

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده منابع طبیعی

## حذف جیوه از پساب‌های صنعتی با استفاده از نانوساختارهای کربنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد آلودگی‌های محیط زیست

فاطمه محمدی لندی

اساتید راهنما

دکتر بهزاد رضایی

دکتر علیمیراد رشیدی

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

بخشی از هزینه‌های اجرایی این تحقیق  
توسط پژوهشگاه صنعت نفت تهران  
پرداخت شده است که بدین وسیله تشکر  
و قدردانی می‌گردد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
نه	فهرست مطالب
سیزده	فهرست جدول‌ها
چهارده	فهرست شکل‌ها
۱	چکیده
	<b>فصل اول: مقدمه و هدف</b>
۲	۱-۱- بحران آب
۳	۲-۱- فلزات سنگین
۳	۳-۱- فاضلاب‌های صنعتی و لزوم تصفیه آنها
۴	۴-۱- فناوری نانو
۵	۵-۱- جایگاه فناوری نانو در محیط زیست و تصفیه فاضلاب
۶	۶-۱- اهداف تحقیق
	<b>فصل دوم: بررسی منابع</b>
۷	۱-۲- جیوه
۷	۱-۱-۲- اشکال مختلف جیوه در محیط زیست
۸	۲-۱-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی جیوه
۹	۳-۱-۲- کاربردهای جیوه
۹	۴-۱-۲- منابع انتشار آلودگی جیوه
۹	۵-۱-۲- چرخه جیوه در محیط زیست
۱۰	۶-۱-۲- تأثیرات زیست محیطی و سمیت جیوه
۱۱	۲-۲- استاندارد و حد مجاز جیوه در آب و پساب
۱۲	۳-۲- روش‌های حذف جیوه از پساب صنعتی
۱۲	۱-۳-۲- ترسیب
۱۳	۲-۳-۲- انعقاد و ته نشینی
۱۳	۳-۳-۲- تبادل یون
۱۳	۴-۳-۲- احیاء شیمیایی
۱۴	۵-۳-۲- جداسازی غشایی
۱۴	۶-۳-۲- اسمز معکوس
۱۴	۷-۳-۲- تصفیه بیولوژیکی
۱۵	۴-۲- جذب سطحی
۱۵	۱-۴-۲- تئوری جذب سطحی
۱۶	۲-۴-۲- انواع جذب سطحی
۱۷	۳-۴-۲- فرایند جذب سطحی

۱۸	۴-۴-۲- ماهیت جاذب‌ها
۱۹	۵-۴-۲- سنتتیک جذب سطحی
۲۰	۶-۴-۲- مکانیسم کنترل سرعت جذب
۲۰	۷-۴-۲- هم‌دماهای جذب سطحی
۲۳	۸-۴-۲- پارامترهای مؤثر بر جذب سطحی
۲۴	۵-۲- جاذب‌های مورد استفاده در جذب جیوه
۲۶	۶-۲- جاذب‌های نانوساختار
۲۷	۷-۲- نانولوله‌های کربنی (CNTs)
۲۹	۱-۷-۲- انواع نانولوله‌های کربنی
۲۹	۲-۷-۲- ساختار نانولوله‌های کربنی
۲۹	۳-۷-۲- روش‌های تولید نانولوله‌های کربنی
۲۹	۴-۷-۲- خواص نانولوله‌های کربنی
۳۰	۵-۷-۲- خواص جذبی نانولوله‌های کربنی
۳۰	۸-۲- عوامل مؤثر بر خواص جذبی نانولوله‌های کربنی
۳۱	۹-۲- جذب یون فلزات سنگین به وسیله نانوساختارهای کربنی
۳۱	۱-۹-۲- مکانیسم جذب یون‌های فلزات سنگین بر روی CNTs
۳۱	۲-۹-۲- عوامل مؤثر در جذب یون‌های فلزات سنگین بر CNTs
۳۲	۱۰-۲- عامل دار کردن MWNTs
۳۳	۱۱-۲- نانوالیاف کربنی (CNFs)
۳۳	۱-۱۱-۲- ساختار نانوالیاف کربنی
۳۴	۲-۱۱-۲- روش‌های تولید نانوالیاف کربنی
۳۴	۳-۱۱-۲- خواص نانوالیاف کربنی
۳۵	۴-۱۱-۲- خواص جذبی نانوالیاف کربنی
۳۵	۱۲-۲- تفاوت نانولوله‌ها و نانوالیاف کربنی
۳۵	۱۳-۲- تعیین خصوصیات جاذب‌های مورد استفاده
۳۵	۱-۱۳-۲- آنالیز پراش پرتو X (XRD)
۳۶	۲-۱۳-۲- طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FT-IR)
۳۶	۳-۱۳-۲- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM)
۳۶	۴-۱۳-۲- تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM)
	<b>فصل سوم: مواد و روش‌ها</b>
۳۷	۱-۳- انتخاب جاذب‌هایی با بیشترین مقدار جذب جیوه
۳۷	۲-۳- جاذب‌های مورد آزمایش
۳۷	۱-۲-۳- روش ساخت MWNT-COOH
۳۸	۲-۲-۳- روش ساخت CNFs

۳۸	۳-۳- تعیین خصوصیات جاذب‌های مورد استفاده .....
۳۸	۱-۳-۳- مساحت سطح، توزیع اندازه و حجم منافذ .....
۳۸	۲-۳-۳- آنالیز پراش پرتو X (XRD) .....
۳۸	۳-۳-۳- طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FT-IR) .....
۳۸	۴-۳-۳- تصویربرداری میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) .....
۳۸	۵-۳-۳- تصویربرداری میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) .....
۳۸	۴-۳- مواد شیمیایی و دستگاه‌های مورد استفاده .....
۳۹	۵-۳- تهیه محلول‌های آزمایشگاهی حاوی جیوه .....
۳۹	۶-۳- انجام آزمایشات جذب .....
۴۰	۷-۳- بررسی تأثیر عوامل مختلف بر جذب جیوه .....
۴۰	۱-۷-۳- تأثیر زمان تعادل و سینتیک جذب .....
۴۰	۲-۷-۳- تأثیر pH .....
۴۰	۳-۷-۳- تأثیر غلظت محلول و تعیین هم‌دهماهای جذب سطحی .....
۴۰	۴-۷-۳- تأثیر مقدار جاذب .....
۴۱	۸-۳- تأثیر یون‌های مزاحم .....
۴۱	۱-۸-۳- تأثیر کاتیون‌های فلزی .....
۴۱	۲-۸-۳- تأثیر آنیون‌ها (قدرت یونی) .....
۴۱	۹-۳- آزمایش ستونی مواد جاذب و احیاء آنها با محلول‌های آزمایشگاهی .....
۴۲	۱۰-۳- جذب جیوه از فاضلاب‌های صنعتی .....
۴۲	۱۱-۳- آنالیز داده‌ها .....
<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>	
۴۳	۱-۴- انتخاب جاذب‌های مناسب برای جذب جیوه .....
۴۳	۲-۴- تعیین خصوصیات جاذب‌های مورد استفاده .....
۴۳	۱-۲-۴- سطح ویژه، توزیع اندازه و حجم منافذ .....
۴۴	۲-۲-۴- آنالیز پراش پرتو X (XRD) .....
۴۴	۳-۲-۴- طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FT-IR) .....
۴۶	۴-۲-۴- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) .....
۴۷	۵-۲-۴- تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) .....
۴۷	۳-۴- بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر جذب جیوه .....
۴۷	۱-۳-۴- تأثیر زمان تماس .....
۴۸	۲-۳-۴- بررسی سینتیک جذب جیوه .....
۵۰	۳-۳-۴- تأثیر pH .....
۵۱	۴-۳-۴- تأثیر غلظت اولیه و هم‌دهماهای جذب سطحی .....
۵۷	۵-۳-۴- تأثیر مقدار جاذب .....

۵۹.....	۴-۴- تأثیر یون مزاحم.....
۵۹.....	۴-۳-۱- تأثیر کاتیون‌های فلزی.....
۶۰.....	۴-۳-۲- تأثیر آنیون‌ها (قدرت یونی).....
۶۲.....	۴-۵- آزمایش ستونی مواد جاذب و احیاء آنها با محلول‌های آزمایشگاهی.....
۶۲.....	۴-۶- جذب جیوه از فاضلاب‌های صنعتی.....
۶۳.....	۴-۷- مقایسه جذب جیوه در MWNT-COOH و CNFs.....
	<b>فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات</b>
۶۴.....	۵-۱- جمع‌بندی نتایج.....
۶۵.....	۵-۲- پیشنهادات.....
۶۶.....	منابع.....



## فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۸	جدول ۱-۲- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی بعضی از ترکیبات جیوه
۳۹	جدول ۱-۳- مشخصات شیمیایی نمک $HgCl_2$ برای تهیه محلول‌های آزمایشگاهی
۴۳	جدول ۱-۴- برخی خواص فیزیکی جاذب‌های مورد استفاده
۴۸	جدول ۲-۴- ثابت‌های مدل‌های سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم
۵۶	جدول ۳-۴- ثابت‌های هم‌دماهای جذبی لانگمویر، فروندلیچ و ردلیچ-پترسون
۵۷	جدول ۴-۴- نوع هم‌دماهای مورد استفاده و $q_{max}$ لانگمویر در برخی جاذب‌های کربنی
۶۱	جدول ۵-۴- تأثیر الکترولیت‌های مورد استفاده در کاهش میزان جذب جیوه
۶۲	جدول ۶-۴- نتایج احیاء MWNT-COOH و CNFs
۶۲	جدول ۷-۴- بررسی میزان جذب جیوه از پساب توسط CNFs و MWNT-COOH
۶۳	جدول ۸-۴- برخی از ترکیبات بافت پساب برنا باتری

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۰	شکل ۱-۲- چرخه جیوه در محیط زیست .....
۲۸	شکل ۲-۲- نانولوله تک دیواره و نانولوله چند دیواره .....
۳۱	شکل ۳-۲- سایت‌های مختلف جذبی یک دسته همگن از SWNT(S) .....
۳۲	شکل ۴-۲- نمایی از جذب یون‌های فلزی دو ظرفیتی روی سطح CNTs .....
۳۴	شکل ۵-۲- انواع ساختارهای نانوالیاف کربنی .....
۴۴	شکل ۱-۴- الگوی پراش پرتو X (XRD) مربوط به MWNT-COOH .....
۴۵	شکل ۲-۴- الگوی پراش پرتو X (XRD) مربوط به CNFs .....
۴۵	شکل ۳-۴- طیف FT-IR مربوط به MWNT-COOH .....
۴۶	شکل ۴-۴- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مربوط به MWNT-COOH .....
۴۶	شکل ۵-۴- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مربوط به CNFs .....
۴۷	شکل ۶-۴- تصویر میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) مربوط به CNFs .....
۴۸	شکل ۷-۴- اثر زمان تماس بر جذب جیوه توسط MWNT-COOH و CNFs .....
۴۹	شکل ۸-۴- برازش سینتیک جذب جیوه با مدل شبه مرتبه اول .....
۴۹	شکل ۹-۴- برازش سینتیک جذب جیوه با مدل شبه مرتبه دوم .....
۵۰	شکل ۱۰-۴- تأثیر pH بر درصد جذب جیوه توسط MWNT-COOH و CNFs .....
۵۲	شکل ۱۱-۴- تأثیر غلظت اولیه جیوه بر درصد جذب توسط MWNT-COOH و CNFs .....
۵۲	شکل ۱۲-۴- تأثیر غلظت اولیه جیوه بر میزان جذب توسط MWNT-COOH و CNFs .....
۵۳	شکل ۱۳-۴- هم‌دمای جذبی لانگمویر برای جذب جیوه روی MWNT-COOH .....
۵۳	شکل ۱۴-۴- هم‌دمای جذبی لانگمویر برای جذب جیوه روی CNFs .....
۵۴	شکل ۱۵-۴- هم‌دمای جذبی فروندلیچ برای جذب جیوه روی MWNT-COOH .....
۵۴	شکل ۱۶-۴- هم‌دمای جذبی فروندلیچ برای جذب جیوه روی CNFs .....
۵۵	شکل ۱۷-۴- هم‌دمای جذبی ردلیچ-پترسون برای جذب جیوه توسط MWNT-COOH .....
۵۵	شکل ۱۸-۴- هم‌دمای جذبی ردلیچ-پترسون برای جذب جیوه توسط CNFs .....
۵۸	شکل ۱۹-۴- تأثیر مقدار MWNT-COOH بر میزان جذب جیوه .....
۵۸	شکل ۲۰-۴- تأثیر مقدار CNFs بر میزان جذب جیوه .....
۵۹	شکل ۲۱-۴- تأثیر میزان کاتیون‌های فلزی بر میزان جذب جیوه توسط MWNT-COOH .....
۵۹	شکل ۲۲-۴- تأثیر میزان کاتیون‌های فلزی بر میزان جذب جیوه توسط CNFs .....
۶۰	شکل ۲۳-۴- تأثیر الکترولیت NaCl بر جذب جیوه توسط جاذب‌ها .....
۶۰	شکل ۲۴-۴- تأثیر الکترولیت Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> بر جذب جیوه توسط جاذب‌ها .....
۶۱	شکل ۲۵-۴- تأثیر الکترولیت KCl بر جذب جیوه توسط جاذب‌ها .....

## چکیده

فلزات سنگین موجود در پساب واحدهای صنعتی یکی از مهمترین و خطرناکترین آلاینده‌های زیست محیطی، به شمار می‌روند. در بین فلزات سنگین، جیوه ناشی از تخلیه فاضلاب صنایع کلرآلکالی، خمیر و کاغذ، پالایشگاه، رنگ، داروسازی و باتری‌سازی به علت سمیت، تجمع زیستی و تأثیرات زیست محیطی بر موجودات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی از جمله انعقاد و ته‌نشینی، اسمز معکوس، احیاء شیمیایی و تبادل یون برای حذف جیوه از پساب‌ها و آب‌های آلوده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، فرایند جذب سطحی به علت بازدهی بالا و هزینه نسبتاً کم توجه زیادی را به خود معطوف داشته است. لزوم کاهش مقدار یون‌های جیوه در جریان فاضلاب‌های صنعتی، نوع جاذب انتخابی را مورد توجه قرار می‌دهد. جاذب‌های مختلفی برای جذب جیوه از فاضلاب‌های صنعتی به کار رفته‌اند. اما امروزه کاربرد نانوجاذب‌ها از جمله نانوذرات و نانو ساختارها به علت سطح ویژه و نسبت سطح به حجم زیاد و کارایی بالا در حذف آلاینده‌های فلزی از فاضلاب‌های صنعتی به عنوان یک موضوع در خور توجه محسوب می‌شود. در این مطالعه، از دو نانو ساختار کربنی MWNT-COOH و CNFs برای جذب جیوه از پساب‌های صنعتی به دو روش ناپیوسته و ستونی استفاده شد و پارامترهای مؤثر بر میزان جذب از جمله زمان تعادل، pH، غلظت اولیه جیوه، میزان جاذب، اثر یون مزاحم و قدرت یونی مورد بررسی قرار گرفت. برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژی جاذب‌ها به کمک روش‌های BET، پراش پرتو (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)، میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) تعیین شدند. مطالعات سینتیک جذب نشان داد که جذب جیوه بر MWNT-COOH و CNFs سریع می‌باشد. سرعت جذب جیوه بر روی CNFs از معادلات شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم تبعیت کرد. بررسی اثر pH اولیه، نشان داد pH بهینه برای جذب جیوه توسط MWNT-COOH بین ۷/۰-۳/۰ و برای CNFs بین ۷/۰-۴/۰ می‌باشد. قابلیت برآزش داده‌های تعادلی سیستم جذب جیوه با مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و ردلیچ-پترسون مورد بررسی قرار گرفت. جذب جیوه روی MWNT-COOH با مدل ردلیچ-پترسون و بر روی CNFs با مدل‌های فروندلیچ و ردلیچ-پترسون برآزش بهتری داشت. حداکثر میزان جیوه جذب شده بر روی هر دو جاذب ۵۰۰ mg/g به دست آمد. افزایش میزان جاذب‌ها بر میزان جذب جیوه تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشت. حضور فلزات مس، سرب، روی، کروم، کادمیوم و نیکل با دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر جذب جیوه نشان نداد. با افزایش غلظت نمک‌های سدیم کلراید، سدیم سولفات و پتاسیم کلراید، درصد جذب جیوه کاهش یافت و تأثیر رقابتی الکترولیت‌های مذکور بر جذب جیوه بر روی MWNT-COOH به صورت  $\text{NaCl} > \text{KCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$  و بر روی CNFs به صورت  $\text{NaCl} > \text{KCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$  بود. واجذب جیوه توسط کلریدریک اسید نسبت به نیتریک اسید بیشتر بوده و حداکثر واجذب توسط کلریدریک اسید برای MWNT-COOH، ۱۰۰٪ و برای CNFs، ۸۳/۳٪ به دست آمد. کارایی جذب جیوه از فاضلاب‌های صنعتی توسط جاذب‌های مورد استفاده در فاضلاب نسبت به جذب آن در شرایط آزمایشگاه کمتر بود. همچنین نتایج نشان داد که جذب جیوه توسط MWNT-COOH نسبت به CNFs سریعتر و بیشتر بوده که احتمالاً به علت وجود گروه عاملی COOH- بر روی سطح این نانو ساختار کربنی است.

**کلمات کلیدی:** جیوه، جذب سطحی، MWNT-COOH، CNFs، سینتیک جذب، هم‌دمای جذب

## فصل اول

### مقدمه و هدف

#### ۱-۱- بحران آب

مکانیسم پیچیده حیات، بدون آب و به ویژه آب شیرین ممکن نخواهد بود. هر روز بیش از ۲۵ هزار نفر در اثر مدیریت ناصحیح آب، جان خود را از دست می‌دهند. تقریباً دو سوم جمعیت جهان از فقدان آب سالم و بهداشتی رنج می‌برند. اگرچه دو سوم سطح زمین را آب پوشانده است، اما  $97/2$  درصد از آب‌های کره زمین را آب‌های شور اقیانوس‌ها و دریاها تشکیل می‌دهند و آب شیرین و قابل شرب بسیار کم است [۱۴]. ذخیره‌های موجود آب شیرین به علت خشکسالی مداوم، افزایش جمعیت، مقررات سختگیرانه‌تر بهداشتی و افزایش رقابت در استفاده‌های مختلف از آب در حال تخلیه می‌باشند [۱۲۹]. بحران آب مهمترین چالش جهانی قرن بیست و یکم است. کشور ایران نیز در منطقه‌ای از دنیا قرار دارد که متوسط بارش سالیانه آن کمتر از یک سوم متوسط بارش جهانی است و از این نظر کشوری خشک و کم آب محسوب می‌شود [۱۵]. با این حال، مشکل اصلی این جاست که از همین منابع آب نیز استفاده درست صورت نمی‌گیرد و با توجه به افزایش سریع جمعیت و کمبود منابع آب، انسان‌ها با آلوده ساختن منابع آب، حیات خویش را به صورت جدی تهدید کرده‌اند. ورود مواد زاید صنعتی، کشاورزی، شیمیایی و مسموم کننده به منابع آبی، آلودگی آب را باعث شده است. آب‌هایی که به علل مختلف آلوده می‌شوند، علاوه بر این که بهداشت، سلامت و محیط زیست انسان‌ها را به خطر می‌اندازند، حیوانات و گیاهان را نیز با مشکلات و مخاطرات زیستی مواجه می‌سازد [۱۴]. در میان آلاینده‌های آبی فلزات سنگین از نظر پایداری، تجمع زیستی و سمیت اهمیت بیشتری دارند [۸۷] و در چند دهه اخیر آلودگی منابع آبی به علت وجود فلزات سنگین توجه جهانی را برانگیخته است [۳۳].

## ۲-۱- فلزات سنگین

یکی از عمده‌ترین آلاینده‌های محیط زیست وجود فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی می‌باشد که از نظر شدت آلاینده‌گی در گروه آلاینده‌های درجه اول سمی قرار دارند [۱۰۱]. فلزات سنگین در مقادیر کم نیز سمی و خطرناک هستند و از این رو به عنوان آلاینده‌های اصلی فون و فلور و انسان محسوب می‌شوند. این عناصر غیر قابل تجزیه زیستی بوده و برای مدت طولانی در محیط زیست باقی می‌مانند. فلزات سنگین در بافت‌های زنده انباشته شده و حضور بیش از اندازه آنها در موجودات زنده باعث سرطان، جهش‌زایی، سقط جنین و تأثیرات سمی دیگر می‌شود. این فلزات اغلب در واکنش‌های بیولوژیک سلول‌های موجودات زنده دخالت کرده و فعالیت‌های متابولیکی را مختل می‌نمایند. تخلیه فاضلاب صنایع مختلف از جمله رنگ، باتری‌سازی، دباغی، داروسازی و شیشه‌سازی، منبع اصلی آلاینده‌های فلزی در سیستم‌های آبی می‌باشند [۱۳۲]. بنابراین با توجه به سمیت و اثرات سوء فلزات سنگین بر انسان و سایر موجودات، فاضلاب‌های صنعتی قبل از تخلیه به منابع آبی باید تصفیه شوند [۱۵۰].

## ۳-۱- فاضلاب‌های صنعتی و لزوم تصفیه آنها

به طور کلی به آب‌های مصرف شده و زائدی که در طی مراحل مختلف تولید و فعالیت یک واحد صنعتی ایجاد می‌گردد و به نوعی کیفیت اولیه خود را از دست داده و برای مصرف خاصی غیر قابل استفاده می‌گردند، پساب صنعتی می‌گویند [۱۹]. فاضلاب‌های صنعتی عموماً حاوی ترکیبات و مواد سمی مضر و نامطلوبی از قبیل حلال‌ها، سیانیدها، مواد آلی و معدنی معلق، رنگ‌ها، روغن و گریس و فلزات سنگین می‌باشند که اگر میزان هریک از این اجزا از حد مجاز بیشتر شود، مواد آلاینده نامیده می‌شوند [۱۷]. به طور کلی کیفیت فاضلاب‌های صنعتی با توجه به نوع صنعت و تکنولوژی متفاوت‌اند. گاهی کیفیت یک صنعت خاص نیز در کارخانه‌های مختلف با هم فرق می‌کند. در بسیاری از این موارد آنچه این نوع فاضلاب‌ها را از فاضلاب‌های خانگی و شهری متمایز می‌سازد، عبارتند از [۴]:

- ترکیبات فاضلاب‌های صنعتی بسیار زیاد و متفاوت هستند.
  - امکان وجود مواد و ترکیبات شیمیایی سمی در فاضلاب‌های صنعتی بیشتر است.
  - اکثراً TDS<sup>۱</sup> فاضلاب‌های صنعتی بالا و TSS<sup>۲</sup> آن کم است.
  - گستره pH، خاصیت خوردگی و درجه اسیدی این گونه فاضلاب‌ها زیاد است.
  - امکان وجود موجودات زنده در پساب‌ها و فاضلاب‌های صنعتی کمتر است.
  - غلظت نیترژن و فسفر این فاضلاب‌ها کم و غلظت روغن و گریس آنها زیاد است.
- فاضلاب‌های صنعتی با توجه به کیفیتی که دارند، اثرات متفاوتی بر محیط زیست و منابع آنها می‌گذارند. هر متر مکعب فاضلاب صنعتی طبق بررسی‌های انجام شده، می‌تواند ۱۵ تا ۴۰ متر مکعب آب را آلوده نماید [۴].

فاضلاب‌های صنعتی غالباً حاوی مقدار زیادی یون‌های فلزی می‌باشند. بنابراین آلودگی ناشی از فاضلاب‌های صنعتی علاوه بر تهدید سلامت انسان‌ها، خسارات جبران‌ناپذیری در زندگی جانوران به ویژه آبزیان و گیاهان و به طور کلی اکوسیستم‌ها وارد نموده است. علاوه بر مسائل فوق، کمبود منابع آب و هزینه لازم جهت تصفیه آب نیز

1- Total Dissolved Solids

2- Total Suspended Solids

اغلب به تنهایی محرکی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و استفاده از آن خواهد بود. بر این اساس اهداف تصفیه فاضلاب را می‌توان به صورت زیر مطرح نمود [۱۰]:

- ۱- حفظ منابع آبی از آلودگی و جلوگیری از تخریب محیط زیست
- ۲- حفظ بهداشت و زیبایی محیط، سلامت انسان و سایر موجودات زنده و جلوگیری از شرایط نامناسب و ناهنجار

۳- استفاده مجدد از پساب تصفیه شده یا بازیابی مواد و ترکیبات موجود در فاضلاب

اگرچه فرایندهای مورد استفاده در تصفیه فاضلاب‌های شهری در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی نیز کاربرد دارند [۲]، اما تصفیه اغلب فاضلاب‌های صنعتی به کمک سیستم‌های تصفیه مکانیکی - بیولوژیکی امکان پذیر نیست. این ناتوانی به خصوص در مورد برخی مواد معین و غلظت‌های زیاد آلاینده‌ها چشمگیرتر می‌شود [۳]. به طوری که بررسی و پژوهش جداگانه‌ای برای تصفیه فاضلاب هر یک از صنایع لازم خواهد بود [۴]. در عین حال لازم است پساب‌های صنعتی را با شیوه‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی تصفیه کرد تا بتوان این پساب‌ها را به نحوی ایمن و بی‌خطر در منابع پذیرنده آنها تخلیه نمود [۳]. انواع روش‌های شیمیایی و فیزیکی جهت تصفیه آلودگی فلزات سنگین اعمال شده است که در این میان جذب به علت سادگی و سهولت استفاده از آن معمول‌ترین روش می‌باشد. جذب هسته فناوری جذب است و تاکنون جذب‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جذب‌های رایج به علت مقدار جذب، احیاء یا سرعت جذبشان با هم رقابت می‌کنند و این امر استفاده از آنها را کاهش می‌دهد [۱۵۰].

#### ۱-۴- فناوری نانو

ریچارد فایمن<sup>۱</sup> متخصص کوانتوم نظری و دارنده جایزه نوبل در سال ۱۹۵۹ در سخنرانی معروف خود با عنوان "آن پائین فضای بسیاری وجود دارد"<sup>۲</sup> بیان کرد که قصد دارد تا با قراردادن اتم‌ها در کنار یکدیگر، کوچکترین مصنوعات بشری را بسازد [۵۷]. اولین بار واژه نانوفناوری توسط نوریوتانیگوچی<sup>۳</sup> استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ برای توصیف ساخت مواد دقیقی که دامنه ابعاد آنها در حد نانومتر بود، مطرح شد [۱۳۶]. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کیم اریک در کسلر<sup>۴</sup> در کتاب «موتور آفرینش: آغاز دوران نانوفناوری» بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آنرا در کتابی تحت عنوان «نانوسیستم‌ها ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آنها» توسعه داد [۵۲]. اما اختراع میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی (STM) به وسیله بینینگ و روهرر<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۱ بود که شانس دستکاری و داشتن شکل مواد را در سطح نانو فراهم ساخت [۱۵۵].

1- Richard feynmam

2- There's Plenty of Room at the Bottom

3- Norio Toniguchi

4- Kim Eric Drexler

5- Binning and Rohrer

نانوفناوری به مفهومی علم، فناوری و روش‌های مهندسی مرتبط با فهم و کنترل مواد در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. همچنین تحقیق و تولید ساختارها، دستگاه‌ها و سیستم‌هایی که به علت ابعاد کوچک دارای مشخصات ویژه‌ای هستند را در برمی‌گیرد [۱۵۷]. نانومواد می‌توانند در یک بعد (مانند یک سطح پوشش بسیار نازک)، دو بعد (مانند نانوسیم‌ها و نانولوله‌ها) و یا مانند نانوذرات در تمامی ابعاد در اندازه نانو ساخته شوند [۱۱۲].

مواد در مقیاس نانو نسبت سطح به حجم بیشتری دارند و از آنجا که واکنش شیمیایی ابتدا در سطح یک ماده رخ می‌دهد، لذا فرصت بیشتری برای بروز واکنش‌های بیوشیمیایی وجود دارد. از سوی دیگر در این مقیاس ویژگی‌های کوانتوم مکانیکی ذرات، به شدت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث ظهور خواص الکتریکی، نوری و مغناطیسی در جسم می‌شود که در مقیاس‌های بزرگتر این حالت اتفاق نمی‌افتد. خصوصیات اساسی مواد، در مقیاس نانو مانند نقطه ذوب، رنگ و هدایت الکتریکی، ممکن است براساس اندازه و شکل مواد در محدوده ۱-۱۰۰ نانومتر متفاوت باشند [۹۰، ۱۲۰].

محور مطالعه در علم نانو، اجسام بسیار کوچک و در حد نانومتر و همچنین بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های نوظهوری است که در مقیاس نانومتری توسعه یافته‌اند. امروزه واژه نانوفناوری برای توضیح جامع فعالیت‌های انجام شده در ابعاد مولکولی و اتمی که کاربردی در دنیای حقیقی داشته باشند به کار می‌رود [۱۱].

### ۱-۵- جایگاه فناوری نانو در محیط زیست و تصفیه فاضلاب

یکی از ویژگی‌های مهم فناوری نانو جنبه چند رشته‌ای آن است. اصل چند رشته‌ای بودن فناوری نانو بیانگر این حقیقت است که این علم، رشته جدیدی نیست بلکه رویکردی جدید در تمام رشته‌هاست و تمام عرصه‌های مختلف علم و فناوری را در بر می‌گیرد [۱۶]. در زمینه مسائل زیست محیطی نیز استفاده از فناوری نانو اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم فناوری نانو بر محیط زیست، از جنبه‌های مختلف قابل بررسی است. اغلب کاربردهای زیست محیطی فناوری نانو را می‌توان در سه بخش تقسیم کرد [۱۰۵]:

۱- تولید محصولات بی‌خطر و با قابلیت تحمل بالا برای محیط زیست یا به عبارتی شیمی سبز

۲- تصفیه موادی که با ذرات خطرناک آلوده شده‌اند

۳- ساخت حسگرهایی برای ذرات محیطی

کاربردهای زیست محیطی فناوری نانو را می‌توان در سه بخش تحت عنوان نانوحسگرها، نانوفیلترها و کاتالیزورهای زیست محیطی تقسیم کرد [۱۰۸].

موضوعات کلان اولویت‌دار فناوری نانو در کشور در زمینه آب و محیط زیست به سه زیر شاخه تصفیه آب، نمک‌زدایی و تصفیه پساب تقسیم شده است که استفاده از نانوفیلترها، نانوکاتالیست‌ها، نانو کامپوزیت‌ها، نانوذرات و نانوسنسورها نمونه‌ای از فناوری‌هایی هستند که در هر کدام از این زیر شاخه‌ها مطرح هستند [۹].

بررسی فعالیت‌های مختلف دنیا، شامل برنامه‌های در دست اجرا و برنامه‌های آتی مراکز صنعتی و پژوهشی، نشان می‌دهد که حوزه تصفیه یکی از حوزه‌های پر کاربرد فناوری نانو در صنعت آب است و با بهره‌گیری از آن، هزینه‌های

تصفیه آب به میزان زیادی کاهش خواهد یافت. مشکل حذف فلزات سنگین از پساب‌ها نیز از جمله مسائلی است که امید است به کمک فناوری نانو قابل حل باشد [۸۳، ۱۲۹].

دو فناوری متعارف تصفیه که در فناوری نانو از آنها استفاده می‌شود عبارتند از جذبی و واکنشی. در فناوری تصفیه جذبی به کمک فرایند جداسازی، آلاینده‌ها (به خصوص فلزات) را با جذب توسط نانو مواد جدا می‌کنند. در حالی که فناوری واکنشی باعث تجزیه آلاینده‌ها به کمک نانو ذرات می‌شود. گاهی تمام روش‌ها به سمت تولید محصولات کم ضررتر است. مثلاً در مواردی که آلاینده‌ها آلی باشند محصولاتی مثل  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  تولید می‌شود [۱۳۹].

### ۱-۶- اهداف تحقیق

جیوه در میان سایر فلزات سنگین، به علت استفاده فراوان، سمیت، توزیع گسترده و تجمع زیستی توجه جهانی را به خود جلب کرده است و به عنوان یکی از خطرناک‌ترین فلزات موجود در محیط زیست به شمار می‌رود. بنابراین حذف آن از پساب‌ها قبل از تخلیه به محیط زیست ضروری است [۲۶]، در غیر این صورت پس از تخلیه به محیط وارد رسوبات شده، توسط موجودات آبی به صورت سمی‌ترین نوع آن یعنی متیل‌مرکوری جذب شده و از طریق زنجیره غذایی باعث تجمع زیستی می‌شود و حیات و سلامت مصرف‌کنندگان نهایی شامل پرندگان، ماهی‌ها و انسان را به خطر می‌اندازد [۵]. در میان روش‌های شیمیایی و فیزیکی پروسه جذب یکی از راهکارهای مؤثری است که به طور موفقیت‌آمیزی برای حذف فلز از پساب به کار می‌رود [۲۶]. جاذب‌های زیادی برای حذف جیوه از پساب‌ها استفاده شده است اما امروزه کاربرد نانو مواد، نانوذرات یا نانوجاذب‌ها به عنوان یک موضوع درخور توجه در حذف آلاینده‌های فلزی از فاضلاب‌های صنعتی می‌باشد. مواد در مقیاس نانو خواص منحصر به فردی را نشان داده و به علت اندازه کوچک، سطح ویژه و نسبت سطح به حجم بالایی که دارند ظرفیت جذب آنها افزایش می‌یابد [۱۰۲]. همچنین این ذرات ویژگی‌های بی‌نظیری از جمله پتانسیل کاتالیستی و واکنش‌پذیری بالایی دارند که آنها را به جاذب‌های بهتری نسبت به مواد جذبی معمول تبدیل می‌کند. مطالعات جامعی نیز در مورد استفاده از نانوجاذب‌ها برای حذف یون‌های فلزی از آب یا پساب انجام شده است [۱۳۲]. با توجه به خواص فوق‌العاده نانوجاذب‌ها در حذف یون‌های فلزی، حذف جیوه توسط نانوساختارهای کربنی به دلیل اینکه سطح ویژه و نسبت سطح به حجم بالایی داشته، غیر سمی‌اند و موجب آلودگی زیست محیطی نمی‌شوند [۱۳۲] در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت که می‌توان اهداف کلی تحقیق را به صورت زیر عنوان کرد:

- ۱- بررسی حذف جیوه از محلول‌های آزمایشگاهی توسط نانوساختارهای کربنی
- ۲- بررسی پارامترهای مؤثر در میزان قدرت جذب جیوه در سیستم ناپیوسته
- ۳- امکان‌سنجی احیاء نانوساختارهای کربنی مورد آزمایش
- ۴- کاربرد نانوساختارهای کربنی در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی



## فصل دوم بررسی منابع

### ۲-۱-۱- جیوه

جیوه یکی از قدیمی‌ترین عناصر شیمیایی است که توسط بشر مورد استفاده قرار گرفت [۴۵]. در واقع جیوه را چینی‌ها و هندی‌های باستان شناخته بودند و درگورهای متعلق به ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد یافت شده است. تا سال ۵۰۰ قبل از میلاد، از جیوه به همراه مواد دیگر برای ساخت آمالگام‌ها استفاده می‌شد. یونانیان باستان از این فلز سمی در پمادها و رومیان از آن در لوازم آرایشی استفاده می‌کردند. کیمیاگران نام خدای رومیان، مرکوری (به معنی سیاره عطارد) را برای این عنصر در نظر گرفتند. جیوه یکی از معدود عناصری است که دارای یک نماد کیمیاگری بوده و نماد آن Hg، از واژه هایدرارجیروم<sup>۱</sup> که لاتینی شده کلمه یونانی هایدرارجیروس<sup>۲</sup> می‌باشد، گرفته شده است [۱۳].

### ۲-۱-۱-۱ اشکال مختلف جیوه در محیط زیست

جیوه یکی از سمی‌ترین فلزات سنگین است که معمولاً در تمام محیط زیست شامل لیتوسفر، هیدروسفر، اتمسفر و بیوسفر یافت می‌شود [۳۱]. دارای اشکال مختلفی شامل جیوه فلزی ( $Hg^0$ )، نمک‌های غیرآلی تک ظرفیتی ( $Hg^+$ ) و دو ظرفیتی ( $Hg^{2+}$ ) و ترکیبات آلی (از جمله متیل - اتیل مرکوری و فنیل مرکوری) می‌باشد که هر شکل خواص فیزیکوشیمیایی و مقادیر سمیت مختلفی را داراست [۷۴]. جیوه غیرآلی متداول‌ترین شکل جیوه در اکوسیستم‌های آبی است [۸۰].  $Hg^{2+}$  می‌تواند در محیط‌های آبی متیل‌دار شود [۳۸]. متیل مرکوری فراوان‌ترین و سمی‌ترین شکل جیوه آلی در محیط زیست بوده و تنها ترکیبی است که دارای خاصیت تجمع و بزرگنمایی زیستی در زنجیره‌های غذایی می‌باشد [۴۰]. متیل مرکوری در محیط‌های آبی به طور طبیعی به صورت متابولیسم میکروبی (فرایند هوازی) و

---

1- Hydrargyrum  
2- Hydrargyros

متیل دار شدن شیمیایی (فرایند بی‌هوازی) تشکیل می‌شود. تشکیل متیل مرکوری در سیستم‌های آبی تحت تأثیر عوامل زیست محیطی مختلفی قرار دارد. بازدهی متیل دار شدن جیوه به روش هوازی به فعالیت باکتری‌ها و مقدار جیوه در دسترس (حضور HgS با کاهش مقدار سولفید رسوبات، مانع از متیل دار شدن جیوه می‌شود) بستگی دارد که در واقع تحت تأثیر دما، pH (گروه‌های عاملی که با جیوه تشکیل پیوند می‌دهند، را کنترل می‌کند)، پتانسیل اکسایش-کاهش و عوامل کمپلکس‌ساز آلی و غیر آلی (منجر به کاهش متیل دار شدن می‌شوند) قرار دارد. سرعت و مکانیسم متیل دار شدن شیمیایی نیز انتظار می‌رود تحت تأثیر پارامترهایی باشد که در گونه‌زایی جیوه مؤثرند [۳۸, ۴۰].

### ۲-۱-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی جیوه

جیوه دومین عنصر سمی در جهان [۲۳] و تنها فلزی است که در دمای اتاق حالت مایع دارد [۱۲۵, ۹۹]. جیوه فلزی سنگین، به رنگ سفید-نقره‌ای است که رسانای ضعیفی برای گرما اما رسانای مناسبی برای الکتریسیته می‌باشد [۳۸]. حلالیت نسبتاً کمی در آب داشته و با وجود سنگین بودن، فراریت قابل ملاحظه‌ای دارد. جیوه در دمای معمولی اتاق به راحتی بخار می‌شود [۱۲, ۷] و هوای ۴۰ درجه سانتیگراد ۴ برابر بیشتر از هوای ۲۰ درجه سانتیگراد می‌تواند بخار جیوه را در خود نگه دارد. این عنصر حتی در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد هم تبخیر می‌شود و به همین دلیل خطری جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شود [۱۳]. جیوه به راحتی و تقریباً با تمامی فلزات معمول (به جز آهن) از جمله طلا و نقره آلیاژ می‌سازد که به هر کدام از این آلیاژها ملغمه می‌گویند [۷]. برای جیوه هفت ایزوتوپ پایدار وجود دارد که فراوان‌ترین آنها  $Hg-202$  (۲۹/۶٪) است [۳۸]. پایدارترین ایزوتوپ پرتوزای جیوه  $Hg-194$  با نیمه عمر ۴۴۴ سال و  $Hg-203$  با نیمه عمر ۴۶/۶۱۲ روز هستند. بقیه ایزوتوپ‌های پرتوزای آن اغلب نیمه عمر کمتر از یک روز دارند [۷]. در جدول ۱-۲ به برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بعضی از ترکیبات جیوه اشاره شده است.

جدول ۱-۲- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی بعضی از ترکیبات جیوه [۱۴۴]

نام ترکیب	جیوه فلزی	کلرید جیوه	کلرید جیوه	کلرید متیل مرکوری	دی متیل مرکوری
فرمول مولکولی	$Hg^0$	$HgCl_2$	$Hg_2Cl_2$	$CH_3HgCl$	$C_2H_5Hg$
وزن مولکولی	۲۰۰/۵۹	۲۷۱/۵۲	۴۷۲/۰۹	۲۵۱/۱	۲۳۰/۶۶
حلالیت (g/L)	$10^{-5}$ در $5/6^{\circ}C$	۶۹ در $20^{\circ}C$	$2 \times 10^{-3}$ در $25^{\circ}C$	۰/۱ در $21^{\circ}C$	۱ در $21^{\circ}C$
چگالی ( $g/cm^3$ )	۱۳/۵۳۴ در $25^{\circ}C$	۵/۴ در $25^{\circ}C$	۷/۱۵ در $19^{\circ}C$	۴/۰۶ در $20^{\circ}C$	۳/۱۸۷۴ در $20^{\circ}C$
نقطه جوش	۳۵۷	۳۰۲	۳۸۴	-	۹۳
نقطه ذوب	-۳۹	۲۷۷	۳۰۲	۱۷۰	-۴۳
حالت اکسیداسیون	۰	+۲	+۱	+۲	+۲

## ۲-۱-۳- کاربردهای جیوه

خواص فیزیکی بی نظیر جیوه در دمای اتاق، استفاده از این عنصر در اهداف زیادی از جمله سوئیچ‌های جیوه‌ای، ترموستات، دماسنج، فشارسنج، باریومتر و باتری‌ها را امکان پذیر می‌سازد. خواص سمی جیوه استفاده از آن در پزشکی (ضد عفونی)، کشاورزی (آفت کش‌ها) و تولید مواد گندزدا را نیز آسان کرده است. کاربردهای دیگر جیوه شامل آمالگام‌های پزشکی، لامپ‌های پرنرزی، رنگدانه، چاشنی مهمات، فناوری ملغمه در صنعت کلر آلکالی و معدن کاوی طلا می‌باشد [۶۴]. در مناطق عملیات نفتی نیز از جیوه برای نمونه‌گیری از ته چاه نفت استفاده می‌شود [۷].

## ۲-۱-۴- منابع انتشار آلودگی جیوه

جیوه به طور طبیعی یک عنصر کمیاب در صخره‌ها، خاک‌ها، رسوبات و اتمسفر است [۳۳]. معمول‌ترین سنگ معدن جیوه سولفید جیوه<sup>۱</sup> (HgS) است. بیش از ۲۵ کانی حاوی جیوه شناخته شده است اما به طور متوسط مقدار آن در پوسته زمین فقط ۰/۵ ppm می‌باشد [۱۳۰]. با شروع عصر صنعت مقدار انتشار آن به محیط زیست به صورت ترکیبات واکنش پذیر و سمی افزایش یافته است [۶۴]. در گزارش مطالعات جیوه در کنگره آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۷ منابع انتشار جیوه به سه دسته منابع طبیعی، انسانی و انتشار دوباره<sup>۳</sup> (به حرکت در آمدن جیوه ساکن) تقسیم می‌شود [۱۴۲].

فرایندهای اصلی انتشار طبیعی جیوه شامل گاززدایی رسوبات معدنی، گاززدایی سیستم‌های آبی و خاکی آلوده به جیوه (از طریق کاهش  $Hg^{2+}$  به  $Hg^0$ )، انتشارات آتشفشانی و آتش‌سوزی جنگل‌ها می‌باشند. یک ویژگی مهم انتشارات طبیعی و انتشارات دوباره، دامنه وسیع پراکندگی و غیرنقطه‌ای بودن آنها نسبت به منابع انسانی است. بنابراین تخمین صحیح مقدار انتشار و اعمال روش‌های مؤثر برای کنترل آنها کار مشکلی است [۱۵۳].

بیش از نیمی از انتشارات جیوه به محیط زیست امروزه مربوط به منابع انسانی هستند [۱۰۰]. مهمترین منابع انسانی آلودگی جیوه فاضلاب‌های شهری، مواد کشاورزی، معدن کاوی، احتراق و فاضلاب‌های صنعتی می‌باشند [۱۶۵].

سباب فرایندهای صنعتی شامل صنایع کلر آلکالی، خمیر و کاغذ، پالایشگاه‌ها، معدن کاوی، آبکاری، رنگ، کود، داروسازی، باتری‌سازی، دندان پزشکی و مواد شیمیایی کشاورزی مهمترین مسیر ورود جیوه به سیستم‌های آبی توسط انسان محسوب می‌شوند [۲۵].

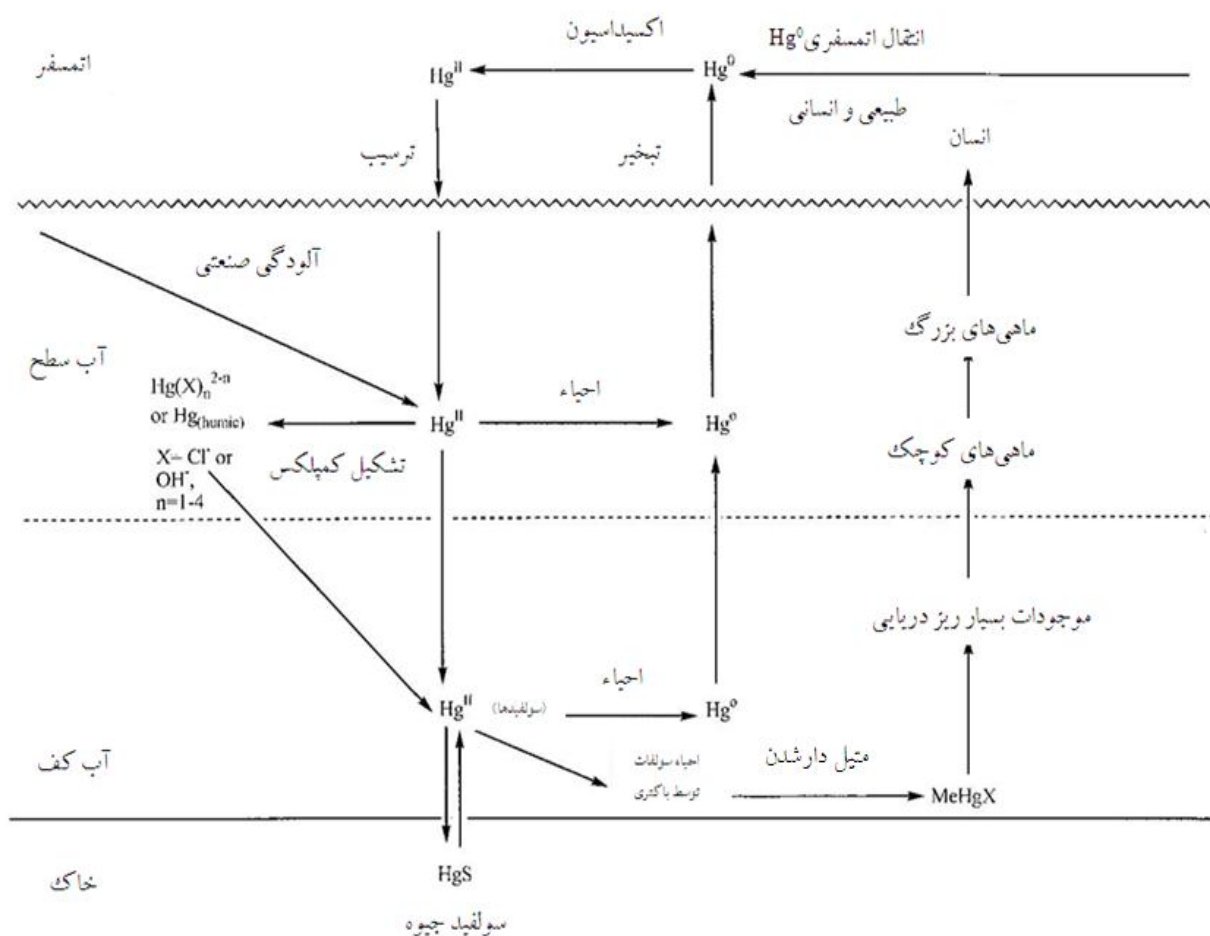
## ۲-۱-۵- چرخه جیوه در محیط زیست

دو چرخه برای جیوه در نظر می‌گیرند که شامل جابجایی در محیط زیست و توزیع جیوه می‌باشند. چرخه اول در مقیاس جهانی است و باعث انتشار اتمسفری بخار جیوه فلزی از منابع روی زمین به اقیانوس‌ها می‌شود. چرخه دوم در مقیاس محلی است و به متیل‌دار شدن جیوه غیر آلی که ناشی از منابع انسانی است، منجر می‌شود و احتمالاً شامل انتشار اتمسفری دی اتیل مرکوری ناشی از فعالیت‌های باکتریایی باشد [۳۶].

1- Cinnabar

2- United States Environmental Protection Agency (USEPA)

3- Re-emitted



شکل ۱-۲- چرخه جیوه در محیط زیست [۷۶]

### ۲-۱-۶- تأثیرات زیست محیطی و سمیت جیوه

به علت استفاده فراوان از جیوه نواحی زیادی در جهان آلوده به این عنصر و یا ترکیبات آن بوده و باعث مشکلات جدی زیست محیطی شده است [۳۶]. جیوه در محیط‌های آبی به عنوان یکی از معضلات مهم سلامتی انسان و حیوانات به شمار می‌رود [۶۸].

یک ویژگی بارز جیوه جذب آن توسط بافت‌های بیولوژیکی است و به طور کلی به کندی از سیستم‌های بیولوژیکی حذف می‌شود. به عبارت دیگر جیوه یک عنصر غیر قابل تجزیه زیستی می‌باشد که منجر به تجمع زیستی می‌شود. این گفته بدان معناست که جیوه قادر است حتی در مقادیر کم نیز به عنوان یک سم تجمعی عمل کند. خطرات سلامتی جیوه به علت تأثیرات سمی آن در بروز بیماری میناماتا<sup>۱</sup> (بیماری که بر اثر خوردن ماهی آلوده به