/g به ۵۲۳/٦ mg/g رسید [۱٤٦]. از پلیمر پلی‌آکریلیک‌اسید که با نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به‌عنوان جاذب، پوشش‌دهی شده است نیز برای حذف یون سرب استفاده شده که ظرفیت جذب زیادی در حذف یون سرب دارد. از مش ۲۰ لایه‌ای مغناطیسی برای جداسازی استفاده شده تا تحت میدان مغناطیسی ضعیف‌تری نانوذرات مغناطیسی جمع‌آوری شوند. مش مغناطیسی و نانوذرات می‌توانند بعد از شست‌وشوی فراصوت دوباره مورد استفاده قرار

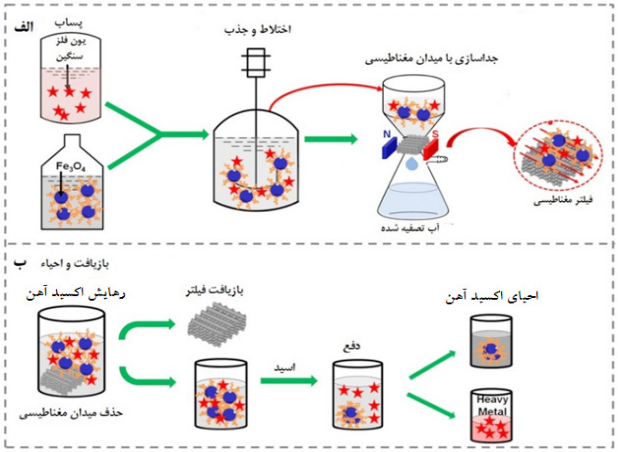


شکل ۸ الف–ساختار کیتوسان و ب– نانوکامپوزیت کیتوسان و اکسیدروی [۱٤۳].

Fig 8 A) Structure of chitosan and B) Chitosan-ZnO nanocomposite

گیرند. در شکل ۹ طرحی از فرایند جذب و احیا توسط میدان مغناطیسی آورده شده است [۱٤۷].

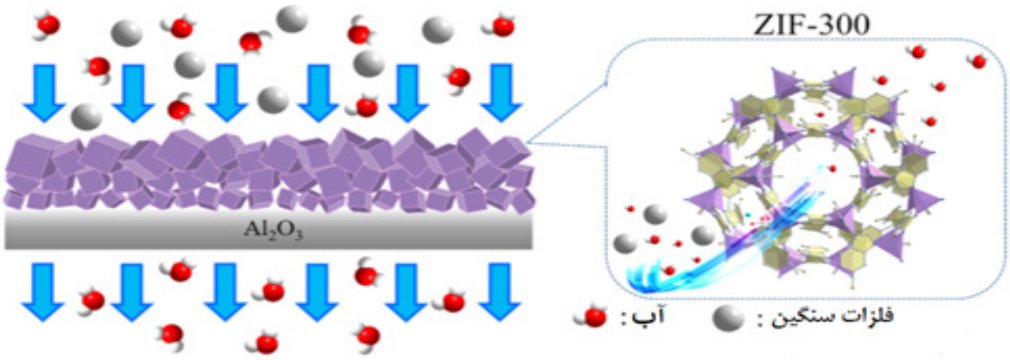
پلی‌وینیل‌کلرید [۱٤۸] پلی‌آکریل‌آمید [۱٤۹] و پلی‌آکریونیتریل [۱۵۰] نیز از دیگر پلیمرهایی هستند که بعد از اصلاح به‌عنوان جاذب استفاده شده‌اند.



شکل ۹ طرحی از حذف فلزات سنگین توسط روش ترکیب جذب و جداسازی با میدان مغناطیسی الف) حذف سرب از پساب با استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 و صافش میدان مغناطیسی و ب) بازیافت و احیای صافی مغناطیسی و نانوذرات Fe_3O_4 [۱٤۷].

Fig 9 A plan of removal of heavy metals by method of combination adsorption and separation with magnetic field A) Removal of Lead from wastewater by Fe_3O_4 nanoparticle and filtration by magnetic field and B) Recovery and regeneration of magnetic filter and Fe_3O_4 nanoparticle

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]



شکل ۱۰ سازوکار حذف یون‌های فلزی سنگین بر اساس اندازه آن‌ها با استفاده از غشای نامتقارن ZIF-۳۰۰ [۱۵٤].

Fig 10 Mechanism of removal of heavy metal ions according to size by ZIF-300 asymmetric membrane

۷ غشاها

در سال‌های اخیر، روش جذب غشایی در جداسازی پروتئین‌ها، درشت‌مولکول‌ها و یون‌های فلزی سنگین بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۵۱]. غشاهای جاذب در مقایسه با روش‌های مشابه برای جذب فلزات سنگین بازده جداسازی بیش‌تر، افت فشار کم‌تر، نرخ حذف بیش‌تر و قابلیت استفاده مجدد دارند [۱۵۲, ۱۵۳]. در شکل ۱۰ سازوکار حذف یون سرب بر اساس اندازه با استفاده از غشای نامتقارن ZIF-۳۰۰ نشان داده شده است [۱۵٤].

پلیمرهای مختلفی از جمله کیتوسان، استات‌سلولز و پلی‌وینیل‌الکل برای ساخت غشاهای ترکیبی جاذب فلز (Blended Metal-Adsorptive Membrane) با بازده حذف مناسب استفاده شده‌اند. با این حال، این غشاها، پایداری مکانیکی و شیمیایی کافی در فرایندهای دینامیک را ندارند. برای غلبه بر این مشکل، از پلیمرهایی مانند پلی‌سولفون، نایلون و پلی‌وینیلیدین برای ساخت غشاهای کامپوزیت جاذب فلز با ظرفیت حذف مناسب و همچنین پایداری مکانیکی مطلوب استفاده می‌کنند. اصلاح سطح، مثل استفاده از پوشش لایه‌ای جاذب روی غشا و همچنین استفاده از لیگاند برای ترکیب با فلزات روی سطح، روشی مؤثر برای تولید غشاهای کامپوزیتی با تمایل به جذب بالای فلز است [۱۵۵].

غشاهای جاذب با تلفیق عمل صافش و جذب، یکی از موثرترین مواد برای جداسازی و حذف آلاینده‌ها است. ساخت غشای شبکه آمیخته با استفاده از ترکیب پلی‌اترسولفون و نانولوله‌های کربنی - که با روش حک اثر یون (Ion Imprinting) سرب اصلاح شده‌اند نتایج خوبی را به‌همراه داشته است. غشای حاصل از این فرایند هم خواص ضدگرفتگی بهتری از خود نشان داده و هم نسبت به سایر یون‌ها، مقادیر بیشتری از یون سرب را جذب کرده است [۱۵٦]. غشاهای شبکه آمیخته حاصل از ترکیب پلی‌سولفون و کربن حاصل از تفاله‌ی نیشکر نیز نرخ حذف ۱۰۰ درصد یون را در آزمایش‌ها نشان داده است [۱۵۷].

غشاهای فراصافش شبکه آمیخته ساخته شده از پلی‌سولفون و اکسیدآهن آب‌دوست نیز در حذف یون سرب کارآمد بوده است [۱۵۸].

۸ زئولیت‌ها

زئولیت‌ها دسته‌ای از کانی‌های رسی هستند که از پایه هیدروسیلیکات‌های آلومینیوم همراه با برخی کاتیون‌ها و اکسیدهای فلزات مختلف تشکیل شده‌اند. نوع چیدمان اتم‌های مختلف در کنار یکدیگر، باعث به‌وجود آمدن ساختاری گسترده، شبکه‌ای و پرحفره شده است. وجود حفرات پرشمار در ابعاد نانو و همچنین وجود یون‌های فلزات قلیایی و قلیایی خاکی با اتصال ضعیف در ساختار زئولیت‌ها باعث ایجاد خواص جذب سطحی و تعویض یونی مطلوبی شده است. به‌دلیل چنین خواصی استفاده از زئولیت‌ها به‌عنوان جاذب فلزات سنگین باسابقه است

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

[۱۵۹, ۱۶۰]. زئولیت‌ها به دلیل اینکه دارای ویژگی‌های قابلیت احیاشدن و استفاده مجدد برای خواص تبادل یونی هستند؛ برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی استفاده می‌شوند [۸]. کار بر روی زئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت به‌دلیل تمایل به جذب قوی برای یون سرب در کارهای قبلی گزارش شده است [۱۶۱-۱۶۳]. پاندی و همکارانش [۸] از زئولیت NaX برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زئولیت NaX می‌تواند یون سرب را با بازده مناسب، به‌ویژه در pH=٦، جدا کند. مقدار جذب ۱٤/۲۲ میلی‌گرم بر گرم با استفاده از این زئولیت در دمای ۳۰۳ کلوین به‌دست آمد.

وانگ و همکارانش [۱٦٤] با استفاده از زئولیت ZSM-۵به‌عنوان جاذب یون سرب، نشان دادند که این نوع زئولیت پس از ۸ مرتبه جذب یون سرب و احیای دوباره، تغییر محسوسی در توانایی حذف یون سرب نداشته که این نشان‌دهنده به‌صرفه بودن استفاده از این نوع جاذب برای حذف یون سرب است.

خدادادی و همکارانش [۱٦۵] نیز با ایجاد لایه‌ای از جنس زئولیت NaA روی ذرات مغناطیسی، جاذبی تولید کردند که پس از حذف یون سرب از محلول، به‌راحتی می‌توان با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، جاذب را از محلول نهایی جدا کرد.

۹ مقایسه‌ی ظرفیت و همدمای جذب جاذب‌ها

در جدول ۲، شرایط جذب، ظرفیت جذب و همدمای جذب جاذب‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود در بیشتر جاذب‌ها، همدمای جذب لانگمویر، تطابق بیشتری با شرایط جذب دارد.

با مرور مقالات مربوطه طی سال‌های گذشته موارد زیر نتیجه می‌شود:

۱) عوامل زیادی از جمله جنس جاذب، سطح ویژه، توزیع اندازه حفرات و گروه‌های عاملی موجود در سطح جاذب، بر جذب یون سرب تأثیرگذارند.

۲) بسیاری از زیست‌توده‌ها به‌علت فراوانی و قیمت کم، توانایی بالایی برای استفاده به‌عنوان جاذب یون سرب دارند اما ظرفیت جذب آن‌ها نسبتاً پایین بوده و نیازمند اصلاح هستند.

۳) در اکثر جاذب‌ها، با افزایش pH محلول، ظرفیت جذب جاذب افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به pH خاص، کاهش می‌یابد.

٤) ساخت جاذب‌هایی که خواص مغناطیسی دارند، راه جدید و کارامدی برای جداسازی جاذب از محیط جذب پس از انجام فرایند است.

۵) در بررسی فرایند جذب سرب بر روی جاذب‌های مختلف، مدل لانگمویر با داده‌های تجربی، تطابق بیشتری داشته است که حاکی از اهمیت گروه‌های عاملی جاذب در برهم‌کنش با یون و جذب شیمیایی دارد.

٦) در بین جاذب‌های مرور شده، جاذب‌های پایه کربنی مثل کربن فعال و اکسیدگرافن که توسط مواد شیمیایی (مثل آمونیومپرسولفات یا پلی‌آمین‌ها) اصلاح خواص شده‌اند؛ از ظرفیت جذب بالاتر و قابلیت صنعتی شدن بیشتری برخوردارند.

به نظر می‌رسد برخی راه‌کارها و جهت‌گیری‌ها در تحقیقات آینده در زمینه جذب یون سرب بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار بگیرند. راهکارهایی مانند مخلوط کردن اکسیدهای فلزات با یکدیگر، بارگذاری نانو ذرات فلزی (مثل کبالت و نیکل) با اکسیدآهن جهت بهبود خواص جذبی، بهبود خواص غشاهای شبکه آمیخته جاذب با تلقیح ذرات زئولیت یا ذرات نانومغناطیسی، ترکیب پلیمرهای مختلف برای حذف یون سرب و اصلاح آن‌ها با نانوذرات، می‌تواند مورد توجه و بررسی بیشتر قرار بگیرند. همچنین استفاده از پلیمرهای زیستی به‌دلیل صرفه اقتصادی و سازگاری با محیط زیست، قابلیت خوب ترکیب شدن با سایر پلیمرها و همچنین امکان اصلاح با نانوذرات مغناطیسی برای حذف یون سرب می‌تواند مورد توجه پژوهشگران قرار بگیرد.

۱۰ نتیجه‌گیری

وجود یون سرب در آب آشامیدنی برای بافت‌های بدن انسان و سایر موجودات، بسیار خطرناک است.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

جدول ۲ مقایسه‌ی جاذب‌ها ، شرایط و ظرفیت جذب یون سرب در پژوهش‌های مختلف.

Table 2 Comparison of adsorbents, conditions and lead ion adsorption capacity in various studies.

نوع جاذب	شرایط جذب	همدمای جذب	بیشینه ظرفیت جذب (mg/g)	مرجع
کربن فعال هسته زردآلو	pH=6، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، دما 20 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	21.38	[۱۴]
کربن فعال لاستیک مستعمل	pH=5، غلظت اولیه یون 10 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 15 میلی‌گرم	لانگمویر	49.7	[۱۶]
کربن فعال پوست انبه	pH=5، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 200 میلی‌گرم	لانگمویر	38.31	[۱۷]
کربن فعال پوست موز	pH=6.1، غلظت اولیه یون 74.4 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 0.9 گرم بر لیتر	لانگمویر	34.50	[۱۸]
کربن فعال خاک اره	pH=5، غلظت اولیه یون 0.5 میلی‌مول بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	95.03	[۱۹]
کربن فعال استخوان گاو	pH=4، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	47.61	[۲۰]
کربن فعال نعناع	pH=6، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر	لانگمویر	53.19	[۲۲]
کربن فعال/زینکون	pH=4، میزان جاذب 25 میلی‌گرم	لانگمویر	26.70	[۲۷]
کربن فعال/تارتازین	pH=1، غلظت اولیه یون 500 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم	لانگمویر	121.30	[۲۸]
کربن فعال لیفی‌شکل اصلاح‌شده با آمونیوم‌پرسولفات	pH=5، غلظت اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	لانگمویر	458.29	[۳۱]
کربن فعال لیفی‌شکل اصلاح‌شده با استات	pH=6 ، غلظت اولیه یون 500 میلی‌گرم بر لیتر ، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	لانگمویر	165	[۳۲]
کربن فعال لیفی‌شکل اصلاح‌شده با اسیدنیتریک	pH=4، غلظت اولیه یون 500 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 300 میلی‌گرم، دما 35 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	57.69	[۳۳]
نانولوله کربنی چنددیواره	pH=5، غلظت اولیه یون 10 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 0.1 گرم	فرندلیچ	104.2	[۳۶]
نانولوله کربنی اصلاح‌شده با اسیدنیتریک	pH=5، غلظت اولیه یون 60 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 25 میلی‌گرم، دما 35 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	85.50	[۳۷]
اکسیدگرافن ساخته‌شده از گرافیت طبیعی	pH=5، غلظت اولیه یون 259 میلی‌گرم بر لیتر	لانگمویر	766	[۴۵]
اکسیدگرافن اصلاح‌شده توسط اسید تارتاریک	pH=5، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 2 میلی‌گرم	لانگمویر	125.63	[۴۶]
اکسیدگرافن اصلاح‌شده توسط پلی‌آمین	pH=6.1، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 14 میلی‌گرم	لانگمویر	819.70	[۴۸]
اکسیدگرافن / Fe_3O_4 / EDTA	pH=4.2، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	فروندلیچ	508.40	[۵۰]
نانواکسیدمس	pH=6.5، غلظت اولیه یون 300 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	125	[۵۴]
اکسیدسلنیوم / پلی‌وینیل‌پیرولیدون	pH=6، غلظت اولیه یون 500 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم بر لیتر، دما 45 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	90.90	[۵۵]
اکسیدتیتانیوم/سلولز استات	pH=5، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	25	[۵۶]
اکسیدتیتانیوم/ کیتوسان اصلاح‌شده	pH=6، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 25 میلی‌گرم	لانگمویر	434.80	[۵۷]
اکسیدنیکل/کاج پودر شده	pH=7، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، دما 50 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	609	[۵۸]
اکسیدروی / مخمر	pH=6، غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	لانگمویر	31.72	[۶۰]

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

			جاذب 100 میلی‌گرم	
اکسیدمنیزیوم / اکسیدگرافن	pH=6.5، غلظت اولیه یون 80 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 0.4 گرم بر لیتر، دما 30 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	190	[۶۴]
$MnFe_2O_4$	pH=6، غلظت اولیه یون 212.5 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 25 میلی‌گرم	لانگمویر	56.56	[۶۶]
$CuFe_2O_4$	pH=4.5، غلظت اولیه یون 700 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 20 میلی‌گرم	لانگمویر	17.80	[۶۷]
سیلیکا با گروه عاملی آمین	pH=6، غلظت اولیه یون 2 میلی‌مول بر لیتر، میزان جاذب 20 میلی‌گرم	سیپس	562.56	[۷۲]
SiO_2-EDTA	pH=6، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 15 میلی‌گرم	لانگمویر	147.60	[۷۳]
نانواکسیدسیلیسوم / آلژینات	pH=5، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم بر لیتر	لانگمویر	83.33	[۷۴]
اکسیدسیلیسیوم / گرافن	pH=6، غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 30 میلی‌گرم	لانگمویر	113.60	[۷۵]
برگ درخت کافور	pH=5، غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم ، 60 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	75.82	[۷۶]
برگ درخت سیدالاشجار	pH=6، غلظت اولیه یون 65 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	لانگمویر	136.70	[۷۷]
برگ درخت بکرایی	pH=5.1، غلظت اولیه یون 98 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 200 میلی‌گرم ، 30 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	104	[۷۸]
برگ اصلاح‌شده درخت گز روغنی	pH=5، غلظت اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم ، 40 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	209	[۷۹]
پوست درخت اقاقیا	pH=4، غلظت اولیه یون 100 میلی گرم بر لیتر، میزان جاذب 6 گرم بر لیتر، 30 درجه سانتی‌گراد	فروندلیچ	199.90	[۸۲]
پوست درخت کاج	pH=4، غلظت اولیه یون 1000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی گرم	لانگمویر	76.80	[۸۳]
قارچ کلاهک‌دار lepolita	pH=6، غلظت اولیه یون 1000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 2.1 گرم	لانگمویر	3.80	[۸۴]
قارچ خجالتی	pH=5، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 4 گرم بر لیتر، دما 20 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	38.40	[۸۵]
گیاه سرخاب کولی	pH=6، غلظت اولیه یون 30 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 20 گرم بر لیتر	فروندلیچ	14.5	[۸۶]
پسماند گیاه پنبه	pH=5، غلظت اولیه یون 800 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 200 میلی‌گرم	لانگمویر	42.08	[۸۹]
پودر هسته زیتون	pH=4، غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 10 گرم بر لیتر	لانگمویر	25.48	[۹۰]
پوست خردل	pH=6، غلظت اولیه یون 5 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 10 گرم بر لیتر	لانگمویر	30.48	[۹۱]
پوسته‌ی سویا	pH=7، غلظت اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 150 میلی‌گرم	لانگمویر	217.70	[۹۲]
پسماندهای نارگیل	pH=7، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 500 میلی‌گرم	لانگمویر	9.74	[۹۳]
پوست سرخالو	pH=6، غلظت اولیه یون 240 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 250 میلی‌گرم	لانگمویر	78.74	[۹۴]
برگ سرخس	pH=5، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	فروندلیچ	12.24	[۹۵]

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

			جاذب 200 میلی‌گرم	
گلسنگ	pH=5، غلظت اولیه یون 270 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 8 گرم بر لیتر	لانگمویر	75.80	[۹۶]
تفاله چای	pH=4.5، غلظت اولیه یون 1000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 2.5 گرم بر لیتر	لانگمویر	64.10	[۱۰۱]
تفاله قهوه	pH=5، غلظت اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1.2 گرم بر لیتر	لانگمویر	22.90	[۱۰۲]
پولک ماهی کپور	pH=3.5، غلظت اولیه یون 800 میلی‌گرم بر لیتر	فروندلیچ	472.20	[۱۰۳]
تار عنکبوت	pH=5، غلظت اولیه یون 20 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 60 میلی‌گرم	فروندلیچ	1.17	[۱۰۴]
علوفه ذرت	pH=5، غلظت اولیه یون 1000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 20 گرم بر لیتر	لانگمویر	34.80	[۱۰۵]
سلولز استات/ نانومنگنزدی‌اکسید	pH=7، غلظت اولیه یون 1.6 مول بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	416.67	[۱۰۶]
نانوبلور سلولز کربوکسیلاته	pH=5، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم بر لیتر، دما 30 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	232	[۱۰۷]
نانوبلور سلولز کربوکسیلاته / Fe_3O_4	pH=5، غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 500 میلی‌گرم	لانگمویر	72.83	[۱۰۸]
کیتوسان / مونت‌موریلونیت	pH=5، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 2 گرم بر لیتر	فروندلیچ	49.33	[۱۱۲]
کیتوسان اصلاح‌شده با thiosemicarbazide	pH=5، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	لانگمویر	325.20	[۱۱۳]
کیتوسان / پلی‌وینیل‌الکل / نانواکسیدمس	pH=7، غلظت اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 150 میلی‌گرم	لانگمویر	116.84	[۱۱۴]
کیتوسان / تری‌اتیلن‌تترامین / Fe_3O_4	pH=6، غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 500 میلی‌گرم	لانگمویر	369	[۱۱۶]
کیتوسان / پلی‌اکریل‌آمید/ نانوذرات مس	pH=6، غلظت اولیه یون 20 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	فروندلیچ	38.93	[۱۱۷]
پلیمر متیل‌بنزن	pH=5.2، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	48	[۱۲۰]
پلی‌آکریل‌آمید / Fe_3O_4	pH=4.5، غلظت اولیه یون 2 میلی‌مول بر لیتر، میزان جاذب 2 گرم بر لیتر	لانگمویر	23.31	[۱۲۲]
پلی آکریلونیتریل اصلاح‌شده با thiosemicarbazide	pH=6.4، غلظت اولیه یون 300 میلی‌گرم بر لیتر	لانگمویر	209.27	[۱۲۳]
غشای شبکه آمیخته پلی‌اترسولفون و نانولوله کربنی	pH=7، غلظت اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 150 میلی‌گرم	لانگمویر	9.73	[۱۲۴]
غشای شبکه آمیخته پلی‌سولفون و کربن حاصل از تفاله نیشکر	غلظت اولیه یون 1600 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	فروندلیچ	79.76	[۱۲۵]
غشای شبکه آمیخته پلی‌سولفون و اکسیدآهن آب-دوست	pH=7، غلظت اولیه یون 45 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	لانگمویر	13	[۱۲۶]
زئولیت ZSM-5	pH=3، غلظت اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 0.2 گرم بر لیتر	لانگمویر	20.10	[۱۲۹]

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

روش‌های مختلفی برای حذف یون سرب وجود دارد که در بین آن‌ها، عملیات واحد جذب سطحی، روشی مناسب و کارآمد است. به‌منظور کنترل میزان آلاینده، پژوهشگران برای ساخت و اصلاح جاذب‌های مختلف و بررسی عملکرد آن‌ها تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. برخی از این جاذب‌ها باتوجه به ساختار مناسب و گروه‌های عاملی فراوان، ظرفیت کافی برای جذب یون سرب دارند اما در برخی دیگر نیاز به اصلاح خواص جاذب‌ها با استفاده از روش‌های مختلف وجود دارد. برخی از روش‌های اصلاح خواص عبارتند از: ترکیب با سایر جاذب‌ها، اصلاح با اسیدها (مثل اتیل‌دی‌آمین‌تری‌استیک‌اسید)، تلقیح گروه‌های عاملی مختلف مثل هیدروکسیل و کربوکسیل بر سطح جاذب و ترکیب جاذب‌های معدنی و فلزی با برخی پلیمرها مثل پلی‌آمین و پلی‌اکریلیک اسید. پلیمرهای طبیعی (مثل سلولز و کیتوسان)، سنتزی (مثل پلی‌وینیل‌الکل و مونومرهای متیل‌بنزن) و همچنین ترکیب این پلیمرها با یکدیگر نیز به‌منظور افزایش ظرفیت جذب یون سرب استفاده شده است. علاوه بر افزایش ظرفیت جذب یون سرب، بحث جداسازی یون‌ها از جاذب و احیای مجدد پس از جذب نیز مطرح است که برای این منظور روش‌هایی مثل پوشش‌دهی جاذب‌ها با نانوذرات مغناطیسی (مثل Fe_3O_4) ارائه شده است. غشاهای شبکه آمیخته جاذب بر پایه پلیمرها که با وارد کردن نانوذرات مناسب اصلاح شده‌اند یا به روش حک اثر یون سرب انتخاب پذیر شده‌اند نیز جالب توجه بوده است. زئولیت‌ها (مثل ZSM-۵ و NA) نیز به‌دلیل ساختار شبکه‌ای و پرحفره، وجود یون‌های فلزات قلیایی و قلیایی‌خاکی و قابلیت احیا و استفاده مجدد برای جذب یون سرب مناسبند.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

مراجع

[1] A. T. Ojedokun, O. S. Bello, "Sequestering Heavy Metals from Wastewater Using Cow Dung," Water Resources and Industry, vol. 13, pp. 7-13, 2016.
[2] S. S. Madaeni, F. Heidary, E. Salehi "Co-Adsorption/Filtration of Heavy Metal Ions from Water Using Regenerated Cellulose UF Membranes Modified with Deta Ligand," Separation Science Technology,Vol. 48, No. 9, Pp. 1308-1314, 2013.
[3] M. Barakat, "New Trends in Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater," Arabian Journal of Chemistry, vol. 4, No. 4, pp. 361-377, 2011.
[4] N. Shiomi, "An Assessment of the Causes of Lead Pollution and the Efficiency of Bioremediation by Plants and Microorganisms," in Advances in Bioremediation of Wastewater and Polluted Soil: Intech, 2015.
[5] Z. Shi, P. Zou, M. Guo, S. Yao, "Adsorption Equilibrium and Kinetics of Lead Ion onto Synthetic Ferrihydrites," (in Eng), Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), vol. 34, No. 3, pp. 25-32, 2015.
[6] M. Gopi Kiran, K. Pakshirajan, G. Das, "An Overview of Sulfidogenic Biological Reactors for the Simultaneous Treatment of Sulfate and Heavy Metal Rich Wastewater," Chemical Engineering Science, vol. 158, pp. 606-620, 2017.
[7] M. Ahmaruzzaman and V. K. Gupta, "Rice Husk and its Ash as Low-Cost Adsorbents in Water and Wastewater Treatment," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 50, No. 24, pp. 13589-13613, 2011.
[8] P. K. Pandey, S. Sharma, S. Sambi, "Removal of Lead (II) from Waste Water on Zeolite-NaX," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 3, No. 4, pp. 2604-2610, 2015.
[9]P. Daraei, S. S. Madaeni, N. Ghaemi, E. Salehi, M. A. Khadivi, R. Moradian, B. Astinchap "Novel Polyethersulfone Nanocomposite Membrane Prepared by Pani/Fe3O4 Nanoparticles with Enhanced Performance for Cu(II) Removal from Water," Journal of Membrane Science, vol. 415-416, pp. 250-259, 2012.
[10] S. S. Ahluwalia and D. Goyal, "Microbial and Plant Derived Biomass for Removal of Heavy Metals from Wastewater," Bioresource Technology, vol. 98, No. 12, pp. 2243-2257, 2007.
[11] E. Salehi, S. Madaeni, L. Rajabi, A. Derakhshan, S. Daraei, V. Vatanpour, "Static and Dynamic Adsorption of Copper Ions on Chitosan/Polyvinyl Alcohol Thin Adsorptive Membranes: Combined Effect of Polyethylene Glycol and Aminated Multi-Walled Carbon Nanotubes," Chemical Engineering Journal ,vol. 215, pp. 791-801, 2013.
[12] G. Zhao, J. Li, X. Ren, C. Chen, X. Wang, "Few-Layered Graphene Oxide Nanosheets as Superior Sorbents for Heavy Metal Ion Pollution Management," Environmental Science & Technology, vol. 45, No. 24, pp. 10454-10462, 2011.
[13] G. Crini, E. Lichtfouse, L. D. Wilson, N. Morin-Crini, "Conventional and Non-Conventional Adsorbents for Wastewater Treatment," Environmental Chemistry Letters pp. 1-19, 2018.
[14] A. Dąbrowski "Adsorption—From Theory to Practice," Advances in Colloid Interface Science, vol. 93, No. 1-3, pp. 135-224, 2001.
[15] N. Arena, J. Lee, R. Clift, "Life Cycle Assessment of Activated Carbon Production from Coconut Shells" Journal of Cleaner Production vol. 125, pp. 68-77, 2016.
[16] A. Mohammad-Khah, R. Ansari, "Activated Charcoal; Preparation, Characterization and Applications: a Review Article," International Journal of Chemtech Research, vol. 1, pp. 2745-2788, 2009.
[17] S. Shrestha, G. Son, S. H. Lee, T. G. Lee, "Isotherm and Thermodynamic Studies of Zn (II) Adsorption on Lignite and Coconut Shell-Based Activated Carbon Fiber," Chemosphere, vol. 92, No. 8, pp. 1053-1061, 2013.
[18] J. M. Dias, M. C. Alvim-Ferraz, M. F. Almeida, J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, "Waste Materials for Activated Carbon Preparation and its Use in Aqueous-Phase Treatment: a Review," Journal of Environmental Management, vol. 85, No. 4, pp. 833-846, 2007.
[19] J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, V. Gómez-Serrano, P. Alvarez, M. Alvim-Ferraz, J. Dias, "Activated Carbon Modifications to Enhance its Water Treatment Applications. An Overview," Journal of Hazardous Materials, vol. 187, No. 1, pp. 1-23, 2011.
[20] E. Salehi, A. Farahani, "Macroporous Chitosan/Polyvinyl Alcohol Composite Adsorbents Based on Activated Carbon Substrate," Journal of Porous Materials, vol. 24, No. 5, pp. 1197-1207, 2017.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

[21] L. Mouni, D. Merabet, A. Bouzaza, L. Belkhiri, "Adsorption of Pb (II) from Aqueous Solutions Using Activated Carbon Developed from Apricot Stone," Desalination, vol. 276, No. 1, pp. 148-153, 2011.
[22] S.-F. Lo, S.-Y. Wang, M.-J. Tsai, L.-D. Lin, "Adsorption Capacity and Removal Efficiency of Heavy Metal Ions by Moso and Ma Bamboo Activated Carbons," Chemical Engineering Research and Design, vol. 90, No. 9, pp. 1397-1406, 2012.
[23] A. Nieto-Márquez, A. Pinedo-Flores, G. Picasso, E. Atanes, R. Sun Kou, "Selective Adsorption of Pb2+, Cr3+ and Cd2+ Mixtures on Activated Carbons Prepared from Waste Tires," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 5, No. 1, pp. 1060-1067, 2017.
[24] S. Abbaszadeh, S. R. Wan Alwi, C. Webb, N. Ghasemi, I. I. Muhamad, "Treatment of Lead-Contaminated Water Using Activated Carbon Adsorbent from Locally Available Papaya Peel Biowaste," Journal of Cleaner Production, vol. 118, pp. 210-222, 2016.
[25] T. Van Thuan, B. T. P. Quynh, T. D. Nguyen, V. T. T. Ho, L. G. Bach, "Response Surface Methodology Approach for Optimization of Cu2+, Ni2+ and Pb2+ Adsorption Using Koh-Activated Carbon From Banana Peel," Surfaces and Interfaces, vol. 6, pp. 209-217, 2017/03/01/2017.
[26] K. Sreejalekshmi, K. A. Krishnan, T. Anirudhan, "Adsorption of Pb (II) and Pb (II)-Citric Acid on Sawdust Activated Carbon: Kinetic and Equilibrium Isotherm Studies," Journal of Hazardous Materials, vol. 161, No. 2-3, pp. 1506-1513, 2009.
[27] M. A. P. Cechinel, S. M. A. G. Ulson De Souza, A. A. Ulson De Souza, "Study of Lead (II) Adsorption onto Activated Carbon Originating from Cow Bone," Journal of Cleaner Production, vol. 65, pp. 342-349, 2014.
[28] A. Okoye, P. Ejikeme, O. Onukwuli, "Lead Removal from Wastewater Using Fluted Pumpkin Seed Shell Activated Carbon: Adsorption Modeling and Kinetics," International Journal of Environmental Science & Technology, vol. 7, No. 4, pp. 793-800, 2010.
[29] R. Ahmad, S. Haseeb, "Adsorption of Pb(II) on Mentha Piperita Carbon (MTC) in Single and Quaternary Systems," Arabian Journal of Chemistry, vol. 10, pp. S412-S421, 2017.
[30] L. Wang, J. Zhang, R. Zhao, Y. Li, C. Li, C. Zhang, "Adsorption of Pb(II) on Activated Carbon Prepared from Polygonum Orientale Linn.: Kinetics, Isotherms, pH, and Ionic Strength Studies," Bioresource Technology, vol. 101, No. 15, pp. 5808-5814, 2010.
[31] G. A. Adebisi, Z. Z. Chowdhury, P. A. Alaba, "Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies of Lead Ion and Zinc Ion Adsorption from Aqueous Solution onto Activated Carbon Prepared from Palm Oil Mill Effluent," Journal of Cleaner Production, vol. 148, pp. 958-968, 2017.
[32] L. Giraldo-Gutiérrez, J. C. Moreno-Piraján, "Pb(II) and Cr(VI) Adsorption from Aqueous Solution on Activated Carbons Obtained from Sugar Cane Husk and Sawdust," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 81, No. 2, pp. 278-284, 2008.
[33] T. Brudey, L. Largitte, C. Jean-Marius, T. Tant, P. C. Dumesnil, P. Lodewyckx, "Adsorption of Lead by Chemically Activated Carbons from Three Lignocellulosic Precursors," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 120, pp. 450-463, 2016.
[34] Z. Li, X. Chang, Z. Hu, X. Huang, X. Zou, Q. Wu, R. Nie "Zincon-Modified Activated Carbon for Solid-Phase Extraction and Preconcentration of Trace Lead and Chromium from Environmental Samples," Journal of Hazardous Materials, vol. 166, No. 1, pp. 133-137, 2009.
[35] L. Monser, N. Adhoum, "Tartrazine Modified Activated Carbon for the Removal of Pb (II), Cd (II) and Cr (III)," Journal of Hazardous Materials, vol. 161, No. 1, pp. 263-269, 2009.
[36] M. H. Fatehi, J. Shayegan, M. Zabihi, I. Goodarznia, "Functionalized Magnetic Nanoparticles Supported on Activated Carbon for Adsorption of Pb(II) and Cr(VI) Ions from Saline Solutions," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 5, No. 2, pp. 1754-1762, 2017.
[37] R. Fu, Y. Liu, Z. Lou, Z. Wang, S. A. Baig, X. Xu, "Adsorptive Removal of Pb (II) by Magnetic Activated Carbon Incorporated with Amino Groups from Aqueous Solutions," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers , vol. 62, pp. 247-258, 2016.
[38] E. Alzahrani, "Gum Arabic-Coated Magnetic Nanoparticles for Methylene Blue Removal," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering Technology, vol. 3, No. 8, pp. 15118-15129, 2014.
[39] K. M. Mena Aguilar, Y. Amano, M. Machida, "Ammonium Persulfate Oxidized Activated Carbon Fiber as a High Capacity Adsorbent for Aqueous Pb(II)," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 4, No. 4, Part A, pp. 4644-4652, 2016.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

[40] Z.-L. Shi, F. Li, S.-H. Yao, "Adsorption Behaviors of Lead Ion onto Acetate Modified Activated Carbon Fiber," Desalination and Water Treatment, vol. 36, No. 1-3, pp. 164-170, 2011.
[41] R. Leyva-Ramos, M. S. Berber-Mendoza, J. Salazar-Rabago, R. M. Guerrero-Coronado, J. Mendoza-Barron, "Adsorption of Lead(II) from Aqueous Solution onto Several Types of Activated Carbon Fibers," Adsorption, vol. 17, No. 3, pp. 515-526, 2011.
[42] I. A. Abbas, A. Al-Amer, T. Laoui, M. Al-Marri, M. Nasser, M. Khraisheh, M. A. Atieh "Heavy Metal Removal from Aqueous Solution by Advanced Carbon Nanotubes: Critical Review of Adsorption Applications," Separation and Purification Technology, vol. 157, pp. 141-161, 2016.
[43]Y.-L. Zhao And J. F. Stoddart, "Noncovalent Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes," Accounts of Chemical Research, vol. 42, No. 8, pp. 1161-1171, 2009.
[44] E. Salehi, S. S. Madaeni, L. Rajabi, V. Vatanpour, A. A. Derakhshan, S. Zinadini, S. Ghorabi H. A. Monfared "Novel Chitosan/Poly (Vinyl) Alcohol Thin Adsorptive Membranes Modified with Amino Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes for Cu (II) Removal from Water: Preparation, Characterization, Adsorption Kinetics and Thermodynamics," Separation Purification Technology, vol. 89, pp. 309-319, 2012.
[45] M. Habuda-Stanić, M. Nujić, "Arsenic Removal by Nanoparticles: A Review," Environmental Science and Pollution Research, vol. 22, No. 11, pp. 8094-8123, 2015.
[46] N. A. Kabbashi, M. A. Atieh, A. Al-Mamun, M. E. S. Mirghami, M. D. Z. Alam, N. Yahya, "Kinetic Adsorption of Application of Carbon Nanotubes for Pb(II) Removal from Aqueous Solution," Journal of Environmental Sciences, vol. 21, No. 4, pp. 539-544, 2009.
[47] N. M. Mubarak, J. N. Sahu, E. C. Abdullah, N. S. Jayakumar, "Rapid Adsorption of Toxic Pb(II) Ions from Aqueous Solution Using Multiwall Carbon Nanotubes Synthesized by Microwave Chemical Vapor Deposition Technique," (In Eng), Journal of Environmental Sciences (China), vol. 45, pp. 143-155, 2016.
[48] V. K. Gupta, O. Moradi, L. Tyagi, S. Agarwal, H. Sadegh, R. Shahryari-Ghoshekandi, A. S. H. Makhlouf, M. Goodarzi, A. Garshasbi "Study on The Removal of Heavy Metal Ions from Industry Waste by Carbon Nanotubes: Effect of the Surface Modification: A Review," Critical Reviews In Environmental Science and Technology, vol. 46, No. 2, pp. 93-118, 2015.
[49] H. J. Wang, A. L. Zhou, F. Peng, H. Yu, L. F. Chen, "Adsorption Characteristic of Acidified Carbon Nanotubes for Heavy Metal Pb(II) in Aqueous Solution," Materials Science and Engineering: A, vol. 466, No. 1, pp. 201-206, 2007.
[50] M. Jahangiri, F. Kiani, H. Tahermansouri, A. Rajabalinezhad, "The Removal of Lead Ions from Aqueous Solutions by Modified Multi-Walled Carbon Nanotubes with 1-Isatin-3-Thiosemicarbazone," Journal of Molecular Liquids, vol. 212, pp. 219-226, 2015.
[51] Z. Li, J. Chen, Y. Ge, "Removal of Lead Ion and Oil Droplet from Aqueous Solution by Lignin-Grafted Carbon Nanotubes," Chemical Engineering Journal, vol. 308, pp. 809-817, 2017.
[52] Y. Bian, Z.-Y. Bian, J.-X. Zhang, A.-Z. Ding, S.-L. Liu, H. Wang, "Effect of the Oxygen-Containing Functional Group of Graphene Oxide on the Aqueous Cadmium Ions Removal," Applied Surface Science, vol. 329, pp. 269-275, 2015.
[53] H. Wang, X. Yuan, Y. Wu, H. Huang, G. Zeng, Y. Liu, X. Wang, N. Lin, Y. Qi "Adsorption Characteristics and Behaviors of Graphene Oxide for Zn(II) Removal from Aqueous Solution," Applied Surface Science, vol. 279, pp. 432-440, 2013.
[54] S.-T. Yang, Y. Chang, H. Wang, G. Liu, S. Chen, Y. Wang, Y. Liu, A. Cao "Folding/Aggregation of Graphene Oxide and its Application in Cu2+ Removal," Journal of Colloid and Interface Science, vol. 351, No. 1, pp. 122-127, 2010.
[55] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, R. S. Ruoff, "The Chemistry of Graphene Oxide," Chemical Society Reviews, vol. 39, No. 1, pp. 228-240, 2010.
[56] A. E. Amooghin, S. Mashhadikhan, H. Sanaeepur, A. Moghadassi, T. Matsuura, S. Ramakrishna, "Substantial Breakthroughs on Function-Led Design of Advanced Materials Used in Mixed Matrix Membranes (MMMs): A New Horizon for Efficient Co2 Separation," Progress In Materials Science, vol. 102, pp. 222-295, 2019.
[57] F. Perreault, A. F. De Faria, M. Elimelech, "Environmental Applications of Graphene-Based Nanomaterials," Chemical Society Reviews ,vol. 44, No. 16, pp. 5861-5896, 2015.
[58] G. Zhao, X. Ren, X. Gao, X. Tan, J. Li, C. Chen, Y. Huang, X. Wang "Removal of Pb (II) Ions from

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Aqueous Solutions on Few-Layered Graphene Oxide Nanosheets," Dalton Transactions, vol. 40, No. 41, pp. 10945-10952, 2011.
[59] W. Peng, H. Li, Y. Liu, S. Song, "Comparison of Pb(II) Adsorption onto Graphene Oxide Prepared from Natural Graphites: Diagramming the Pb(II) Adsorption Sites," Applied Surface Science, vol. 364, pp. 620-627, 2016.
[60] Z.-H. Wang, B.-Y. Yue, J. Teng, F.-P. Jiao, X.-Y Jiang, J.-G. Yum. Zhong, X.-Q. Chen "Tartaric Acid Modified Graphene Oxide as a Novel Adsorbent for High-Efficiently Removal of Cu (II) and Pb (II) from Aqueous Solutions," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 66, pp. 181-190, 2016.
[61] M. Yari, M. Rajabi, O. Moradi, A. Yari, M. Asif, S. Agarwal "Kinetics of the Adsorption of Pb (II) Ions from Aqueous Solutions by Graphene Oxide and Thiol Functionalized Graphene Oxide," Journal of Molecular Liquids, vol. 209, pp. 50-57, 2015.
[62] L. Hu, Z. Yang, L. Cui, Y. Li, H. H. Ngo, Y. Wang, Q. Wei, H. Ma, L. Yan, B. Du "Fabrication of Hyperbranched Polyamine Functionalized Graphene for High-Efficiency Removal of Pb (II) and Methylene Blue," Chemical Engineering Journal, vol. 287, pp. 545-556, 2016.
[63] F. Ge, M.-M. Li, H. Ye, B.-X. Zhao, "Effective Removal of Heavy Metal Ions Cd2+, Zn2+, Pb2+, Cu2+ from Aqueous Solution by Polymer-Modified Magnetic Nanoparticles," Journal of Hazardous Materials, vol. 211-212, pp. 366-372, 2012.
[64] L. Fan, C. Luo, M. Sun, X. Li, H. J. C. Qiu, S. B. Biointerfaces, "Highly Selective Adsorption of Lead Ions by Water-Dispersible Magnetic Chitosan/Graphene Oxide Composites," Colloids Surfaces B: Biointerfaces, vol. 103, pp. 523-529, 2013.
[65] L. Cui, Y. Wang, L. Gao, L. Hu, L. Yan, Q, Wei, B. Du "Edta Functionalized Magnetic Graphene Oxide for Removal of Pb (II), Hg (II) and Cu (II) in Water Treatment: Adsorption Mechanism and Separation Property," Chemical Engineering Journal, vol. 281, pp. 1-10, 2015.
[66] N. Danesh, M. Hosseini, M. Ghorbani, A. Marjani, "Fabrication, Characterization and Physical Properties of a Novel Magnetite Graphene Oxide/Lauric Acid Nanoparticles Modified by Ethylenediaminetetraacetic Acid and its Applications as an Adsorbent for the Removal of Pb (II) Ions," Synthetic Metals, vol. 220, pp. 508-523, 2016.
[67] I. Ojea-Jiménez, X. N. López, J. Arbiol, V. Puntes, "Citrate-Coated Gold Nanoparticles as Smart Scavengers for Mercury (II) Removal from Polluted Waters," Acs Nano, vol. 6, No. 3, pp. 2253-2260, 2012.
[68] M.-L. Bonnet, D. Costa, E. Protopopoff, P. Marcus, "Theoretical Study of the Pb Adsorption on Ni, Cr, Fe Surfaces and on NI Based Alloys," Applied Surface Science, vol. 426, pp. 788-795, 2017/12/31/ 2017.
[69] A. Afkhami, M. Saber-Tehrani, H. Bagheri, "Simultaneous Removal of Heavy-Metal Ions in Wastewater Samples Using Nano-Alumina Modified with 2, 4-Dinitrophenylhydrazine," Journal of Hazardous Materials, vol. 181, No. 1-3, pp. 836-844, 2010.
[70] S. Recillas, A. García, E. González, E. Casals, V. Puntes, A. Sánchez, X. Font "Use of CeO2, TiO2 and Fe3O4 Nanoparticles for the Removal of Lead from Water: Toxicity of Nanoparticles and Derived Compounds," Desalination, vol. 277, No. 1-3, pp. 213-220, 2011.
[71] S. Mahdavi, M. Jalali, A. Afkhami, "Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions Using Fe3O4, ZnO, and CuO Nanoparticles," In Nanotechnology for Sustainable Development: Springer, 2012, pp. 171-188.
[72] Y. Sharma, V. Srivastava, E. Data, "Comparative Studies of Removal of Cr (VI) and Ni (II) from Aqueous Solutions by Magnetic Nanoparticles," Journal of Chemical Engineering Data, vol. 56, No. 4, pp. 819-825, 2010.
[73] S. Rajput, C. U. Pittman Jr, D. Mohan, "Magnetic Magnetite (Fe3O4) Nanoparticle Synthesis and Applications for Lead (Pb2+) and Chromium (Cr6+) Removal from Water," Journal of Colloid Interface Science, vol. 468, pp. 334-346, 2016.
[74] N. Kataria, V. Garg, "Optimization of Pb (II) and Cd (II) Adsorption onto ZnO Nanoflowers Using Central Composite Design: Isotherms and Kinetics Modelling," Journal of Molecular Liquids, vol. 271, pp. 228-239, 2018.
[75] A. Farghali, M. Bahgat, A. E. Allah, B.-S. Khedr, "Adsorption of Pb (II) Ions from Aqueous Solutions Using Copper Oxide Nanostructures," Journal of Basic Applied Sciences, vol. 2, No. 2, pp. 61-71, 2013.
[76] S. Yari, S. Abbasizadeh, S. E. Mousavi, M. S. Moghaddam, A. Z. Moghaddam, "Adsorption of Pb(II) and Cu(II) Ions from Aqueous Solution by an Electrospun CeO2 Nanofiber Adsorbent Functionalized with Mercapto Groups," Process Safety and Environmental Protection, vol. 94, pp. 159-171, 2015.
[77] K. A. Gebru, C. Das, "Removal Of Pb (II) And Cu (II)

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Ions from Wastewater Using Composite Electrospun Cellulose Acetate/Titanium Oxide (TiO2) Adsorbent," Journal of Water Process Engineering, vol. 16, pp. 1-13, 2017.
[78] M. A. Shaker, A. A. Yakout, "Optimization, Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies of Pb(II) Ions Adsorption onto N-Maleated Chitosan-Immobilized TiO2 Nanoparticles from Aqueous Media," Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, vol. 154, pp. 145-156, 2016.
[79] A. Naeem, M. T. Saddique, S. Mustafa, Y. Kim, B. Dilara, "Cation Exchange Removal of Pb from Aqueous Solution by Sorption onto NiO," Journal of Hazardous Materials, vol. 168, No. 1, pp. 364-368, 2009.
[80] T. Sheela, Y. A. Nayaka, "Kinetics and Thermodynamics of Cadmium and Lead Ions Adsorption on NiO Nanoparticles," Chemical Engineering Journal, vol. 191, pp. 123-131, 2012.
[81] W. Zhang, L. Meng, G. Mu, M. Zhao, P. Zou, Y. Zhang, "A Facile Strategy for Fabrication of Nano-ZnO/Yeast Composites and Their Adsorption Mechanism Towards Lead (II) Ions," Applied Surface Science, vol. 378, pp. 196-206, 2016.
[82] A. Modwi, L. Khezami, K. Taha, O. Al-Duaij, A. Houas, "Fast and High Efficiency Adsorption of Pb (II) Ions by Cu/ZnO Composite," Materials Letters, vol. 195, pp. 41-44, 2017.
[83] H. A. Sani, M. B. Ahmad, M. Z. Hussein, N. A. Ibrahim, A. Musa, T. A. Saleh, "Nanocomposite of ZnO With Montmorillonite for Removal of Lead and Copper Ions from Aqueous Solutions," Process Safety and Environmental Protection, vol. 109, pp. 97-105, 2017.
[84] H. Zhang, L. Gu, L. Zhang, S. Zhengh. Wan, J. Sun, D. Zhu, Z. Xu "Removal of Aqueous Pb (II) by Adsorption on Al_2O_3-Pillared Layered MnO_2," Applied Surface Science, vol. 406, pp. 330-338, 2017.
[85] S. Mohan, V. Kumar, D. K. Singh, S. H. Hasan, "Effective Removal of Lead Ions Using Graphene Oxide-MgO Nanohybrid from Aqueous Solution: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Modeling of Adsorption," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 5, pp. 2259-2273, 2017..
[86] L. Ge, W. Wang, Z. Peng, F. Tan, X. Wang, J. Chen, X. Qiao "Facile Fabrication of Fe@Mgo Magnetic Nanocomposites for Efficient Removal of Heavy Metal Ion and Dye From Water," Powder Technology, vol. 326, pp. 393-401, 2018.
[87] J. Parsons, M. Lopez, J. Peralta-Videa, J. Gardea-Torresdey, "Determination of Arsenic (III) and Arsenic (V) Binding to Microwave Assisted Hydrothermal Synthetically Prepared Fe_3O_4, Mn_3O_4, and $Mnfe_2O_4$ Nanoadsorbents," Microchemical Journal, vol. 91, No. 1, pp. 100-106, 2009.
[88]Y. Ren, N. Li, J. Feng, T. Luan, Q. Wen, Z. Li, M. Zhang "Adsorption of Pb (II) and Cu (II) from Aqueous Solution on Magnetic Porous Ferrospinel $MnFe_2O_4$," Journal of Colloid and Interface Science, vol. 367, No. 1, pp. 415-421, 2012.
[89]Y.-J. Tu, C.-F. You, M.-H. Chen, Y.-P. Duan, "Efficient Removal/Recovery of Pb onto Environmentally Friendly Fabricated Copper Ferrite Nanoparticles," Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 71, pp. 197-205, 2017.
[90] Y. Zhang, L. Yan, W. Xu, X. Guo, L. Cui, L. Gao, Q. Wei, B. Du "Adsorption of Pb (II) and Hg (II) from Aqueous Solution Using Magnetic $CoFe_2O_4$-Reduced Graphene Oxide," Journal of Molecular Liquids, vol. 191, pp. 177-182, 2014.
[91] J.-G. Yu, B.-Y. Yue, X.-W. Wu, Q. Liuf.-P. Jiao, X.-Y. Jiang, X.-Q. Chen ,"Removal of Mercury by Adsorption: A Review," Environmental Science and Pollution Research, vol. 23, No. 6, pp. 5056-5076, 2016.
[92] H. Javadian, B. B. Koutenaei, E. Shekarian, F. Z. Sorkhrodi, R. Khatti, M. Toosi, "Application of Functionalized Nano HMS Type Mesoporous Silica with N-(2-Aminoethyl)-3-Aminopropyl Methyldimethoxysilane as a Suitable Adsorbent for Removal of Pb (II) from Aqueous Media and Industrial Wastewater," Journal of Saudi Chemical Society, 2014.
[93] M. Ghorbani, S. M. Nowee, N. Ramezanian, F. Raji, "A New Nanostructured Material Amino Functionalized Mesoporous Silica Synthesized via Co-Condensation Method for Pb (II) and Ni (II) Ion Sorption from Aqueous Solution," Hydrometallurgy, vol. 161, pp. 117-126, 2016.
[94] A. M. El-Toni, M. A. Habila, M. A. Ibrahim, J. P. Labis, Z. A. Alothman, "Simple and Facile Synthesis of Amino Functionalized Hollow Core–Mesoporous Shell Silica Spheres Using Anionic Surfactant for Pb (II), Cd (II), and Zn (II) Adsorption and Recovery," Chemical Engineering Journal, vol. 251, pp. 441-451, 2014.
[95] S. Hao, A. Verlotta, P. Aprea, F. Pepe, D. Caputo, W. Zhu, "Optimal Synthesis of Amino-Functionalized Mesoporous Silicas for the Adsorption of Heavy

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Metal Ions," Microporous and Mesoporous Materials, vol. 236, pp. 250-259, 2016.
[96] Y. Liu, Z. Lou, Y. Sun, X. Zhou, S. A. Baig, X. Xu, "Influence of Complexing Agent on the Removal of Pb (II) from Aqueous Solutions by Modified Mesoporous SiO2," Microporous and Mesoporous Materials, vol. 246, pp. 1-13, 2017.
[97] R. D. C. Soltani, G. S. Khorramabadi, A. Khataee, S. Jorfi, "Silica Nanopowders/Alginate Composite for Adsorption of Lead (II) Ions in Aqueous Solutions," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 45, No. 3, pp. 973-980, 2014.
[98] L. Hao, H. Song, L. Zhang, X. Wan, Y. Tang, Y. Lv, "SiO2/Graphene Composite for Highly Selective Adsorption of Pb (II) Ion," Journal of Colloid and Interface Science, vol. 369, No. 1, pp. 381-387, 2012.
[99] H. Chen, J. Zhao, G. Dai, J. Wu, H. Yan, "Adsorption Characteristics of Pb (II) from Aqueous Solution onto a Natural Biosorbent, Fallen Cinnamomum Camphora Leaves," Desalination, vol. 262, No. 1, pp. 174-182, 2010.
[100] Z. Li, X. Tang, Y. Chen, L. Wei, Y. Wang, "Activation of Firmiana Simplex Leaf and the Enhanced Pb (II) Adsorption Performance: Equilibrium and Kinetic Studies," Journal of Hazardous Materials, vol. 169, No. 1, pp. 386-394, 2009.
[101] S. Chakravarty, A. Mohanty, T. Sudha, A. Upadhyay, J. Konar, J. Sircar, A. Madhukar, K. Gupta, "Removal of Pb (II) Ions from Aqueous Solution by Adsorption Using Bael Leaves (Aegle Marmelos)," Journal of Hazardous Materials, vol. 173, No. 1, pp. 502-509, 2010.
[102] D. H. K. Reddy, Y. Harinath, K. Seshaiah, A. Reddy, "Biosorption of Pb (II) from Aqueous Solutions Using Chemically Modified Moringa Oleifera Tree Leaves," Chemical Engineering Journal, vol. 162, No. 2, pp. 626-634, 2010.
[103] A. M. Soliman, H. M. Elwy, T. Thiemann, Y. Majedi, F. T. Labata, N. A. Al-Rawashdeh, "Removal of Pb (II) Ions from Aqueous Solutions by Sulphuric Acid-Treated Palm Tree Leaves," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 58, pp. 264-273, 2016.
[104] M. El-Sayed, A. A. Nada, "Polyethylenimine–Functionalized Amorphous Carbon Fabricated from Oil Palm Leaves as a Novel Adsorbent for Cr (VI) and Pb (II) from Aqueous Solution," Journal of Water Process Engineering, vol. 16, pp. 296-308, 2017.
[105] V. S. Munagapati, V. Yarramuthi, S. K. Nadavala, S. R. Alla, K. Abburi, "Biosorption of Cu (II), Cd (II) and Pb (II) by Acacia Leucocephala Bark Powder: Kinetics, Equilibrium and Thermodynamics," Chemical Engineering Journal, vol. 157, No. 2, pp. 357-365, 2010.
[106] A. Gundogdu, D. Ozdes, C. Duran, V. N. Bulut, M. Soylak, H. B. Senturk, "Biosorption of Pb (II) Ions from Aqueous Solution by Pine Bark (Pinus Brutia Ten.)," Chemical Engineering Journal, vol. 153, No. 1, pp. 62-69, 2009.
[107] Z. Kariuki, J. Kiptoo, D. Onyancha, "Biosorption Studies of Lead and Copper Using Rogers Mushroom Biomass 'Lepiota Hystrix'," South African Journal of Chemical Engineering, vol. 23, pp. 62-70, 2017.
[108] A. Sar, M. Tuzen, "Kinetic And Equilibrium Studies of Biosorption of Pb (II) and Cd (II) from Aqueous Solution by Macrofungus (Amanita Rubescens) Biomass," Journal of Hazardous Materials, vol. 164, No. 2, pp. 1004-1011, 2009.
[109] G. Wang, D. Shao, G. Hou, X. Wang, A. Alsaedi, B. Ahmad, "Removal of Pb (II) from Aqueous Solutions by Phytolacca Americana L. Biomass as a Low Cost Biosorbent," Arabian Journal of Chemistry, vol. 11, No. 1, pp. 99-110, 2018.
[110] S. Saadat, A. Karimi-Jashni, "Optimization of Pb (Ii) Adsorption onto Modified Walnut Shells Using Factorial Design and Simplex Methodologies," Chemical Engineering Journal, vol. 173, No. 3, pp. 743-749, 2011.
[111] E. Pehlivan, T. Altun, S. Cetin, M. I. Bhanger, "Lead Sorption by Waste Biomass of Hazelnut and Almond Shell," Journal of Hazardous Materials, vol. 167, No. 1, pp. 1203-1208, 2009.
[112] M. Riaz, R. Nadeem, M. A. Hanif, T. M. Ansari, "Pb (II) Biosorption from Hazardous Aqueous Streams Using Gossypium Hirsutum (Cotton) Waste Biomass," Journal of Hazardous Materials, vol. 161, No. 1, pp. 88-94, 2009.
[113] A. Ronda, M. Martín-Lara, A. Almendros, A. Pérez, G. Blázquez, "Comparison of Two Models for the Biosorption of Pb (II) Using Untreated and Chemically Treated Olive Stone: Experimental Design Methodology and Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 54, pp. 45-56, 2015.
[114] A. K. Meena, K. Kadirvelu, G. Mishraa, C. Rajagopal, P. Nagar, "Adsorption of Pb (II) and Cd (II) Metal

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Ions from Aqueous Solutions by Mustard Husk," Journal of Hazardous Materials, vol. 150, No. 3, pp. 619-625, 2008.
[115] L. Jia, C. Enzan, S. Haijia, T. Tianwei, "Biosorption of Pb2+ with Modified Soybean Hulls as Absorbent," Chinese Journal of Chemical Engineering, vol. 19, No. 2, pp. 334-339, 2011.
[116] A. Kamari, S. N. M. Yusoff, F. Abdullah, W. P. Putra, "Biosorptive Removal of Cu (II), Ni (II) and Pb (II) Ions from Aqueous Solutions Using Coconut Dregs Residue: Adsorption and Characterisation Studies," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 2, No. 4, pp. 1912-1919, 2014.
[117] R. Jiang, J. Tian, H. Zheng, J. Qi, S. Sun, X. Li, "A Novel Magnetic Adsorbent Based on Waste Litchi Peels for Removing Pb (II) from Aqueous Solution," Journal of Environmental Management, vol. 155, pp. 24-30, 2015.
[118] D. Dissanayake, W. Wijesinghe, S. Iqbal, N. Priyantha, M. Iqbal, "Isotherm and Kinetic Study on Ni (II) And Pb (II) Biosorption by the Fern Asplenium Nidus L," Ecological Engineering, Vol. 88, pp. 237-241, 2016.
[119] A. Sarı, M. Tuzen, Ö. D. Uluözlü, M. Soylak, "Biosorption of Pb (II) and Ni (II) from Aqueous Solution by Lichen (Cladonia Furcata) Biomass," Biochemical Engineering Journal, vol. 37, No. 2, pp. 151-158, 2007.
[120] O. D. Uluozlu, A. Sari, M. Tuzen, M. Soylak, "Biosorption of Pb (II) And Cr (III) from Aqueous Solution by Lichen (Parmelina Tiliaceae) Biomass," Bioresource Technology, vol. 99, No. 8, pp. 2972-2980, 2008.
[121] A. Sarı, M. Tuzen, "Biosorption of Pb (II) and Cd (II) from Aqueous Solution Using Green Alga (Ulva Lactuca) Biomass," Journal of Hazardous Materials, vol. 152, No. 1, pp. 302-308, 2008.
[122] F. Brouers, T. J. Al-Musawi, "On the Optimal Use of Isotherm Models for the Characterization of Biosorption of Lead onto Algae," Journal of Molecular Liquids, vol. 212, pp. 46-51, 2015.
[123] A. Verma, S. Kumar, S. Kumar, "Biosorption of Lead Ions from the Aqueous Solution by Sargassum Filipendula: Equilibrium and Kinetic Studies," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 4, No. 4, pp. 4587-4599, 2016.
[124] X. Yang, X. Cui, "Adsorption Characteristics of Pb (II) on Alkali Treated Tea Residue," Water Resources and Industry, vol. 3, pp. 1-10, 2013.
[125] R. Gomez-Gonzalez, F. J. Cerino-Córdova, A. M. Garcia-León, E. Soto-Regalado, N. E. Davila-Guzman, J. J. Salazar-Rabago, "Lead Biosorption onto Coffee Grounds: Comparative Analysis of Several Optimization Techniques Using Equilibrium Adsorption Models and Ann," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 68, pp. 201-210, 2016.
[126] R. Nadeem, T. M. Ansari, A. M. Khalid, "Fourier Transform Infrared Spectroscopic Characterization and Optimization of Pb (II) Biosorption by Fish (Labeo Rohita) Scales," Journal of Hazardous Materials, vol. 156, No. 1, pp. 64-73, 2008.
[127] L. Pelit, F. N. Ertaş, A. E. Eroğlu, T. Shahwan, H. Tural, "Biosorption of Cu (II) and Pb (II) Ions from Aqueous Solution by Natural Spider Silk," Bioresource Technology, vol. 102, No. 19, pp. 8807-8813, 2011.
[128] M. J. Rwiza, S.-Y. Oh, K.-W. Kim, S. D. Kim, "Comparative Sorption Isotherms and Removal Studies for Pb (II) by Physical and Thermochemical Modification of Low-Cost Agro-Wastes from Tanzania," Chemosphere, vol. 195, pp. 135-145, 2018.
[129] A. A. Yakout, R. H. El-Sokkary, M. A. Shreadah, O. G. A. Hamid, "Removal of Cd (II) and Pb (II) from Wastewater by Using Triethylenetetramine Functionalized Grafted Cellulose Acetate-Manganese Dioxide Composite," Carbohydrate Polymers, vol. 148, pp. 406-414, 2016.
[130] N. Wang, R.-N. Jin, A. Omer, X.-K. Ouyang, "Adsorption of Pb (II) from Fish Sauce Using Carboxylated Cellulose Nanocrystal: Isotherm, Kinetics, and Thermodynamic Studies," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 102, pp. 232-240, 2017.
[131] J. Lu, R.-N. Jin, C. Liu, Y.-F. Wang, X.-K. Ouyang, "Magnetic Carboxylated Cellulose Nanocrystals as Adsorbent for the Removal of Pb (II) from Aqueous Solution," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 93, pp. 547-556, 2016.
[132] E. Salehi, S. S. Madaeni, "Influence of Poly(Ethylene Glycol) as Pore-Generator on Morphology and Performance of Chitosan/Poly(Vinyl Alcohol) Membrane Adsorbents," Applied Surface Science, vol. 288, pp. 537-541, 2014.
[133] E. Salehi, P. Daraei, A. A. Shamsabadi, "A Review on Chitosan-Based Adsorptive Membranes," Carbohydrate Polymers, vol. 152, pp. 419-432, 2016.
[134] V. K. Thakur, S. I. Voicu, "Recent Advances in

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Cellulose and Chitosan Based Membranes for Water Purification: A Concise Review," Carbohydrate Polymers, vol. 146, pp. 148-165, 2016.
[135] A. Heidari, H. Younesi, Z. Mehraban, H. Heikkinen, "Selective Adsorption of Pb (II), Cd (II), and Ni (IIi) Ions from Aqueous Solution Using Chitosan–Maa Nanoparticles," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 61, pp. 251-263, 2013.
[136] M. Badawi, N. Negm, M. A. Kana, H. Hefni, M. A. Moneem, "Adsorption of Aluminum and Lead from Wastewater by Chitosan-Tannic Acid Modified Biopolymers: Isotherms, Kinetics, Thermodynamics and Process Mechanism," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 99, pp. 465-476, 2017.
[137] C. Hu, P. Zhu, M. Cai, H. Hu, Q. Fu, "Comparative Adsorption of Pb (II), Cu (II) and Cd (II) on Chitosan Saturated Montmorillonite: Kinetic, Thermodynamic and Equilibrium Studies," Applied Clay Science, vol. 143, pp. 320-326, 2017.
[138] J. Gu, S. Yuan, W. Shu, W. Jiang, S. Tang, B. Liang, S. Pehkonen "PVBC Microspheres Tethered with Poly (3-Sulfopropyl Methacrylate) Brushes for Effective Removal of Pb (II) Ions from Aqueous Solution," Colloids and Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects, vol. 498, pp. 218-230, 2016.
[139] T. Anitha, P. S. Kumar, K. S. Kumar, B. Ramkumar, S. Ramalingam, "Adsorptive Removal of Pb (II) Ions from Polluted Water by Newly Synthesized Chitosan–Polyacrylonitrile Blend: Equilibrium, Kinetic, Mechanism and Thermodynamic Approach," Process Safety and Environmental Protection, vol. 98, pp. 187-197, 2015.
[140] X. Jiao, Y. Gutha, W. Zhang, "Application of Chitosan/Poly (Vinyl Alcohol)/CuO (Cs/PVA/CuO) Beads as an Adsorbent Material for the Removal of Pb (II) from Aqueous Environment," Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, vol. 149, pp. 184-195, 2017.
[141] S.-P. Kuang, Z.-Z. Wang, J. Liu, Z.-C. Wu, "Preparation of Triethylene-Tetramine Grafted Magnetic Chitosan for Adsorption of Pb (II) Ion from Aqueous Solutions," Journal of Hazardous Materials, vol. 260, pp. 210-219, 2013.
[142] V. K. Gupta, D. Gupta, S. Agarwal, Nc. Kothiyalm. Asif, S. Sood, D. Pathania "Fabrication of Chitosan-G-Poly (Acrylamide)/Cu Nanocomposite for the Removal of Pb (II) from Aqueous Solutions," Journal of Molecular Liquids, vol. 224, pp. 1319-1325, 2016.
[143] A. H. A. Saad, A. M. Azzam, S. T. El-Wakeel, B. B. Mostafa, M. B. El-Latif, , "Removal of Toxic Metal Ions from Wastewater Using ZnO@ Chitosan Core-Shell Nanocomposite," Environmental Nanotechnology, Monitoring, and Management, vol. 9, pp. 67-75, 2018.
[144] L. Chunxiang, G. Jie, P. Jianming, Z. Zhang, Y. Yongsheng, "Synthesis, Characterization, and Adsorption Performance of Pb (II)-Imprinted Polymer in Nano-Tio2 Matrix," Journal of Environmental Sciences, vol. 21, No. 12, pp. 1722-1729, 2009.
[145] Y. Lu, J. He, G. Luo, "An Improved Synthesis of Chitosan Bead for Pb (II) Adsorption," Chemical Engineering Journal, vol. 226, pp. 271-278, 2013.
[146] Y. He, Q. Liu, J. Hu, C. Zhao, C. Peng, Q. Yang, H. Wang, H. Liu "Efficient Removal of Pb (II) by Amine Functionalized Porous Organic Polymer Through Post-Synthetic Modification," Separation and Purification Technology, vol. 180, pp. 142-148, 2017.
[147] X. Wei, P. J. Sugumaran, E. Peng, X. L. Liu, J. Ding, Interfaces, "Low-Field Dynamic Magnetic Separation by Self-Fabricated Magnetic Meshes for Efficient Heavy Metal Removal," Acs Applied Materials Interfaces, vol. 9, No. 42, pp. 36772-36782, 2017.
[148] S. Mallakpour, A. Abdolmaleki, H. Tabebordbar, "Production of PVC/A-Mno2-KH550 Nanocomposite Films: Morphology, Thermal, Mechanical and Pb (II) Adsorption Properties," European Polymer Journal, vol. 78, pp. 141-152, 2016.
[149] F. Zhao, W. Z. Tang, D. Zhao, Y. Meng, D. Yin, M. Sillanpää, "Adsorption Kinetics, Isotherms and Mechanisms of Cd (II), Pb (II), Co (II) And Ni (II) by a Modified Magnetic Polyacrylamide Microcomposite Adsorbent," Journal of Water Process Engineering,vol. 4, pp. 47-57, 2014.
[150] S. Deng, P. Wang, G. Zhang, Y. Dou, "Polyacrylonitrile-Based Fiber Modified with Thiosemicarbazide by Microwave Irradiation and its Adsorption Behavior for Cd (II) And Pb (II)," Journal of Hazardous Materials, vol. 307, pp. 64-72, 2016.
[151] E. Salehi, S. Madaeni, V. Vatanpour, "Thermodynamic Investigation and Mathematical Modeling of Ion-Imprinted Membrane Adsorption," Journal of Membrane Science, vol. 389, pp. 334-342, 2012.
[152] E. Salehi, J. Abdi, M. H. Aliei, "Assessment of Cu (II) Adsorption from Water on Modified Membrane Adsorbents

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]

Using LS-SVM Intelligent Approach," Journal of Saudi Chemical Society ,vol. 20, No. 2, pp. 213-219, 2016.
[153] E. Salehi, S. Madaeni, "Adsorption of Humic Acid onto Ultrafiltration Membranes in the Presence of Protein and Metal Ions," Desalination ,vol. 263, No. 1-3, pp. 139-145, 2010.
[154] J. Yuan, W.-S. Hung, H. Zhu, K. Guan, Y. Ji, Y. Mao, G. Liu, K.-R. Lee "Fabrication of ZIF-300 Membrane and its Application for Efficient Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater," Journal of Membrane Science, vol. 572, pp. 20-27, 2019.
[155] E. Salehi, S. Madaeni, F. Heidary, "Dynamic Adsorption of Ni (II) and Cd (II) Ions from Water Using 8-Hydroxyquinoline Ligand Immobilized PVDF Membrane: Isotherms, Thermodynamics and Kinetics," Separation Purification Technology, vol. 94, pp. 1-8, 2012.
[156] J. Sun, L. Wu, Y. Li, "Removal of Lead Ions from Polyether Sulfone/Pb (II)-Imprinted Multi-Walled Carbon Nanotubes Mixed Matrix Membrane," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 78, pp. 219-229, 2017.
[157] J. He, Y. Song, J. P. Chen, "Development of a Novel Biochar/PSF Mixed Matrix Membrane and Study of Key Parameters in Treatment of Copper and Lead Contaminated Water," Chemosphere, vol. 186, pp. 1033-1045, 2017.
[158] N. Abdullah, Rj. Gohari, N. Yusof, Af. Ismail, J. Juhana, W. Lau, T. Matsuura "Polysulfone/Hydrous Ferric Oxide Ultrafiltration Mixed Matrix Membrane: Preparation, Characterization and its Adsorptive Removal of Lead (Ii) from Aqueous Solution," Chemical Engineering Journal, vol. 289, pp. 28-37, 2016.
[159] P. Chutia, S. Kato, T. Kojima, S. Satokawa, "Arsenic Adsorption from Aqueous Solution on Synthetic Zeolites," Journal of Hazardous Materials, vol. 162, No. 1, pp. 440-447, 2009.
[160] J. Perić, M. Trgo, N. Vukojević Medvidović, "Removal of Zinc, Copper and Lead by Natural Zeolite—a Comparison of Adsorption Isotherms," Water Research, vol. 38, No. 7, pp. 1893-1899, 2004.
[161] A. Buasri, N. Chaiyut, K. Phattarasirichot, P. Yongbut, L. Nammueng, "Use of Natural Clinoptilolite for the Removal of Lead (Ii) from Wastewater in Batch Experiment," Chiang Mai Journal of Science, vol. 35, No. 3, pp. 447-456, 2008.
[162] A. A. Ponizovsky, C. Tsadilas, "Lead (Ii) Retention by Alfisol and Clinoptilolite: Cation Balance and Ph Effect," Geoderma, vol. 115, No. 3-4, pp. 303-312, 2003.
[163] M. Sprynskyy, B. Buszewski, A. P. Terzyk, J. Namieśnik, "Study of the Selection Mechanism of Heavy Metal (Pb2+, Cu2+, Ni2+, And Cd2+) Adsorption on Clinoptilolite," Journal of Colloid Interface Science, vol. 304, No. 1, pp. 21-28, 2006.
[164] X. Wang, D. Shao, G. Hou, X. Wang, A. Alsaedi, B. Ahmad, "Uptake of Pb (II) and U (VI) Ions from Aqueous Solutions by the ZSM-5 Zeolite," Journal of Molecular Liquids, vol. 207, pp. 338-342, 2015.
[165] M. Khodadadi, A. Malekpour, M. Ansaritabar, M. Materials, "Removal of Pb (II) and Cu (II) from Aqueous Solutions by NaA Zeolite Coated Magnetic Nanoparticles and Optimization of Method Using Experimental Design," Microporous Mesoporous Materials, vol. 248, pp. 256-265, 2017.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-01]