

Microorganisms in the Removal of Heavy Metals from Industrial Effluents

Abbas Farazmand

MSc., Iranian Research Organization for Science and Technology, Isfahan

Abstract

Microorganisms immobilize metal ions by both active and passive processes. For example, bacteria that use sulfate as a terminal electron acceptor actively produce and excrete an ion sulfide - that forms an insoluble complex with metal ions present in solution, causing these ions to precipitate. In contrast, biosorption (strong binding of metal ions to bacterial cells and to polymeric substances secreted by the cells) is a passive process seen with both living and dead cells. In biotransformation, some heavy metals such as uranium, chromium and mercury are reduced by microorganisms.

نقش و کاربرد میکروارگانیسم‌ها در حذف فلزات سمّی از پساب‌های صنعتی

عباس فرازمنند*

چکیده

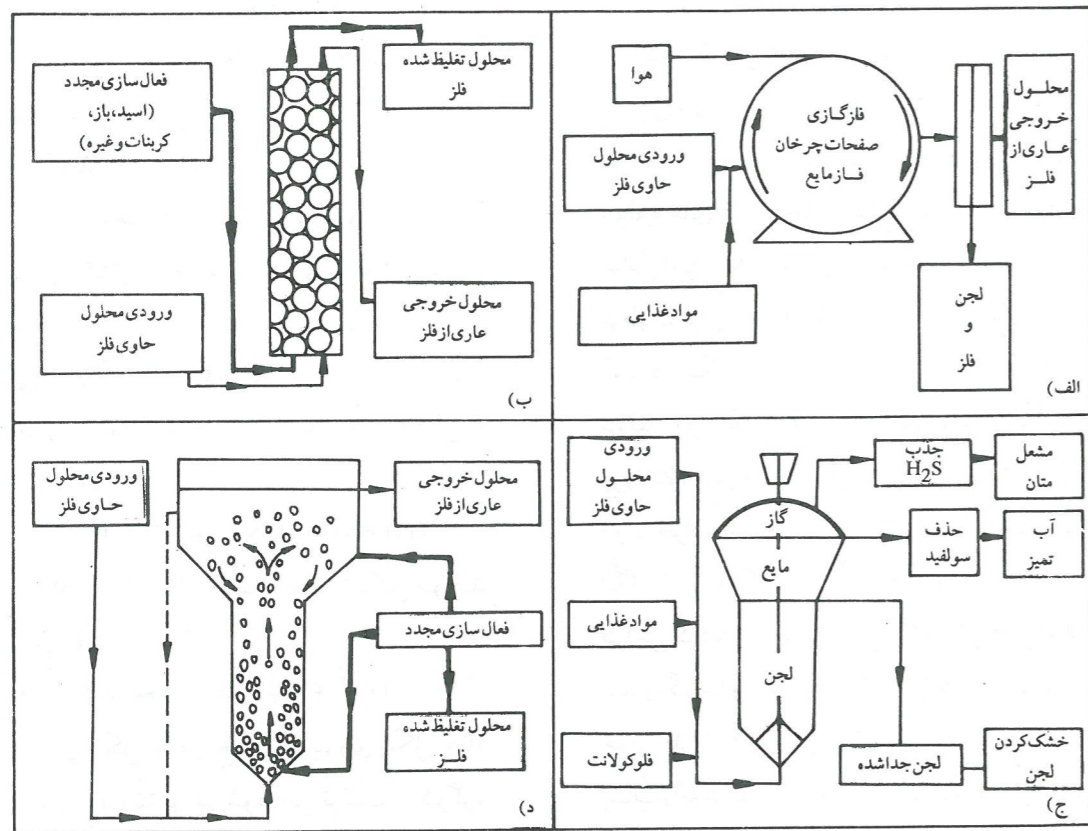
با استفاده از روش‌های مختلف بیولوژیکی می‌توان انواع پساب‌های حاوی فلزات سمّی را تصفیه کرد. روش جذب، رسوب‌دهی و تغییر و تبدیل به طریق زیستی مهمترین ساز و کار مورد استفاده در تصفیه فلزات سمّی است. در روش جذب به طریق زیستی فلزاتی نظیر سرب، کادمیوم، روی و اورانیوم به مکان‌های خاصی از سلول و یا مواد پلیمری مترشحه از آنها متصل می‌شوند. در روش رسوب‌دهی به طریق زیستی یون‌های فلزات دو ظرفیتی مانند سرب، جیوه، کادمیوم و روی با یون‌های سولفید حاصل از فعالیت باکتری‌های احیا کننده سولفات رسوب‌های غیر محلول تشکیل می‌دهند. تغییر شکل فلزات به طریق زیستی شامل احیای اورانیوم (VI) به اورانیوم (IV)، احیای کروم (VI) به کروم (III)، احیای جیوه (II) به جیوه (0) و اکسیداسیون آرسنیک (III) به آرسنیک (V) می‌باشد. در این مقاله انواع روش‌های بیولوژیکی مورد استفاده در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و سازوکار آنها به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مقدمه

و عناصر پرتوزای حاصل از محیط‌های طبیعی به وسیله فعالیت میکروارگانیسیم‌ها صورت می‌گیرد. از این موجودات می‌توان جهت حذف پسماندهای فلزات سنگین قبل از ورود آنها به محیط زیست استفاده کرد. میکروارگانیسیم‌ها از هر دو فرایند فعال و غیرفعال، یون‌های فلزات را تثبیت می‌کنند. برای مثال باکتری‌هایی که از سولفات به عنوان پذیرنده نهایی الکترون استفاده می‌کنند به طور فعال یون‌های سولفید تولید و ترشح می‌کنند و این یون‌ها باعث تشکیل کمپلکس‌های غیر محلول با

با پیشرفت صنعت و فن‌آوری، آلودگی محیط زیست نیز رو به افزایش است. پساب‌های آلوده به مواد سمّی و فلزات سنگین (حتی در حد مجاز) از قبیل جیوه، کادمیوم، اورانیوم، آرسنیک و سرب وقتی وارد محیط زیست شوند می‌توانند تحت تأثیر عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی و میکروبی تغلیظ شده و آب‌های سطحی و زیرزمینی را آلوده و اثرات جبران‌ناپذیری بر محیط زیست وارد کنند. از این رو ضرورت مطالعه راه‌های رفع آلاینده‌های پیچیده آب، خاک و هوا شدیداً احساس می‌شود. فرایندهای مهم حذف، تثبیت یا سم‌زدایی بیشتر فلزات سنگین

* عضو هیات علمی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران - پژوهشکده اصفهان



شکل ۱- طرح‌های ساده‌ای از برخی فرایندهای بیوتکنولوژی که اخیراً برای زدودن فلزات سمی از پساب‌ها به کار گرفته شده است؛ الف) راکتور دارای صفحات چرخان، ب) راکتور دارای بستر ثابت، ج) بیوراکتور مملو از لجن و د) راکتور دارای بستر شناور

است که به طور طبیعی در رسوبات دریاها صورت می‌گیرد. در آب دریا، کلراید فراوان‌ترین آنیون است و بعد از آن سولفات قرار دارد. اکسیژن و سولفات مهم‌ترین پذیرنده‌های الکترون می‌باشند. در حالتی که آب دریا کاملاً اشباع از هوا باشد، غلظت سولفات (۰/۰۲۸M) صد برابر غلظت اکسیژن است. به علاوه قدرت نفوذ سولفات در عمق رسوبات بیش از صد برابر اکسیژن است. در چنین رسوباتی که در آن شرایط به صورت بی‌هوازی است و از سولفات غنی می‌باشد، با کتری‌های احیاکننده سولفات^۲ مثل دی‌سولفو توما کلوم^۳ و دی‌سولفو ویربو^۴ مرحله

انبوه آن، توده سلول‌ها با استفاده از مواد تثبیت‌کننده مناسب تثبیت می‌شوند. سپس با قراردادن دانه‌های تثبیت شده در ستون مورد نظر تصفیه صورت می‌گیرد. در شکل ۱ برخی از راکتورهای مورد استفاده در جذب فلزات نشان داده شده است [۵، ۴، ۳].

رسوب‌دهی سولفیدهای فلزات

دریاچه‌ها و مرداب‌های مصنوعی و زمین‌های مرطوب که با مواد غذایی مناسب غنی‌سازی شده‌اند می‌توانند به عنوان فیلترهای بیولوژیکی^۱ برای فلزات سنگین موجود در پساب‌های اسیدی معادن عمل نمایند. این فرایند مشابه فرایندی

1- Biofilter
2- Sulfate Reducing Bacteria
3- Desulfotomaculum
4- Desulfovibrio

مکانیسم‌های تبادل یونی، مواد جاذب زیستی از طریق تشکیل کمپلکس در مکان‌های بدون بار باعث ایجاد رسوب فلز می‌گردند.

منشأ میکروارگانیسم‌های صنعتی

نکته مهم در مورد مواد جاذب زیستی ویژگی سوبیه‌ای میکروارگانیسم‌ها است. برای مثال تاکنون گزارش‌های متنوعی از جذب یون‌های فلزی توسط مخمر ساکارومیس سروزی^۴ صورت گرفته است که هر کدام درصد جذب خاصی را گزارش کرده‌اند. محققین برای یافتن سوبیه‌های صنعتی میکروارگانیسم‌های جاذب فلزات سنگین، میکروارگانیسم‌های مقاوم به این فلزات را جستجو می‌کنند. برای جستجوی این میکروارگانیسم‌ها می‌توان از پساب‌های کارخانه‌های صنعتی مثل باطری‌سازی، آب‌کاری و ... استفاده کرد. با کشت نمونه‌های مختلف بر روی محیط کشت آگاردار حاوی فلزات سنگین (مثلاً یک میلی‌مول Pb^{+2} یا Cd^{+2} یا Zn^{+2}) می‌توان به راحتی این میکروارگانیسم را جداسازی کرد و در مورد هر میکروارگانیسم به طور مجزا توانایی جذب و تجمع بیولوژیکی^۵ فلزات را بررسی کرد. از دیگر خصوصیات میکروارگانیسم‌های صنعتی کشت آنها با استفاده از ساده‌ترین منابع غذایی است. میکروارگانیسم‌های صنعتی نبایستی از گروه میکروب‌های بیماری‌زا و یا فرصت طلب باشند. در میان میکروارگانیسم‌های مختلف صنعتی که از قدرت جذب خوبی برخوردار هستند می‌توان به این گونه‌ها اشاره کرد. در میان باکتری‌ها باسیلوس^۶ و زئوگلا رامیزرا^۷ و پسودوموناس MGF-۴۸^۸، در میان مخمرها ساکارومیس سروزی^۹، در میان قارچ‌های رشته‌ای رایزوپوس آریزوس^۹ و اسپرژیلوس نیگر^{۱۰} و در میان جلبک‌ها کلرلا رگولاریس^{۱۱} از کارایی خوبی در جذب فلزات برخوردار هستند. پس از انتخاب سوبیه مناسب و کشت

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1- Biosorption | 2- Biosorbents |
| 3- Bioremediation | 4- Saccharomyces Cerevisiae |
| 5- Bioaccumulation | 6- Bacillus |
| 7- Zoogloea Ramigera | 8- Pseudomonas MGF - 48 |
| 9- Rhizopus Arrhizus | 10- Aspergillus Niger |
| 11- Chlorella Regularis | |

یون‌های فلز موجود در محلول می‌شود. در مقابل، جذب به طریق زیستی^۱ (اتصال محکم یون‌های فلزی به سلول‌های با کتری و مواد پلیمری مترشحه از این سلول‌ها) یک فرایند غیرفعال است که هم در سلول‌های زنده و هم در سلول‌های غیرزنده دیده می‌شود. به توده سلول‌های مورد استفاده در جذب فلزات، مواد جاذب زیستی^۲ گفته می‌شود. امروزه استفاده از مواد جاذب زیستی به طور گسترده‌ای در صنعت تصفیه و بازیابی فلزات سنگین و سمی و به طور کلی در چاره‌جویی‌های زیستی^۳ عوامل سمی استفاده می‌شود. فرایندهای تصفیه بیولوژیکی در مورد برخی از فلزات سمی به مرحله نیمه صنعتی و صنعتی رسیده است.

روش‌های متداول جداسازی عناصر پرتوزا و فلزات سمی در غلظت‌های بیش از 100 mg/l عبارتند از: فرایندهای رسوب‌دهی، واکنش‌های اکسیداسیون-احیاء، تبادل یونی و تصفیه فیزیکی با استفاده از صافی‌ها. فرایند تصفیه امروزه با استفاده از میکروارگانیسم‌ها حتی در غلظت‌های بسیار پایین به خوبی صورت می‌گیرد [۱].

مزایای استفاده از مواد جاذب زیستی

حجم‌های یکسانی از مواد جاذب زیستی که از توده سلول میکروارگانیسم‌ها تشکیل یافته‌اند در مقایسه با رزین‌های مصنوعی تبادل یونی از ظرفیت جذب تقریباً مشابهی برخوردار هستند. مواد جاذب زیستی می‌توانند غلظت‌های زیاد فلزات قلیایی خاکی (Mg^{+2} , Ca^{+2}) و غلظت‌های پایین کاتیون‌های فلزات سنگین (نظیر Ra^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Pb^{+2} , Ni^{+2} , Cd^{+2}) را به طور کارآمدی جذب نمایند. یکی دیگر از مزایای استفاده از میکروارگانیسم‌ها تولید ارزان قیمت آنها در مقایسه با رزین‌های تبادل یونی است. فلزات جذب شده بر روی میکروارگانیسم‌ها را می‌توان با استفاده از محلول‌های شستشو دهنده مناسب بازیابی کرد [۲ و ۳].

اتصال یون‌های فلزی به مواد جاذب زیستی ناشی از وجود بارهای منفی (کربوکسیلات، فسفات) بر روی دیواره سلولی و پلیمرهای خارج سلولی میکروارگانیسم است. علاوه بر

نهایی معدنی کردن بقایای مواد آلی تجزیه شده را انجام می دهند. این ارگانسیم ها برای تولید انرژی از اسیدهای آلی (لاکتات، استات، پروپیونات، بوتیرات و فومارات)، اتانل، بنزوات و H₂ به عنوان دهنده الکترون استفاده کرده و از سولفات به عنوان پذیرنده نهایی الکترون استفاده می کنند و آن را به هیدروژن سولفور (H₂S) احیا می نمایند. ده درصد سولفید تولید شده در محیط های احیا کننده رسوبات دریا با یون های فلزات واکنش داده، سولفیدهای نامحلول فلز را تشکیل می دهند.

آهن یکی از فلزات آب دریا می باشد. در رسوبات دریا به دنبال تولید هیدروژن سولفور آهن پس از طی چند واکنش به پیریت تبدیل می شود:



یون های آزاد فرو با H₂S واکنش داده و تشکیل سولفید فرو بی شکل را می دهند.



سولفید فرو بی شکل به تدریج به ماده بلوری شکل به نام مکیناویت^۱ (FeS_۲) تبدیل می شود. این ترکیب با گوگرد عنصری واکنش داده و پیریت را به وجود می آورد.



در دریاچه های آب شیرین میزان سولفات بسیار کم است (در حدود ۰/۰۰۱M) و از این رو توانایی انجام متابولیسم وابسته به سولفات محدود می باشد. با این حال پساب های اسیدی معادن حاوی غلظت های زیادی از فلزات سنگین و نیز سولفات می باشند. از این رو غنی سازی این پساب ها با مواد آلی موجب رشد باکتری های احیا کننده سولفات (SRB) می شود. این باکتری ها با متابولیسم خود و تولید سولفید باعث رسوب دهی سولفیدهای فلزات سنگین می شوند. به علاوه یون های بی کربنات که فرآورده نهایی اکسیداسیون مواد آلی است موجب افزایش pH می گردد.

برای مثال در دهه ۱۹۷۰ در مانتیوبا^۲ کانادا پساب یک معدن و کارخانه ذوب سنگ معدن که حاوی کادمیوم، مس، آهن، روی، جیوه و سولفات بود در دریاچه ای در کنار آن رها می شد. این دریاچه به علاوه محل ورود فاضلاب شهر مجاور

نیز بود. فراوانی مواد آلی منجر به رشد زیاد سیانوباکترها و جلبک ها گردید. این افزایش توده سلول ها موجب جذب فلزات سنگین گردید که با مرگ آنها به رسوبات عاری از اکسیژن دریاچه منتقل می شدند. در رسوبات، این توده های سلولی برای باکتری های احیا کننده سولفات (SRB) به عنوان ماده اولیه رشد محسوب می شد و با تولید هیدروژن سولفور موجب تشکیل سولفیدهای غیر محلول ZnS، CdS، FeS و HgS گردید. بر اساس این مطالعات زیست محیطی، فکر ایجاد زمین های مرطوب برای تصفیه ساده و ارزان پساب های معادن به وجود آمد. در شکل پیشرفته صنعتی، از باکتری های احیا کننده سولفات و رسوب دهی سولفیدی فلزات سنگین با استفاده از بیوراکتورهای مملو از لجن برای تصفیه پساب های یک کارخانه ذوب فلزات استفاده شده است. شرکت تحقیقاتی شل^۳ در انگلستان و بادلکو بی وی^۴ در هلند راکتوری را به این منظور طراحی کرده اند که ۹ متر مکعب گنجایش داشته و از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شده است. این راکتور مملو از لجن است و به خوبی فلزات سمی را پاکسازی کرده و سولفات موجود در پساب را به شکل سولفیدهای فلزی تبدیل می کند. ماده اولیه این راکتور جهت رشد باکتری ها اتانل می باشد. این راکتور قدرت تحمل محدوده وسیعی از pH های مختلف را داشته و حرارت لازم برای راکتور را خود تأمین می کند. غلظت فلزات خروجی از این سیستم کمتر از یک قسمت در هر میلیارد (ppb) است (شکل ۱ ج) [۱ و ۳]. این فرایند تا اندازه ۱۸۰۰ متر مکعب به شکل یک راکتور بتونی توسعه یافته است [۱ و ۳].

رسوب دهی فلزات با استفاده از فسفات

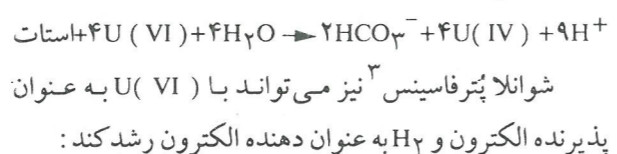
گونه ای از باکتری سیتروباکتر^۵ دارای آنزیم فسفاتاز متصل به غشای سلول است که می تواند از بسترهای مختلف مانند گلیسرول ۲- فسفات و تری بوتیل فسفات یون های HPO_۴^{۲-} تولید نماید و کاتیون های دو ظرفیتی را بر سطح سلول رسوب دهد. برای مثال هر گرم از این باکتری (بر حسب وزن خشک

- | | |
|----------------|---------------|
| 1- Mackinawite | 2- Manitoba |
| 3- Shell | 4- Budelco BV |
| 5- Citrobacter | |

می تواند ۹ گرم اورانیوم را به صورت H₂UO_۲PO_۴ رسوب دهد. با این حال این روش برای رسوب دهی سایر فلزات مقرون به صرفه نیست [۶].

تغییر شکل فلزات به طریق زیستی

تغییر شکل فلزات به طریق زیستی^۱ شامل احیا و یا اکسیداسیون برخی از فلزات سمی است. برای مثال برخی از باکتری های بی هوازی می توانند از طریق واکنش های آنزیمی اورانیوم (VI) محلول را به شکل اورانیوم (IV) غیر محلول احیا نمایند. ژئوباکتر متالیردیوسنس^۲ اولین ارگانسمی بود که مشخص گردید می تواند از اورانیوم (VI) به عنوان پذیرنده نهایی الکترون استفاده نماید. این باکتری از طریق انجام واکنش زیر رشد می کند:



هر دو ارگانسیم فوق که از میکروارگانسیم های احیا کننده آهن محسوب می شوند می توانند در غلظت های زیاد اورانیوم (۸ mM) رشد کنند. تعدادی از میکروارگانسیم های احیا کننده سولفات نظیر دی سولفوویبریو دی سولفورکانس^۴ نیز می توانند به وسیله آنزیم اورانیوم (VI) (اورانیل UO_۲^{۲+}) را با H₂ یا لاکتات احیا کنند. احیای میکروبی اورانیوم (VI) مزایای متعددی نسبت به روش های دیگر تصفیه دارد که عبارتند از:

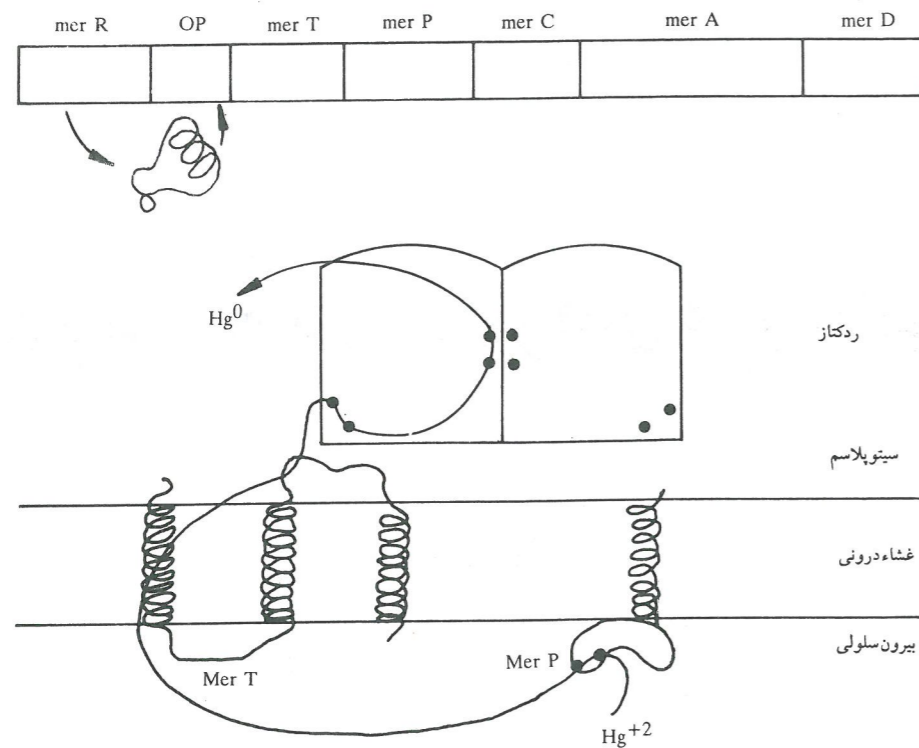
- ۱) توانایی رسوب دهی اورانیوم از کمپلکس کربنات اورانیوم (VI).
- ۲) بازیابی اورانیوم به شکل بسیار تغلیظ شده و خالص به صورت اورانیت (UO_۲).
- ۳) جداسازی مقادیر زیادی از اورانیوم بر حسب مقدار توده سلول.
- ۴) توانایی همزمان تصفیه مواد آلی و اورانیوم با استفاده از ماده آلی به عنوان دهنده الکترون.
- ۵) داشتن توانایی تصفیه آب های سطحی و زیرزمینی به طریق زیستی در همان مکان آلوده.

یکی از مثال های دیگر تغییر شکل فلزات به طریق زیستی احیای کروم (VI) به کروم (III) توسط میکروارگانسیم های احیا کننده کرومات است. مکانسیم مقاومت میکروارگانسیم های احیا کننده کرومات و مکانسیم احیای کرومات دو سیستم مجزا از یکدیگر است. انتروباکتر کلوسه^۵ یکی از مهم ترین باکتری های شناخته شده احیا کننده کرومات (CrO_۴^{۲-}) است که می تواند کرومات را در شرایط بی هوازی و از طریق تنفس بی هوازی احیا کرده و هیدروکسید کروم تولید نماید [۳].

تصفیه پساب های آرسنیک دار با استفاده از باکتری های مولد اسید از (که آرسنیک (III) متداول را به آرسنیک (V) کاتالیز می کنند) می تواند روش های تصفیه آرسنیک را بهبود بخشد، چراکه آرسنات (آرسنیک ۵ ظرفیتی) نسبت به آرسنیک سه ظرفیتی به آسانی از طریق ترکیب با آهن از پساب ها حذف می شود. امروزه محققین در جستجوی میکروارگانسیم های احیا کننده آرسنیک (III) یا (V) به آرسنیک (0) می باشند. کشف این گروه از میکروارگانسیم ها در تصفیه پساب های حاوی آرسنیک مفید خواهد بود [۳].

آخرین مثال از تغییر شکل فلز به طریق زیستی احیا و تبخیر جیوه است. میکروارگانسیم ها از طریق مکانسیم های مختلفی باعث حذف جیوه از پساب ها می شوند که می توان به تبخیر به شکل دی متیل مرکوری و تبخیر به شکل جیوه فلزی اشاره کرد. بسیاری از میکروارگانسیم ها از طریق متیل کردن جیوه، خود را از اثرات سمی آن حفظ می کنند. اما ترکیبات الکیل مرکوری برای موجودات عالی بسیار سمی و خطرناک است. حادثه شیوع بیماری در ساکنان شهر میناماتا^۶ ژاپن در سال ۱۹۵۳ که با ضعف عضلانی، از بین رفتن بینایی، آسیب های مغزی، فلج احتمالی و حتی در برخی با اغما و مرگ همراه بود، ناشی از مصرف ماهی های حاوی مقادیر زیاد متیل مرکوری بود. با ردیابی جیوه معلوم شد که منشأ آن پساب یک کارخانه می باشد. باکتری های بی هوازی موجود در رسوبات باعث تبدیل جیوه به مشتقات

- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| 1- Biotransformation | 2- Geobacter metallireducens |
| 3- Shewanella putrefaciens | 4- Desulfo vibrio desulfuricans |
| 5- Enterobacter cloacae | 6 - Minamata |



شکل ۳- سیستم مقاومت به جیوه و ترکیبات آلی حاوی جیوه در باکتری های گرم منفی

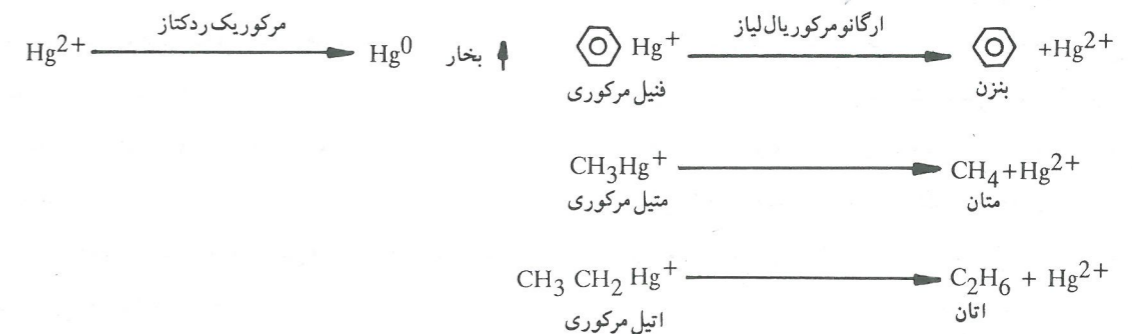
در سیستمی که عمل اختلاط در آن سریع صورت می گیرد Hg^0 در اتمسفر سریعاً به صورت بخار خارج می گردد. در غیاب هوادهی مناسب مثل یک اکوسیستم آرام Hg^0 به لیپیدها، کربوهیدراتها و مواد گوگرددار متصل می شود.

آنزیم است متصل می شود. Hg^{2+} توسط الکترونهایی که از NADPH به FAD متصل به آنزیم منتقل می شود احیا می گردد. Hg^0 از آنزیم رها شده و سریعاً از سلول به بیرون انتشار می یابد (این پدیده ظاهراً بدون حامل پروتئینی خاص صورت می گیرد).

منابع و مراجع

- 1- Glazer, A., and Nikado, H. (1995). " *Microbial Biotechnology* ", Chap. 15, PP. 611 - 614, W. H. Freeman and Company.
- 2- Ghafourian, H., and Farazmand, A. (1997). " *Removal of Radium by a New Bacterium MGF - 48* ", 4th International Conference on Method and Application of Radioanalytical Chemistry, April 1997, Hawaii, U.S.A.
- 3- Gadd, G.M. (1993). " *Microbial Treatment of Metal Pollution, a Working Biotechnology* ", Trend Biotechnology, 11, 353 - 357.
- 4- Malekzadeh, F., Ghafourian, H., and Farazmand, A. (1995). " *Microbial Accumulation of Uranium by Chryseomonas Lteola Strain MGF - 48* ", Abstract of the 95th General Meeting of the American Society for Microbiology, Washington DC, 21 - 25 May, PP. 330.
- 5- Malekzadeh, F., Farazmand, A., Ghafourian, H., Shahamat, M., and Collwell, R.R. (1995). " *Uranium Accumulation by Bacterium Isolated from Electroplating Effluent* ", Appl. Environ. Microbiol. (Submitted).
- 6- Macaskie, L. E. (1991). " *The Application of Biotechnology to the Treatment of Waste Produced from the Nuclear Fuel Cycle* ", Critical Review in Biotechnology, II (1): 41 - 59.

طریق ژن تنظیم کننده mer R فعال می شود. قطعه اپرون پروموتور دارای ۷۵ جفت باز نوکلئوتید است. در غیاب یونهای جیوه پروتئین Mer R سنتز ژنهای بعدی (ژنهای ساختمانی) را مهار می کند. وقتی یونهای جیوه به پروتئین Mer R اضافه می شود این پروتئین به صورت یک الگوی تنظیمی مثبت عمل کرده و باعث افزایش سنتز mRNA تا بیش از صد برابر می گردد و به این ترتیب سیستم مقاومت به جیوه فعال می گردد. در واقع اتصال Hg^{2+} به پروتئین Mer R موجب تغییر آرایش فضایی DNA شده و در نتیجه سبب ایجاد برهم کنش مناسب میان RNA پلیمراز و علائم آغاز ترجمه بر روی DNA می گردد. سپس ژنهای بعدی نسخه برداری می شوند. محصول این ژن ها در انتقال جیوه و سم زدایی آن دخالت دارند. Mer T محصول اولین ژن است که یک پروتئین درون غشایی بوده و به عنوان سیستم انتقال Hg^{2+} عمل می کند. این پروتئین، جیوه را از بیرون سلول به درون سلول منتقل می کند. Mer P پروتئینی است که در فضای پری پلاسمی قرار دارد و دارای دو نقش عمده است: (۱) نقش تصفیه کنندگی داشته و با اتصال به جیوه خارج سلولی باعث حفظ غشای سلول می گردد و (۲) عامل انتقال جیوه به سیستم انتقال دهنده Mer T می باشد. جیوه از Mer T مستقیماً به آنزیم مرکوریک ردکتاز (Mer A) منتقل می شود. نقش Mer T احتمالاً در تنظیم اپرون Mer می باشد. یون جیوه به یک جفت سیستین در انتهای گروه کربوکسیل آنزیم مرکوریک ردکتاز متصل می شود. این سیستین ها نقش حفاظت آنزیم را بر عهده دارند. معلوم شده است که Hg^{2+} در مرکز یک چهارگوش که شامل جفت سیستین های کربوکسیل انتهایی و بخش فعال



شکل ۲- آنزیم های تجزیه کننده جیوه و ترکیبات آلی حاوی جیوه

متیل و دی متیل مرکوری شده اند. سپس این مشتقات از طریق زنجیره غذایی در موجودات عالی تر تجمع یافته است.
 $Hg^{2+} \longrightarrow CH_3Hg^+ \longrightarrow (CH_3)_2Hg$
 اما فرایندی که در تصفیه جیوه از پساب های صنعتی بسیار حائز اهمیت است احیا و تبخیر Hg^{2+} به Hg^0 است. نکته قابل توجه در این فرایند آن است که مکانیسم مقاومت به جیوه در باکتری ها در واقع همان مکانیسم سم زدایی به طریق آنزیمی است. در این مکانیسم Hg^{2+} بسیار سمی به Hg^0 که به مراتب سمیت کمتری دارد تبدیل شده و به صورت بخار از محیط آلوده و باکتری خارج می شود. مواد آلی حاوی جیوه نظیر فنیل مرکوری، متیل مرکوری و اتیل مرکوری از طریق آنزیم به Hg^{2+} و ترکیبات آلی نظیر بنزن، متان و اتان تبدیل می شوند. این دو فرایند توسط آنزیم های مرکوریک ردکتاز و ارگانومرکوریک لیاژ صورت می پذیرند (شکل ۲). در یک بیوراکتور غلظت جیوه از ۷۵ mg/l به ۰/۱۲ mg/l به طریق بیولوژیکی تصفیه می شود و به این ترتیب ۹۹ درصد جیوه از پساب حذف می گردد. این مقدار جیوه احیا شده را می توان با استفاده از ستون های حاوی ذغال فعال بازیابی کرد [۳، ۱] .

سیستم مقاومت به جیوه مربوط به شش ژن است که محصول هر کدام از این ژنها در تنظیم جذب جیوه در سلول، اتصال و انتقال یون جیوه به آنزیم درون سلولی مرکوریک ردکتاز و احیا و تبخیر جیوه شرکت دارند. سازمان دهی این سیستم ژنی در باکتری ها در شکل ۳ نشان داده شده است. برخی از جزئیات مکانیسم عمل این سازماندهی ژنی در باکتری های گرم مثبت با باکتری های گرم منفی تفاوت دارد. اپرون mer از