



کانال مهندسی آب و فاضلاب

برای عضویت در کانال عبارت : **@mohandesifazelab**

را برای دوستانتان فرستاده و یا در گروهی به اشتراک بگذارید و سپس روی آن کلیک کرده تا وارد کانال شوید

برای تکمیل عضویت حتما گزینه **join** را بزنید

بررسی روش های حذف فلزات سنگین از پساب های صنعتی

بهزاد شیروود حیدری (دانشجوی مقطع کارشناسی رشته مهندسی شیمی از دانشگاه صنعتی امیرکبیر - واحد

ماهشهر)

Email: B.Sh.Heidari@aut.ac.ir

آرمان مرفع، وجیهه السادات چراغچی

Email: Cheraghchi@aut.ac.ir, a-moraffa@aut.ac.ir

چکیده

در طول دو دهه گذشته، توجه گسترده ای به آلودگی محیط زیست توسط مواد خطرناک مانند فلزات سنگین، پرداخته شده است. برخی از روش های متداول، برای حذف فلزات سنگین از زباله های مایع توسعه یافته اند که عبارتند از: ته نشینی شیمیایی، تبادل یونی، فرآیندهای غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی و غیره. با این حال این روش ها دارای معایب مختلف از جمله حذف یون های فلزی غیر قابل پیش بینی، نیاز به مقدار زیادی از واکنشگر، تولید لجن سمی و غیره می باشد. جذب زیستی فرآیندی است که نشان دهنده نوآوری بیوتکنولوژی و همچنین به عنوان یک ابزار مقرون به صرفه برای حذف فلزات سنگین از محلول های آبی می باشد. این مقاله ضمن بررسی تکنیک های مرسوم برای حذف یون های فلزات سنگین از فاضلاب ها و ارزیابی مزایا و محدودیت های کاربردی آنها، به معرفی زیست جاذب های میکروبی، مکانیزم های جذب زیستی، مدل های تعادلی جذب زیستی، احیاء زیست جاذب ها و استفاده مجدد از آنها و همچنین در آخر به بررسی مزایای آن در مقایسه با روش های متداول حذف فلزات سنگین، می پردازد.

کلمات کلیدی

فلزات سنگین، ته نشینی شیمیایی، تبادل یونی، فرآیندهای غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی، زیست جاذب های میکروبی

مقدمه

فلزات سنگین، عناصری هستند که دارای وزن اتمی بین ۶۳/۵ تا ۲۰۰/۶ و وزن مخصوص بزرگتر از ۵/۰ گرم بر سانتی متر مکعب می باشند [1]. یون های فلزات سنگین اثرات مهلک و مرگباری بر همه اشکال حیات دارند و از طریق دفع پسماندها در کانال های آب، وارد زنجیره غذایی می گردند. یون های فلزات سنگین به علت عدم زیست تخریب پذیری، تجمع یافته و مقدارشان در طول زنجیره غذایی افزایش می یابد. در میان یون های فلزی مختلف، سرب، جیوه، کادمیوم و کروم (VI) در صدر فهرست سمیت قرار دارند [2]. از مهمترین مشخصه های سمیت فلزات سنگین، می توان به موارد زیر اشاره کرد [3]:

- ۱- سمیت این عناصر می تواند به مدت طولانی در طبیعت باقی بماند.
 - ۲- برخی از فلزات سنگین حتی می توانند در یک محیط خاص، با گذشت زمان سمیتشان افزایش پیدا کند، جیوه یک نمونه از این موارد می باشد.
 - ۳- تجمع و تشدید زیستی فلزات سنگین بوسیله زنجیره غذایی می توانند به فعالیت های فیزیولوژیکی طبیعی آسیب رسانده و در نهایت زندگی بشر را به مخاطره بیندازند.
 - ۴- فلزات را نمی توان با هیچ روشی از جمله روش های زیستی، تخریب کرد و آنها تنها می توانند تغییر ظرفیت داده و به گونه ای دیگر تبدیل شوند.
 - ۵- سمیت فلزات سنگین حتی در غلظت های پایین و در حدود یک تا ۱۰ میلی گرم بر لیتر نیز رخ می دهد. برخی از یون های فلزی سمی قوی نظیر جیوه و کادمیوم، حتی در غلظت های پایین تر و حدود ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی گرم بر لیتر نیز بسیار سمی هستند.
- با توجه به روند سریع توسعه صنایع مختلف (شامل معدنکاری و ذوب فلزات، تولید انرژی و سوخت، صنعت کود و آفت کش ها، متالورژی، صنایع آهن و فولاد، آبکاری الکتریکی، الکترولیز، چرمکاری، عکاسی، تولید لوازم خانگی الکتریکی، صنایع هوا فضا و انرژی اتمی)، مقادیر هشدار دهنده ای از فلزات سنگین سمی به همراه پسماندهای این صنایع مستقیماً در محیط زیست رها شده که اکوسیستم های طبیعی و سلامت عمومی بشر را بخصوص در کشورهای در حال توسعه، به مخاطره انداخته است [3]. با وجود در نظر گرفتن قوانین سختگیرانه بیشتر و دقیق تر در این زمینه، امروزه فلزات سنگین، به عنوان آلاینده های اولویت دار زیست محیطی مطرح بوده و در حال تبدیل شدن به یکی از جدی ترین مشکلات زیست محیطی می باشند [1]. فلزات سنگینی که منشأ این نگرانی ها می باشند در سه گروه طبقه بندی می گردند که عبارتند از، فلزات سمی (از قبیل جیوه، کروم، سرب، روی، مس، نیکل، کادمیوم، آرسنیک، کبالت، قلع و غیره)، فلزات گرانبها (از قبیل، پالادیوم، پلاتین، طلا، نقره، روتنیوم و غیره)، و رادیونوکلییدی ها (از قبیل، اورانیوم، توریوم، رادیوم، امریسیوم و غیره) [4]. بنابراین، به منظور محافظت از مردم و محیط زیست، این فلزات سنگین باید از پسماندها و فاضلاب ها حذف گردند. روش های متعددی برای حذف یون های فلزات سنگین، مورد استفاده قرار می گیرند که متداولترین آنها عبارتند از، ته نشینی، لخته سازی، احیا، تبادل یون، تبخیر و فرآیندهای غشایی [1].

هر کدام از این روش ها در کنار مزایای کاربرد، معایب متعددی نیز دارند. از جمله، کم اثر بودن در حذف یون های فلزات سنگین، مصرف مقدار زیادی معرف و مواد شیمیایی، تولید لجن های سمی در مقادیر بالا، هزینه بالا، و مسائل مربوط به دفع ایمن مواد حاصله. بنابراین نیاز به فناوری های نوین که بتوانند غلظت فلزات سنگین را با هزینه های مقبول به سطوح قابل قبول از نظر زیست محیطی کاهش دهند، احساس می شود. روش جذب و حذف زیستی این پتانسیل را دارد که به تحقق این هدف کمک کند. جذب زیستی (حذف بیولوژیکی فلزات)، نسبت به روش های متداول ذکر شده، دارای مزایای مشخصی مانند مقرون به صرفه بودن، کارایی بالا در حذف فلزات و سادگی عملیات اجرایی می باشد [5].

در ادامه به توضیح در مورد روش های متداول برای حذف فلزات سنگین و سپس به تشریح روش جذب زیستی حذف فلزات سنگین و بررسی مزایای آن در مقایسه با روش های متداول، پرداخته می شود.

۱. فناوری های مرسوم برای حذف فلزات سنگین

روش های حذف فلزات از محلول های آبی اساساً دربرگیرنده فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می باشند [4]. در این بخش متداول ترین روش های حذف فلزات سنگین از محیط های آبی بطور مختصر مورد بررسی قرار می گیرند.

۱.۱. ته نشینی شیمیایی

ته نشینی شیمیایی روشی بسیار مؤثر است که بطور گسترده ای در صنایع مورد استفاده قرار می گیرد زیرا بهره برداری از آن بسیار ساده و ارزان است. در فرآیندهای ته نشینی، مواد شیمیایی با یون های فلز سنگین برای تشکیل رسوب های نامحلول واکنش می دهند. رسوب های تشکیل شده را می توان با فرآیندهای رسوب زدایی و فیلتراسیون از آب جدا کرد. آب تصفیه شده به این روش برای تخلیه به محیط و یا استفاده مجدد مناسب خواهد بود. فرآیندهای ته نشینی شیمیایی متداول شامل ته نشینی با هیدروکسید و ته نشینی با سولفید می باشند [1].

۲.۱. تبادل یون

تبادل یون یک روش مؤثر برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب است. هنگامی که رزین های تبادل یون اشباع می شوند، باید آنها را در یک محیط اسیدی یا بازی احیا نمود تا یون های فلزات از بستر رزین جداسازی گردند. روش تبادل یونی قادر به تصفیه محلول های فلز سنگین با خلوص بالا و همچنین قادر به انجام عملیات بصورت پیوسته می باشد. از این رو، نیاز به فرآیندهای پیش تصفیه به منظور کاهش غلظت مواد جامد معلق برای ایجاد حداکثر بازدهی خواهد داشت. جدا از بحث هزینه، که می تواند بخصوص برای کارگاه های فرآوری کوچکتر گران و ممانعت زا باشد، رزین های تبادل یونی در مقابل اکسیداسیون توسط مواد شیمیایی آسیب پذیر بوده و تحت تأثیر حضور یون های منیزیم یا کلسیم موجود در محلول بوده و مستعد رسوب گیری بوسیله مواد آلی می باشند [5].

۳.۱. فناوری غشایی

فرآیندهای غشایی به منظور انجام جداسازی های فیزیکی یا فیزیکی و شیمیایی طراحی می گردند. اگرچه کاربری های غشاء ها عمدتاً بر پایه آب هستند اما فرآیندهای جداسازی گاز- مایع و گاز - گاز نیز وجود دارند، هرچند که این فرآیندها اخیراً توسعه یافته اند و هنوز بطور گسترده ای مورد استفاده قرار نمی گیرند [6]. توسعه فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب بر اساس غشاء ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: فرآیندهای غشایی [6]

فرآیند	هدف
میکروفیلتراسیون	حذف مواد جامد معلق شامل میکرو ارگانیسم ها
اولترافیلتراسیون	حذف مولکولهای املاح محلول و ذرات معلق کلوئیدی
نانوفیلتراسیون	حذف (انتخابی) یون های چند ظرفیتی و برخی مولکولهای باردار یا قطبی
اسمز معکوس	حذف یون های غیرآلی
الکترودیالیز و دیالیز	استخراج (انتخابی) یون ها از آب و/یا تغلیظ این یون ها در جریان پسماند
تبخیر تراوشی	استخراج (انتخابی) گاز مولکولی و/یا املاح فرار
انتقال گاز	انتقال گاز مولکولی به داخل یا خارج آب

اسمز معکوس مفیدترین فرآیند غشایی ممکن در جداسازی مایع - مایع می باشد. در اصل آب تنها ماده ای است که از میان غشاء عبور می کند و تمام مواد محلول و معلق جداسازی می گردند [7]. سیستم اسمز معکوس برای عملکرد مؤثر نیاز به ورودی با کیفیت بالا دارد، بنابراین فاضلاب پیش از تصفیه توسط فرآیند اسمز معکوس باید به منظور حذف مواد جامد، پیش تصفیه شود [5].

کاربرد تکنولوژی غشاء برای جریان های پسماند محتوی فلزات با موانع بزرگ متعددی روبرو است. جدا از هزینه، غشاء ها قادر به مقاومت در مقابل برخی انواع مشخص از مواد شیمیایی و مقادیر PH نبوده و مستعد تخریب در حضور میکروارگانیسم ها نیز می باشند [5].

۴.۱. انعقاد و لخته سازی

فرآیندهای انعقاد و لخته سازی، حذف مواد جامد معلق در ابعاد ذرات کلوئیدی را آسان می سازد. این فرآیند در آخرین مرحله از جداسازی جامدات-مایعات بکار می رود. عمل انعقاد شامل ناپایدار سازی ذرات کلوئیدی با افزودن معرف- های شیمیایی با عنوان مواد منعقد کننده می باشد. عمل لخته سازی تجمع و تراکم ذرات ناپایدار شده برای تبدیل به ریزلخته ها و پس از آن لخته های حجیم با قابلیت ته نشین شدن می باشد. افزودن معرف دیگری موسوم به لخته ساز ممکن است تشکیل این لخته ها را ارتقاء بخشد. فرآیند لخته سازی شامل هم زدن آرام یا ایجاد تلاطم ملایم به منظور

تجمیع و تراکم ذرات ناپایدار شده و ایجاد فرآیند ته نشینی سریع لخته ها می باشد. این تکنیک به عنوان تکنیکی که قابلیت حذف فلزات سنگین از محلول ها را دارد شناخته شده است [5].

۵.۱. تصفیه الکتروشیمیایی

روش های الکتروشیمیایی شامل آبکاری یون های فلزی بر روی سطح یک کاتد بوده و می توانند فلزات را در حالت عنصری بازیابی نمایند. تکنولوژی های الکتروشیمیایی مستلزم سرمایه گذاری های نسبتاً بزرگ و تجهیزات الکتریکی گران قیمت می باشند، لذا این تکنولوژی ها بطور گسترده ای مورد استفاده قرار نگرفته اند. با این حال با توجه به مقررات سختگیرانه زیست محیطی در خصوص تخلیه فاضلاب، تکنولوژی های الکتروشیمیایی در طول دو دهه گذشته، اهمیت خود را در سراسر جهان به دست آورده اند [1].

مهمترین تکنولوژی های مرتبط با این زمینه شامل انعقاد الکتریکی (Electrocoagulation)، شناورسازی الکتریکی (Electroflotation) و رسوبدهی الکتریکی (Electrodeposition) می باشند [1].

۶.۱. جذب سطحی

امروزه جذب سطحی به عنوان یک روش مؤثر و اقتصادی برای تصفیه فاضلاب از فلزات سنگین شناخته می شود. فرآیند جذب سطحی دارای انعطافپذیری در طراحی و بهره برداری بوده و در بسیاری از حالات یک جریان خروجی تصفیه شده با کیفیت بالا تولید می کند. بعلاوه، از آنجاییکه جذب سطحی گاهی اوقات برگشت پذیر است، جاذب ها را می توان با استفاده از فرآیندهای احیاء مناسب، بازسازی نمود. مهمترین جاذب در این زمینه کربن فعال می باشد. جاذب های کربن فعال، بطور گسترده ای جهت حذف آلودگی های فلزات سنگین مورد استفاده قرار می گیرند. علت کارایی خوب آنها در این زمینه ناشی از حجم بالای میکروحفره ها و مزو حفره های موجود در آنها و سطح ویژه بالای حاصل از آن می باشد [1].

نانولوله های کربن نیز اخیراً در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته اند. نانو لوله های کربن نخستین بار توسط لیجیما (Lijima) در سال ۱۹۹۱ کشف شدند. این جاذب های نسبتاً جدید قابلیت های فوق العاده ای را برای جذب فلزات سنگین از خود نشان داده اند. نانولوله های کربن به دو نوع تقسیم می شوند: (۱) نانولوله های کربن تک دیواره و (۲) نانولوله های کربن چند دیواره. مکانیزم هایی که یون های فلزی بوسیله آنها جذب نانولوله های کربن می شوند بسیار پیچیده بوده و به نظر می رسد با فرآیندهایی مانند جاذبه الکتروستاتیک، جذب-ته نشینی، و برهمکنش شیمیایی بین یون های فلزی و گروه های عاملی موجود بر روی سطح نانولوله ها در ارتباط باشند [1].

کربن فعال پرکاربردترین جاذب سطحی می باشد، درحالیکه جاذبی نسبتاً گران است. جست و جو برای یافتن جاذب های سطحی کم هزینه و با دسترسی آسان به منظور حذف یون های فلزات سنگین تبدیل به اولویت اصلی تحقیقات شده است. تاکنون صدها مطالعه بر روی استفاده از جاذب های سطحی کم هزینه منتشر شده است و پسماندهای کشاورزی، محصولات جانبی و پسماندهای صنایع، و مواد طبیعی به همین منظور مورد مطالعه قرار گرفته اند [1].

هریک از این روش های ذکر شده دارای مزایا و معایب مختص به خود می باشند و دانستن این فاکتورها برای انتخاب و بکارگیری آنها در یک حالت خاص بسیار مفید می باشد. برخی از مزایا و معایب هر یک از این روش ها در جدول ۲ مورد اشاره قرار گرفته اند.

جدول ۲: فناوری های مرسوم برای حذف فلزات سنگین [2,5]

معایب	مزایا	روش
تولید مقادیر عظیم لجن، وابستگی به pH، دشواری جداسازی، مواد شیمیایی مورد نیاز	ساده، ارزان، اکثر فلزات را می توان حذف کرد	ته نشینی شیمیایی
حساس به ذرات، هزینه بهره برداری بالا، رسوبگیری فلزی، تعداد کمتری از فلزات را می توان حذف کرد.	هیچ لجنی تولید نمی شود، جریان خروجی با کیفیت بالا، امکان بازیابی فلزات	تبادل یون
رسوب گیری غشاء، عمر مفید محدود غشاء، پرهزینه بودن، فشار بالا، نرخ جریان پایین	جریان خروجی با کیفیت بالا، پسماند جامد کمتری تولید می شود، مواد شیمیایی کمتری مصرف می شود	فرآیندهای غشایی
مواد شیمیایی بسیار زیادی مورد نیاز است، تولید لجن، هزینه بالا	ذرات بسیار ریزی از رسوب تولید می کند، آبگیری (dewatering)	انعقاد و لخته سازی
زمانبر بودن، سطح وسیعی از الکتروود مورد نیاز است، رسوب گیری، پرهزینه بودن	قابلیت انتخابی بودن فلز، عدم مصرف مواد شیمیایی، قابلیت دستیابی به فلزات خالص	روش های الکتروشیمیایی
قیمت بالای کربن فعال، عدم قابلیت بازسازی	اکثر فلزات را می توان حذف کرد، بازدهی بالا (بیش از ۹۹ درصد)	جذب سطحی با کربن فعال

۲. جداسازی فلزات سنگین به روش حذف زیستی

حذف زیستی در اینجا بصورت جمع آوری و تغلیظ آلاینده ها از محلول های آبی با استفاده از مواد بیولوژیکی تعریف می شود. در این روش امکان بازیابی آلاینده ها و یا رساندن آن ها به سطوح قابل قبول از لحاظ زیست محیطی امکانپذیر می باشد. فرآیندهای حذف زیستی می توانند بر پایه توده های زیستی گیاهی و یا پلیمرهای حیوانی (نظیر کیتوسان(Chitosan)) باشند [8]. دست کم چهار حوزه گسترده برای کاربرد زیست جذب ها در مطالعات مختلف مورد اشاره قرار گرفته اند که عبارتند از: (۱) دفع سم از فاضلاب های حاوی فلزات (۲) رفع آلودگی های رادیواکتیوی از فاضلاب ها (۳) بازیابی فلزات از محلول های فرآیند معدنکاری (۴) تغلیظ و بازیابی فلزات نادر و استراتژیک از آب دریا [9]. مکانیسم های جذب فلزات شامل، کمپلکس شدن (Complexation)، تبادل یون، کئوردیناسیون (Coordination)، جذب سطحی، آهن زدایی (Chelation) و ته نشینی در مقیاس میکرو (Microprecipitation)، بسیار پیچیده و به شیمی یون های فلزی، ویژگی های سطح میکروارگانیزم ها و فیزیولوژی سلول وابسته هستند [10]. فرآیند جذب زیستی تحت تأثیر اثرات فیزیکی

و شیمیایی محیط از قبیل PH ، دما، غلظت توده زیستی، غلظت اولیه فلز، و رقابت یونی می باشد [11]. زیست جاذب های معمول را می توان از سه منبع بدست آورد: (۱) توده های زیستی غیر زنده از قبیل، پوست درخت، لیگنین، میگو، ماهی مرکب، پوست خرچنگ و غیره. (۲) توده های زیست جلبکی (۳) توده های زیست میکروبی مانند باکتری ها، قارچ ها و مخمرها [1].

۱.۲. زیست جاذب های میکروبی

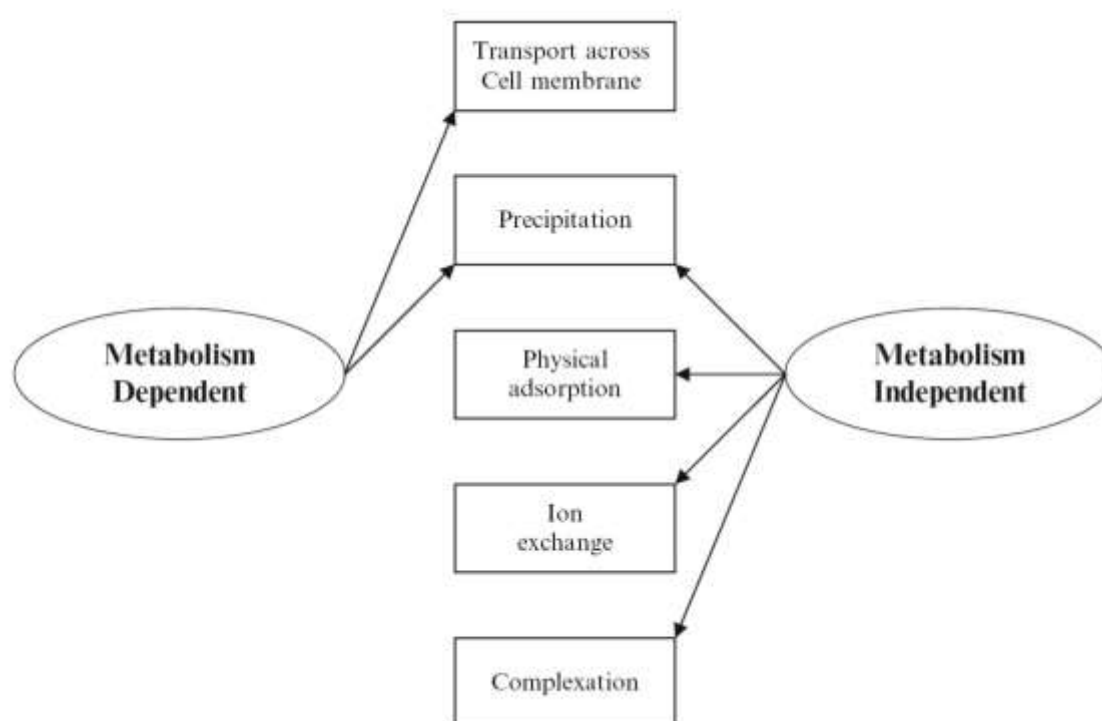
انواع مختلفی از توده های زیست میکروبی به منظور بررسی قابلیت هایشان در جذب زیستی مورد مطالعه قرار گرفته اند. در میان میکروارگانیسم ها، زیست توده های قارچی دارای این مزیت می باشند که دارای درصد بالایی از مواد دیواره سلولی بوده که خواص فوق العاده ای را در اتصال فلز نشان می دهد. بسیاری از قارچ های رشته ای و مخمرها، قابلیت فوق العاده ای در جذب فلزات از خود نشان داده اند [5]، مخصوصاً قارچ ها و مخمرهای *Aspergillus*، *Rhizopus*، *Saccharomyces* و *Rhodotorula*، *Penicillium*، *Streptovercillum*.

از میان گونه های مطالعه شده، قارچ ها بطور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته اند که تا حدودی به این دلیل است که آنها دارای طیف گسترده ای از انواع مورفولوژیکی بوده و همچنین مقدار بسیار زیادی از زیست توده های قارچی حاصل از فرآیندهای صنعتی و کارخانجات در دسترس می باشد. قارچ ها قادر به حذف فلزات سنگین از فاضلاب در مقادیر قابل توجه می باشند. در نمونه های مشخص، مشاهده شده است که جذب زیستی فلزات سنگین توسط سلول های قارچی، بیشتر از میزان جذب توسط جاذب های مرسوم نظیر کربن فعال و رزین های تبادل یونی بوده است. از میان قارچ ها، گونه های *Aspergillus* و *Rhizopus* بطور گسترده ای به عنوان زیست جاذب برای فلزات سنگین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته اند. همچنین *Penicillium chrysogenum*، قابلیت جذب طلا از سیانید را از خود نشان داده است هر چند ظرفیت جذب آن چندان دل گرم کننده نبوده است [5].

مخمرها دارای قابلیت حذف کاتیون های فلزات سنگین می باشند که این قابلیت توسط مطالعات مختلف مورد تصدیق قرار گرفته است. مخمرها در انواع فرآیندهای تخمیر صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند و می توان به سادگی و با استفاده از تکنیک های غیر پیچیده تخمیر و در بسترهای رشد بسیار ارزان آنها را کشت کرد. خصوصیات مخمرها را نیز می توان با دستکاری های ژنتیکی و مورفولوژیکی تغییر داد که ممکن است منجر به ایجاد زیست جاذب های با قابلیت های بهتری گردد. از میان مخمرها، جذب زیستی فلزات سنگین بوسیله *Saccharomyces cerevisiae* بیش از همه مورد مطالعه قرار گرفته است. این مخمر یک زیست جاذب نیرومند و قابل قبول خصوصاً برای کادمیوم است. اخیراً گزارش شده است که برخی از مخمرهای خاکی شامل *Rhodotorula*، در مقابل سمیت فلزات سنگین مقاوم بوده اند. چو (Cho) و همکارانش نیز گزارش کرده اند که مخمر های *R. glutinis* و *R. aurantiaca* ظرفیت بالایی در جذب زیستی سرب از خود نشان داده اند [5].

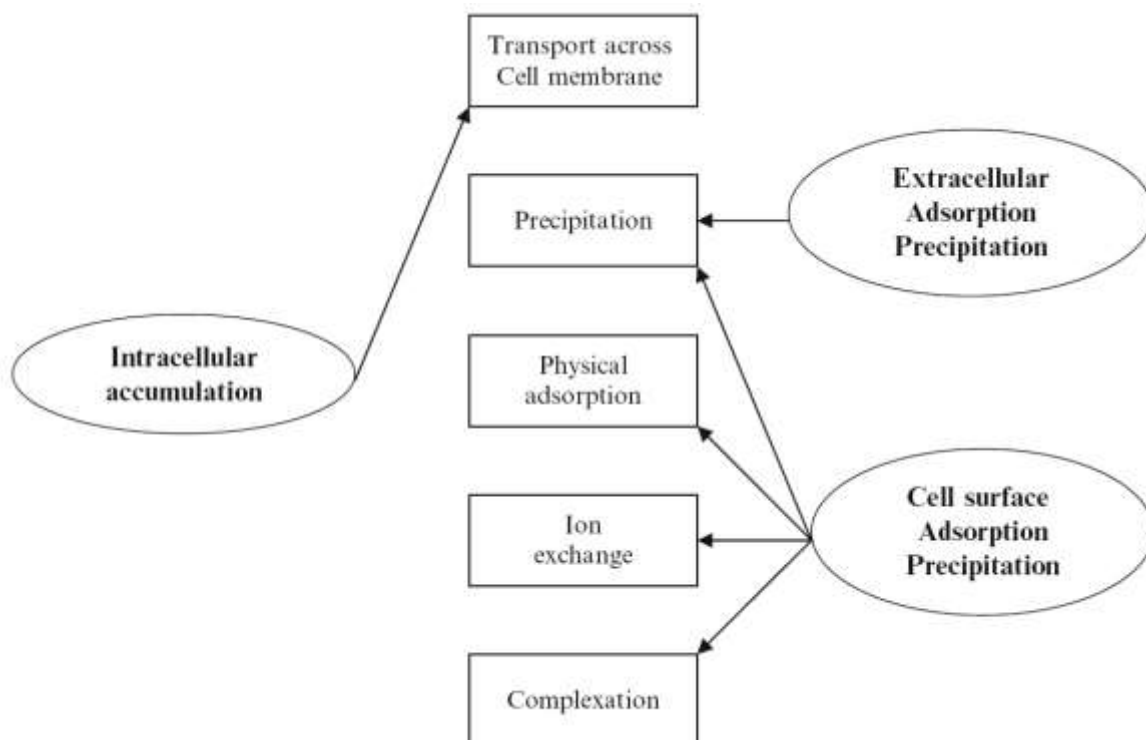
۲.۲ مکانیزم های جذب زیستی

پیچیدگی ساختار دیواره سلولی حاکی از آن است که برای جذب زیستی فلزات سنگین بوسیله میکروارگانیسم ها، راه های بسیار زیادی وجود دارد. بنابراین، مکانیزم های جذب زیستی بسیار متنوع بوده و در برخی موارد بیش از یک مکانیزم را شامل می شوند. به هر حال، این مکانیزم ها بطور کامل شناسایی نشده اند [5]. مکانیزم های جذب زیستی بصورت خلاصه در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده اند.



شکل ۱ - مکانیزم های جذب زیستی بر اساس وابسته بودن به متابولیسم سلول ها [5]

مکانیزم های جذب زیستی را بر اساس وابستگی به متابولیسم سلول ها می توان در دو گروه طبقه بندی نمود [12]: الف) مکانیزم های وابسته به متابولیسم (جذب فلز فعال، تجمع زیستی). این فرآیند یک فرآیند مبتنی بر انرژی است. ب) مکانیزم های مستقل از متابولیسم (جذب فلز غیر فعال، جذب زیستی). شامل ته نشینی، جذب سطحی فیزیکی، تبادل یونی، و کمپلکساسیون. فرآیند جذب فلز غیرفعال نسبتاً سریع بوده و می تواند برگشت پذیر نیز باشد.



شکل ۲- مکانیزم های جذب زیستی بر اساس محلی که فلز حذف شده در آن یافت شده است [5]

مکانیزم های جذب زیستی را همچنین بر اساس محلی که فلز حذف شده در آن یافت می شود نیز می توان بصورت زیر طبقه بندی کرد [13]:

الف) تجمع (ته نشینی) خارج سلولی که ممکن است با استفاده از میکروارگانیسم های زنده تسهیل شود.
 ب) جذب (ته نشینی) بر روی سطح سلول. ته نشینی، جذب سطحی فیزیکی، تبادل یونی، و کمپلکس شدن می تواند با میکروارگانیسم های زنده یا مرده اتفاق بیافتد.

ج) تجمع داخل سلولی. جابجایی در سراسر غشاء سلول، نیاز به فعالیت های میکروبی دارد.

بطور کلی مکانیزم های جذب زیستی را می توان بصورت زیر خلاصه کرد [14]:

۱- جابجایی در سراسر غشاء سلولی

این پدیده مرتبط با متابولیسم سلول توسط زیست توده ها (biomass) می باشد. این فرآیند ممکن است بوسیله همان مکانیزم های استفاده شده برای انتقال یون های ضروری از قبیل سدیم، منیزیم و پتاسیم، انجام شود. سیستم انتقال فلز ممکن است به واسطه حضور یون های فلزات سنگین، با همان بارها و شعاع های یونی، مختل گردد.

۲- کمپلکس شدن

جذب زیستی فلز ممکن است از طریق تشکیل کمپلکس بر روی سطح سلول و پس از برهمکنش مابین فلز و مکان های فعال، اتفاق بیافتد. یون های فلزی می توانند به لیگاند های منفرد متصل شوند و کمپلکس شدن سطح سلول به مفهوم بار سطحی ایجاد شده ناشی از مکان های سطحی آموتری می باشد که قادر به واکنش با گونه های کاتیونی و آنیونی برای تشکیل کمپلکس های سطحی می باشند.

۳- کئوردیناسیون

اتصال فلزات به لیگاندها بر مبنای شکل گیری ترکیبات کئوردیناسیونی می باشد. فلز به عنوان اسید لوییس عمل می کند یعنی تمایل به بدست آوردن الکترون کافی برای رسیدن به فاز بی اثر دارد و لیگاند به عنوان یک باز لوییس عمل می کند یعنی، جفت الکترون هایی دارد که می تواند با فلز به اشتراک بگذارد. به این ترتیب، کئوردیناسیون، یک فرآیند خنثی سازی اسید لوییس - باز لوییس می باشد.

۴- تبادل یونی

تبادل یونی نقش مهمی در جذب بوسیله زیست توده های جلبکی ایفا می کند و بصورت اتصال یون های فلزات سنگین و پروتون ها بصورت تابعی از غلظت فلز و تعادل PH مدل شده است. یون های فلزی سبک، حاضر در دیواره سلولی و غشاء از قبیل K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} نیز می توانند با کاتیون های فلزی تبادل شوند.

۵- آهن زدایی

آهن زدایی زمانی اتفاق می افتد که یک لیگاند از طریق بیش از یک جفت الکترون به اشتراک گذاشته شده، با یک فلز پیوندهای کئوردیناسی تشکیل می دهد و در نتیجه یک ساختار حلقه ای شکل می گیرد. بسته به ساختار لیگاند و نیاز برای الکترون های فلز، بیشتر از هشت جفت الکترون بین یک یون فلزی منفرد و لیگاند می تواند به اشتراک گذاشته شود.

۶- ته نشینی در مقیاس میکرو

ته نشینی ممکن است وابسته به متابولیسم سلولی باشد و یا مستقل از آن. در حالت اول، جذب زیستی فلز از محلول اغلب مرتبط با یک سیستم دفاع فعال از طرف میکروارگانیسم ها می باشد. آنها در حضور یک فلز سمی واکنش می دهند و ترکیباتی مطلوب برای فرآیند ته نشینی تولید می کنند. در حالت ته نشینی در مقیاس میکرو، فرآیند وابسته به متابولیسم سلولی نیست و ممکن است در نتیجه یک برهمکنش شیمیایی فلز و سطح سلول باشد.

حالت فیزولوژیکی میکروارگانیسم ها، دسترسی به میکروارگانیسم ها در طول رشدشان، و شرایط محیطی در طول فرآیند جذب زیستی (نظیر PH، دما، و ...) از پارامترهای تأثیرگذاری هستند که عملکرد یک زیست جاذب میکروبی را تحت تأثیر قرار می دهند [5].

۳.۲. مدل های تعادلی جذب زیستی

آزمایشات اولیه از سیستم جذب مایع جامد بر مبنای دو نوع از تحقیقات است: الف) آزمون های تعادلی جذب دسته ای ب) مطالعات جریان دینامیکی پیوسته جذب سطحی. تعادل فرآیند جذب زیستی معمولاً توسط برازش داده های

تجربی با مدل هایی که برای ارائه تعادل جذب سطحی همدم استفاده می شود، بیان می گردد. دو مدل عمومی تعادل جذب سطحی همدم که برای محلول های تک جزئی است، Langmuir و Freundlich می باشد که در ذیل آورده شده - اند: [15]:

$$\text{Langmuir: } q = \frac{q_{\max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (1)$$

که q میلی گرم فلز تجمع یافته در یک گرم از زیست جاذب، C_{eq} غلظت فلز ته نشین شده در محلول، q_{\max} مکان اشباع و b نسبت میزان جذب به دفع می باشد. این مدل، برای جذب سطحی تک لایه ای است. مدل تجربی دیگری که برای این نوع جذب بکار می رود، Freundlich است:

$$\text{Freundlich: } q = K_F C_{eq}^{1/n} \quad (2)$$

که K_F و n مقادیر ثابتی هستند. این مدل ها می توانند در یک PH ثابت بکار برده شوند، و برای شبیه سازی تعادل جذب زیستی در حضور یک فلز مورد استفاده قرار گیرند.

۴.۲ احیاء زیست جاذب ها و استفاده مجدد از آنها

در تعدادی از مطالعات، زیست توده ها با استفاده از ساپورت های جامد خنثی، بصورت بایوفیلیم ها بی تحرک شده اند. این ماتریس های خنثی شامل پلی وینیل کلراید، شیشه، ورقه های فلزی، پلاستیک ها، سطوح ناهموار نظیر تراشه های چوب، خاک رس، شن و ماسه، و سنگ های خرد شده، و مواد متخلخل نظیر فوم ها و اسفنج ها می باشند. بهره برداری از فن آوری جذب زیستی برای حذف فلزات سنگین، به بازده آنها در بازسازی پس از جداسازی فلزات از آنها وابسته است. بنابراین، بازیابی غیر مخرب بوسیله عامل های دفع ملایم و ارزان برای بازسازی زیست توده ها جهت بکارگیری در چرخه های متعدد بسیار مطلوب است [15].

بازده عامل های دافع یا شوینده، اغلب بوسیله نسبت S/L یعنی نسبت جامدات به مایعات تشریح می گردد. جامدات در این نسبت بیانگر جاذب جامد (میلی گرم وزن خشک) و مایعات بیانگر مقدار شوینده بکار رفته (به میلی لیتر) می باشد. مقادیر بالای نسبت S/L برای شست و شوی کامل و اقتصادی ساختن فر آیند بسیار مطلوب است. گاهی اوقات شست و شوی انتخابی یک فلز مورد نظر است که می تواند از طریق درک پایه ای از مکانیزم های درگیر، قابل دستیابی باشد. این مورد برای یون های فلزی که یک وابستگی مشخص به PH در اتصال به سلول های میکروبی از خود نشان داده

اند، مشاهده شده است. زدودن فلزات پیوندی را می توان با تنظیم PH انجام داد، همانگونه که در مورد *Chlorella Vulgaris* برای جداسازی مس (II)، کروم (II)، نیکل (II)، سرب (II)، روی (II)، کادمیوم (II) و کبالت (II) بوسیله کاهش PH به حدود ۲/۰ این مسئله گزارش شده است. اسیدهای معدنی رقیق، در مطالعات مختلفی به منظور حذف فلزات از زیست توده های بارگذاری شده مورد استفاده قرار گرفته اند. افزایش اسیدیته معمولاً منجر به حذف مؤثر فلزات از زیست توده ها می گردد [15].

کربنات ها و بی کربنات ها نیز برای بازیابی غیرمخرب اورانیوم و دیگر فلزات مورد استفاده قرار گرفته اند. کویوکاک (*Kuyucak*) و ولسکی (*Volesky*) اثرات شوینده های مختلف را برای جداسازی کبالت از *Ascophyllum* مورد ارزیابی قرار داده اند و تأکید کرده اند که شوینده ها نباید بر ساختمان سلولی اثر بگذارند. طبق گزارش آنها، CaCl_2 (۰/۰۵ M) در HCl بهترین شوینده ای است که قادر به جداسازی ۹۶ درصد از کبالت در PH حدود ۲ تا ۳ می باشد، ضمن اینکه هیچ تغییری در ساختمان سلولی و مواد ساختاری اش ایجاد نمی کند. درحالیکه، شوینده های دیگر شامل اسیدها، NH_4OH ، KCN ، KHCO_3 و EDTA منجر به ایجاد تغییراتی در ساختمان سلولی گردیده اند [15].

نتیجه گیری

امروزه خطر پساب های حاوی فلزات سنگین، مهم ترین مشکل زیست محیطی در سراسر جهان می باشد. بمنظور پاسخگویی به مقررات شدید زیست محیطی، طیف وسیعی از تکنولوژی ها مانند ته نشینی شیمیایی، انعقاد و لخته سازی تصفیه الکتروشیمیایی، تبادل یونی و فرآیندهای غشایی، برای حذف فلزات سنگین از پساب ها توسعه یافته اند. بر اساس بررسی های انجام شده تبادل یونی، جذب سطحی و فرآیندهای غشایی بیشتر از سایر فرآیندهای متداول، بمنظور عملیات حذف فلزات سنگین از پساب ها، مورد مطالعه قرار گرفته اند. اما در مورد جذب زیستی باید گفت که این روش به عنوان یک روش مؤثر و اقتصادی برای پساب های حاوی فلزات سنگین با غلظت های پایین، می باشد. جنبه های کاربردی زیست جاذب ها، برای بهینه سازی فرآیند جذب زیستی باید هدف قرار گیرد. برای این منظور، مدل های ریاضی، در پیشرفت کارهای تجربی و پیش بینی هایی که مورد عملکرد زیست جاذب ها در شرایط عملیاتی مختلف می شود، می تواند بسیار مفید باشد. برای افزایش کاربرد فناوری جذب زیستی در صنعت، باید برنامه ریزی هایی شود که در آن فرآیندهای احیاء زیست توده ها و سپس تبدیل فلز بازیابی شده به شکل قابل مصرف آن، توسعه یابد.

منابع و مراجع

- [1] Fu F., Wang Q., Removal of heavy metal ions from wastewaters A review , *Environmental Management*, Vol. 92, Issue 3, March 2011, Pages 407-418
- [2] Farooq U., Kozinski J. A., Khan M. A., Athar M., Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents A review , *Bioresource Technology*, Volume 101, 2001, Pages 5043–5053.
- [3] Wang J.L., Chen C., Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review, *Biotechnology*

- Advances, Volume 24, Issue 5, September-October 2006, Pages 427-451*
- [4] Wang J., Chen C., *Biosorbents for heavy metals removal and their future, Biotechnology Advances, Volume 27, Issue 2, March-April 2009, Pages 195-226*
- [5] Lawrence K. Wang, Joo-Hwa Tay, Stephen Tiong-Lee Tay, Yung-Tse Hung, *Handbook of Environmental Bioengineering, Springer Science&Business Media, volume 11, 2010, pages 375-399*
- [6] Judd S., Jefferson B., *Handbook of Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-us, Elsevier Science & Technology Books, Pages 7-9*
- [7] Wagner J., *Membrane Filtration Handbook, Practical Tips and Hints , Chemical Engineering, Second Edition, Revision 2, November 2001, Page 7*
- [8] Edward W. Wilde, John R. Beneman, *Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae, Biotechnology Advances, Volume 11, Issue 4, 1993, Pages 781-812*
- [9] Volesky B., *Biosorbents for metal recovery Review Article , Trends in Biotechnology, Volume 5, Issue 4, April 1987, Pages 96-101*
- [10] Hu M.Z.C., Norman J.M., Faison B.D., Reeves M.E., *Biosorption of uranium by Pseudomonas aeruginosa strain CSU: characterization and comparison studies, Biotechnology Bioengineering , Volume 51, Issue , July 1996, Pages 237-247*
- [11] Sag Y., Kustal T., *Biosorption of heavy metals by Zoogloearamizera: use of adsorption isotherms and a comparison of biosorption characteristics, Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, Volume 60, Issues 1-3, December 1995, Pages 181-188*
- [12] Sag Y., *Biosorption of heavy metals by fungal biomass and modeling of fungal biosorption: a review, Separation Purification Methods, Volume 30, Issue 1, 2001, Pages 1-48*
- [13] Veglio F., Beolchini F., *Removal of metals by biosorption: a review, Hydrometallurgy, Volume 44, Issue 3, March 1997, Pages 301-316*
- [14] Volesky B., *Biosorption of fungal biomass, In: Volesky B (ed) Biosorption of heavy metals. CRC, Boca Raton, FL, 1990, pp 139-171*
- [15] Das N., Vimala R., Karthika P., *Biosorption of Heavy Metals: an Overview, Indian Journal of Biotechnology, Volume 7, APRIL 2008, pages 159-169*
- [16] Rani Gupta, Prerna Ahuja, Seema Khan, R. K. Saxena, Harapriya Mohapatra *"Microbial biosorbents Meeting challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions Review article", Current Science, Volume 78, Issue 8, 25 APRIL 2000, 967*