

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده منابع طبیعی

حذف کروم از محلول‌های آبی با استفاده از زیتوده جلبک سبز  
سندسموس کوادریکوادا (*Scenedesmus quadricauda*)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی - محیط زیست

رقیه شکری خوبستانی

اساتید راهنما

دکتر نوراله میرغفاری

دکتر امیدوار فرهادیان



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده منابع طبیعی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی منابع طبیعی - محیط زیست  
خانم رقیه شکری خوبستانی  
تحت عنوان

**حذف کروم از محلول‌های آبی با استفاده از زیتوده جلبک سبز  
سندسموس کوادریکوادا (*Scenedesmus quadricauda*)**

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر نوراله میر غفاری

۲- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر امیدوار فرهادیان

۳- استاد داور دکتر محسن سلیمانی

۴- استاد داور دکتر سالار درافشان

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر محمدرضا وهابی

## مشکر و قدردانی

پاس خدای را که دستودن وی کویندگان درماند و آمارگران در شمارش نعمت های او ناتوان ماند و تلاشگران ادای حق وی نتوانند؛ همان کس که نه بلندای همت با بدو در رسد و نه ژرفای فطرت با وی را دریابد.

اکنون که با استعانت از درگاه ایزد یکتا دوره ای دیگر از دوران تحصیلی ام را پشت سر نهادم، جای آن دارد از همه کسانی که در طی این مدت مریاری نمودند پاسکزاری نمایم.

ابتدا از خانواده محترم، بهر ائمان همیشه مهربان، صمیمانه پاسکزاری و قدردانی می نمایم.  
از اساتید ارجمند آقایان دکتر نوراله میرغفاری و دکتر امیدوار فرهادیان که در تمام مراحل تحصیل و پژوهش بار بار بهمانی های عالمانه و ارزنده خویش بنده ریاری نموده اند و از بهمنگری ایشان بهره برده ام صمیمانه مشکر و قدردانی می کنم.  
بهچنین از جناب آقای مهندس تقی پور کارشناس آزمایشگاه آلودگی محیط زیست که در طی انجام این تحقیق از بیچ گلی دریغ نکردند پاسکزارم.

از دوستان عزیزم که محظت بسیار شادی را در کنارشان سپری کردم مشکر می نمایم آنان که یاد و خاطر ایشان همواره با من است.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم،

که دریای بی کران محبتند و فداکاری های بی دینشان برایم پشتوانه محکمی در رویارویی با مشکلات است و همواره

در سایه محبت آنها آرامش یافته ام.

خواهران و برادران گرامی ام، به پاس صمیمیت شان.

## فهرست مطالب

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
فهرست مطالب .....	هشت
فهرست جداول .....	سیزده
فهرست شکل ها .....	چهارده
چکیده .....	۱
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۱-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق .....	۲
۲-۱- اهداف تحقیق .....	۵
<b>فصل دوم: کلیات و بررسی منابع</b>	
۱-۲- انواع فاضلاب .....	۶
۱-۱-۲- فاضلاب شهری یا خانگی .....	۶
۲-۱-۲- فاضلاب صنعتی .....	۷
۳-۱-۲- فاضلابهای سطحی (آبهای سطحی) .....	۸
۲-۲- ضرورت‌های تصفیه فاضلاب .....	۹
۳-۲- اهداف تصفیه فاضلاب .....	۹
۴-۲- ضرورت استفاده از پساب در ایران .....	۹
۵-۲- فلزات سنگین .....	۱۰
۱-۵-۲- منابع فلزات سنگین .....	۱۱
۶-۲- کروم .....	۱۱
۱-۶-۲- مهمترین کاربردهای کروم .....	۱۲
۲-۶-۲- اثرات سم شناختی کروم .....	۱۳
۷-۲- اهمیت حذف فلزات سنگین .....	۱۴
۸-۲- روش‌های رایج حذف فلزات سنگین .....	۱۴
۱-۸-۲- ترسیب (رسوب دادن) شیمیایی .....	۱۴
۲-۸-۲- تبادل یونی .....	۱۵

- ۱۶-۳-۸-۲-..... فیلتراسیون غشایی
- ۱۸-۴-۸-۲-..... انعقاد و لخته سازی
- ۱۸-۵-۸-۲-..... شناورسازی
- ۱۸-۶-۸-۲-..... تصفیه الکتروشیمیایی
- ۱۹-۷-۸-۲-..... جذب سطحی با کربن فعال
- ۲۰-۹-۲-..... جذب زیستی
- ۲۱-۱-۹-۲-..... مزایای به کارگیری فرآیند جذب زیستی
- ۲۱-۲-۹-۲-..... جاذب‌های زیستی
- ۲۲-۳-۹-۲-..... ارزیابی و انتخاب جاذب زیستی
- ۲۳-۴-۹-۲-..... مزایای به کارگیری زیتوده غیر زنده
- ۲۳-۵-۹-۲-..... گروه‌های عاملی دخیل در جذب زیستی
- ۲۵-۱۰-۲-..... مکانیسم‌های جذب زیستی فلز توسط میکروارگانیسم‌ها
- ۲۶-۱-۱۰-۲-..... جذب فیزیکی
- ۲۶-۲-۱۰-۲-..... تبادل یونی
- ۲۶-۳-۱۰-۲-..... تشکیل کمپلکس
- ۲۷-۴-۱۰-۲-..... ترسیب
- ۲۷-۵-۱۰-۲-..... انتقال از میان غشای سلولی
- ۲۷-۱۱-۲-..... سرعت فرآیند جذب و عوامل مؤثر بر آن
- ۲۸-۱۲-۲-..... پارامترهای مؤثر در جذب زیستی
- ۲۸-۱-۱۲-۲-..... pH محلول
- ۲۸-۲-۱۲-۲-..... غلظت اولیه جذب شونده
- ۲۸-۳-۱۲-۲-..... دما



- ۲۹-۲-۱۲-۴- غلظت زیتوده در محلول ..... ۲۹
- ۲۹-۲-۱۲-۵- حضور یون‌های رقیب در محلول ..... ۲۹
- ۲۹-۲-۱۲-۶- زمان تماس ..... ۲۹
- ۲۹-۲-۱۲-۷- اثر اندازه ذرات جاذب ..... ۲۹
- ۳۰-۲-۱۳- اثر پیش تیمار بر فرآیند جذب زیستی ..... ۳۰
- ۳۱-۲-۱۴- جذب زیستی توسط سلول‌های تثبیت شده ..... ۳۱
- ۳۲-۲-۱۵- بازیابی و احیاء جاذب ..... ۳۲
- ۳۲-۲-۱۶- مدل‌های جذب زیستی ..... ۳۲
- ۳۳-۲-۱۶-۱- سینتیک جذب زیستی ..... ۳۳
- ۳۵-۲-۱۶-۲- هم‌دماهای جذب زیستی ..... ۳۵
- ۳۸-۲-۱۷- جلبک‌ها ..... ۳۸
- ۳۸-۲-۱۷-۱- دیواره سلولی جلبک‌ها ..... ۳۸
- ۴۰-۲-۱۷-۲- ارزش اقتصادی جلبک‌ها ..... ۴۰
- ۴۰-۲-۱۷-۳- کلیاتی بر جلبک سبز سندسموس ..... ۴۰
- ۴۱-۲-۱۸- مروری بر مطالعات انجام شده در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی با جاذب‌های زیستی ..... ۴۱

#### فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۴۵-۳-۱- مراحل آماده سازی و تهیه جاذب ..... ۴۵
- ۴۵-۳-۱-۱- کشت جلبک سندسموس کوادریکوادا ..... ۴۵
- ۴۷-۳-۲- مواد شیمیایی و دستگاه‌های مورد استفاده ..... ۴۷
- ۴۷-۳-۳- تعیین خصوصیات جاذب ..... ۴۷
- ۴۷-۳-۳-۱- طیف سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) ..... ۴۷
- ۴۸-۳-۳-۲- تصویربرداری و آنالیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ..... ۴۸
- ۴۸-۳-۳-۳- آنالیز عنصری ..... ۴۸
- ۴۸-۳-۴- تهیه محلول‌های مادر ..... ۴۸
- ۴۸-۳-۵- آزمایش‌های جذب ..... ۴۸
- ۴۹-۳-۶- بررسی تأثیر عوامل مختلف بر فرآیند جذب کروم ..... ۴۹

- ۴۹..... اثر زمان تماس..... ۱-۶-۳
- ۴۹..... اثر pH..... ۲-۶-۳
- ۵۰..... اثر غلظت اولیه محلول و تعیین هم‌دماهای جذب سطحی..... ۳-۶-۳
- ۵۰..... اثر مقدار جاذب..... ۴-۶-۳
- ۵۰..... آزمایش‌های ستونی و استفاده مجدد از جاذب..... ۷-۳
- ۵۰..... حذف فلز کروم از فاضلاب صنعتی..... ۸-۳
- ۵۱..... بررسی کاهش کروم (VI) به کروم (III) طی فرآیند جذب زیستی..... ۹-۳
- ۵۱..... آنالیز داده‌ها..... ۱۰-۳
- فصل چهارم: نتایج و بحث**
- ۵۲..... تعیین خصوصیات ریزجلبک..... ۱-۴
- ۵۲..... آنالیز عنصری..... ۱-۱-۴
- ۵۳..... طیف سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FTIR)..... ۲-۱-۴
- ۵۵..... تصویر برداری و آنالیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)..... ۳-۱-۴
- ۵۶..... طیف سنجی تفکیک انرژی (EDX)..... ۴-۱-۴
- ۵۶..... بررسی تأثیر عوامل مختلف بر فرایند جذب کروم (III) و (VI)..... ۲-۴
- ۵۶..... اثر زمان تماس..... ۱-۲-۴
- ۵۸..... سینتیک جذب..... ۲-۲-۴
- ۶۱..... اثر pH..... ۳-۲-۴
- ۶۷..... تأثیر غلظت اولیه..... ۴-۲-۴
- ۷۰..... هم‌دماهای جذب سطحی..... ۵-۲-۴
- ۷۶..... تأثیر مقدار جاذب..... ۶-۲-۴
- ۷۸..... احیاء و استفاده مجدد جاذب..... ۳-۴
- ۷۹..... جذب فلزات از نمونه‌های فاضلاب صنعتی..... ۴-۴
- ۸۰..... بررسی کاهش کروم (VI) به کروم (III) طی فرآیند جذب زیستی..... ۵-۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۸۱-۱-۵- نتیجه‌گیری ..... ۸۱

۸۲-۲-۵- پیشنهادها ..... ۸۲

۸۳-منابع ..... ۸۳

## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ استاندارد تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی و چاه جاذب و مصارف کشاورزی	۸
جدول ۲-۲- پساب‌های صنعتی حاوی کروم شش ظرفیتی و غلظت تقریبی آن	۱۲
جدول ۲-۳- برخی مطالعات انجام شده در زمینه جذب زیستی	۲۲
جدول ۲-۴- میل ترکیبی فلزات با لیگاندها	۲۴
جدول ۲-۵- گروه‌های عاملی معروف و طبقات ترکیبات آلی در زیتوده	۲۵
جدول ۲-۶- ترکیبات شیمیایی عمده چند نوع از جلبک‌ها	۳۹
جدول ۳-۱- محیط کشت بی بی ام مورد استفاده در کشت جلبک سبز سندسموس کوادریکوادا	۴۶
جدول ۳-۲- حجم استوک مخلوط شده جهت تهیه بی بی ام مورد استفاده در کشت جلبک سبز سندسموس کوادریکوادا	۴۶
جدول ۳-۳- فهرست دستگاه‌های مورد استفاده	۴۷
جدول ۳-۴- مشخصات شیمیایی نمک‌های مورد استفاده	۴۷
جدول ۴-۱- نتایج آنالیز عنصری (درصد) زیتوده جلبک	۵۲
جدول ۴-۲- گروه‌های آلی شناسایی شده با طیف FTIR در زیتوده جلبک	۵۳
جدول ۴-۳- نتایج آنالیز نیمه کمی EDX جاذب قبل و بعد از جذب فلز کروم (VI)	۵۶
جدول ۴-۴- مربع ضرایب همبستگی و ثابت مدل‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و ایلوویج برای جذب کروم (III، VI)	۶۱
جدول ۴-۵- درصد شکل‌های مختلف کروم (III) موجود در محلول با pH مختلف	۶۳
جدول ۴-۶- ثابت‌های هم‌دماهای جذبی لانگمویر، فروندلیچ و ردلیچ- پترسون برای جذب توسط زیتوده جلبک	۷۵
جدول ۴-۷- نوع هم‌دماهای برازش شده و $q_{max}$ لانگمویر در برخی از جاذب‌ها برای کروم (III، VI)	۷۶
جدول ۴-۸- نتایج آزمایش‌های ستونی جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک	۷۸
جدول ۴-۹- نتایج احیاء جاذب پس از واجذب کروم (III) توسط اسید نیتریک و آب مقطر	۷۹
جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایش‌های ستونی جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک	۷۹
جدول ۴-۱۱- نتایج احیاء جاذب پس از واجذب کروم (VI) توسط اسید نیتریک، سود و آب مقطر	۷۹
جدول ۴-۱۲- نتایج آزمایش‌های ناپیوسته بررسی جذب کروم (III) و (VI) با نمونه واقعی پساب	۸۰
جدول ۴-۱۳- نتایج بررسی کاهش کروم (VI) به کروم (III) طی فرآیند جذب زیستی	۸۰

## فهرست شکل ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵۴	شکل ۴-۱- طیف FTIR زیتوده جلبک
۵۴	شکل ۴-۲- طیف FTIR زیتوده جلبک قبل از جذب (a)، بعد از جذب کروم (III) (b) و کروم (VI) (c)
۵۵	شکل ۴-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی جاذب مورد استفاده قبل از جذب
۵۵	شکل ۴-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی جاذب مورد استفاده بعد از جذب
۵۷	شکل ۴-۵- اثر زمان تماس بر جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۵۷	شکل ۴-۶- اثر زمان تماس بر جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۵۸	شکل ۴-۷- برازش مدل سینتیکی شبه مرتبه اول جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۵۸	شکل ۴-۸- برازش مدل سینتیکی شبه مرتبه اول جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک
۵۹	شکل ۴-۹- برازش مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۵۹	شکل ۴-۱۰- برازش مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک
۶۰	شکل ۴-۱۱- برازش مدل سینتیکی ایلوویج جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۶۰	شکل ۴-۱۲- برازش مدل سینتیکی ایلوویج جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک
۶۲	شکل ۴-۱۳- تأثیر pH بر درصد جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۶۵	شکل ۴-۱۴- توزیع شکل‌های مختلف کروم (III) در pH مختلف
۶۶	شکل ۴-۱۵- تأثیر pH بر درصد جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک
۶۶	شکل ۴-۱۶- توزیع شکل‌های مختلف کروم (VI) در pH مختلف
۶۶	شکل ۴-۱۷- مکانیسم پیشنهادی حذف کروم (VI) توسط زیتوده غیر زنده
۶۸	شکل ۴-۱۸- تأثیر غلظت اولیه کروم (III) بر درصد جذب توسط زیتوده جلبک
۶۸	شکل ۴-۱۹- تأثیر غلظت اولیه کروم (VI) بر درصد جذب توسط زیتوده جلبک
۶۹	شکل ۴-۲۰- تأثیر غلظت اولیه کروم (III) بر مقدار جذب توسط زیتوده جلبک
۶۹	شکل ۴-۲۱- تأثیر غلظت اولیه کروم (VI) بر مقدار جذب توسط زیتوده جلبک
۷۱	شکل ۴-۲۲- هم‌دمای جذبی لانگمویر جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک
۷۱	شکل ۴-۲۳- هم‌دمای جذبی لانگمویر جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک

- شکل ۴-۲۴- هم‌دمای جذبی فروندلیچ کروم (III) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۵- هم‌دمای جذبی فروندلیچ کروم (VI) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۶- هم‌دمای جذبی ردلیچ- پترسون جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۷- هم‌دمای جذبی ردلیچ- پترسون جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۸- منحنی تعادلی جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۹- منحنی تعادلی جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۰- تأثیر مقدار جاذب بر درصد جذب کروم (III) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۷
- شکل ۴-۳۱- تأثیر مقدار جاذب بر درصد جذب کروم (VI) توسط زیتوده جلبک ..... ۷۷

## چکیده

افزایش سریع جمعیت جهان و صنعتی شدن نقش بسیار مهمی در آلودگی اکوسیستم‌های آبی و خشکی توسط فلزات سنگین دارند. در بین فلزات سنگین، آلودگی فلز کروم در سال‌های اخیر به دلیل اثرات مضر بر موجودات زنده و اکوسیستم بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. کروم شش و سه ظرفیتی دو شکل پایدار از کروم در طبیعت می‌باشند که عموماً در پساب‌های صنعتی مانند آبکاری، دباغی چرم، رنگ و نگهداری چوب، آلیاژ و فلزکاری، شیشه، پارچه و نساجی، فیلم و عکاسی یافت می‌شوند. روش‌های مختلفی مانند ترسیب شیمیایی، تبادل یونی، فیلتراسیون غشایی، اسمز معکوس و جذب برای حذف فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، فرآیند جذب زیستی به عنوان روش موثر و اقتصادی برای حذف یون‌های فلزی مورد توجه قرار گرفته است. جذب زیستی روشی است که از مواد طبیعی با منشأ زیستی مختلف از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، پسماندهای کشاورزی و صنعتی به عنوان جاذب زیستی استفاده می‌شود. در این مطالعه، از زیتوده خشک ریزجلبک سبز سندسموس کوادریکودا (*Scenedesmus quadricauda*)، برای جذب کروم سه و شش ظرفیتی از محلول‌های آبی و پساب صنعتی به دو روش تعادلی و ستونی استفاده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژی جاذب به کمک آنالیز عنصری، طیف‌سنجی مادون قرمز و میکروسکوپ الکترونی روبشی تعیین شدند. پارامترهای مختلف موثر بر میزان جذب مانند زمان تعادل، pH، غلظت اولیه محلول فلزی و میزان جاذب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان تعادل برای کروم سه و شش ظرفیتی ۱۲۰ دقیقه می‌باشد. بررسی سینتیک جذب نیز نشان‌دهنده برازش بهتر سینتیک شبه مرتبه دوم برای جذب یون‌های فلزی مذکور توسط زیتوده جلبک بود. حداکثر جذب فلز کروم (III) در pH = ۶ و برای کروم (VI) در pH = ۱ به دست آمد. بررسی داده‌ها با هم‌دماهای جذب نشان داد که فرآیند جذب کروم (III) توسط جاذب با مدل لانگمویر و مدل ردلیچ - پترسون نسبت به مدل فروندلیچ برازش بهتری دارد. جذب کروم (VI) با جاذب از مدل ردلیچ - پترسون و فروندلیچ تبعیت بیشتری داشت. حداکثر جذب پیشنهادی مدل لانگمویر برای کروم (III) و (VI)، ۵۸/۴۷ و ۴۶/۵۱ میلی‌گرم بر گرم بود. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲ به ۱۰ گرم در لیتر در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، درصد جذب برای کروم (III) از ۳۰/۰۳ به ۹۶/۴۰ درصد و برای کروم (VI) از ۷/۶۷ به ۶۴/۱۲ درصد افزایش پیدا کرد. جاذب کارایی جذب ۳۰ درصد (۶۳/۳ میلی‌گرم بر گرم) یون‌های محلول کروم (III) و ۱۳ درصد (۲۵/۵ میلی‌گرم بر گرم) یون‌های محلول کروم (VI) داشت. نتایج آزمایشات ستونی نشان داد که احیاء جاذب با اسید نیتریک و NaOH امکان‌پذیر می‌باشد. احیاء جاذب برای کروم (III) قابلیت احیاء بالایی بیش از ۸۵ درصد با اسید نیتریک ۰/۱ مولار نشان داد اما برای کروم (VI) به کارگیری باز به عنوان محلول شویی نسبت به اسید کارایی بالاتری را در واجذب نشان داد.

**کلمات کلیدی:** کروم، جذب زیستی، ریزجلبک، *Scenedesmus quadricauda*، هم‌دمای جذب

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

آب مایه حیات است که در یک چرخه دائمی، حیات موجودات زنده را حمایت می‌کند. در نگرش جدید جهانی، آب کالایی اقتصادی-اجتماعی است و به عنوان نیاز اولیه محسوب می‌شود. رشد جمعیت و ارتقای سطح کیفی و بهداشتی زندگی بشری باعث افزایش مصرف آب در بسیاری از کشورها از جمله ایران شده که تأمین این نیاز از ذخایر سطحی و زیر زمینی صورت می‌گیرد [۱۸]. اهمیت آب در توسعه کشورها به حدی است که از آن به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار یاد می‌شود [۲۳]. کاهش نزولات جوی در چند سال اخیر موجب کاهش بیش از اندازه‌ی این منابع در بسیاری از نقاط و وقوع خشکسالی شده است. همچنین، پیش‌بینی‌ها گسترش بیشتر این پدیده را نشان می‌دهد [۹۶].

در قرن گذشته جمعیت جهان سه برابر و مصرف آب در جهان ۶ برابر شده است. سالیانه به جمعیت جهان ۷۵ میلیون نفر افزوده می‌شود و پیش‌بینی‌های خوش بینانه تا سال ۲۰۵۰ میلادی جمعیت جهان را ۷/۹ میلیارد نفر برآورد نموده‌اند. این در حالی است که برخی پیشگوئی‌ها خبر از جمعیت ۱۰/۹ میلیارد نفری در جهان دارند [۱۵]. همانطور که می‌دانیم کشور پهناور ایران یکی از کشورهایی است که به علت موقعیت جغرافیایی خود از نعمت باران و منابع سرشار آبی کم بهره بوده و نیز توزیع بارندگی و منابع آبی در آن به صورت برابر در همه جا وجود ندارد [۱۱]. همچنین، با متوسط نزولات جوی ۲۶۰ میلی‌لیتر در سال از کشورهای خشک جهان محسوب می‌شود [۱۸]. بخش کشاورزی با اختصاص ۸۸/۸۸ درصد، آب شرب ۶/۶۷ درصد و بخش صنعت با ۴/۴۵ درصد مهم‌ترین مصرف‌کننده آب در ایران هستند. از سوی دیگر صنایع متعددی در کشور در قسمت‌های کم آب ساخته شده‌اند



که این خود عاملی برای نیاز و اهمیت بالای آب در این مناطق می‌باشد [۱۱،۱۰]. بحران کمبود آب یکی از چالش‌هایی است که امروزه جهان با آن مواجه شده است. منابع محدود آب باعث شده است محققین، استفاده از آب‌های غیر متعارف مانند آب‌های شور، پساب‌های شهری و صنعتی را مورد توجه قرار دهند [۳۱].

تولید پساب با حجم زیاد، حاصل فعالیت‌های اجتناب‌ناپذیر جوامع انسانی و صنعتی می‌باشد. اکثر پساب‌ها برای جمعیت انسانی و محیط زیست خطرناک هستند و باید قبل از وارد شدن به نه‌رها، دریاچه‌ها و دریاها، رودخانه‌ها و سطح زمین مورد تصفیه قرار بگیرند [۳۷]. پساب‌های خانگی و صنعتی با افزایش جمعیت و همچنین توسعه حاشیه‌نشینی رشد چشمگیری داشته است. محدودیت منابع آبی از یک طرف و آلودگی منابع آبی موجود توسط فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی از طرف دیگر، توجه به مدیریت فاضلاب‌ها را دو چندان می‌کند. به دلیل کمبود منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده در آبیاری فضای سبز و کشاورزی و مصارف دیگر، به عنوان یکی از اهداف اصلی در نظر گرفته می‌شود [۲].

در ۲۵ سال اخیر قرن بیستم این ایده شکل گرفت که تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری باید بتواند آب بازیافتی با کیفیت بالا تولید کند که نه تنها دور ریخته نشود، بلکه مصارف مطلوبی برای آن قابل پیش‌بینی باشد. این الزام علاوه بر غلبه بر شرایط کم آبی و جلوگیری از صرف هزینه‌های بسیار بالای توسعه منابع جدید آبی و حفاظت محیط زیست، انگیزه استفاده از پساب را در بسیاری از نقاط به وجود می‌آورد. پساب‌های تصفیه شده یا آب‌های بازیافتی عملاً منابع آبی هستند که به راحتی و بدون هزینه‌های زیاد در دسترس جوامع قرار دارد و می‌توان آن را به عنوان منبع آب پایدار در مواقع خشکسالی به حساب آورد [۲۸].

فلزات سنگین از عناصری هستند که به وفور در پوسته زمین یافت می‌شوند و طی فرآیندهای مختلف و از طریق مواد زائد صنعتی وارد محیط زیست می‌گردند. صنایع مختلف از جمله معدن‌کاوی، ذوب فلزات، تولید سوخت و انرژی، صنعت کود و آفت‌کش، متالورژی، الکترولیز، آهن و فولاد، صنعت چرم و عکاسی از مهم‌ترین منابع آلاینده هستند [۸۱]. بسیاری از این فلزات سمی و خطرناک بوده و ضمن ورود به زنجیره غذایی و تجمع در بافت‌های زنده می‌توانند مخاطرات گسترده‌ای برای سلامت انسان داشته باشند. عناصری مانند مس، آهن، منگنز و روی عناصر ضروری برای سلامت انسان هستند و در غلظت‌های کم، ارزش غذایی دارند اما همین فلزات در غلظت‌های بالا می‌توانند با دارنده و نهایتاً اثرات سمی خود را ظاهر نمایند. برخی فلزات از جمله کادمیوم، جیوه، سرب، آرسنیک و کروم حتی در غلظت‌های کم نیز برای موجودات زنده به عنوان عوامل سمی شناخته شده‌اند [۹۴].

فلزات سنگین قادرند با مواد آلی و معدنی تشکیل کمپلکس‌هایی داده و به صورت ترکیبات پایدار در محیط زیست باقی بمانند. این فلزات نسبت به تشکیل کمپلکس‌های پایدار با اجزای آلی متفاوت عمل می‌کنند و اثرات سمی آن‌ها بر موجودات زنده نیز یکسان نبوده و به صورت‌های مختلف ظاهر می‌شود [۱۲۷].

آلودگی فلز کروم در محیط زیست در سال‌های اخیر به دلیل اثرات خطرناک و مضر بر اکوسیستم و انسان بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. کروم شش و سه ظرفیتی دو شکل پایدار از کروم در طبیعت می‌باشند. گونه‌های کروم عموماً در پساب‌های صناعی مانند آبکاری، دباغی چرم، رنگ و نگهداری چوب، آلیاژ و فلزکاری، شیشه، پارچه و نساجی، فیلم و عکاسی یافت می‌شوند [۶۶]. کروم شش ظرفیتی سمی‌ترین شکل کروم می‌باشد و عامل ایجاد

سرطان، ناراحتیهای کبدی، حساسیت‌های پوستی و زخمهای معده و روده در انسان می‌شود. کروم سه ظرفیتی ۳۰۰ مرتبه از کروم شش ظرفیتی سمیت کمتری دارد و در واقع به علت محدودیت حلالیت آبی قابلیت دسترسی زیستی پایین تری دارد. کروم سه ظرفیتی برای حیوانات و گیاهان ضروری می‌باشد و نقش مهمی در متابولیسم قند و چربی دارد با این حال افزایش بیش از حد آن منجر به سرطان و حساسیت‌های پوستی می‌شود [۹۱].

اثرات بهداشتی و زیست محیطی گسترده ناشی از فلزات سنگین مختلف به خوبی شناخته شده است. این فلزات با روش‌های متعارف تصفیه قابل جداسازی نبوده و در صورت ورود به سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی فاضلاب که برای شهرها متداول است، اختلال ایجاد کرده و در غلظت‌های بالا با وارد کردن شوک ناشی از بار ورودی، احتمال توقف عمل تصفیه در کل سیستم وجود دارد [۱۲۸]. از این رو، محققین و مهندسين محیط زیست همواره به دنبال فن‌آوری‌های ارزان قیمت برای تصفیه پساب می‌باشند. از روش‌های متداول برای حذف فلزات سنگین می‌توان به ترسیب شیمیایی، اکسیداسیون یا احیاء شیمیایی، تبادل یونی، فیلتراسیون، جذب سطحی و جذب بیولوژیکی، تصفیه الکتروشیمیایی، اسمز معکوس، فن‌آوری‌های غشایی، تبخیر اشاره نمود. در حال حاضر، از بین تمام روش‌های ذکر شده، روش جذب به دلیل سادگی، تولید لجن کمتر، ملاحظات اقتصادی و بروز مشکلات ناچیز در دفع ضایعات تولیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این فرایندها انواع مختلفی از آلاینده‌های آلی و غیرآلی از پساب و آب را کاهش داده یا حذف می‌کند بنابراین، کاربرد زیادی در کنترل آلودگی آب دارد [۱۳۶، ۱۳۳، ۱۲۹].

در سال‌های اخیر، فرآیند جذب زیستی به‌طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است. این رویکرد شامل استفاده از مواد طبیعی با منشأ زیستی می‌باشد که این مواد با استفاده از لیگاندها یا گروه‌های عاملی با یون‌های فلزی، کمپلکس تشکیل می‌دهند و منجر به کاهش غلظت فلزات در محلول می‌شوند [۱۲۲]. توانایی جذب و پذیرش فلزات سنگین مختلف توسط میکروارگانیسم‌های غیر زنده ( جلبک‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها، مخمرها و اکتینومیسیت‌ها) و سایر مواد آلی (مانند سبوس برنج، سبوس گندم، پوست میوه) به اثبات رسیده است، به طوری که دیواره سلولی قارچ، جلبک، باکتری به این پدیده واکنش نشان می‌دهد. این توانایی می‌تواند از طریق سازوکارهای متفاوتی شامل فرآیندهای فیزیکی شیمیایی جذب بر سطح دیواره سلولی و سازوکارهای مرتبط با متابولیسم میکروبی نظیر انتقال و رسوب‌دهی انجام شود. مهم‌ترین مزایای جذب زیستی نسبت به روش‌های متداول تصفیه عبارتند از: هزینه پایین، کارایی بالا، کاهش لجن شیمیایی و یا بیولوژیکی، احیاء جاذب و بازیابی فلز [۱۱۲، ۱۲۳، ۱۳۲].

استفاده از زیتوده جلبکی به عنوان یک جاذب زیستی موثر و اقتصادی مورد توجه واقع شده است که این امر به دلیل مزایایی است که جلبک نسبت به جاذب‌های زیستی دارد. جلبک به مواد غذایی بسیار اندکی نیاز دارد، به دلیل اتروتروفیک بودن زیتوده بزرگی تولید می‌کند [۷۱]. تحقیقات چند دهه اخیر پژوهشگران بر استفاده از ریز جلبک‌ها در تصفیه پساب نشان می‌دهد که این موجودات می‌توانند انتخاب مناسبی در رسیدن به این اهداف باشند [۳۷]. در بین جاذب‌های زیستی، ریز جلبک‌های سبز به علت ظرفیت جذب بالا، کوچک بودن اندازه، سرعت در رشد و تکثیر، دانسیته کم، قدرت جداسازی بالا و کم هزینه بودن، بالا بودن نسبت سطح به حجم، میل ترکیبی بالا با آلاینده، در دسترس بودن و فراوانی آنها در دریاها و اقیانوس‌ها به طور گسترده به عنوان جاذب زیستی استفاده می‌شوند و سعی بر این است تا با اعمال روش‌های جدیدی مانند استفاده از ستون بستر ثابت و تغییر سیستم ناپیوسته به سیستم پیوسته،

بتوان حتی الامکان میزان جذب را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد [۳۷،۸۰]. میزان جذب در گونه‌های مختلف با هم تفاوت دارد زیرا با ترکیبات مختلف موجود در دیواره سلولی آن‌ها، هر گونه جلبکی می‌تواند به طور مؤثر و انتخابی در جداسازی یون‌های خاص استفاده شود [۸۰،۱۳۲]. به طور کلی جوامع انسانی به روش‌ها و فناوری‌هایی جهت پاکسازی آب‌ها و تقلیل آلودگی‌های محیطی ناشی از پیشرفت بشر نیاز دارد. استفاده از روش جذب زیستی می‌تواند راه حل عملی جهت تصفیه آلودگی محیط زیست با فلزات سنگین باشد. بدین ترتیب، با انجام مطالعات بیشتر می‌توان به طور عملی و در مقیاس گسترده از این فناوری ارزان قیمت برای حذف فلزات سنگین از آب و فاضلاب استفاده نمود [۳۳].

با توجه به موارد ذکر شده در این مطالعه از ریز جلبک سبز سندسموس کوادریکوادا<sup>۱</sup> ساکن زیستگاه‌های آب شیرین که در محیط‌های غنی از مواد غذایی رشد سریعی دارد، به عنوان جاذب زیستی در حذف فلز سنگین کروم از محلول‌های آبی استفاده شده است. سلول‌های این ریز جلبک مکعب مستطیل شکل بوده و از پهلو به هم متصل می‌شوند و تشکیل کلنی می‌دهند [۱۹، ۲۰].

#### ۱-۲- اهداف تحقیق

- مطالعات زیادی در زمینه جذب زیستی با جلبک انجام گرفته است اما تحقیقات اندکی با استفاده از جلبک سبز در مقایسه با سایر جلبک‌ها شده است بنابراین مهم‌ترین اهداف این پژوهش به شرح زیر است:
- ۱- بررسی کارایی زیتوده خشک ریز جلبک سبز سندسموس کوادریکوادا به عنوان جاذب در حذف فلز کروم.
  - ۲- بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند جذب فلزات سنگین توسط زیتوده خشک ریز جلبک سندسموس کوادریکوادا در سیستم ناپیوسته.
  - ۳- آزمایش‌های جذب جهت احیاء مواد جاذب.
  - ۴- بررسی کارایی جاذب مورد نظر در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی.

## فصل دوم

### کلیات و بررسی منابع

#### ۲-۱- انواع فاضلاب

فاضلاب تقریباً ۹۹/۹ درصد آب و حدود یک دهم درصد مواد جامد در بر دارد که بخشی از آن مواد آلی و بخش دیگر مواد معدنی جامد به حالت محلول یا معلق در آب هستند. بوی بد فاضلاب اغلب به علت مواد آلی موجود در آن می‌باشد. این مواد بیشتر قابل تجزیه میکروبی هستند و گاهی تجزیه میکروبی منجر به تولید بوی نامطبوع می‌شود. علاوه بر مشکل تولید بو فاضلاب‌های دریافت کننده مدفوع انسانی و حیوانات زنده در بردارنده عوامل بیماری‌زا هستند که از نظر آلودگی محیط به ویژه منابع آب و خاک فوق‌العاده اهمیت دارند [۲۲]. فاضلاب یا گنداب ممکن است بسته به شکل پیدایش و خواص آن‌ها به سه گروه فاضلاب شهری<sup>۱</sup> یا خانگی، فاضلاب صنعتی و فاضلاب سطحی تقسیم شود.

#### ۲-۱-۱- فاضلاب شهری یا خانگی

فاضلاب خانگی خالص از فاضلاب‌های بهداشتی خانه‌ها مانند توالت‌ها، دستشویی‌ها، حمام‌ها، ماشین لباسشویی، ظرفشویی، پساب آشپزخانه‌ها و یا فاضلاب به دست آمده از شستشوی قسمت‌های مختلف خانه تشکیل می‌شود. اما آنچه در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری به نام فاضلاب خانگی جریان دارد، علاوه بر فاضلاب خاص خانگی خالص، مقداری فاضلاب‌های تولید شده در واحدهای کوچک صنعتی مانند تعمیرگاه اتومبیل، بیمارستان‌ها، رستوران‌ها، هرزآب ناشی از بارندگی در شهرها و نظایر آن‌ها می‌باشد که به اجبار وارد کانال‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری می‌گردند. لذا با توجه به نوع و تعداد این گونه مؤسسه‌ها، نوع فاضلاب در هر شهر تغییر می‌کند [۲۶].