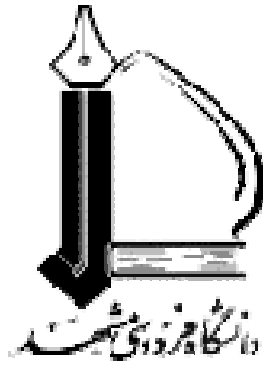


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

حذف فلز کادمیوم با استفاده از جاذب طبیعی و استفاده همزمان از جاذب طبیعی و نانوذرات

پایان نامه کارشناسی ارشد جداسازی و پدیده های انتقال

فاطمه دیمه

اساتید راهنما

دکتر علی احمدپور

دکتر محمد تقی حامد موسویان

استاد مشاور

دکتر زرین اسحاقی

۱۳۹۰



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (پدیده های انتقال و جداسازی) خانم فاطمه دیمه

تحت عنوان

حذف فلز کادمیوم با استفاده از جاذب طبیعی و استفاده همزمان از

جاذب طبیعی و نانوذرات

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۰/۰۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|---|--|
| دکتر علی احمدپور-دکتر محمد تقی حامد موسویان | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر زرین اسحاقی | ۲- استاد مشاور پایان نامه |
| دکتر فاطمه بامحرم | ۳- استاد داور خارجی |
| دکتر سید محمود موسوی | ۴- استاد داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی |

دکتر مهدی پورافشاری

مدیر گروه مهندسی شیمی

تعهد نامه

اینجانب **فاطمه دیمه** دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه: **حذف فلز کادمیوم با استفاده از جاذب طبیعی و استفاده همزمان از جاذب طبیعی و نانوذرات**، تحت راهنمایی آقایان **دکتر علی احمدپور و محمد تقی حامد موسویان** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از این نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا «Ferdowsi University of Mashhad» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شده است.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.
- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده وجود داشته باشد.

فهرست مطالب

صفحه	-----	عنوان
۱		چکیده
		فصل اول: مقدمه
۳		۱-۱- مقدمه
۴		۱-۲- کاربردهای فلز کادمیوم
۴		۱-۳- کادمیوم در محیط زیست
۴		۱-۴- اثرات کادمیوم بر روی سلامتی
۵		۱-۵- اثرات زیست محیطی کادمیوم
		فصل دوم: بررسی جاذب های طبیعی در حذف فلزات سنگین و معرفی نانوذرات و نانولوله ها
۶		۱-۲: مقدمه
۶		۲-۲- انواع روش های مرسوم تصفیه آب و فاضلاب
۲۲		۲-۳- نانو ذرات
۲۶		۲-۴- نانولوله های کربنی
		فصل سوم: معرفی روش های آماری
۳۱		۱-۳- مقدمه
۳۱		۲-۳- طراحی آزمایش و کاربردهای آن
۳۴		۳-۳- طراحی آزمایش به روش فاکتوریل
۳۵		۳-۴- بهینه سازی به روش سطح پاسخ
		فصل چهارم: بخش تجربی
۴۰		۱-۴- مقدمه
۴۰		۲-۴- مواد شیمیایی و واکنشگر ها
۴۰		۳-۴- تجهیزات و وسایل
۴۳		۴-۴- تهیه محلول ها و استانداردها
		فصل پنجم: نتایج و بحث
۴۴		۱-۵- مقدمه
۴۴		۲-۵- مشخصات جاذب
۴۷		۳-۵- حذف فلز کادمیوم با استفاده از پوست سبز پسته
۴۷		۴-۵- بهینه سازی شرایط جذب با استفاده از روش بررسی تک متغیر در زمان
۵۲		۵-۵- بررسی واجذب کادمیوم تحت شرایط بهینه
۵۳		۶-۵- ایزوترم های جذب سطحی
۵۶		۶-۵- سینتیک جذب
۵۹		۷-۵- بررسی ترمودینامیک جذب
۶۰		۸-۵- بررسی کارایی روش بر روی نمونه حقیقی
۶۰		۹-۵- عامل دار کردن نانوذره SiO ₂
۶۳		۱۰-۵- عامل دار کردن نانولوله کربنی
۶۶		۱۱-۵- بهینه سازی آزمایشات با نرم افزار طراحی آزمایش

چکیده

در این کار، پوست سبز پسته به عنوان یک جاذب ارزان قیمت برای حذف فلز کادمیوم استفاده شد. حذف فلز کادمیوم با عمل آوری های متفاوت و بدون عمل آوری به روش ناپیوسته انجام شد. بازده حذف بعد از یک دقیقه با مقدار ۰/۶ گرم جاذب برای جاذب عمل آوری نشده، عمل آوری شده با اسید نیتریک، عمل آوری شده با آمونیاک/پراکسید هیدروژن و عمل آوری شده با استون/پراکسید هیدروژن به ترتیب ۶۸٪، ۵۵٪، ۸۸٪ و ۹۵٪ می باشد. فاکتورهایی که در این کار مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: اثر عمل آوری، غلظت اولیه یون کادمیوم، pH، دما و زمان تماس. مقدار بهینه جاذب با استفاده از روش بررسی تک متغیره در یک زمان به ترتیب مقدار ۰/۲، ۰/۶ و ۱ گرم برای غلظت های محلول ۲۰، ۸۰ و ۱۵۰ میلی گرم برلیتر می باشد. مقدار بهینه pH برابر ۴ و زمان تماس برابر ۱ دقیقه در غلظت ۲۰ میلی گرم برلیتر بدست آمد. با افزایش دما تا مقدار ۴۵°C درصد حذف کادمیوم بالا رفته و پس از آن کاهش می یابد. ایزوترم های تعادلی لانگمویر فروندلیچ و تمکین مورد بررسی قرار گرفتند و تمامی این مدل ها نتایج بدست آمده را به خوبی برازش می کنند. مدل سینتیکی شبه درجه دوم به طور مناسب داده های سینتیکی جذب را پیش بینی می کند. مقادیر ΔG° و ΔH° حاصل شده منفی می باشند. که به ترتیب نشاندهنده انجام فرایند به صورت خودبه خودی و گرمازا بودن جذب هستند. جهت بررسی اثر برهمکنش ها در این آزمایشات، بهینه سازی با نرم افزار طراحی آزمایش در دستور کار قرار گرفت. مدل ارائه شده توسط نرم افزار یک مدل درجه دوم نسبت به جملات مقدار جاذب و pH است. جهت نشان دادن گروه عاملی کربوکسیل بر روی نانوذره SiO₂ از روش غیر مستقیم استفاده شد. این گروه عاملی با استفاده از روش اولتراسونیک بر روی نانولوله ی کربنی نشانده شد. حذف یون کادمیوم بوسیله مخلوط جاذب پوست سبز پسته و نانوذره SiO₂ و نیز نانولوله کربنی انجام گرفت. در غلظت ۲۰ میلی گرم برلیتر و زمان ۳۰ ثانیه میزان حذف فلز کادمیوم با استفاده از پوست سبز پسته ۴۹/۵٪، مخلوط نانوذره SiO₂ و پوست سبز پسته ۷۵/۵٪، مخلوط نانوذره SiO₂ آمین دار شده و پوست سبز پسته ۸۶/۳٪ و مخلوط نانوذره SiO₂ کربوکسیل دار شده و پوست سبز پسته ۹۵/۳٪ می باشد. در همین شرایط نتایج حاصل از استفاده ی مخلوط نانولوله کربنی و پوست سبز پسته ۵۵/۲٪ و مخلوط نانولوله کربنی کربوکسیل دار شده و پوست سبز پسته ۹۴/۳٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: پوست سبز پسته، کادمیوم، حذف، بهینه سازی، نانوذرات

Abstract

In this work, pistachio green hulls are employed as a new low-cost adsorbent for the removal of cadmium (Cd) ions from aqueous solutions without and with some chemical treated procedures. For 0.6 g of adsorbent and after 1 min, the removal efficiencies of sorbent for the untreated, HNO₃ treated, NH₃/H₂O₂ treated, and acetone/H₂O₂ treated samples were 68%, 55%, 88%, and 95%, respectively. The removal of Cd(II) by this new adsorbent was investigated using batch adsorption technique and all parameters influencing the removal efficiency in the case of chemically treated adsorbent such as: type of chemicals, dose of adsorbent, initial Cd(II) concentration, pH, contact time, and temperature were considered. Also, adsorption isotherms and their kinetics were studied. The removal of Cd(II) was considerably increased for the chemically treated samples. Optimum dose of sorbent for maximum Cd(II) adsorption were obtained as 0.2, 0.6, and 1.0 g for 20, 80, and 150 mg.L⁻¹ of Cd(II) solutions, respectively. Optimum pH for maximum removal of Cd(II) was 4. High removal efficiency of Cd(II) was occurred in the first minute of adsorbent contact time for 20 mg.L⁻¹ of Cd(II) solution. The amount of Cd(II) adsorption was enhanced with an increase in temperature until 45°C and then declined, especially in the case of high concentration solution. The adsorption isotherm data are investigated by Langmuir, Freundlich, and Temkin models. Kinetic data have shown that the adsorption of Cd(II) follows the pseudo-second-order kinetic model. The amount of ΔH° negative that show Exothermic adsorption. The amounts of ΔG° are negative that show Spontaneous adsorption. In order to investigate interactions effects in these experiments, optimizing with design expert software has been done. Obtained model was quadratic model with second order term for pH and dose of adsorbent. Carboxylic acid-functionalized silica nanoparticles (SiO₂-COOH) prepared with indirect method. Carbon nano tube was functionalized with Carboxyle function group using ultrasonic method. Combination of PGH and nanoparticle was used for Removal of Cd(II). At 20 ppm concentration and 30 second contact time percent of Cd(II) removal was 49.5, 75.5, 86.3, 95.3 for PGH, SiO₂ nanoparticle, amino-functionalized silica nanoparticles (SiO₂-NH₂) and Carboxylic acid-functionalized silica nanoparticles (SiO₂-COOH), respectively. At these conditions for PGH, carbon nano tube and carboxylic acid-functionalized carbon nanotube amount of Cd(II) removal were 49.5, 55.2, 94.3, respectively.

Keywords: Pistachio green hull, Cadmium, Removal, Optimization, Nano particle

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

دنیای امروز، دنیای صنعت و تکنولوژی های نو است و همگان برای همگام شدن با دنیا تلاش می کنند. کارخانه ها و صنایع بزرگ و کوچک فراوانی در شهرها و حاشیه آن ها ایجاد شده اند. علاوه بر محصولات تولیدی اصلی، اکنون پساب صنایع را نیز می توان از فراورده های صنایع به شمار آورد، که بسیاری از آن ها با محیط سازگار نمی باشند. بنابراین می توان گفت صنعت مسئول بسیاری از آلودگی های محیطی است. از جمله آلودگی ها، رها شدن فلزات سنگین به محیط زیست می باشد. یون های فلزات سنگین در خروجی های صنعتی اثرات مخربی بر روی محیط زیست نظیر آب و خاک و زندگی انسان و حیوانات دارند [۵-۱]. فلزات سنگین می توانند در پساب های حاصل از صنایع فلزی، آبکاری، استخراج معادن، کارخانه های تولید باتری، آلیاژسازی و ذوب فلزات وجود داشته باشند و می توانند با ورود پساب این صنایع به آب های رودخانه ها، اثرات جبران ناپذیری بر محیط زیست بگذارند. بنابراین شناسایی و ارزیابی غلظت انواع مختلف آلاینده های موجود در آن ها ضروری بوده و این عمل باید قبل از تخلیه به آب های جاری انجام گیرد [۶]. اثرات بیولوژیکی فلزات آلاینده با ایجاد تغییر در ساختار پلانکتون ها شروع می شود، چرا که جذب فلزات سنگین توسط میکروارگانیسم های منبع تغذیه پلانکتون ها، واقعیتی مسلم است [۷]. گیاهان از پلانکتون ها، جانوران از گیاهان و انسان ها از گیاهان و جانوران تغذیه می کنند، بدین ترتیب فلزات آلاینده، زنجیره غذایی تمام موجودات زنده را تحت تأثیر خود قرار می دهند [۸-۱۱]. مشکل اصلی این فلزات این است که در بدن متابولیزه نمی شوند؛ در واقع، پس از ورود به بدن در بافت ها ذخیره شده و از بدن دفع نمی گردند. همچنین می توانند جایگزین املاح و مواد معدنی موردنیاز بدن شوند. این مسئله موجب شده است که روش های متعددی برای جداسازی، حذف و بازیابی فلزات سمی و گرانبها رو به گسترش و توسعه باشد.

کادمیوم یکی از فلزات سنگین می باشد و در این قسمت به معرفی این فلز پرداخته می شود. کادمیوم براق، سفید، نقره ای، نرم و یک فلز بسیار چکش خوار است. سطح آن رنگ جزئی مایل به آبی دارد و به قدری نرم است که با چاقو می توان آن را برید ولی در مجاورت هوا جلای خود را از دست می دهد. در اسیدها حل شده اما در بازها حل نمی شود. از بسیاری جهات شبیه به روی است ولی ترکیبات کمپلکس بیشتری تشکیل می دهد.

۱-۲- کاربردهای فلز کادمیوم

تقریباً ۷۵ درصد کادمیوم در باتریهای Ni-Cd مورد استفاده بوده و بیشتر از ۲۵ درصد باقی مانده به طور عمد در مواد رنگی، پوشش ها، صنعت آبکاری و نیز به عنوان تثبیت کننده برای پلاستیکها مورد استفاده قرار می گیرد. کادمیوم بویژه در الکتروآبکاری فولاد مورد استفاده واقع می شود، به طوری که لایه کادمیوم به ضخامت ۰/۰۵ میلی متر حفاظت از فولاد را در برابر آب کامل می کند. کادمیوم توانایی جذب نوترون ها را دارد بنابراین به عنوان مانع یا سدی جهت کنترل هم جوشی هسته ای مورد استفاده قرار می گیرد [۷,۸].

۱-۳- کادمیوم در محیط زیست

کادمیوم به طور عمد در پوسته زمین یافت شده و همیشه در ترکیب با روی می باشد. همچنین در صنعت به عنوان محصول جانبی استخراج روی و سرب و مس نیز می باشد و به میزان زیاد در کودها و آفت کشها نیز موجود است. به طور طبیعی مقدار زیادی از کادمیوم در محیط زیست آزاد می گردد، که تقریباً ۲۵۰۰ تن به ازای هر سال است. نیمی از کادمیوم از طریق تجزیه تخته سنگهای در معرض هوا، وارد رودخانه ها می شود. بیشتر کادمیوم ورودی به هوا به خاطر آتش گرفتن جنگلها و کوههای آتشفشانی است. پایه اصلی آزاد سازی کادمیوم، فعالیتهای بشر در زمینه کارخانه ها و صنایع مربوطه است. برای به دست آوردن کادمیوم هیچ کانی به صرف داشتن کادمیوم استخراج نمی شود. زیرا بیشتر کادمیوم به صورت محصولی جانبی حاصل از ذوب سنگ روی (ZnS)^۱ به دست می آید. CdS یک آلودگی قابل توجه است که به صورت ترکیبی بیشتر از ۳ درصد وجود دارد. منابع معدنی اصلی کادمیوم با روی همراه است. تولید جهانی کادمیوم، ۱۴۰۰۰ تن در سال و کشورهای تولید کننده اصلی عبارتند از: کانادا، استرالیا، USA، مکزیک، ژاپن و پرو.

۱-۴- اثرات کادمیوم بر روی سلامتی

جذب کادمیوم توسط بدن عمدتاً از طریق غذا صورت می گیرد. ماده غذایی سرشار از کادمیوم می تواند غلظت آن را در بدن تا حد زیادی افزایش دهد. موادی همچون جگر، قارچ، صدف ماهی، صدف دو کپه، پودر کاکائو و جلبک یا علف دریایی خشک شده سرشار از کادمیوم هستند. کشیدن سیگار کادمیوم را وارد ریه ها می کند. خون آن را به سراسر بدن انتقال می دهد و این مسئله باعث افزایش ذخیره کادمیوم در بدن می شود. کادمیوم در ابتدا از طریق خون وارد کبد می شود و در آن جا با پروتئین ها، تشکیل کمپلکس داده و به

^۱ Sphalerite

کلیه ها منتقل می گردد. کادمیوم تجمع کرده در کلیه ها، سیستم فیلتراسیون آن را دچار مشکل می کند. این مسئله باعث دفع پروتئین های لازم و قند از بدن و صدمه به کلیه می شود. پس از گذشت زمانی های طولانی تر کادمیوم تجمعی در کلیه از بدن دفع می گردد. تأثیرات دیگر کادمیوم بر روی سلامتی عبارتند از: اسهال، دردهای معده و استفراغ شدید، شکستگی استخوان، نقص در اندام تناسلی و حتی امکان ناباروری، صدمه به سیستم اعصاب مرکزی، صدمه به سیستم حفاظتی بدن، اختلالات روان شناختی، صدمه احتمالی به DNA و پیشرفت سرطان [۷,۸].

۱-۵- اثرات زیست محیطی کادمیوم

جریان های پساب صنایع شامل کادمیوم، به طور عمده وارد خاک و از طریق سوختن پساب یا سوختن سوخته های فسیلی وارد هوا می گردد. مقدار کمی کادمیوم با دفع پساب از صنعت و مصارف خانگی وارد آب ها می شود. منبع مهم دیگر کادمیوم تولید کودهای فسفاته مصنوعی است. بخشی از کادمیوم بعد از به کارگیری کود در مزارع وارد خاک می شود و مابقی آن، از پساب های ناشی از تولید کود که توسط شرکت های تولیدی تخلیه می شود، وارد آبه ای سطحی می گردد. کادمیوم زمانی که با لجن جذب شود، در فواصل زیادی می تواند منتقل شود این لجن غنی از کادمیوم، آبه ای سطحی را همچون خاک ها آلوده می کند. کادمیوم به مقدار زیادی توسط مواد آلی موجود در خاک جذب می شود. خاکهایی که اسیدی شده اند جذب کادمیوم را توسط گیاهان افزایش داده و این خود خطری است برای حیواناتی که برای ادامه زندگی احتیاج به خوردن این گیاهان دارند، کادمیوم در بدن آن ها تجمع می کند، بخصوص در مواردی مثل گاوها که گیاهان متعددی می - خورند و از این راه کادمیوم زیادی را وارد کلیه خود می کنند. کرم خاکی و دیگر ارگانسیم های حیاتی موجود در خاک نسبت به سمیت کادمیوم بسیار حساسند آن ها در غلظت های خیلی کم از بین می روند و این اهمیت ساختار خاک را می رساند. زمانی که غلظت کادمیوم در خاک خیلی بالا رود روی فرآیندهای میکروارگانسیم های موجود در خاک تأثیر گذاشته و تهدیدی برای همه اکوسیستم های خاکی است. در اکوسیستم های آبی کادمیوم میتواند تجمع زمینی در صدفهای دو کپه، صدفها، میگو، خرچنگ دریایی و ماهی داشته باشد. حساسیت به کادمیوم بین ارگانسیم های آب می تواند متفاوت باشد. ارگانسیم های آب نمک مقاومتر از ارگانسیم های آب تازه نسبت به سمیت کادمیوم هستند. اثرات مخرب ناشی از خوردن کادمیوم توسط حیوانات بیماری های کبدی و صدمه به مغز و اعصاب و افزایش فشار خون می باشد [۹-۱۰].

فصل دوم

بررسی جاذب های طبیعی در حذف فلزات سنگین

و معرفی نانوذرات و نانولوله ها

۲-۱-۱- مقدمه

فلزات سنگین به علت دارا بودن چگالی بالا به این نام نامیده شده اند. از آن جا که مقدار کمی از این فلزات در حجم زیاد ایجاد سمیت می کند، به اغلب آنها فلزات سنگین سمی گفته می شود. کروم، آهن، کبالت، کادمیوم از جمله این فلزات می باشند. همواره حذف این فلزات از آب و پساب و جلوگیری از ورود آن ها به طبیعت از دغدغه های محققان بوده است. جهت حذف این فلزات روش های متفاوتی وجود دارد که اجمالا به معرفی آن ها پرداخته می شود.

۲-۲-۱- انواع روش های مرسوم تصفیه آب و فاضلاب

روش های عمومی که برای حذف یون های فلزی از جریان های آبی استفاده می شوند، شامل رسوب دهی شیمیایی^۱، تبادل یون، فیلتراسیون غشایی، شناورسازی، روش های الکتروشیمیایی و جذب سطحی می باشند.

۲-۲-۱-۱- رسوب دهی شیمیایی

رسوب دهی شیمیایی یک روش مؤثر و دارای کاربرد وسیع در صنعت است [۱۲]. زیرا روشی نسبتاً ساده و هزینه انجام آن اندک است. در فرایندهای رسوب دهی، از برهم کنش بین مواد شیمیایی با یون های فلزات سنگین، لخته های نامحلول ایجاد می شود. لخته های ایجاد شده را می توان از طریق رسوب دهی یا فیلتراسیون از آب جدا کرد. آب تصفیه شده را پس از دکانته کردن در طبیعت رها کرده و یا دوباره مورد استفاده قرار می دهند. فرایندهای رایج رسوب دهی شیمیایی شامل رسوب دهی هیدروکسیدی و رسوب دهی سولفیدی هستند [۱۳].

۲-۲-۲- تبادل یون

^۱Chemical precipitation

فرایند تبادل یون به دلیل داشتن مزایای زیاد، از قبیل ظرفیت بالای تصفیه، بهره‌حذف بالا و سینتیک سریع [۱۴]، کاربرد زیادی در حذف فلزات سنگین از فاضلاب دارد. در این فرایند، یون‌های فلزی از محلول‌های رقیق با یون‌های نگهداشته شده توسط نیروهای الکتروستاتیک بر روی رزین تبادل‌ی، تعویض می‌شوند. رزین تبادل یونی، چه سنتزی و چه رزین جامد طبیعی، توانایی ویژه‌ای در تبادل کاتیون‌های خود با فلزات موجود در فاضلاب دارد. از میان موادی که در فرایند تبادل یون به کار می‌روند، رزین‌های سنتزی به خاطر حذف مؤثرتر فلزات سنگین از محلول، رایج‌ترند [۱۳]. ایراد این فرایند هزینه زیاد و حذف جزئی یون‌های معین است [۱۵].

۲-۲-۳- فیلتراسیون غشایی

تکنولوژی‌های فیلتراسیون غشایی با انواع مختلف غشاها به خاطر بهره‌ی حذف زیاد، عملکرد آسان و فضای ذخیره‌ی زیاد، ظرفیت بالایی را در حذف فلزات سنگین نشان دادند. فرایندهای غشایی مورد استفاده در حذف فلزات از فاضلاب، اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون و الکترودیالیز هستند [۱۳]. ایراد اصلی این فرایند تولید لجن می‌باشد.

۲-۱-۴- شناورسازی

امروزه شناورسازی کاربرد گسترده‌ای در تصفیه فاضلاب دارد. این شیوه برای جداسازی فلزات سنگین از فاز مایع با اتصال به حبابی که از فرایندهای معدنی سرچشمه می‌گیرد، به کار گرفته می‌شود. شناورسازی هوای حل شده، شناورسازی یونی و شناورسازی رسوبی، سه فرایند عمده‌ی شناورسازی به منظور حذف یون‌های فلزی از محلول هستند [۱۳].

۲-۲-۴- الف- شناورسازی هوای حل شده

در این روش حباب‌های بسیار ریز هوا به ذرات سوسپانسیون موجود در آب متصل شده و انباشته‌هایی با دانسیته کمتر از آب تولید می‌کنند، که سبب می‌شوند این توده‌ها در سطح آب و در محلی که بتوانند به صورت لجن خارج شوند، تجمع یابند [۱۶]. این روش حذف فلزات سنگین، در دهه ۱۹۹۰ بسیار مورد مطالعه قرار گرفت [۱۹-۱۷].

۲-۲-۴- ب- شناورسازی یونی

شناورسازی یونی به عنوان یک شیوه‌ی اثبات شده برای حذف یون‌های فلزی سنگین از فاضلاب شناخته شده است. فرایند شناورسازی یونی براساس توزیع گونه‌های فلزی یونی در فاضلاب‌های آب‌گریز شده با استفاده از سورفکتانت‌ها، و سپس حذف این گونه‌های آب‌گریز توسط حباب‌های هوا عمل می‌کند [۲۰].

۲-۲-۴- ج- شناورسازی رسوبی

فرایند شناورسازی رسوبی، شیوه دیگر شناورسازی است که اساس آن تشکیل رسوب و حذف بعدی آن با اتصال به حباب های هوا است. بسته به غلظت محلول فلزی، ترسیب ممکن است با تشکیل هیدروکسید فلزی یا تشکیل یک نمک با آنیونی خاص (سولفید، کربنات و...) پیش رود [۲۱].

۲-۲-۵- روش های الکتروشیمیایی

روش های الکتروشیمیایی شامل آبکاری یون های فلزی بر روی سطح کاتد است و می توان فلزات را به صورت فلز عنصری بازیابی کرد. تکنولوژی های الکتروشیمیایی فاضلاب نیازمند تأمین الکتریسیته گران و سرمایه گذاری کلان می باشد، به همین دلیل به طور گسترده به کار برده نمی شوند. بعضی از فرایندهای الکتروشیمیایی مورد استفاده به منظور حذف فلزات سنگین عبارتند از: لخته سازی الکتروشیمیایی^۱ و شناورسازی الکتروشیمیایی^۲.

۲-۲-۵-الف- لخته سازی الکتروشیمیایی

شامل تولید لخته سازها در محل با استفاده از حل کردن الکتریکی یون های آلومینیوم یا آهن از الکتروود آلومینیوم یا آهن است [۲۲]. تولید یون فلزی در آند اتفاق می افتد و گاز هیدروژن در کاتد آزاد می شود. گاز هیدروژن می تواند به جریان یافتن ذرات لخته شده به خارج از آب کمک کند [۲۲].

۲-۲-۵-ب- شناورسازی الکتروشیمیایی

شناورسازی الکتروشیمیایی یک فرایند جداسازی جامد/مایع است که با استفاده از حباب های کوچک گاز هیدروژن یا اکسیژن تولید شده از الکترولیز آب، آلودگی ها را در سطح آب شناور می کند. این روش کاربرد گسترده ای در حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی دارد [۱۳].

۲-۲-۶- جذب سطحی

امروزه جذب سطحی به عنوان یک روش مؤثر و اقتصادی برای تصفیه ی فاضلاب حاوی فلز سنگین شناسایی شده است [۲۳]. فرایند جذب سطحی در طراحی و عملکرد انعطاف پذیر است و در بسیاری از موارد فاضلاب تصفیه شده با کیفیت بالا تولید می کند. به علاوه، از آنجایی که بعضی مواقع جذب سطحی برگشت پذیر است، می توان جاذب ها را توسط فرایند واجذبی مناسب دوباره تولید کرد. موادی که در فرایند جذب سطحی به عنوان جاذب به کار می روند عبارتند از: جاذب های سطحی کربن فعال (جاذب های متداول) و جاذب های ارزان قیمت (نامتداول). این روش، مشکل ایجاد لجن را حل کرده و سیستم را از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می کند؛ بویژه، اگر جاذب های سطحی ارزان قیمت (نامتداول) به کار گرفته شوند [۲۴].

^۱Electrocoagulation

^۲Electroflotation

۲-۶-۲ الف-جاذب های سطحی کربن فعال (جاذب های متداول)

جاذب های سطحی کربن فعال کاربرد گسترده ای در حذف آلودگی های ناشی از فلزات سنگین دارند. تعداد زیادی از تحقیقات کاربرد کربن فعال را به منظور حذف فلزات سنگین بررسی کرده اند [۲۶ و ۲۵]. برای بهبود جذب سطحی فلزات سنگین بر کربن فعال، مواد افزودنی و تشکیل کربن فعال مرکب می تواند یک انتخاب باشد. افزودن آلژینات^۱ [۲۷]، تانیک اسید [۲۸]، منیزیم [۲۹]، سورفکتانت ها [۳۰] به ترکیبات کربن فعال می تواند جاذب های سطحی مؤثری برای فلزات سنگین ایجاد کنند. تبدیل مواد کربن دار به کربن فعال برای مقابله با فلزات سنگین گزارش شده است. دیاز و همکارانش تهیه کربن فعال با استفاده از ضایعات مواد مختلف را بازیابی کردند [۳۱]. کونگ سوان و همکارانش از کربن فعال بدست آمده از پوسته درخت اکالیپتوس برای جذب Pb^{2+} و Cu^{2+} استفاده کردند [۳۲]. چند مورد از مطالعاتی که تاکنون در مورد کاربرد این جاذب ها انجام شده است به قرار زیر است:

ذرات بهم چسبیده ی نمناک [۳۳]، لجن آسیاب شده ی کاغذ [۲۳]، جاذب زیستی جلبک دریایی [۳۴]، ذرات ژلاتینی تانن [۳۵]، مغز چغندر قند [۳۶]، پوسته گندم [۳۷]، قالب برگ [۳۸]، برگ درختان دارای میوه مخروطی [۳۹]، کربن فعال پوسته بادام زمینی [۴۰]، فیبرهای فشرده درخت و پوسته نارگیل [۴۱]، کربن های فعال خاکستری زغال، چوب و پوسته نارگیل [۴۲]، کربن خاک اره درخت نارگیل [۴۳]، خاک اره لاستیک استفاده شده [۴۴]، کاکتوس، گوشته و هسته زیتون، کرک، زغال چوب، و سوزن کاج [۴۵]، پوسته برنج [۴۶]، خزه [۴۷]، کود خشک شده ی خزه [۴۸]، پوسته فندق [۴۹ و ۵۰]، کربن پوسته بادام [۵۱]، چوب ذرت [۵۲]، کربن سرگین گاو [۵۳]، ضایعات کشاورزی [۵۴]، ضایعات دوغاب [۵۵].

۲-۶-۲ ب-جاذب های ارزان قیمت (نامتداول)

کربن فعال که در بسیاری از موارد به عنوان جاذب سطحی مورد استفاده قرار می گیرد، نسبتاً گران است. تحقیق در جهت یافتن جاذب های ارزان قیمت و دارای فراوانی زیاد برای حذف یون های فلزی سنگین، توجه محققان را به خود جلب کرد. تا به امروز صدها مقاله در مورد استفاده از جاذب های سطحی ارزان قیمت منتشر شده است. ضایعات کشاورزی، محصولات جانبی صنعتی و ضایعات مواد طبیعی به عنوان جاذب هایی برای تصفیه فاضلاب حاوی فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفتند [۱۳] که به آن ها اصطلاحاً جاذب های نامتداول می گویند. مزایای اصلی جاذب های نامتداول عبارتند از:

- ظرفیت جاذب های نامتداول مختلف در حذف جذب شونده ها عموماً بین ۵۰٪ تا ۹۰٪، بسته به خصوصیات و اندازه ذرات جاذب، خصوصیات و غلظت جذب شونده و...، تغییر می کند. به همین دلیل، جاذب های نامتداول را می توان به طور کارآمد به منظور حذف فلزات سنگین به کار برد.

^۱ Alginate

- جاذب های نامتداول نسبت به جاذب های متداول بسیار ارزان تر هستند، همیشه و همه جا در دسترس هستند و موجب کاهش شدید هزینه های جابه جایی می شوند.
- بعضی از جاذب های نامتداول قبل از کاربرد و به منظور افزایش کارایی در حذف فلزات سنگین، به پیش تصفیه ساده ی قلیایی یا اسیدی نیاز دارند تا لیگنین موجود در آن ها حذف شود.
- جاذب های نامتداول به نگهداری و نظارت کمتری نیاز دارند.

اگر چه همه روش های تصفیه فاضلاب های حاوی فلزات سنگین را می توان برای حذف فلزات سنگین به کار گرفت؛ اما، هر کدام از آن ها مزایا و محدودیت هایی دارد. رسوب دهی شیمیایی در فاضلاب های حاوی غلظت بالای یون های فلزی سنگین عملی است اما موقعی که غلظت یون فلزی کم باشد، کارایی ندارد. این روش از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و حجم زیادی از لجن را تولید می کند. در روش تبادل یونی رزین ها را با واکنشگرهای شیمیایی بازتولید می کنند، که خود این عمل می تواند آلوده کننده ثانویه محیط باشد. همچنین هزینه این روش زیاد است. تکنولوژی فیلتراسیون غشایی می تواند یون های فلزی سنگین را با بهره زیاد حذف کند، اما مشکلاتی از قبیل هزینه زیاد، پیچیدگی فرایند و رسوب غشایی^۱ کاربرد آن را در حذف فلزات سنگین محدود می کند. جذب سطحی به عنوان روش مناسبی برای حذف فلزات سنگین در فاضلاب های با غلظت پایین شناخته شده است؛ اما، گران بودن کربن فعال، کاربرد آن را در جذب سطحی محدود می کند. جاذب های ارزان قیمت زیادی به منظور حذف یون های فلزات سنگین آزمایش شده اند، اما کارآمدی جذب سطحی به نوع جاذب بستگی دارد.

۲-۲-۶-۲-پ-انباشتگی زیستی^۲

چنانچه مواد شیمیایی محلول در محیط های مایعی که زیست توده نیز یافت می شود، وجود داشته باشد، میان این مواد و زیست توده^۳ها برهمکنش هایی - پیوند با سطح سلول ها در فرایندی که جذب زیستی نامیده می شود، یا تجمع درون سلول ها که انباشتگی زیستی نامیده می شود- صورت می گیرد [۵۶ و ۵۷]. جذب زیستی و انباشتگی زیستی در چرخه ای از مواد در محیط زیست با هم شراکت می کنند. فرایندها به طور پیوسته اتفاق افتاده و توسط انواع زیست توده های موجود قابل انجام اند. اگرچه بشر می تواند این فرایندها را در صنعت تحت شرایط کنترل شده به کار گیرد، اما قادر به کنترل این فرایندها در طبیعت نیست، جذب زیستی و انباشتگی زیستی از این منظر با هم تفاوت دارند که در فرایند اول آلاینده ها با سطح دیواره سلولی پیوند یافته، حال آنکه در فرایند دوم علاوه بر پیوند یافتن با سطح دیواره سلولی، آلاینده ها درون سلول ها نیز تجمع می یابند. جذب زیستی یک فرایند فیزیکی و شیمیایی ساده مشابه جذب سطحی یا تبادل یونی متداول می باشد. جذب زیستی فرایند متابولیکی-انفعالی می باشد. در انباشتگی زیستی فرایند بیشتر پیش می رود؛ بدین معنی که مرحله ی اول

^۱ Membrane fouling

^۲ Bioaccumulation

^۳ Biomass

جذب زیستی است و سپس مراحل بعدی اتفاق می افتد، که با انتقال آلاینده به داخل سلول و نهایتاً افزایش غلظت آلاینده درون سلول ها همراه می باشند. بنابراین، در انباشتگی زیستی موقعیت های پیوند بیشتری برای آلاینده ها در دسترس است و می توان به غلظت های باقیمانده کمتری از آلاینده درون محلول دست یافت. چنانچه جذب زیستی و انباشتگی زیستی تحت شرایط آزمایشگاهی عملی شوند، می بایست در مرحله اول زیست توده در محلول حاوی جذب شونده معلق گردد. بعد از گذشت چند ساعت به تعادل می رسد و اگر در این مرحله زیست توده مملو شده از گونه آلاینده از محلول جدا شود، جذب زیستی صورت گرفته است. اما اگر محلول حاوی مواد مغذی باشد و بتواند به عنوان یک محیط رشد و نمو کوچک برای ارگانسیم عمل کند، فرایندهای متابولیکی شروع به انجام شدن کرده و سیستم های انتقال درون سلولی فعال می شوند. اگر ارگانسیم های هتروتروف (باکتری و قارچ ها) به کار گرفته شوند، می بایست منشأ کربن آلی برای فاضلاب تأمین شود. این یک محدودیت ضعیف است؛ زیرا، فاضلابی که توسط انباشتگی زیستی تصفیه می شود به ندرت حاوی جذب شونده های اضافی و همچنین منشأ کربن آلی است. جذب زیستی فرایندی متابولیکی - انفعالی است و توسط مواد دارای منشأ بیولوژیکی انجام می گیرد، نه زیست توده های زنده. انباشتگی زیستی فرایندی متابولیکی فعال است و توسط سلول های زنده عملی می شود. در جذب زیستی خطر مسموم شدن جاذب بوسیله ی جذب شونده ها وجود ندارد، در حالی که در انباشتگی زیستی این خطر وجود دارد. جذب و انباشتگی زیستی عمدتاً به منظور حذف کاتیون های فلزی از محلول مورد استفاده قرار می گیرند. تحقیق در مورد برهمکنش زیست توده - فلز به سال ۱۹۶۰ برمی گردد. در این سال آشکار شد که اگرچه زیست توده نمی تواند فلزات را از بین ببرد، اما می تواند در بعضی موارد به شکل شگفت انگیزی خصوصیاتشان را تغییر دهد. فاضلاب هایی که قادر به تصفیه شدن با هر دو روش جذب زیستی و انباشتگی زیستی هستند، بیشتر شامل فاضلاب صنایع ذوب فلزات می باشد. از جمله فلزاتی که می توانند به عنوان جذب شونده در فرایندهای جذب زیستی و انباشتگی زیستی به کار روند می توان به Al, Cd, Cr, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mn, Hg, Mo, Ni, Pt, Se, Ag, U, V, Zn اشاره کرد.

از آن جایی که در این تحقیق به بررسی جذب زیستی پرداخته خواهد شد، از توضیح بیشتر در مورد فرایند انباشتگی زیستی خودداری کرده و در ادامه فقط درباره ی جذب زیستی صحبت می شود.

۲-۲-۶-ت- جذب زیستی

جذب زیستی اصطلاحی است که در اینجا برای توصیف حذف فلزات سنگین با استفاده از فرایند تشکیل پیوند خارجی با میکرو ارگانسیم های غیر زنده و زیست توده هایی که قادر به جمع آوری مؤثر فلزات سنگین هستند، به کار می رود. مزایای این فرایند شامل هزینه ی عملیات اندک در صورت استفاده از جاذب های ارزان قیمت، کم بودن مقدار لجن تولیدی، و عدم افزایش اکسیژن مورد نیاز شیمیایی^۱ فاضلاب است. این فرایند شامل یک فاز جامد (جاذب یا جاذب زیستی؛ مواد بیولوژیکی) و یک فاز مایع (حلال؛ معمولاً آب) حاوی گونه های حل شده ای که جذب می شوند (یون های فلزی)، است. در اثر تماس جاذب با گونه های جذب شونده، توسط

^۱ COD

مکانیسم های مختلف جذب و پیوند صورت می گیرد. فرایند ادامه می یابد تا اینکه تعادل بین مقدار گونه های جذب شده به جامد و بخش باقی مانده از آن جزء در محلول برقرار شود. درجه نزدیکی جاذب به جذب شونده، توزیع جذب شونده را بین فازهای جامد و مایع تعیین می کند. به کارگیری فرایند ساده است و به جذب سطحی متداول و تبادل یونی شباهت دارد، به جز این که در اینجا از جاذب با منشأ زیستی استفاده می شود. جذب زیستی یک فرایند ویژه بسیار مؤثر در تصفیه فاضلاب های رقیق است [۵۸ و ۵۹] که در آن، جاذب ها گزینش پذیر و تجدیدپذیر هستند. موادی که به عنوان جاذب زیستی به کار می روند از باکتری ها، قارچ ها، گیاهان و یا حیوانات منشأ می گیرند [۶۵-۶۰]. زیست توده ای که به خصوصیات جذب کننده گی آن شک نداریم می تواند به طور کارآمد یون های فلزی را از محلول جدا کند [۶۶]، مانند پوسته تخم مرغ خرد شده، ضایعات پنبه، کود گیاهی و یا پوسته برنج [۶۷]. بعضی از مواد جاذب زیستی محدوده وسیع دارند و بدون فعالیت ویژه ای با اکثر فلزات سنگین پیوند یافته و آن ها را جمع آوری می کنند، درحالی که بقیه مخصوص فلزات معین هستند. بعضی آزمایشگاه ها زیست توده هایی را که به آسانی در دسترس قرار می گیرند را به کار می برند درحالی که دیگران نژاد خاصی از میکروارگانیسم ها را قرنطینه و نگهداری می کنند و برخی هم زیست توده ی خام موجود را تا یک درجه ی معین برای بهبود خواص جذب زیستی شان فرآوری می کنند. جاذب های زیستی را می توان به جاذب های ارزان و جاذب های گران قیمت دسته بندی کرد. گروه اول شامل موادی است که مستقیماً از محیط زیست جمع آوری می شوند (مانند جلبک ها) و ضایعات یا محصولات جانبی صنایع هستند (مانند باقیمانده حاصل از فرایند تخمیر در کارخانه های شراب سازی و آبجوسازی) [۶۸]. گروه دوم دربرگیرنده موادی است که مخصوصاً برای اهداف جذب زیستی آماده سازی می شوند. آن ها باید خصوصیات جذب زیستی خوبی داشته و نیز به آسانی تجدیدپذیر باشند. اصطلاح زیست توده به چوب، ضایعات کشاورزی، گونه های گیاهی، کاغذ باطله، خاک اره، جامدات زیستی، علف، ضایعات فرآوری مواد غذایی، گیاهان آبی و دیگر مواد مشابه اشاره دارد [۶۹].

۲-۲-۶-ت- مکانیسم جذب زیستی

جذب فلزات سنگین بر روی مواد بیولوژیکی به اجزای تشکیل دهنده این مواد، که عمدتاً پروتئین ها، کربوهیدرات ها و ترکیبات فنولی هستند، نسبت داده شده است؛ چرا که این ترکیبات دارای گروه های عاملی قطبی کربوکسیل، هیدروکسیل و آمین هستند که قادرند به یون فلزی متصل شوند [۷۰]. این گروه ها با تعویض یون های هیدروژن با یون های فلزی موجود در محلول، یا دادن یک جفت الکترون با یون فلزی تشکیل کمپلکس داده و بدین ترتیب با فلز پیوند می یابند [۷۱]. مکانیسم هایی که تاکنون برای جذب زیستی ارائه شده است عبارتند از: جذب شیمیایی، تشکیل کمپلکس، جذب سطحی - تشکیل کمپلکس بر روی سطح و درون حفره ها-، تبادل یونی، تشکیل ریزرسوب، تجمع هیدروکسید فلزات سنگین بر روی سطح زیستی [۷۲-۷۴]. برای درک چگونگی پیوند یافتن فلزات با زیست توده، ضروری است که ابتدا گروه های عاملی درگیر در این پیوندها را بشناسیم. اکثر گروه های عاملی درگیر در فرایند تشکیل پیوند، در دیواره های سلولی یافت می شوند.

ساختار دیواره های سلولی گیاهی عموماً از مولکول های سلولزی، به شکل رشته های ریز احاطه شده توسط مواد هموسلولزی (زایلن ها، مانان ها^۱، گلوکومانان ها^۲، گالاکتان ها^۳)، لیگنین و پکتین همراه با مقادیر کمی پروتئین ساخته شده اند [۷۷ و ۷۶ و ۷۵]. لاسزلو و دیانتزیس^۴ [۷۸] نشان دادند لیگنوسلولزها ظرفیت جذب مناسبی دارند، که این ظرفیت از پلیمرهای سازنده و ساختارشان منشأ می گیرد. پلیمرها حاوی سلولز، همی سلولزها، پکتین، لیگنین و پروتئین می باشند. این پلیمرها، جاذب های سطحی برای محدوده وسیعی مواد حل شده، بویژه کاتیون های فلزی دو ظرفیتی هستند [۷۸]. آب قادر است به بخش غیر کریستالی سلولز و تمام همی سلولز و لیگنین نفوذ کند. بنابراین، برای انجام جذب و جذب سطحی، محلول های آبی در تماس با سطح بسیار بزرگی از اجزای مختلف تشکیل دهنده دیواره سلولی قرار می گیرند. سلولز قادر است فلزات سنگین موجود در محلول را جذب کند [۷۹]. در جدول ۲-۱ عوامل مؤثر بر جذب زیستی به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۲-۱: بعضی عوامل مؤثر بر جذب زیستی

افزایش قابلیت دسترسی به گرو های موجود در زیست توده تغییر در حالت شیمیایی مکان (مانند قابلیت دستیابی) رابط بین مکان جذب و فلز (توانایی تشکیل پیوند)	گروه های عاملی
تحت تأثیر قرار دادن پروتونه شدن یون های فلزی پیوند یافته با موقعیت ها و حالت یونی جذب شونده در محلول پروتونه شدن موقعیت های آنیونی در pH پایین (مقادیر بالای H^+) شسته شدن کاتیون های فلزی توسط اسید - کاربرد در تجدیدپذیری، استفاده مجدد و صرفه جویی اقتصادی.	pH
تقریباً تمام مواد معدنی (به استثناء K^+ و Mg^{2+}) اکثر آلاینده های محیط زیست با سمیت زیاد: As, Cr, Cd, Hg, Cu, Pb, هسته های رادیواکتیو (Co, Sr, U, Th)	جذب شونده ها

انباشته شدن فلزات سنگین بر موجودات آبی، که یک فرایند فعال شامل فعالیت متابولیکی درون ارگانسیم های زنده است، توسط چندین محقق از سال ۱۹۷۸ مورد مطالعه قرار گرفته است [۸۴-۸۰]. اگرچه در ابتدا اکثر محققین تلاششان را بر روی انباشتگی و تغلیظ فلزات سنگین درون ارگانسیم های زنده متمرکز کرده بودند [۸۸-۸۵]، اما امروزه زیست توده های غیر زنده دارای پتانسیل بالای جذب فلزات [۸۹]، توجه آن ها را به این نوع

^۱ Mannans

^۲ Glucomannans

^۳ Galactans

^۴ Laszlo and Dintzis

جذب زیستی جلب کرده است [۹۰-۱۰۷]. عمدتاً پسماندهای صنعتی، بافت گیاهی و کشاورزی در طی دهه اخیر اهمیت زیادی در حذف فلزات سنگین پیدا کرده است [۱۰۸-۱۱۸].

۲-۲-۶-ج-مروری بر جذب زیستی

چندین مقاله مروری وجود دارند که کاربرد جاذب های زیستی را در تصفیه آب و فاضلاب حاوی فلزات سنگین مورد بحث قرار داده اند [۱۱۹-۱۴۲]. یکی از گروه هایی که بیشترین تحقیقات را در زمینه جذب زیستی انجام داده است گروه ولسکای^۱ می باشد. در طول سه دهه گذشته، این گروه چندین مقاله مروری نوشته اند که در اینجا به تعدادی از آن ها اشاره می شود [۱۳۷، ۱۳۴، ۱۳۰، ۱۲۴، ۱۲۰]. مقالات مروری شان بسیاری از جنبه های مؤثر بر حذف فلزات سنگین با استفاده از جاذب های زیستی را در بر می گیرد. به عنوان مثال در سال ۱۹۹۵، ولسکای و هولن^۲ [۱۲۰] بیش از ۱۱۰ مقاله منتشر شده از سال ۱۹۴۳ تا ۱۹۹۵ را گردآوری کردند. کراتوکویل^۳ و ولسکای تکامل جذب زیستی را از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۷ مورد بحث قرار دادند [۱۲۴]. آن ها ظرفیت های پیوند یافتن فلز را برای انواع متعدد زیست توده ها تحت تاثیر عوامل آزموده شده مختلف، به طور خلاصه بیان کردند. از این رو، مکانیسمی که بسیار با آن مواجه شدند، مکانیسم تبادل یونی بود. شناخت تبادل یونی بین پروتون ها و فلزات سنگین، سهم گروه های عاملی سطحی در فرایند های تبادل یونی و بررسی ایزوترم تعادلی در این بررسی مورد توجه قرار گرفته است. داده های سینتیک و تعادل جذب از ویژگی های ذاتی برای طراحی سیستم جداسازی جذب سطحی هستند. اکثر مطالعات جذب زیستی به سمت این هدف کشیده شده اند. به علاوه، ترکیبی از داده های جذب تعادلی، رفتار جذب شونده در محلول، مکانیسم های به دام انداختن جذب شونده، ویژگی های انتقال جرم و خصوصیات دینامیک سیال برای طراحی سیستم های جذب سطحی لازم است [۱۳۴]. نمایش و توصیف چگونگی به کارگیری هم زمان این اطلاعات، توسط مدل های ریاضی مناسب برای پیش بینی عملکرد ستون جذب در بررسی منتشر شده از ولسکای در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است [۱۳۴]. ولسکای یک مقاله مروری تحت عنوان "جذب زیستی و من"^۴ نوشته است [۱۳۷]. این مقاله جالب تقریباً تمام کارهای نویسنده را پوشش می دهد. ولسکای کارهایش را در چند بخش دسته بندی کرده است، که شامل چالش رشته های علمی مختلف، تهدید فلزات برای محیط زیست، معمای برهم کنش های زیست توده-فلز، تعادلات جذب و اشتباهات ایجاد شده، ملاحظات فرایند و تجدید نسل جاذب، چگونگی مدل سازی و بهینه سازی عملکرد جذب زیستی، و آینده جذب زیستی می باشد. در سال ۲۰۱۱ آنا ویتک-کروویاک^۵ و همکارانش [۱۴۳] جذب زیستی یون های Cu(II) و Cr(III) را بر روی زیست توده پوست بادام زمینی بررسی کردند. داده های تجربی را با استفاده از

^۱ Volesky

^۲ Holan

^۳ Kratochvil

^۴ Biosorption and me

^۵ Anna Witek-Krowiak