

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

**Ehsan Salehi <sup>1,\*</sup>, Mohsen Goodarzi <sup>2</sup>, Hamidreza Sanaeepur <sup>3</sup>,  
Einallah Khademian <sup>4</sup>**

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

# پژوهش‌های کاربردی مهندسي شيمي - پلimer

## مروري بر حذف یون سرب از محلول‌های آبی با عملیات جذب سطحی

احسان صالحی<sup>۱\*</sup>، محسن گودرزی<sup>۲</sup>، حمیدرضا ستایی‌پور<sup>۳</sup>، عین‌الله خادمیان<sup>۴</sup>

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

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای

سال سوم، شماره ۱، نسخه ۱

بهار ۱۳۹۸، صفحه ۳-۲۸

### چکیده

در این مقاله، جاذب‌های مورد استفاده برای حذف یون سرب با استفاده از عملیات جذب سطحی مروی شده است.

انواع جاذب‌های مورد استفاده برای حذف یون سرب، اصلاح خواص انجام شده روی آن‌ها، شرایط عملیاتی جذب، همدهماها و ظرفیت جذب جاذب‌ها با مرور مقالات بررسی و مقایسه شده است.

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

### واژه‌های کلیدی

سرب  
جذب سطحی  
جادب  
اصلاح خواص جاذب

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

## ۱ مقدمه

بیماری‌های قلبی و عروقی می‌شود [۴]. سرب، فلزی خاکستری رنگ با نماد Pb، عدد اتمی ۸۲ و جرم اتمی  $207/2\text{ g/mol}$  است که در جدول تناوبی جزء عناصر واسطه به حساب می‌آید. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تماس و حتی به طور طولانی مدت در معرض این آلینده قرار گرفتن می‌تواند بر عملکرد خون، کلیه، کبد و مغز انسان تأثیرگذار باشد. تقریباً ۴۰ تا ۵۰ درصد سرب ورودی از طریق بینی، جذب ریه می‌شود [۵]. این یون تمايل زیادی به واکنش با آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و زیست‌ملکول‌هایی دارد که حاوی گروه‌های فسفاته و تیول هستند. بنابراین به واسطه ترکیب با آن‌ها می‌تواند باعث تغییر تراوایی غشای کلیوی، کبد و حتی سلول‌های مغزی شود [۶]. بنابراین حذف این آلینده از منابع آبی، موضوعی حیاتی است. حداکثر میزان مجاز یون سرب در آب آشامیدنی  $mg/L$   $0/01$  [۷] و همچنین در فاضلاب (پساب)  $mg/L$   $0/1$  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 آلینده 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 محیط زیست 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 [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 انعطاف-پذیر در بهره‌برداری و طراحی است. در فرایند جذب سطحی، جاذب‌ها را می‌توان با استفاده از سازوکارهای ساده انتقال حرارتی (گرم‌گیری) یا احیاناً شست و شوی شیمیایی، احیاء (فروشوبی) و دوباره از جاذب استفاده

امروزه به دلیل فعالیت‌های فزاینده‌ی کشورها در عرصه‌های متنوع صنعتی، کشاورزی و فناوری، انسان‌ها بیشتر از گذشته در معرض آلینده‌های فلزات سنگین قرار گرفته‌اند [۱]. فلزات سنگین مانند مس، سرب، روی، کادمیوم و نیکل از شایع‌ترین آلینده‌های موجود در پساب‌های صنعتی است. حتی مقادیر کم این فلزات می‌تواند برای انسان و محیط‌زیست سمی باشد [۲]. به دلیل تخلیه مقادیر زیادی از آلینده‌های 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 آلینده‌های است که به دلیل گستردگی منابع تولید آن، امروزه به نحو فرایندهای در محیط‌زیست پراکنده شده است. این یون می‌تواند حاصل از فعالیت صنایع پاتری‌سازی، 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 به دلیل داشتن نقطه ذوب پایین و خاصیت چکش‌خواری می‌تواند به راحتی شکل دهی 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  $40$  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

از جمله ساختار متخلخل با سطح داخلی بسیار زیاد، ظرفیت جذب فراوان و دارا بودن سایتهاي جذب متنوع، به عنوان يكى از جاذب‌های ايده‌آل برای حذف انواع آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گيرد [۱۵-۱۷]. ويژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کربن فعال، متأثر از عواملی مانند فرایند تولید، ماده اولیه‌ای که کربن از آن تولید شده (پیش‌ساز) و همچنین نحوه فعال‌سازی است [۱۸, ۱۹]. برخی از روش‌های اصلاحی برای بهبود خواص کربن فعال، عبارتند از فرایند پلاسمای فرایند اسیدشويي/بازشوسي، رسوب شيميايي و پرتوفاكني با اشعه مايكرويو [۲۰].

برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی، طيف گستردگی از پیش‌سازها، روش‌های تولید و فعال‌سازی به کار گرفته شده است. هسته‌ی زرداًلو [۲۱]، چوب بامبو [۲۲]، لاستیک مستعمل [۲۳]، پوست انبه [۲۴]، پوست موز [۲۵]، خاک اره [۲۶]، استخوان گاو [۲۷]، انواع دانه‌ها [۲۸]، گیاهان [۲۹, ۳۰] و تفاله‌های آن‌ها [۱۲, ۳۱]، [۳۲] برای ساخت کربن فعال مورد استفاده در جذب یون سرب استفاده شده‌اند. اين مواد پس از خرد شدن، در دماهای زياد تبديل به کربن می‌شوند. برای فعال‌سازی کربن و ايجاد گروه‌های عاملی مختلف بر سطوح آن، از مواد و روش‌های مختلفی استفاده شده است. گاهی پيش از بالا بردن دما، ماده اولیه را در محلول اسیدی [۳۳] یا بازي 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

کرد [۱۲]. احیاپذیری و قابلیت استفاده مجدد، فرایندهای جذب سطحی را از دیدگاه اقتصادی مقرن به صرفه و توجیه پذیر 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 اين زمينه بررسی خواهد شد.

## ۲ انواع مواد جاذب برای حذف یون سرب

معمولًاً جاذب‌های 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 آلمینوسیلیکات‌ها
  - ۴) ضایعات جامد کشاورزی و محصولات جانبی صنعتی مثل گل سرخ، ذرات خاکستر (Fly ash)
  - ۵) زیست‌توده‌ها از قبیل کیتوسان، قارچ، زیست‌توده باکتریایی
- دسته‌بندی دیگر جاذب‌ها توسط دابروسکی [۱۴] ارائه شده است که در جدول ۱ آورده شده است:

### ۲-۱ کربن فعال

کربن فعال به دليل خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب

جدول ۱ جاذب‌های پرکاربرد در صنعت [۱۴]

Table1 More common Industrial Adsorbents

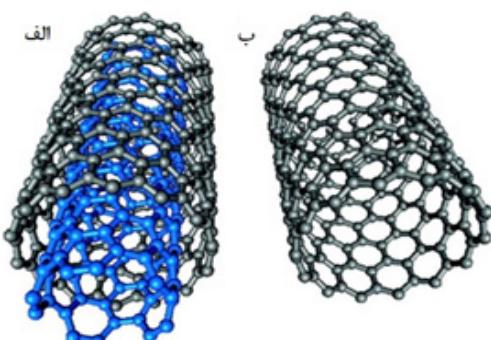
جاذب‌های پایه کربنی	جاذب‌های معدنی	دیگر جاذب‌ها
کربن فعال	اکسید فلزات	پلیمرها
کربن فعال لیفی‌شكل	زئولیت‌ها	جادب‌های کامپوزیتی (کربن‌های معدنی)
غربال‌های کربن مولکولی	آلومینای فعال	جادب‌های ترکیبی

## ۲-۱ کربن فعال لیفی شکل

کربن فعال لیفی شکل به دلیل سطح داخلی بیشتر و وزن کمتر نسبت به کربن‌های فعال دانه‌ای شکل، 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 لیفی شکل به وسیله‌ی آمونیوم پرسولفات موجب  $10\%$  برابر شدن ظرفیت جذب جاذب، نسبت به حالت خالص شده است. این افزایش ظرفیت، به دلیل ایجاد شدن گروههای عاملی اکسیژن‌دار به ویژه گروه کربوکسیل در سطح جاذب است [۳۹]. اصلاح این نوع از جاذب‌ها توسط سدیم استات، پتاسیم استات و لیتیوم استات، اگرچه موجب کاهش سطح داخلی کربن‌ها شده اما میزان جذب سرب را به دلیل ایجاد گروه عاملی کربوکسیل، افزایش داده است [۴۰]. اثر اکسایش به وسیله‌ی اسیدنیتریک هم، بر عملکرد این نوع جاذب مثبت بوده است [۴۱].

## ۲-۱-۳ نانولوله‌های کربنی

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

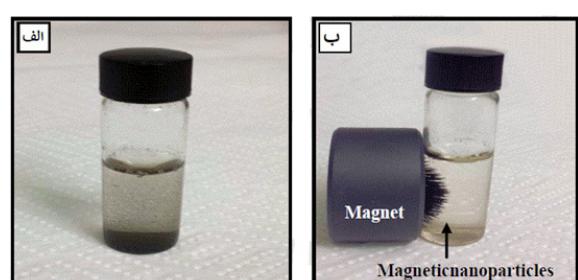


شکل ۲ ساختارهای نانولوله‌های کربنی مربوط به (الف) نانولوله کربنی چند‌دیواره و (ب) نانولوله کربنی تک‌دیواره [۴۳].

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

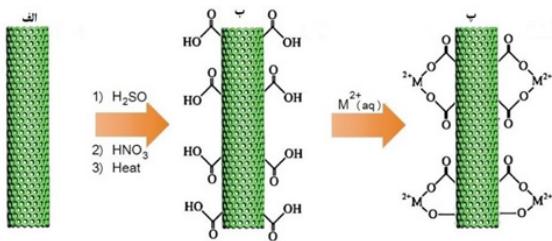
هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل بر روی سطوح جاذب‌ها به وجود آمده‌اند که در عملیات جذب، نقش مهمی ایفا می‌کنند. برای بهبود عملکرد کربن فعال به جز اسیدشویی و بازشویی روش‌های دیگری نیز وجود دارد. پژوهشگران با نشاندن مواد مختلفی همچون زینکون [۳۴] و تارتازین [۳۵] سعی در بهبود کیفیت کربن فعال در جذب یون سرب داشته‌اند. پس از جذب آلاینده‌ها به وسیله‌ی کربن فعال، جداسازی جاذب 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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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 به وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی (آهن‌ربا) [۳۸].

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



شکل ۳ سازوکار جذب یون‌های فلزی بر روی الف) نانولوله کربنی، ب) نانولوله کربنی اصلاح شده با –COOH و پ) جذب فلزات توسط نانولوله کربنی اصلاح شده با –COOH [۴۸]

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 [۴۹]. 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 3-isatin-1-thiosemicarbazone ظرفیت جذب را به نحو چشمگیری افزایش داده است [۵۰]. 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 به دلیل پیوندهای واندروالس قوی و همچنین عدم وجود گروههای عاملی، به خوبی در آب توزیع نمی‌شوند و به هم می‌چسبند. پیوند نانولوله و پلیمر طبیعی لیکنین (Lignin) این مشکل را برطرف کرده و جاذب حاصل از این پیوند، ظرفیت جذب خوبی از خود نشان داده است [۵۱].

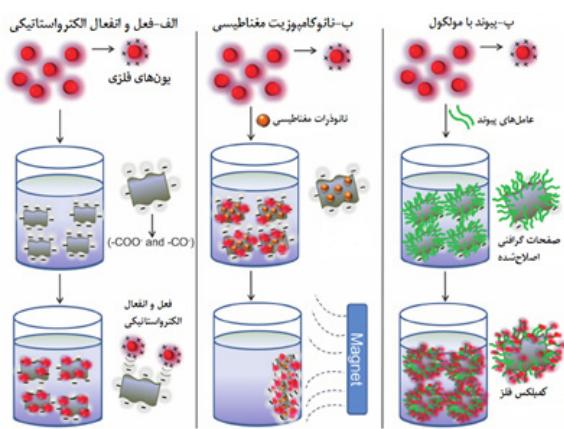
#### ۴-۱-۲ اکسیدگرافن

اکسیدگرافن، شکل اکسیدشده‌ی گرافن است که پیش از این در پژوهش‌های زیادی به عنوان جاذب یون‌های فلزات مختلف به کار رفته است [۵۲-۵۴]. علاوه بر سطح ویژه‌ی زیاد، از دیگر دلایل توانایی بالای این ماده در جذب یون فلزات، می‌تواند وجود گروههای

به کارگیری نانولوله‌های کربنی به دلیل 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 [۴۴]. با اینکه از کشف نانولوله‌های کربنی زمان زیادی نمی‌گذرد اما با این حال از پرکاربردترین ساختارهای کربنی هستند. ساختار نانولوله‌ها شیوه استوانه‌ی توخالی با انتهای باز یا بسته است. جاذب‌های معمولی به دلیل 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 [۴۵]. 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 [۴۶، ۴۷].

گروههای عاملی مختلفی مثل –COOH و –OH با فعال‌سازی شیمیایی به وسیله 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 می‌کند. 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 [۴۸].

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



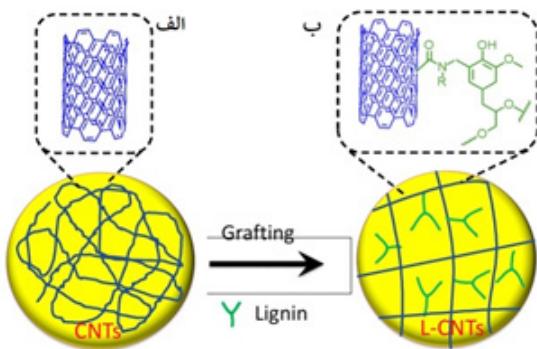
شکل ۵ روش‌های مختلف کاربرد مواد گرافنی به عنوان جاذب برای حذف فلزات از محلول‌های آبی [۵۷].

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 [۵۹]. مطالعات نشان داده که اصلاح جاذب توسط اسیدتارتاریک، ظرفیت جذب را افزایش داده که با توجه به وجود دو گروه کربوکسیل و دو گروه هیدروکربوکسیل در ساختار این اسید، چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نیست [۶۰].

از گروه‌های عاملی دیگر مثل تیول هم برای بهبود عملکرد گرافن اسید در جذب یون استفاده شده که نتیجه مثبت بوده است [۶۱]. همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که برخی پلیمرهای حل شونده در آب مثل پلی‌آمین [۶۲] و پلی‌اکریلیک اسید هم برای اصلاح این جاذب به منظور حذف یون سرب کاربرد داشته‌اند [۶۳]. فان و همکارانش [۶۴] از کامپوزیت کیتوسان مغناطیسی و اکسیدگرافن برای جذب یون سرب از محلول‌های آبی استفاده کردند که ظرفیت جذب کیتوسان با پیوند اکسیدگرافن به  $76/94 \text{ mg/g}$  افزایش پیدا کرد و نشان دهنده این موضوع است که این کامپوزیت برای حذف سرب از پساب‌های صنعتی و کشاورزی بسیار مناسب است.

اکسیدگرافن عامل‌دار شده، به دلیل داشتن گروه‌های عاملی آب دوست به خوبی در آب پخش می‌شود که این موضوع برای جذب یون سرب، مزیت محسوب می‌شود؛



شکل ۴ نanolوله کربنی مربوط به الف) نanolوله کربنی کلوخه شده، ب) نanolوله کربنی در پیوند با لیگنین [۵۱].

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 [۵۶، ۵۵]. شکل ۵ 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 به دلیل فعل و انفعال الکترواستاتیکی بین صفحات اکسیدگرافن با بار منفی و یون‌های فلزی با بار مثبت است که در قسمت الف شکل ۵ اورده شده است. صفحات گرافن می‌توانند 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 ۵ اورده شده است. اصلاح صفحات گرافن با مولکول‌های آلی می‌تواند باعث بهبود فرایند جذب شود که در قسمت پ شکل ۵ اورده شده است [۵۷]. 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 [۵۸]. یعنی انواع مختلف اکسیدگرافن، هرچه میزان گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار بیشتر باشد، ظرفیت جذب هم بیشتر

[۷۹]. شایان گفتن است که این ماده یکی از اکسیدهای فلزی است که پژوهش‌های زیادی در خصوص 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 [۸۰]. 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 به صورت 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 [۸۱]. همچنین افزودن فلز مس به ساختار  $ZnO$  تأثیر بسزایی در توانایی جذب یون سرب داشته است [۸۲].

اکسیدفلزات، فارغ از نقشی که به طور مستقیم در جذب یون سرب ایفا می‌کنند، گرینه مناسبی برای افزایش سطح ویژه‌ی سایر جاذب‌ها نیز است. به عنوان مثال افزودن نانوذرات  $ZnO$  به کانی رسی مونت‌موریلوفیت باعث افزایش سطح ویژه‌ی این کانی و به دنبال آن

ظرفیت جذب این ماده شده است [۸۳].

$MnO_2$  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 [۸۴].

آزمایش جذب یون سرب توسط جاذب نانوهیریدی  $MgO/GO$  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 به وجود می‌آید [۸۵]. نانوکامپوزیت  $Fe/MgO$  با توجه به ساختار مزومتخلخل و داشتن سطح ویژه و خاصیت جذب مغناطیسی زیاد، برای حذف یون سرب از آب استفاده شده که بیشینه ظرفیت جذب  $1476/4 \text{ mg/g}$  برای حذف این یون به دست آمد. در شکل ۶ طرحی از فرایند تشکیل این

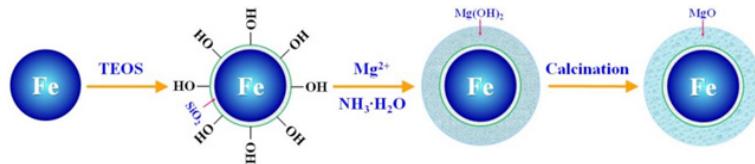
اما هنگام جداسازی جاذب از محلول، مشکل محسوب می‌شود. برخی محققین با نشاندن  $Fe_3O_4$  روی سطح اکسیدگرافن، به جاذب، خاصیت مغناطیسی داده‌اند؛ به طوری که بعد از عملیات جذب، با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، جاذب را بتوان جمع آوری کرد [۶۵, ۶۶].

### ۳ فلزات، اکسیدهای فلزی و اکسیدهای چندفلزی ۱-۳ فلزات

برخی فلزات مانند طلا به دلیل ویژگی‌های ساختاری اتم‌های آن، در جذب برخی فلزات سنگین کارآمد بوده‌اند. البته به دلیل گران بودن این فلز، کاربرد چنین جاذبی، از مقیاس‌های آزمایشگاهی فراتر نرفته است [۷۷]. در خصوص جذب یون سرب نیز گزارشی از جذب به وسیله‌ی 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 [۷۸].

### ۴-۳ اکسیدفلزات

اخیراً مطالعات زیادی در مورد کاربرد اکسیدفلزات مثل  $\alpha-Al_2O_3$  [۶۹],  $CeO_2$  [۷۰],  $ZnO$  [۷۱],  $CuO$  [۷۲] و  $Fe_3O_4$  [۷۳] برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی انجام شده است [۷۴]. فرقاًی و همکارانش [۷۵] 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 نانو اکسیدفلزات به عنوان جاذب، مشکلاتی به همراه 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. به عنوان نمونه در پژوهشی، پلیمر پلی وینیل پیرولیدون به عنوان پایه‌ای برای  $CeO_2$  [۷۶] و سلولزاستات یا کیتوسان اصلاح شده به عنوان پایه‌ای برای  $TiO_2$  استفاده شده است [۷۷, ۷۸]. اکسیدفلزی دیگری است که برای سهولت جداسازی، روی پودر کاج نشانده شده است



شکل ۶ طرحی از فرایند تشکیل نانوکامپوزیت Fe/MgO [۸۶].

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

اصلاح جاذب‌ها به وسیله‌ی اسید، متداول است. در پژوهشی با اصلاح سیلیکاژل توسط اتیل دی‌آمین تری‌استیک اسید، میانگین قطر حفرات جاذب، افزایش قابل توجهی یافت [۹۶]. ایجاد جاذب‌های ترکیبی بالاستفاده از سیلیکاژل نیز از حوزه‌های مورد توجه پژوهشگران است. ترکیب پودر نانوذرات سیلیکاژل با آلرینات [۹۷] و ترکیب سیلیکاژل با گرافن از مواردی است که باعث بهبود ظرفیت جذب سیلیکاژل شده است [۹۸].

## ۵ زیست‌توده‌ها

در دهه‌ی گذشته زیست‌توده‌ها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. این مواد به علت فراوانی در طبیعت و سازگاری با آن و همچنین داشتن صرفه‌ی اقتصادی و ساده بودن روند آماده‌سازی، توانایی زیادی برای استفاده به عنوان جاذب فلزات سنگین را دارند. بنابراین تلاش‌های زیادی برای شناسایی جاذب‌های کارآمد زیستی به منظور جذب یون سرب صورت گرفته است. برگ درختان از جمله فراوان‌ترین زیست‌توده‌ها هستند که پژوهش‌های زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. برگ درخت کافور [۹۹]، برگ درخت سیدالشجاع [۱۰۰] و برگ درخت بکرایی [۱۰۱] به صورت خشک شده و پودر شده به عنوان جاذب، آزمایش شده‌اند. همچنین برگ درخت گز روغنی بعد از بازشویی و اصلاح به وسیله‌ی اسید‌سیتریک، ظرفیت بالایی در جذب یون سرب از خود نشان داده است [۱۰۲].

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

نانوکامپوزیت آورده شده است [۸۶].

## ۳-۳ اکسیدهای چندفلزی

پژوهش‌ها در خصوص استفاده از اکسیدهای چندفلزی برای حذف فلزات سنگین دارای سابقه‌ی زیادی است [۸۷]. زیرا جداسازی این مواد پس از اتمام فرایند جذب، به وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی به سادگی امکان‌پذیر است [۸۸، ۸۹]. زانگ و همکارانش [۹۰] از نانوکامپوزیت Reduced Graphene CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و اکسید گرافن کاهش یافته (Oxide برای حذف سرب از محلول آبی استفاده کردند. میزان جذب سرب با استفاده از مدل لانگمویر در دمای ۲۵°C و  $pH=5/3$  و  $mg/g=299/4$  به دست آمد. به دلیل خاصیت مغناطیسی، CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-rGO می‌تواند در میدان مغناطیسی دارای قدرت کم، در زمان ۲ دقیقه به طور کامل از آب جدا شود. یکی از دلایل توجه به جاذب‌هایی مانند MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> و CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> علاوه بر ظرفیت جذب مناسب، خاصیت مغناطیسی این مواد است.

## ۴ نافلزات و اکسیدهای نافلزی

سیلیکاژل به دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی بسیار بالا همواره به عنوان ماده‌ی پایه به عنوان جاذب مدنظر بوده است. با افزودن ترکیبات و گروه‌های عاملی مختلف به ویژه گروه‌هایی که شامل اتم‌هایی مثل S و O هستند که می‌توانند گروه‌هایی با بار نسبی منفی باشند، می‌توان خواص این ماده را بهبود بخشد [۹۱]. به عنوان مثال، افزودن گروه عاملی آمین به انواع مختلف سیلیکاژل موجب افزایش کارایی جاذب می‌شود [۹۵-۹۲].

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؛ به طوری که بخش مهمی از پژوهش‌ها به بررسی عملکرد و اصلاح این جاذب‌ها معطوف شده است. سلولز به عنوان فراوانترین پلیمر طبیعی یکی از پایه‌های اساسی ساخت جاذب است. پژوهشگران با تبدیل سلولز به سلولزاستات و سپس ساخت کامپوزیت سلولزاستات-نانومنگتردی اکسید به جاذبی با ظرفیت جذب بالا دست یافته‌اند [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 به طور عمده در فرایندهای جذب، کروماتوگرافی و تبادل یونی به دلایل خواص آب‌دوستی (Hydrophilicity) و اکشن‌پذیری، مکانیکی، ظرفیت تشکیل به صورت الیاف و ورق استفاده می‌شود [۱۳۲]. از استیل زدایی کیتین حاصل شده و نقش آن به عنوان 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 [۱۳۴].

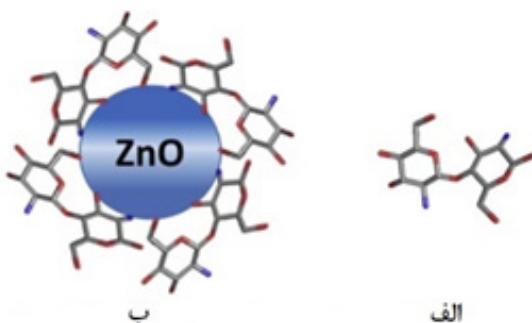
اصلاح کیتوسان به وسیله‌ی اسیدهای مختلف، باعث افزایش کارایی آن در جذب یون سرب می‌شود [۱۳۵، ۱۳۶]. همچنین ترکیب کیتوسان با مواد دیگر و اصلاح آن متدالو ا است. ترکیب کیتوسان با کانی مونت‌موریلونیت [۱۳۷]، ترکیب با thiosemicarbazide [۱۳۸]، ترکیب با پلی‌اکریونیتریل [۱۳۹]، ترکیب با پلی‌وینیل الکل و نانوذرات اکسیدم [۱۴۰]، ترکیب با تری‌اتیلن‌ترامین و  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [۱۴۱]، ترکیب با پلی‌اکریل آمید و نانوذرات مس [۱۴۲]، ترکیب با اکسیدروی (ZnO) [۱۴۳] 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

برای جذب یون سرب شده است [۱۰۳]. البته با اصلاح این کربن توسط پلی‌اتیلن ایمین، ظرفیت جذب بهتر شده است [۱۰۴].

علاوه بر برگ، پوست درختان نیز می‌تواند به عنوان جاذب استفاده شود. از جمله درختانی که از پوست آن‌ها به عنوان جاذب یون سرب استفاده شده می‌توان به افاقیا [۱۰۵] و کاج [۱۰۶] اشاره کرد. علاوه بر درختان، قارچ‌ها [۱۰۸، ۱۰۷] و گیاهان سمی [۱۰۹] هم به عنوان جاذب مورد توجه محققان بوده‌اند. پوستهای سخت میوه‌هایی مثل گردو [۱۱۰]، فندق و بادام [۱۱۱]، پسماندهای گیاه پنبه [۱۱۲]، پودر هسته‌ی زیتون [۱۱۳]، پوست خردل [۱۱۴]، پوستهای سویا [۱۱۵]، پسماندهای نارگیل [۱۱۶]، پوست سُرخالو [۱۱۷]، برگ سرخس [۱۱۸]، انواع گلسانگ‌ها [۱۱۹، ۱۲۰]، انواع گیاهان، خزه‌ها و جلبک‌های دریایی [۱۲۱]، تفاله‌های چای [۱۲۴] و قهوه [۱۲۵] و حتی پولک ماهی [۱۲۶] 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  $0.33 \text{ m}^2/\text{g}$  است. اما بعد از واکنش تفکافت و تبدیل شدن به کربن، سطح ویژه‌ی آن به  $0.82 \text{ m}^2/\text{g}$  افزایش می‌یابد. همچنین سطح ویژه‌ی کربن حاصله از تفکافت، بعد از اصلاح توسط  $\text{ZnCl}_2$  به میزان  $84/75 \text{ m}^2/\text{g}$  می‌رسد. همین روند درباره‌ی ظرفیت جذب هم وجود دارد. علوفه‌ی ذرت ب صورت طبیعی ظرفیت  $34/87 \text{ mg/g}$  برای جذب یون سرب دارد اما بعد از تفکافت، ظرفیت جاذب به  $50/51 \text{ mg/g}$  و بعد از اصلاح توسط  $\text{ZnCl}_2$  به  $113/12 \text{ mg/g}$  ارتقا می‌یابد. برای علوفه‌ی برنج نیز همین روند وجود دارد [۱۲۸].

## ۶ پلیمرها

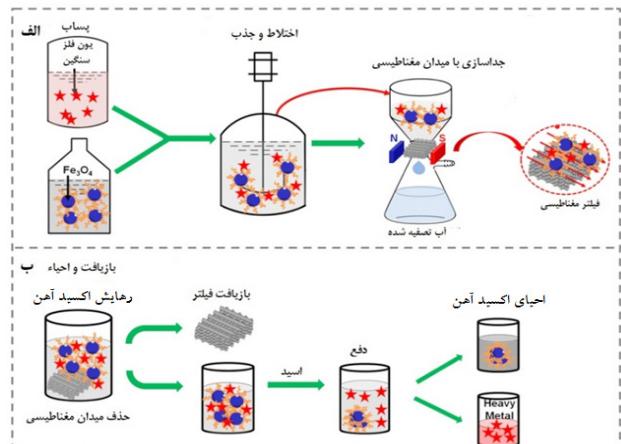
پلیمرها از جمله موادی هستند که کاربرد آن‌ها در



شکل ۸ الف-ساختار کیتوسان و ب- نانوکامپوزیت کیتوسان و اکسید روی [۱۴۳].

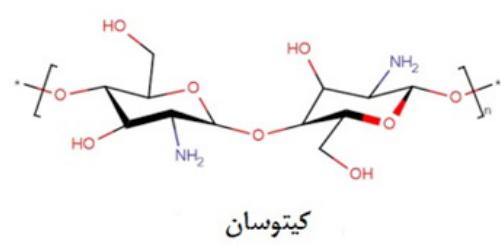
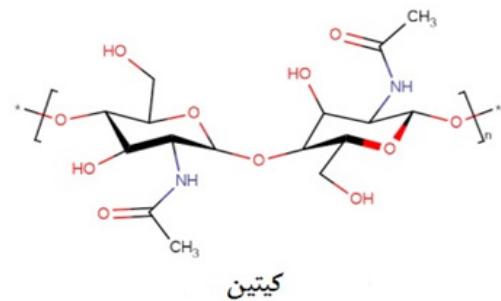
Fig 8 A) Structure of chitosan and B) Chitosan-ZnO nanocomposite

گیرند. در شکل ۹ طرحی از فرایند جذب و احیا توسط میدان مغناطیسی آورده شده است [۱۴۷]. پلی‌اکریل آمید [۱۴۹] و پلی‌اکریل کلرید [۱۴۸] نیز از دیگر پلیمرهایی هستند که پلی‌اکریونیتریل [۱۵۰] نیز از دیگر پلیمرهایی هستند که بعد از اصلاح به عنوان 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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و صافش میدان مغناطیسی و ب) بازیافت و احیای صافی مغناطیسی و نانوذرات  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [۱۴۷].

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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle and filtration by magnetic field and B) Recovery and regeneration of magnetic filter and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle

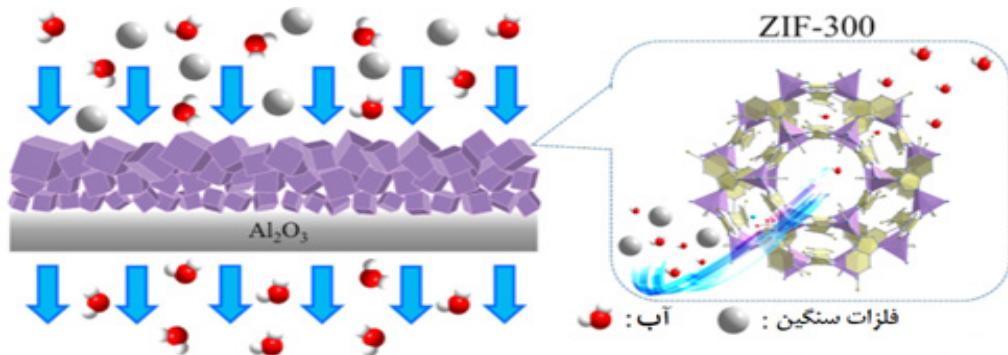


شکل ۷ ساختار شیمیایی کیتین و کیتوسان [۱۳۴].

Fig 7 Chemical structure of chitin and chitosan

آورده شده است [۱۴۳].

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 [۱۴۴، ۱۴۵]. علاوه بر پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای سنتزی نیز توانایی زیادی در استفاده به عنوان جاذب یون سرب دارند. منومرهای متیلن بنزن بعد از پلیمری شدن به دو صورت اصلاح نشده و اصلاح شده با گروه آمین، مورد بررسی قرار گرفته که نتیجه اصلاح صورت گرفته چشمگیر بوده و ظرفیت جذب از ۴۸ mg/g به ۵۲۳/۶ mg/g رسید [۱۴۶]. از پلیمر پلی‌اکریلیک اسید که با نانوذرات مغناطیسی  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  به عنوان جاذب، پوشش دهنده شده است نیز برای حذف یون سرب استفاده شده که ظرفیت جذب زیادی در حذف یون سرب دارد. از مش لایه‌ای مغناطیسی برای جداسازی استفاده شده تا تحت میدان مغناطیسی ضعیفتری نانوذرات مغناطیسی جمع آوری شوند. مش مغناطیسی و نانوذرات می‌توانند بعد از شست و شوی فرآصوت دوباره مورد استفاده قرار



شکل ۱۰ سازوکار حذف یون‌های فلزی سنگین بر اساس اندازه آن‌ها با استفاده از غشای نامتقارن ZIF-300 [۳۰۰-۱۵۴].

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

است. ساخت غشای شبکه آمیخته با استفاده از ترکیب پلی اترسولفون و نانولولهای کربنی - که با روش حک اثر یون (Ion Imprinting) سرب اصلاح شده‌اند نتایج خوبی را به همراه 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 [۱۵۶]. غشاهای شبکه آمیخته حاصل از ترکیب پلی سولفون و کربن حاصل از تفاله‌ی نیشکر نیز نرخ حذف ۱۰۰ درصد یون را در آزمایش‌ها نشان داده است [۱۵۷].

غشاهای فرآصفش شبکه آمیخته ساخته شده از پلی سولفون و اکسید آهن آب دوست 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 به وجود آمدن ساختاری گستردۀ شبکه‌ای و پرخره 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. به دلیل چنین خواصی استفاده از زئولیت‌ها به عنوان جاذب فلزات سنگین با سابقه است

## ۷ غشاهای

در سال‌های اخیر، روش جذب غشایی در جداسازی پروتئین‌ها، درشت مولکول‌ها 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 کم تر، 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-300-۳۰۰ نشان داده شده است [۱۵۴].

پلیمرهای مختلفی از جمله کیتوسان، استات سلولز و پلی وینیل الکل برای ساخت غشاهای ترکیبی جاذب فلز (Blended Metal-Adsorptive Membrane) با بازده حذف مناسب استفاده شده‌اند. با این حال، این غشاهای پایداری مکانیکی و شیمیایی کافی در فرایندهای دینامیک را ندارند. برای غلبه بر این مشکل، از پلیمرهایی مانند پلی سولفون، نایلون و پلی وینیلیدین 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 تمايل به جذب بالای فلز است [۱۵۵]. غشاهای جاذب با تلفیق عمل صافش و جذب، یکی از موثرترین مواد برای جداسازی و حذف آلاینده‌ها

کم، توانایی بالایی برای استفاده به عنوان 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.

۴) 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.

۶) 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 راه کارها 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 کالت 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 به دلیل 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 خطرونک است.

[۱۶۰، ۱۶۱]. زئولیت‌ها به دلیل اینکه دارای ویژگی‌های قابلیت احیا شدن و استفاده مجدد برای خواص تبادل یونی هستند؛ برای حذف یون سرب از محلول‌های آبی استفاده می‌شوند [۸]. کار بر روی زئولیت طبیعی کلینوپیتولیت به دلیل 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، به ویژه در  $pH=6$ ، جدا کند. مقدار جذب ۱۴/۲۲ میلی‌گرم بر گرم با استفاده از این زئولیت در دمای ۳۰۳ کلوین به دست آمد.

وانگ و همکارانش [۱۶۴] با استفاده از زئولیت-ZSM-5 به عنوان 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 به صرفه بودن استفاده از این نوع جاذب برای حذف یون سرب است.

خدادادی و همکارانش [۱۶۵] نیز با ایجاد لایه‌ای از جنس زئولیت NaA روی ذرات مغناطیسی، جاذبی تولید کردند که پس از حذف یون سرب از محلول، به راحتی 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 نتیجه‌گیری شود:

(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 به علت فراوانی و قیمت

## 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	همدانی 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 مو	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 ازینتکون	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 آمونیوم پرسولفات	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	فرندیچ	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 ساخته شده 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 پلی‌آمن	pH=6.1 غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 14 میلی‌گرم	لانگمویر	819.70	[۴۸]
EDTA / Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	pH=4.2 غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	فروندیچ	508.40	[۵۰]
نانواکسیدنس	pH=6.5 غلظت اولیه یون 300 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	لانگمویر	125	[۵۴]
اکسیدسلنیوم / پلی‌وینیل‌پروپیلیدون	pH=6 غلظت اولیه یون 500 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم بر لیتر، دما 45 درجه سانتی‌گراد	لانگمویر	90.90	[۵۵]
اکسیدتیتانیوم/سلوژ 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]
اکسیدروری / مخمر	pH=6 غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	لانگمویر	31.72	[۶۰]

[۶۴]	190	لانگمویر	جاذب 100 میلی‌گرم pH=6.5 میزان جاذب 0.4 گرم بر لیتر، دما 30 درجه سانتی‌گراد غلظت اولیه یون 80 میلی‌گرم بر لیتر،	اکسیدمنیزیوم / اکسیدگرافن
[۶۶]	56.56	لانگمویر	میزان جاذب 25 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.4 گرم بر لیتر،	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
[۶۷]	17.80	لانگمویر	میزان جاذب 20 میلی‌گرم pH=4.5 میزان جاذب 0.2 گرم بر لیتر،	CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
[۷۲]	562.56	سپیس	جاذب 20 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.2 میلی‌گرم غلظت اولیه یون 2 میلی‌مول بر لیتر، میزان	سیلیکا با گروه عاملی آمین
[۷۳]	147.60	لانگمویر	جاذب 15 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.1 گرم بر لیتر، میزان	SiO <sub>2</sub> -EDTA
[۷۴]	83.33	لانگمویر	جاذب 1 گرم بر لیتر pH=5 میزان جاذب 0.5 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	نانواکسیدسیلیسیوم / آژینات
[۷۵]	113.60	لانگمویر	جاذب 30 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.5 میلی‌گرم غلظت اولیه یون 50 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	اکسیدسیلیسیوم / گرافن
[۷۶]	75.82	لانگمویر	جاذب 50 میلی‌گرم ، 60 درجه سانتی‌گراد pH=5 میزان جاذب 0.5 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	برگ درخت کافور
[۷۷]	136.70	لانگمویر	جاذب 50 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.5 میلی‌گرم غلظت اولیه یون 65 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	برگ درخت سیدالاشجار
[۷۸]	104	لانگمویر	جاذب 200 میلی‌گرم ، 30 درجه سانتی‌گراد pH=5.1 میزان جاذب 0.2 میلی‌گرم بر لیتر،	برگ درخت بکرایی
[۷۹]	209	لانگمویر	جاذب 100 میلی‌گرم ، 40 درجه سانتی‌گراد pH=5 میزان جاذب 0.4 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	برگ اصلاح شده درخت گز روغنی
[۸۲]	199.90	فروندلیچ	جاذب 6 گرم بر لیتر، 30 درجه سانتی‌گراد pH=4 میزان جاذب 0.06 میلی‌گرم بر لیتر،	پوست درخت افاقیا
[۸۳]	76.80	لانگمویر	جاذب 50 میلی‌گرم pH=4 میزان جاذب 0.001 میلی‌گرم بر لیتر،	پوست درخت کاج
[۸۴]	3.80	لانگمویر	جاذب 2.1 گرم pH=6 میزان جاذب 0.0001 میلی‌گرم بر لیتر،	قارچ کلاهکدار lepolita
[۸۵]	38.40	لانگمویر	جاذب 4 گرم بر لیتر، دما 20 درجه سانتی‌گراد pH=5 میزان جاذب 0.002 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	قارچ خجالتی
[۸۶]	14.5	فروندلیچ	جاذب 20 گرم بر لیتر pH=6 میزان جاذب 0.003 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 30 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	گیاه سرخاب کولی
[۸۹]	42.08	لانگمویر	جاذب 200 میلی‌گرم pH=5 میزان جاذب 0.008 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 800 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	پسماند گیاه پنبه
[۹۰]	25.48	لانگمویر	جاذب 10 گرم بر لیتر pH=4 میزان جاذب 0.0025 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 250 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	پودر هسته زیتون
[۹۱]	30.48	لانگمویر	جاذب 10 گرم بر لیتر pH=6 میزان جاذب 0.005 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 5 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	پوست خردل
[۹۲]	217.70	لانگمویر	میزان جاذب 150 میلی‌گرم pH=7 غلظت اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر،	پوسته‌ی سویا
[۹۳]	9.74	لانگمویر	جاذب 500 میلی‌گرم pH=7 میزان جاذب 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان غلظت اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	پسماندهای نارگیل
[۹۴]	78.74	لانگمویر	جاذب 250 میلی‌گرم pH=6 میزان جاذب 0.24 میلی‌گرم بر لیتر، میزان	پوست سرخالو
[۹۵]	12.24	فروندلیچ	جاذب 200 میلی‌گرم pH=5 میزان جاذب 0.02 میلی‌گرم	برگ سرخس

			جاذب 200 میلی‌گرم	
[۹۶]	75.80	لانگمور	pH=5، غلظت اولیه یون 270 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 8 گرم بر لیتر	گلستگ
[۱۰۱]	64.10	لانگمور	pH=4.5 میزان جاذب 2.5 گرم بر لیتر	تفاله چای
[۱۰۲]	22.90	لانگمور	pH=5، غلظت اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1.2 گرم بر لیتر	تفاله قهوه
[۱۰۳]	472.20	فروندلیج	pH=3.5 غله اولیه یون 800 میلی‌گرم بر لیتر	بولک ماهی کپور
[۱۰۴]	1.17	فروندلیج	pH=5 غله اولیه یون 20 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 60 میلی‌گرم	تار عنکبوت
[۱۰۵]	34.80	لانگمور	pH=5 غله اولیه یون 1000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 20 گرم بر لیتر	علوفه ذرت
[۱۰۶]	416.67	لانگمور	pH=7 غله اولیه یون 1.6 مول بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	سلولز استات / نانومگنزندي اکسید
[۱۰۷]	232	لانگمور	pH=5 غله اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 1 گرم بر لیتر، دما 30 درجه سانتي‌گراد	نانوبلور سلولز کربوکسیلاته
[۱۰۸]	72.83	لانگمور	pH=5 غله اولیه یون 100 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 500 میلی‌گرم	نانوبلور سلولز کربوکسیلاته / <chem>Fe3O4</chem>
[۱۱۲]	49.33	فروندلیج	pH=5 غله اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 2 گرم بر لیتر	کیتوسان / مونتموریلونیت
[۱۱۳]	325.20	لانگمور	pH=5 غله اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	کیتوسان اصلاح شده با thiosemicarbazide
[۱۱۴]	116.84	لانگمور	pH=7 غله اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 150 میلی‌گرم	کیتوسان / پلی‌وینیل‌اکل / نانوکسیدمس
[۱۱۶]	369	لانگمور	pH=6 غله اولیه یون 200 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 500 میلی‌گرم	کیتوسان / تری‌اتیلن‌ترامین / <chem>Fe3O4</chem>
[۱۱۷]	38.93	فروندلیج	pH=6 غله اولیه یون 20 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	کیتوسان / پلی‌اکریل‌آمید / نانوذرات مس
[۱۲۰]	48	لانگمور	pH=5.2 میزان جاذب 100 میلی‌گرم	پلیمر متیل‌بنزن
[۱۲۲]	23.31	لانگمور	pH=4.5 غله اولیه یون 2 میلی‌مول بر لیتر، میزان جاذب 2 گرم بر لیتر	پلی‌اکریل‌آمید / <chem>Fe3O4</chem>
[۱۲۳]	209.27	لانگمور	pH=6.4 غله اولیه یون 300 میلی‌گرم بر لیتر	پلی‌اکریلونیتریل اصلاح شده با thiosemicarbazide
[۱۲۴]	9.73	لانگمور	pH=7 غله اولیه یون 2000 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 150 میلی‌گرم	غشای شبکه آمیخته پلی‌سولفون و نانولوله کربنی
[۱۲۵]	79.76	فروندلیج	غله اولیه یون 1600 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 100 میلی‌گرم	غشای شبکه آمیخته پلی‌سولفون و کربن حاصل از تفاله نیشکر
[۱۲۶]	13	لانگمور	pH=7 غله اولیه یون 45 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 50 میلی‌گرم	غشای شبکه آمیخته پلی‌سولفون و اکسید‌آهن آب - دوست
[۱۲۹]	20.10	لانگمور	pH=3 غله اولیه یون 40 میلی‌گرم بر لیتر، میزان جاذب 0.2 گرم بر لیتر	ZSM-5

(مثل سلولز و کیتوسان)، سنتزی (مثل پلی وینیل الکل و مونومرهای متیل بنزن) و همچنین ترکیب این پلیمرها با یکدیگر نیز به منظور 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 مظور روش‌هایی مثل پوشش دهی جاذب‌ها با نانوذرات مغناطیسی (مثل  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ارائه شده است. غشاهاشی 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-5 و NA) نیز به دلیل ساختار شبکه‌ای و پرحرره، وجود یون‌های فلزات قلیایی و قلیایی خاکی و قابلیت احیا و استفاده مجدد برای جذب یون سرب مناسبند.

روش‌های مختلفی برای حذف یون سرب وجود دارد که در بین آن‌ها، عملیات واحد جذب سطحی، روشی مناسب و کارآمد است. به منظور کترول میزان آلاینده، پژوهشگران برای ساخت و اصلاح جاذب‌های مختلف و بررسی عملکرد آن‌ها تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. برخی از این جاذب‌ها با توجه 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 اتیل دی‌آمین تری‌استیک اسید)، 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

## 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 Polyether-sulfone Nanocomposite Membrane Prepared by Pani/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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. Lichtenfouse, 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.

- [21] L. Mouni, D. Merabet, A. Bouaza, 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 Pb<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup> and Cd<sup>2+</sup> 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. Ghaseemi, 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 Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> 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.

- [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-Baron, "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. Makhlof, 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. Rajablinezhad, "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 Cu<sup>2+</sup> 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 Co<sub>2</sub> 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

- 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-Efficient 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 Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> 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 CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 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 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticle Synthesis and Applications for Lead (Pb<sup>2+</sup>) and Chromium (Cr<sup>6+</sup>) 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 CeO<sub>2</sub> 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)

- Ions from Wastewater Using Composite Electrospun Cellulose Acetate/Titanium Oxide ( $TiO_2$ ) 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  $TiO_2$  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-Duajj, 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. Garda-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. Sorkhodi, 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

- 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 SiO<sub>2</sub>," *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, "SiO<sub>2</sub>/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 Hystric*'," *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

- 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 Pb<sup>2+</sup> 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. Sari, 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. Sari, 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

- 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: Bio-interfaces*, 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-Tio<sub>2</sub> 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-Mno<sub>2</sub>-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

- 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. Nammuang, "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 ( $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ , And  $Cd^{2+}$ ) 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. Ansaratabar, 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.