

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی گرایش
پیشرفته

عنوان پایان نامه

ساخت و ارزیابی هیدروژل‌ها برای جداسازی

استاد راهنما:

دکتر فرشاد رحیم پور

استاد مشاور:

دکتر مرضیه صادقی

نگارش:

فاطمه حبیب پور

اسفند ۱۳۹۱



پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

دانشجو: فاطمه حبیب پور

تحت عنوان

ساخت و ارزیابی هیدروژل‌ها برای جداسازی

در تاریخ ۹۱/۱۲/۲۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

- ۱- استاد راهنمای اول پایان نامه : دکتر فرشاد رحیم پور با مرتبه علمی استادیار امضاء
- ۲-استاد مشاور پایان نامه : دکتر مرضیه صادقی با مرتبه علمی استادیار امضاء
- ۲- استاد داور اول داخل گروه : دکتر شهرام شریفی نیا با مرتبه علمی دانشیار امضاء
- ۳- استاد داور دوم داخل گروه : دکتر امید بختیاری با مرتبه علمی استادیار امضاء

سپاس گزاری

سپاس و ستایش سزاوار یگانگی بهمانی که سایه آسایش، همیشه بر دلواپسی هایم گسترده است، مدبری که قلم به دستان ناتوانم سپرد و قوت به اندیشه هایم و ایمان به اعلم و نور به چشمانم.

واژه حقدرا لکن است وقتی به ستایش پروردگاری برمی خورد که تمام ذرات عالم امکان، سجده کرده اویند.

چنگ می کشم به کلمات که ستایش کنم نام مقدست را

یارب العالمین؛

سپاس خدای ات را و سپاس هر آنچه را که از تو دارم.

الکون که با لطف و یاری پروردگار متعال انجام این رساله به اتمام رسیده است، بر خود لازم می دانم از کلیه عزیزانی که در این راه مریاری نموده اند صمیمانه قدردانی نمایم. از جناب آقای دکتر فرهاد رحیم پور استاد محترم را بهمانکه با نظرات و پیشنهادات ارزنده و زحمت بی دریغشان در طی مراحل مختلف اجرا، تدوین و ارائه رساله مریاری نموده اند صمیمانه قدردانی می نمایم. از یزدان پاک توفیق روز افزون ایشان و خانواده گرامی شان را خواستارم. مراتب سپاس خود را نشا استاد مشاورم سرکار خانم مرضیه صادقی می نمایم و برایشان آرزوی توفیق روز افزون از این دوستان خواستارم. از اساتید بزرگوار گروه مهندسی شیعی آقایان دکتر شرام شریف نیا و دکتر امید تهنیدی سپاسگزارم. از بهر اینان خوب این دوره از تحصیل، همچنین از دوستان خوبم صمیمانه سپاسگزارم.

سپاسگزار کسانی هستم که سر آغاز زندگی نمودند، از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه، پدر و مادری که تار مویی از آن با پای من سیه نماند و دو استادی که سپیدی را بر تخته سیه زندگی ام نداشتند.

نهایت سپاس خود را به خانواده خوبم پیشکش می نمایم که وجودشان مرا سراسر لطف بوده است و مهربانی. صمیمانه سپاسگزارم به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

این پایان نامه را به آستانه چشمان مقدس مادرم و شانه های نستوه پدرم تقدیم می کنم

که هر دویشان آياتی نازل شده از سوی پروردگارم

که چگونه می توانم فراموش کنم اضطرابشان را و دلواپسی هایشان را

و دعاهای مادرم را و سجاده های خیسش را و دعاهای بدرقه می پدرم را.

مهربانی دستان خسته شان و چشمان پر از امید و آرزویشان را به فردایی که تنها از آن فرزند است و آنان را بهره مگر خدا تولد داد با

بهشت.

چکیده

رشد روزافزون جمعیت و گسترش شهرها و واحدهای صنعتی مختلف سبب افزایش میزان تولید انواع مواد آلاینده گردیده است. فلزات سنگین یکی از رایج‌ترین و در برخی موارد خطرناک‌ترین آلاینده‌های این پساب‌ها می‌باشند که به مرور زمان با سخت‌گیرانه شدن استانداردهای خروجی این مواد، روش‌های مؤثرتر حذف آن‌ها همواره یک چالش بوده است. روش‌های نوین به خصوص در زمینه‌ی جذب سطحی در بسیاری از موارد نتایج امیدوار کننده‌ای حاصل کرده است. هیدروژل‌ها ترکیباتی پلیمری با کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، دارویی، کشاورزی، تصفیه‌ی پساب و ... می‌باشند که در سال‌های اخیر در زمینه‌ی حذف فلزات سنگین توجهات فراوانی را به خود جلب کرده‌اند. زیست‌سازگاری، زیست‌تجزیه‌پذیری، عملکرد راحت و بازده بالا از ویژگی‌های برجسته‌ی این ترکیبات می‌باشد.

در مطالعه‌ی حاضر هیدروژل کیتوسان-پیوند-پلی (اکریلیک اسید-اکریل‌آمید) با به‌کارگیری نانوذرات بوهمیت اصلاح شیمیایی شده و برای جذب سطحی یون سرب (Pb^{2+}) از محلول آبی مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مؤثر در فرآیند جذب شامل pH اولیه، دما، غلظت اولیه‌ی فلز، مقدار جاذب مصرفی، نسبت مونومرها و مقدار نانوذره به روش RSM و در سیستم ناپیوسته بررسی شدند. ظرفیت جذب بهینه $233/615 \text{ mg/g}$ در $pH=3$ ، دمای 40°C درجه‌ی سلسیوس، غلظت فلز اولیه 50 mg/l ، مقدار 10 mg جاذب، نسبت مونومری $AAC/AAM=3/625$ و 3% نانوذره به دست آمد.

انواع ایزوترم‌های جذب برای داده‌های تعادلی به دست آمده در شرایط بهینه به کار رفتند که داده‌های آزمایشگاهی با مدل فروندلیچ برازش خوبی نشان داد. همچنین نفوذ داخل ذره‌ای و فیلمی هر دو کنترل کننده‌ی انتقال جرم بوده و سینتیک جذب نیز به خوبی از مدل سینتیکی شبه مرتبه‌ی دوم پیروی می‌کرد. فرآیند دفع یون‌های جذب شده بر روی جاذب مورد ارزیابی قرار گرفت و در فرآیند احیاء جاذب تا ۳ مرحله قابلیت استفاده‌ی مجدد را از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: هیدروژل، کیتوسان، اکریلیک اسید، اکریل‌آمید، حذف فلز سنگین

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: آلاینده‌ها و روش‌های حذف آن‌ها
۱-۱-۱	مقدمه
۲-۱-۲	روش‌های حذف فلزات سنگین و مقایسه‌ی آن‌ها
۳-۱-۳	جذب سطحی
۴-۱-۴	فلز سرب
۵-۱-۵	رنگ‌ها
۶-۱-۶	نانوتکنولوژی و نانو مواد
۱۰	فصل دوم: هیدروژل‌ها، تعریف، کاربردها، آنالیزهای شناسایی و مروری بر کارهای پیشین
۱-۲-۱۱	هیدروژل
۲-۲-۱۳	دسته بندی هیدروژل‌ها
۳-۲-۱۳	روش‌های ساخت هیدروژل
۱-۳-۲-۱۴	اتصال عرضی فیزیکی
۲-۳-۲-۱۴	اتصال عرضی شیمیایی
۳-۳-۲-۱۶	اتصال عرضی تابشی
۴-۲-۱۶	مشخصات هیدروژل
۵-۲-۱۸	هیدروژل‌های هوشمند
۶-۲-۱۸	آنالیزهای شناسایی
۱-۶-۲-۱۸	آنالیز طیف سنجی مادون قرمز FTIR
۲-۶-۲-۱۹	آنالیز میکروسکوپ الکترونی SEM
۳-۶-۲-۱۹	آنالیزهای DSC و NMR
۷-۲-۱۹	پلی ساکاریدها
۸-۲-۲۱	نانوذره‌ی بوهمیت
۹-۲-۲۳	مروری بر کارهای پیشین
۳۴	فصل سوم: ایزوترم‌های جذب، طراحی آزمایش‌ها و مواد و روش‌ها
۱-۳-۳۵	مطالعات تعادلی جذب سطحی یون‌های فلزات سنگین
۱-۱-۳-۳۵	ایزوترم‌های دو پارامتری
۲-۱-۳-۳۹	ایزوترم‌های سه پارامتری
۲-۳-۴۰	معادلات سینتیکی جذب سطحی فلزات سنگین

- ۳-۲-۱- مدل سینتیکی جذب سطحی ۴۱
- ۳-۲-۲- مدل نفوذی جذب سطحی ۴۲
- ۳-۳- ترمودینامیک جذب سطحی ۴۳
- ۳-۴- طراحی آزمایش‌ها و روش سطوح پاسخ (RSM) ۴۳
- ۳-۴-۱- تعاریف: ۴۴
- ۳-۴-۲- مراحل روش RSM: ۴۵
- ۳-۴-۳- مدل‌های تجربی ۴۶
- ۳-۴-۴- قدرت پیش‌بینی مدل ۴۷
- ۳-۴-۵- آنالیز مدل با استفاده از جدول ANOVA ۴۸
- ۳-۴-۶- به‌دست آوردن نقاط بهینه متغیرها ۵۰
- ۳-۵- مواد و روش‌ها ۵۱
- ۳-۵-۱- مواد مورد استفاده در پروژه ۵۱
- ۳-۵-۲- دستگاه‌ها و لوازم مورد استفاده در پروژه ۵۳
- ۳-۵-۳- روش انجام آزمایش‌ها ۵۳
- ۳-۵-۴- آزمایش‌های مربوط به حذف رنگ ۶۱
- فصل چهارم: بحث و نتایج**
- ۴-۱- بررسی نتایج حاصل از جذب فلز سرب بر روی هیدروژل ۶۴
- ۴-۱-۱- بررسی اثر نانوذره در میزان جذب فلز سرب ۶۴
- ۴-۱-۲- شرح آنالیز رگرسیون ۶۵
- ۴-۱-۳- تعیین نقطه‌ی بهینه‌ی حذف سرب با استفاده از هیدروژل اصلاحی ۶۹
- ۴-۱-۴- نمودارهای توزیع نرمال ۷۰
- ۴-۱-۵- تحلیل نمودارهای سطوح پاسخ جذب سرب بر روی هیدروژل ۷۰
- ۴-۲- مطالعه‌ی روابط تعادلی جذب سرب بر روی هیدروژل اصلاح شده ۸۴
- ۴-۲-۱- بررسی اثر زمان تماس بر روی جذب ۸۴
- ۴-۲-۲- بررسی سینتیک جذب ۸۵
- ۴-۲-۳- مکانیزم جذب یون‌های سرب بر روی هیدروژل ۸۶
- ۴-۲-۴- ایزوترم تعادلی جذب سرب بر روی هیدروژل ۸۸
- ۴-۳- مشخصه سازی هیدروژل کیتوسان-پیوند-پلی (اکریلیک اسید-اکریل آمید)/بوهمیت ۸۹
- ۴-۳-۱- مکانیزم جذب کاتیون سرب توسط هیدروژل ۹۰
- ۴-۳-۲- آنالیز طیف مادون قرمز FTIR ۹۱
- ۴-۳-۳- آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) ۹۳

۹۶	۴-۳-۴- آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM
۹۷	۴-۴- میزان تورم
۹۹	۵-۴- آزمایش دفع و احیای مجدد
۱۰۰	۶-۴- آزمایش‌ها و نتایج حاصل از آن‌ها در حذف رنگ
۱۰۰	۴-۶-۱- بررسی اثر pH در حذف رنگ
۱۰۱	۴-۶-۲- بررسی اثر نسبت مونومرها در حذف رنگ متیلن بلو
۱۰۲	۴-۶-۳- بررسی اثر زمان تماس در حذف رنگ
۱۰۲	۴-۶-۴- بررسی اثر مقدار جاذب بر روی حذف رنگ
۱۰۳	۴-۶-۵- اثر غلظت اولیه‌ی رنگ در حذف رنگ متیلن بلو
۱۰۴	۴-۷- آنالیزها
۱۰۴	۴-۷-۱- آنالیز FTIR
۱۰۵	۴-۷-۲- آنالیز SEM

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۰۷	
۱۰۸	۵-۱- مقدمه
۱۰۸	۵-۲- نتایج
۱۰۸	۵-۲-۱- نقطه‌ی بهینه‌ی جذب
۱۰۸	۵-۲-۲- فاکتورهای مهم در حذف فلز سرب
۱۱۰	۵-۲-۳- ظرفیت جذب هیدروژل
۱۱۰	۵-۲-۴- اثر زمان تماس
۱۱۱	۵-۲-۵- ایزوترم‌های تعادلی
۱۱۱	۵-۲-۶- سینتیک جذب
۱۱۱	۵-۲-۷- مکانیزم انتقال جرم
۱۱۱	۵-۲-۸- دفع و احیاء
۱۱۱	۵-۳- نتیجه‌گیری
۱۱۱	۵-۴- پیشنهادها
۱۱۲	منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

فصل اول

شکل (۱-۱) - ساختار مولکولی متیلن بلو و رزونانس‌های آن ۸

فصل دوم

شکل (۲-۱) - توصیف تصویری استفاده از یک عامل اتصال دهنده ۱۵

شکل (۲-۲) - شبکه‌ای شدن هیدروژل پس از اتصال عرضی ۱۵

شکل (۲-۳) - پیوند شدن یک مونومر بر روی بدنه‌ی پلیمر شکل گرفته ۱۶

شکل (۲-۴) - هیدروژل قبل (الف) و بعد (ب) از تورم ۱۷

شکل (۲-۵) - ساختار شیمیایی کیتین ۲۰

شکل (۲-۶) - ساختار شیمیایی کیتوسان ۲۰

شکل (۲-۷) - ساختار مولکولی بوهمیت ۲۲

شکل (۲-۸) - ساختار نانوذرات بوهمیت ۲۲

شکل (۲-۹) - بوهمیت با مورفولوژی‌های متفاوت ۲۲

فصل سوم

شکل (۳-۱) - طراحی ۳ فاکتوری روش CCF (سمت چپ) و روش CCC (سمت راست) ۴۵

شکل (۳-۲) - شکل مینیمم‌دار پاسخ سطحی ۵۰

شکل (۳-۳) - شکل ماکزیمم‌دار پاسخ سطحی ۵۰

شکل (۳-۴) - شکل صعودی پاسخ سطحی ۵۱

شکل (۳-۵) - ظرف واکنش مربوط به تهیه‌ی هیدروژل ۵۴

شکل (۳-۶) - ماده‌ی به دست آمده پس از سنتز هیدروژل ۵۵

شکل (۳-۷) - هیدروژل پس از صابونی شدن ۵۵

شکل (۳-۸) - نمودار کالیبراسیون فلز سرب (II) ۵۷

شکل (۳-۹) - دستگاه جذب اتمی ۶۰

شکل (۳-۱۰) - منحنی کالیبراسیون متیلن بلو ۶۲

فصل چهارم

شکل (۴-۱) - مقایسه‌ی جاذب‌های مختلف در حذف یون سرب ۶۵

شکل (۴-۲) - مقایسه‌ی ظرفیت جذب آزمایشگاهی و ظرفیت جذب پیش‌بینی شده توسط مدل ۶۹

شکل (۴-۳) - نمودار توزیع نرمال ۷۰

شکل (۴-۴) - نمودار پاسخ سطحی دما ۷۲

شکل (۴-۵) - نمودار کانتور تأثیر دما ۷۲

- شکل (۴-۶) - نمودار pH main effect ۷۳
- شکل (۴-۷) - نمودار main effect دما ۷۳
- شکل (۴-۸) - نمودار پاسخ سطحی دما و مقدار نانوذره ۷۴
- شکل (۴-۹) - نمودار کانتور اثر متقابل دما و نانوذره ۷۵
- شکل (۴-۱۰) - نمودار اثر متقابل دما و نانوذره ۷۵
- شکل (۴-۱۱) - نمودار پاسخ سطحی اثر متقابل pH و نسبت مونومرها ۷۶
- شکل (۴-۱۲) - نمودار کانتور اثر متقابل pH و نسبت مونومرها ۷۷
- شکل (۴-۱۳) - اثر برهم کنش پارامترهای pH و نسبت مونومرها ۷۷
- شکل (۴-۱۴) - نمودار پاسخ سطحی اثر متقابل pH و غلظت اولیه فلز ۷۸
- شکل (۴-۱۵) - نمودار کانتور اثر متقابل pH و غلظت اولیه فلز ۷۸
- شکل (۴-۱۶) - تأثیر متقابل pH و غلظت اولیه فلز ۷۹
- شکل (۴-۱۷) - نمودار main effect غلظت اولیه فلز ۷۹
- شکل (۴-۱۸) - نمودار پاسخ سطحی اثر متقابل غلظت اولیه فلز و میزان جاذب مصرفی ۸۰
- شکل (۴-۱۹) - نمودار کانتور اثر متقابل غلظت اولیه فلز و میزان جاذب مصرفی ۸۰
- شکل (۴-۲۰) - نمودار main effect میزان جاذب مصرفی ۸۱
- شکل (۴-۲۱) - نمودار اثر متقابل غلظت اولیه فلز و میزان جاذب مصرفی ۸۱
- شکل (۴-۲۲) - نمودار پاسخ سطحی اثر متقابل pH و مقدار جاذب مصرفی ۸۲
- شکل (۴-۲۳) - نمودار کانتور اثر متقابل pH و مقدار جاذب مصرفی ۸۲
- شکل (۴-۲۴) - نمودار اثر متقابل pH و میزان جاذب مصرفی ۸۳
- شکل (۴-۲۵) - نمودار پاسخ سطحی اثر متقابل نسبت مونومرها و مقدار جاذب مصرفی ۸۳
- شکل (۴-۲۶) - بررسی اثر زمان تماس بر روی ظرفیت جذب فلز سرب ۸۴
- شکل (۴-۲۷) - نمودار سینتیکی درجه‌ی اول ۸۵
- شکل (۴-۲۸) - نمودار سینتیکی درجه‌ی دوم ۸۶
- شکل (۴-۲۹) - نمودار نفوذ داخل ذره‌ای یون‌های سرب ۸۷
- شکل (۴-۳۰) - مقایسه‌ی ظرفیت جذب آزمایشگاهی با مدل‌های فروندلیچ و لانگمویر ۸۹
- شکل (۴-۳۱) - مکانیزم پلیمریزاسیون پیوندی رادیکالی اکریل‌آمید و اکریلیک اسید بر روی کیتوسان ۹۰
- شکل (۴-۳۲) - مکانیزم جذب یون سرب بر روی هیدروژل ۹۱
- شکل (۴-۳۳) - نمودار FTIR هیدروژل قبل و بعد از جذب فلز سرب ۹۱
- شکل (۴-۳۴) - تصاویر SEM مربوط به کیتوسان ۹۳
- شکل (۴-۳۵) - تصاویر SEM مربوط به نانوذرات بر روی هیدروژل ۹۴
- شکل (۴-۳۶) - تصاویر SEM هیدروژل بعد از جذب یون سرب (II) ۹۵
- شکل (۴-۳۷) - تصاویر SEM مربوط به وجود یون‌های سرب بر روی هیدروژل ۹۵

- شکل (۴-۳۸) - تصاویر TEM مربوط به نانوذره‌ی بوهمیت ۹۶
- شکل (۴-۳۹) - تصاویر TEM مربوط به هیدروژل حاوی نانوذرات بوهمیت ۹۷
- شکل (۴-۴۰) - تورم هیدروژل در نسبت مونومر و درصد نانوذره‌ی مختلف ۹۸
- شکل (۴-۴۱) - تغییرات تورم با زمان تماس ۹۸
- شکل (۴-۴۲) - هیدروژل قبل و بعد از تورم ۹۹
- شکل (۴-۴۳) - مقادیر مربوط به جذب و دفع در ۳ مرحله‌ی متوالی ۱۰۰
- شکل (۴-۴۴) - بررسی اثر pH در حذف رنگ متیلن بلو ۱۰۰
- شکل (۴-۴۵) - بررسی اثر نسبت مونومرها در حذف متیلن بلو ۱۰۱
- شکل (۴-۴۶) - اثر زمان تماس بر حذف رنگ ۱۰۲
- شکل (۴-۴۷) - بررسی اثر مقدار جاذب در حذف رنگ ۱۰۳
- شکل (۴-۴۸) - اثر غلظت اولیه‌ی رنگ در حذف متیلن بلو ۱۰۳
- شکل (۴-۴۹) - نمودار FTIR مربوط به هیدروژل قبل و بعد از جذب رنگ ۱۰۴
- شکل (۴-۵۰) - تصاویر SEM مربوط به هیدروژل قبل از جذب رنگ ۱۰۵
- شکل (۴-۵۱) - تصاویر SEM مربوط به هیدروژل پس از حذف رنگ ۱۰۶

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
فصل اول	
جدول (۱-۱) - اثرات سمیت فلزات سنگین و حداکثر مقدار مجاز آن‌ها براساس قوانین USEPA	۳
فصل دوم	
جدول (۱-۲) - روش‌های متداول حذف فلزات سنگین و معایب و مزایای آن‌ها	۴
جدول (۱-۲) - نمونه‌ای از هیدروژل‌ها و موارد استعمال آن	۱۲
فصل سوم	
جدول (۳-۱) - تعیین نوع ایزوترم با استفاده از فاکتور R_a	۳۷
جدول (۳-۲) - تعداد متغیرها و تعداد آزمایش‌های متناسب با آن‌ها	۴۶
جدول (۳-۳) - جدول تحلیل ANOVA	۴۸
جدول (۳-۴) - فهرست مواد آزمایشگاهی استفاده شده	۵۱
جدول (۳-۵) - سطوح کد شده برای جداسازی فلز سرب از محلول آبی	۵۶
جدول (۳-۶) - طراحی آزمایش‌ها برای حذف فلز سرب (II)	۵۸
فصل چهارم	
جدول (۴-۱) - ظرفیت جذب و غلظت نهایی یون فلز سرب	۶۶
جدول (۴-۲) - مقادیر ضرایب رگرسیون و احتمال مربوطه در ارزیابی ظرفیت جذب فلز سرب	۶۷
جدول (۴-۳) - جدول تحلیل ANOVA	۶۸
جدول (۴-۴) - شرایط بهینه‌ی پارامترهای مؤثر در فرآیند جذب	۶۹
جدول (۴-۵) - ثابت سرعت و ظرفیت جذب حاصل از معادله‌ی سینتیکی مرتبه‌ی دوم	۸۶
جدول (۴-۶) - ثوابت مدل‌های ایزوترمی برای جذب سرب (II) بر روی هیدروژل	۸۸
فصل پنجم	
جدول (۵-۱) - انواع مختلف جاذب و ظرفیت جذب آن‌ها برای حذف فلز سرب (II)	۱۱۰

فصل اول

آلاینده‌ها و روش‌های حذف آن‌ها

آلودگی محیط زیست از مهمترین مشکلات پیش روی جهان امروز است. اگر کنترلی بر روند رشد تصاعدی این پدیده انجام نگیرد با فاجعه زیست محیطی روبرو خواهیم شد. در یک تعریف ساده، آلودگی محیط زیست عبارتست از هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای محیط زیست به طوری که استفاده پیشین از آن‌ها را دشوار یا ناممکن کند و به طور مستقیم یا غیرمستقیم حیات موجودات زنده را به مخاطره اندازد. حدود دو سوم کره زمین را آب فرا گرفته است که از این میزان آب حدود ۹۷ درصد آن غیر قابل آشامیدن است. بر اساس پیش‌بینی سازمان ملل در سال ۲۰۳۵ میلادی حدود ۴۸ کشور (یعنی ۳۲ درصد جمعیت جهان) دچار کمبود آب آشامیدنی می‌شوند. در کنفرانس UNCED که در سال ۱۹۹۲ تشکیل شده و به کنفرانس زمین معروف گردید، تمامی کشورهای دنیا متعهد شدند که در حفظ محیط زیست به طور جدی تلاش کنند و این کره‌ی خاکی را برای نسل‌های آینده حفظ نمایند. آب با کیفیت، یک فاکتور حیاتی برای بشر است. استانداردها برای آب آشامیدنی بر پایه‌ی حداکثر ضرورت آن برای جلوگیری از خطر بیماری است. اگرچه حذف بعضی از آلودگی‌های محیط زیست مانند فلزات سنگین به طور کامل توسط روش‌های خالص‌سازی مرسوم آب غیرممکن است. نقصان منابع آبی و صنعتی شدن شهرها همراه با افزایش کمی مواد شیمیایی به آب‌ها، به یک مشکل محیط زیستی تبدیل شده است. تلاش برای کاهش آلاینده‌ها و تصفیه‌ی آب مصرفی در فرایندهای صنعتی و فاضلاب شهری به منظور استفاده‌ی مجدد از آن مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است [۱].

خاک‌ها، بارش‌های اتمسفریک و آب‌های زیرزمینی از منابع غیر مستقیم آلوده کننده‌ی آب‌ها می‌باشند. خاک‌ها می‌توانند با تجمع فلزات سنگین و شبه فلزات آلوده شوند که این کار از طریق انتشار آن‌ها از مناطق صنعتی که به سرعت گسترش پیدا کرده‌اند، پس مانده‌های معدنی، دفع پساب‌های فلزی، بنزین و رنگ‌های آغشته به سرب، به کار بردن کودهای شیمیایی، کودهای حیوانی، لجن فاضلاب، آفت کش‌ها، آبیاری با پساب‌ها، باقیمانده‌های احتراق ذغال و نشت مواد پتروشیمیایی و ... انجام می‌شود. خاک‌ها به واسطه‌ی فعالیت‌های انسانی مزبور منبع اصلی انتشار فلزات سنگین به محیط می‌باشند. فلزات سنگین گروهی از مواد شیمیایی غیر آلی خطرناک می‌باشند و برخلاف آلودگی‌های آلی که با عوامل میکروبیولوژیکی به اکسید کربن (VI) اکسید می‌شوند، به صورت بیولوژیکی یا شیمیایی تخریب نمی‌شوند و غلظت کلی آن‌ها تا مدت‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند [۲].

فلزات سنگین عناصری با اعداد اتمی بین ۶۳/۵ و ۲۰۰/۶ و وزن مخصوص بزرگتر از ۵/۰ می‌باشند. با گسترش سریع صناعی از قبیل آبکاری فلز، عملیات معدن، صنایع کود، دباغی، باتری، صنایع کاغذ، آفت-کش‌ها و ...، خصوصاً در کشورهای در حال توسعه، پساب فلزات سنگین با روند رو به رشدی به طور مستقیم یا غیر مستقیم به محیط زیست تخلیه می‌شوند. برخلاف آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین زیست تجزیه پذیر نبوده و تمایل دارند در ارگانسیم‌های زنده تجمع یابند [۳ و ۴]؛ این فلزات به دلیل انحلال پذیری زیادی که در محیط‌های آبی دارند، می‌توانند توسط ارگانسیم‌های زنده جذب شوند. با ورود آن‌ها به زنجیره غذایی، غلظت زیادی از فلزات در بدن انسان تجمع می‌یابد که اگر غلظت فلزات بلعیده شده بیش از حد مجاز باشد سبب اختلالات جدی در سلامت افراد می‌شود [۵]. بعلاوه بسیاری از یون‌های فلزات سنگین سمی و سرطان‌زا می‌باشند. فلزات سنگین سمی مورد توجه در تصفیه پساب‌های صنعتی شامل روی، مس، نیکل، جیوه، کادمیوم، سرب و کروم می‌باشند. امروزه در مواجهه با قوانین دقیق‌تر، فلزات سنگین به عنوان آلودگی‌های مقدم زیست محیطی و یکی از مهم‌ترین مشکلات آن محسوب می‌شوند. از این رو به منظور حفاظت از افراد و محیط زیست این فلزات باید از پساب حذف شوند.

به منظور اینکه انسان‌ها و محیط کمتر در معرض مواد شیمیایی خطرناک قرار بگیرند آیین نامه‌ای در ارتباط با پساب‌ها بنا نهاده شد که شامل محدودیت‌هایی در مورد انواع فلزات سنگین موجود در پساب‌ها و غلظت‌های آن‌ها می‌باشد. استانداردهای MCL^۱ (ماکزیمم مقدار آلودگی) برای فلزات سنگین توسط سازمان محیط زیست آمریکا (USEPA)^۲ وضع شد که به طور خلاصه در جدول (۱-۱) آورده شده است [۶].

جدول (۱-۱) - اثرات سمیت فلزات سنگین و حداکثر مقدار مجاز آن‌ها بر اساس قوانین USEPA [۶]

فلز سنگین	اثر سمیت	MCL(mg/l)
آرسنیک	بثورات پوستی، سرطان‌های احشائی، بیماری‌های عروقی	۰/۰۵۰
کادمیم	آسیب‌ها و اختلالات کلیوی، سرطان‌زایی	۰/۰۱
کروم	سردرد، اسهال، حالت تهوع، استفراغ کردن، سرطان‌زایی	۰/۰۵
مس	آسیب‌های کبدی، بیماری ویلسون، بی‌خوابی	۰/۲۵
نیکل	آماس پوستی، حالت تهوع، آسم مزمن، سرفه کردن، سرطان‌زایی	۰/۲۰
روی	افسردگی، رخوت و سستی، نشانه‌های عصبی، افزایش تشنگی	۰/۸۰
سرب	آسیب مغزی جنین، بیماری‌های کلیوی، سیستم گردش خون و سیستم عصبی	۰/۰۰۰۶
جیوه	آرتریت روماتوئید، بیماری‌های کلیوی، سیستم گردش خون و سیستم عصبی	۰/۰۰۰۰۳

1-Maximum Contaminant Level

2-United State Environmental Protection Agency

۲-۱- روش‌های حذف فلزات سنگین و مقایسه‌ی آن‌ها

قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین حتی در سطح کم آن، یک خطر برای زندگی بشر به حساب می‌آید. از این رو حذف فلز نامطلوب از سیستم پساب اهمیت فراوانی دارد.

جدول (۱-۲) - روش‌های متداول حذف فلزات سنگین و معایب و مزایای آن‌ها [۵-۳ و ۸]

روش‌های حذف	مزایا	معایب و محدودیت‌ها
رسوب شیمیایی (رسوب هیدروکسید، رسوب سولفید و ...)	سادگی عملیات کم هزینه بودن کنترل آسان pH	تولید لجن زیاد با دانسیته‌ی نسبتاً پایین مناسب برای pH های بالا مناسب برای غلظت‌های بالا
تبادل یونی	ظرفیت تصفیه بالا بازده حذف بالا سینتیک سریع	هزینه بالا گزینه‌ی ناپذیری حساس به pH
فیلتراسیون غشائی (اولترافیلتراسیون (UF)، اسمز معکوس، نانو فیلتراسیون، الکترودیالیز)	بازدهی بالا بهره برداری آسان صرفه جویی در فضا	گرفتگی غشاء نیاز به پیش تصفیه شار نفوذی پایین
تصفیه‌ی الکترو شیمیایی	بازیافت فلز به حالت عنصر سریع و کنترل پذیر نیاز کم به مواد شیمیایی لجن کمتر	هزینه‌ی سرمایه گذاری اولیه‌ی بالا منابع الکتریکی گران قیمت
گیاه پالایی	کم هزینه بودن عدم آلودگی محیط زیست	طولانی بودن زمان حذف فلز دشواری احیای گیاه برای جذب بیشتر
انعقاد و لخته‌ی	سادگی عملیات کنترل آسان pH	حذف ناقص فلزات انجام همزمان با روش‌های دیگر تولید زیاد لجن
شناور سازی	انتخاب پذیری بالای فلز بازدهی بالای حذف دوره‌ی توقف پایین هزینه‌ی عملیاتی پایین	هزینه‌ی سرمایه گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری بالا
جذب سطحی	اقتصادی بودن طراحی ساده و اجرای آسان خروجی با کیفیت بالا وجود جاذب‌های ارزان محدوده‌ی وسیع pH	غلظت پایین فلز بازده وابسته به نوع جاذب انتخاب پذیری بسته به نوع جاذب

امروزه روش‌های بسیاری برای حذف کارآمد فلزات سنگین پیشنهاد شده است که شامل رسوب شیمیایی، تبادل یونی، جذب سطحی، فیلتراسیون غشائی و تصفیه‌ی الکترو شیمیایی می‌باشد اما محدود به این روش‌ها نیست. روش‌های مختلف حذف فلزات سنگین در جدول (۱-۲) ارائه شده است [۷].

اگرچه تمامی روش‌های مذکور می‌توانند برای حذف فلز سنگین به کار روند اما حذف غیر کامل فلز، مقدار انرژی و مواد مورد نیاز بالا، تولید لجن سمی یا دیگر تولیدات پسابی که نیازمند دفع دقیق می‌باشند، ضرورت روشی مقرون به صرفه که قادر به حذف فلزات سنگین از جریان‌های آبی باشد را فراهم می‌کند. از این رو انتخاب مناسب‌ترین روش با توجه به غلظت اولیه‌ی فلز، pH، ترکیبات پساب، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و هزینه‌ی عملیاتی، انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات، قابلیت اطمینان، شرایط محلی و اثرات زیست‌محیطی، از اهمیت فراوانی برخوردار است [۳].

۱-۳- جذب سطحی

در میان این تکنیک‌ها، جذب سطحی یکی از فرآیندهای تصفیه‌ی پیشنهادی است؛ به این دلیل که انعطاف‌پذیری در طراحی و عملکرد را ارائه داده و در بسیاری موارد خروجی تصفیه شده با کیفیت بالایی تولید می‌کند و هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری آن نیز پایین می‌باشد [۹ و ۱۰]. جذب سطحی فرآیندی است که برای حذف آلودگی‌ها در غلظت‌های پایین مناسب می‌باشد. بعلاوه با توجه به ماهیت برگشت‌پذیری اکثر فرآیندهای جذب سطحی، جاذب‌ها می‌توانند با انجام فرآیندهای دفع مناسب احیا شده و استفاده‌های متعددی داشته باشند. بسیاری از فرآیندهای دفع نیز هزینه نگهداری پایین، بازدهی بالا و عملکرد آسانی دارند. ازین رو جذب سطحی به عنوان یکی از تکنیک‌های مهم در حذف فلزات سنگین، حذف رنگ‌ها، بوها، آلاینده‌های آلی و غیر آلی از خروجی‌های صنعتی به شمار می‌رود [۳ و ۴].

جذب سطحی یک فرآیند انتقال جرم است که در آن ماده‌ی مورد نظر از فاز مایع به سطح یک جامد انتقال می‌یابد و در اثر برهم‌کنش‌های فیزیکی و/یا شیمیایی بر روی آن محصور می‌شود. به طور کلی سه مرحله‌ی اصلی در جذب آلودگی بر روی جاذب وجود دارد: (i) انتقال آلودگی از توده‌ی محلول به سطح جامد، (ii) جذب بر روی سطح ذره و (iii) انتقال درون ذرات جاذب.

در سال‌های اخیر تحقیقات برای استفاده از جاذب‌های ارزان قیمت که ظرفیت اتصال به فلز را داشته باشند تشدید شده است. جاذب‌ها می‌توانند منشأ معدنی، آلی یا بیولوژیکی داشته باشند؛ مانند کربن فعال [۱۱ و ۱۲]، زئولیت‌ها [۱۳]، محصولات جانبی صنایع، ضایعات کشاورزی [۱۴ و ۱۵]، زیست توده‌ها [۱۶] و مواد پلیمری. جاذب‌های کارآمد باید پایدار و حل‌نشده باشند و گروه‌های عاملی واکنش‌پذیر مانند کربوکسیلات و ... داشته باشند. هیدروژل‌ها به دلیل اینکه نرخ و ظرفیت جذب بالایی دارند و عکس‌العمل سریعی را نیز نشان می‌دهند، برای حذف آلودگی‌ها از محلول‌های آبی توجهات خاصی را به خود معطوف