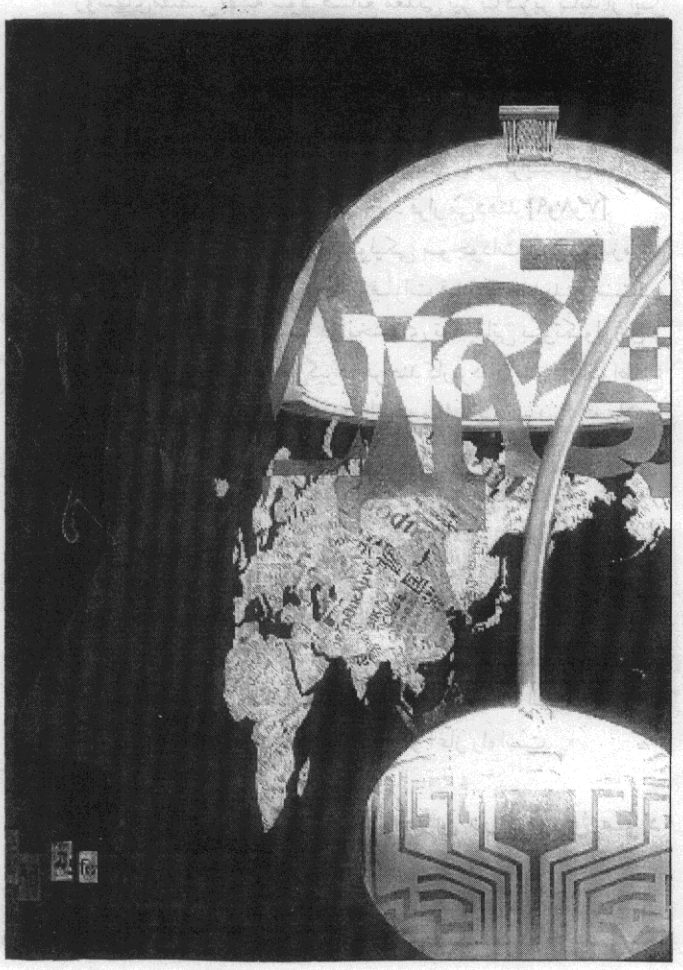
# نقش بیوتکنولوژی در فراوری مواد معدنی و متالوژی استخراجی

**دکتر احمدرضا شاهوردی**
عضو کمیسیون بیوتکنولوژی



نیاز روزافزون به مواد اولیه، کاهش ذخایر معدنی با عیار بالا، ضرورت مصرف بهینه انرژی و رعایت دقیق معیارهای زیست‌محیطی، بروز تحولاتی در عرضه فراوری مواد معدنی و استخراج فلزات را به‌دنبال داشته است[۱]، اهم این تحولات عبارت است از:

ـ توسعه فن‌آوریهای جدید برای فراوری منابع معدنی کم‌عیار و یا منابعی که روشهای معمول، کارایی لازم را درمورد آنها نداشته و یا ملاحظات اقتصادی، امکان استفاده از آنها را نمی‌دهد. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه فرهنگی کشورها، مصرف محصولات فلزی شتاب زیادی به خودگرفته است. این امر سبب بروز مشکلات جدی در تولید فلزات شده است، چون ذخیره بسیاری از منابع معدنی فلزی با عیار بالا بسرعت درحال تمام شدن است، آنچه باقی مانده است کانیهای مخلوط یا کانیهای با عیار پایین فلز و همچنین باطله‌های سنگ معدن است که امروزه به‌ناچار مورد توجه زیادی قرار گرفته است. مثلاً در مورد فلز مس، در طول قرن گذشته فقط معادن مسی ازنظر اقتصادی قابل‌استخراج بودند که دارای ۱۰/ یا بیشتر فلز مس باشند، چنانچه عیار مس کمتر از ۳٪ باشد، استخراج آن با روشهای استاندارد متداول، اقتصادی نیست. در مورد این کانیها و همچنین کانیهای با عیار پایین سایر فلزات، نیاز به روشهای مقرون به‌صرفه‌تری است.

ـ توجه به بازیابی مواد از ضایعات جانبی صنایع مختلف و جلوگیری از به‌هدر رفتن منابع اولیه در فرایندهای مختلف معدنی و متالوژی، محور دیگر این تحولات است. امروزه حجم عظیم مواد زاید، بعنوان منبعی برای تأمین مواد صنعتی مطرح است. فرایندهای موثر جذبی برای بازیافت یونهای فلزی از پساب فرایندهای مختلف صنعتی، حاصل تلاشهای علمی و صنعتی در این رابطه است [۳و۲].

ـ توسعه روشهایی برای کاهش آلودگیهای زیست‌محیطی که منشأ آنها گازهای خروجی یا پسابهای سمی فرایندهای مختلف شیمیایی است. پاره‌ای از این روشها عبارت است از: جذب و خنثی‌سازی فلزات سنگین از پسابهای صنعتی [۴]، تجزیهٔ ترکیبات آلی آلوده‌کنندهٔ محیط در مواد زاید و پسابها و کاهش گوگرد درسوختهای فسیلی مورد استفاده در نیروگاههای حرارتی [۶و۵].

**پیشرفتهای اخیر در بیوتکنولوژی موجب شده است ابزار نیرومندی در فراوری مواد معدنی و هیدرومتالوژی و حل مسایل زیست‌محیطی این صنایع دراختیار انسان قرار گیرد.**

ـ مصرف بهینه انرژی. با توجه به بحران انرژی در جهان، در تمامی صنایع تلاش براین است که انرژی مصرف‌شده به روشهای‌مقتضی بهینه شود. صنایع معدنی نیز ناگزیر باید از این سیاست کلی‌حاکم بر صنایع پیروی کند.

میکروارگانیسمها برای سوخت‌وساز و انجام فرایندهای حیاتی خود از منابع آلی و معدنی موجود در محیط تغذیه می‌کنند، از این‌رو واکنشهای‌مختلف‌شیمیایی وشیمی فیزیکی را در فرایندهای مختلف طبیعی[1] یا مصنوعی[2] تحت تاثیر خود قرار می‌دهند [۹و۸و۷].

کاربرد مثبت واکنشهای متابولیکی موجودات زنده در زمینه فراوری مواد معدنی و استخراج فلزات قلمرو جدیدی است‌که تحقیقات پیرامون آن بیشتر در بخشهای تحقیقاتی بیوتکنولوژی و میکروبیولوژی صورت می‌گیرد، هرچند کاربرد آن بدون آنکه اطلاع دقیقی از مکانیسم آن وجود داشته باشد به قرن ۱۶ میلادی میرسد[۱۰].

پیشرفتهای اخیر در بیوتکنولوژی موجب شده است ابزار نیرومندی در فراوری مواد معدنی و هیدرومتالوژی و حل مسایل زیست‌محیطی این صنایع دراختیار انسان قرار گیرد. پاره‌ای از کاربردها نظیر تقویت و بهبود بازدهی فرایندهای اکسیداسیون فروشویی[3] کانیهای کم‌عیار سولفیدی طلا یا کانسنگهای اکسیدی اورانیم، امروزه در مقیاس صنعتی به‌کار گرفته شده است [۱۱]، اما تحقیق در بسیاری از زمینه‌های دیگر در آغاز راه است.

## کاربردهای مختلف بیوتکنولوژی در فراوری مواد معدنی و استخراج فلزات

شکل یک کاربردهای بیوتکنولوژی را در فراوری مواد معدنی نشان می‌دهد، این کاربردها عبارت است از:

### استفاده از میکروارگانیسمها در کانه‌آرایی و تولید کنستانتره

میکروارگانیسمهایی در طبیعت وجود دارند که ضمن داشتن بار الکتریکی منفی بشدت آب‌گریزند. به‌همین‌دلیل می‌توان از آنها برای تغلیظ بعضی از مواد معدنی استفاده کرد. مطالعه انجام‌شده در بخش معدن دانشگاه نوادا نشان داده است که گونه‌هایی از میکروارگانیسمها برای رسوب‌دهی قسفات و ذرات ریز ذغال و هماتیت در روش جداسازی قابل‌استفاده هستند[۱۲]. به‌عنوان مثال با استفاده از ۱۰ میلی‌گرم میکروارگانیسم به ازای هر کیلوگرم مواد جامد معلق در آب، زمان رسوب‌دهی برای ذرات قسفات با شرایط یکسان، از ۴۵ دقیقه به حدود ۴ دقیقه کاهش می‌یابد [۱۳]. آزمایشهای دیگری نشان داده است که میکروارگانیسمها می‌توانند به‌صورت انتخابی، ذرات ریز ذغال را در مخلوطی از خاکستر و پیریت رسوب دهند، بدین‌ترتیب محتوای گوگرد و ذغال کاهش می‌یابد. همچنین میکروارگانیسمها در شناورسازی[4] به‌عنوان تجمع‌دهنده و یا تصحیح‌کننده شناورسازی نقش بهینه‌سازی دارند، برای مثال مایکوباکتریم‌فمی[5] در شناورسازی ذغال باکاهش فعالیت پیریت عملاً بازدهی شناورسازی برای ذغال را بهبود می‌بخشد. اکسیده‌کردن سطح ذرات و افزایش جذب سطحی آنها از عوامل موثر در شناورسازی بیولوژیک است [۱۴].

### استفاده از میکروارگانیسمها در تجزیه مواد آلی ناشی از پسابهای واحدهای کانه‌آرایی و هیدرومتالوژی

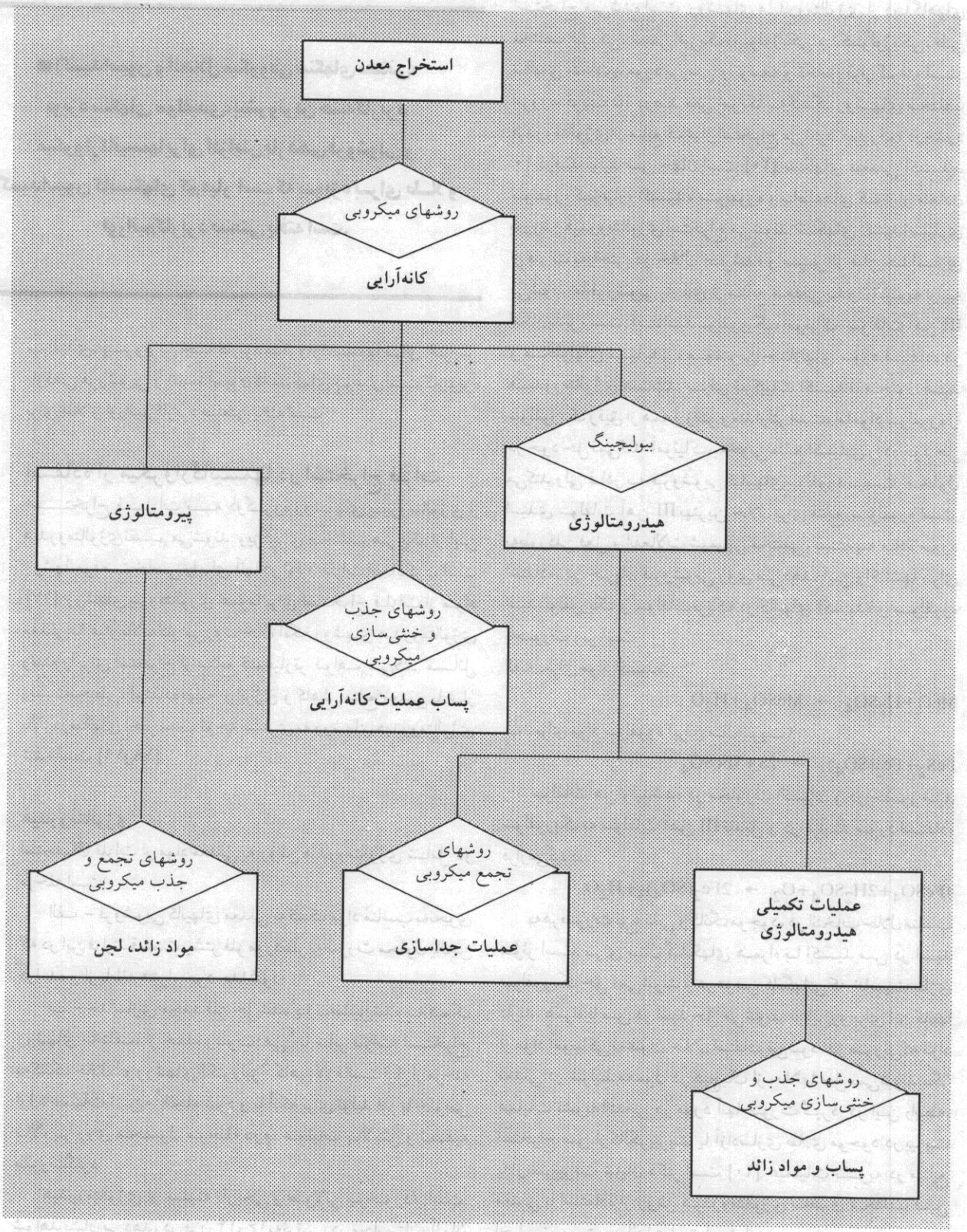
آبهای خروجی واحدهای کانه‌آرایی و هیدرومتالوژی، حاوی ترکیبات آلی است، که طی فرایند مورد استفاده قرار گرفته است. این ترکیبات متناسب با ماهیتشان درجهٔ سمیتشان متفاوت است، برای مثال می‌توان از سیانور که برای محلول‌سازی طلا به‌کار گرفته می‌شود، نام برد. تاثیر بعضی از میکروارگانیسمها و یا آنزیمهای ترشح‌شده از آنها در تجزیه سیانیدهای آزاد، کاربرد موثری در بهبود وضعیت زیست‌محیطی پسابهای سیانیدی تولیدشده از واحدهای هیدرومتالوژی فلزات گرانقیمت دارد[۱۵].

### جذب و استخراج بیولوژیکی یونهای فلزی از محلولها، بویژه محلولهای رقیق

بعضی از موجودات قادرند یونهای فلزات سنگین را در محلولهای رقیق جذب کنند، بدین‌ترتیب جذب این یونها بر روی سطح آنها و سپس خارج‌سازی آنها از محلول، مترادف با جداسازی این فلزات است. جذب یونهای سرب [۱۶] به‌وسیله دسته‌ای از جلبکها نمونه‌هایی از این موارد است. این روش به‌خوبی برای جداسازی فلزات از پسابهای صنعتی حاصل از فرایندهای شیمیایی یا محلولهای حاصل از فرایندهای هیدرومتالوژی به‌کار می‌رود [۳و۲].

### استفاده از میکروارگانیسمها در افزایش بازدهی فروشویی و اکسیداسیون

اکسیداسیون و انحلال میکروبی سنگهای معدنی، بویژه سنگهای




شکل ۱ کاربردهای بیوتکنولوژی در فراوری موادمعدنی و استخراج فلزات[۱۷]

**■ اکسیداسیون و انحلال میکروبی سنگهای معدنی، بویژه سنگهای سولفیدی، پیشروترین جنبه‌کاربرد میکروارگانیسمها برای افزایش بازدهی فروشویی و اکسیداسیون کانسنگهای کم‌عیار است که بویژه برای طلا و اورانیم کاربرد صنعتی یافته است.**

سولفیدی، پیشروترین جنبه کاربرد میکروارگانیسمها برای افزایش بازدهی فروشویی و اکسیداسیون کانسنگهای کم‌عیار است که بویژه برای طلا و اورانیم کاربرد صنعتی یافته است.

## استفاده از میکروارگانیسمها در استخراج فلزات

استخراج فلزات به دوگروه روشهای پیرومتالوژی و هیدرومتالوژی‌تقسیم می‌شوند. ویژگیهای مختلف هر یک از این روشها، موقعیت‌خاصی را برای آنها در تولید فلزات ایجاد کرده است [۱۷]. روشهای پیرومتالوژی عموماً برای استخراج فلزات از مواد معدنی با عیار بالابه‌کار می‌رود، حال آنکه روشهای هیدرومتالوژی زمینه را برای استخراج از منابع کم‌عیارتر فراهم می‌کند. مسائل زیست‌محیطی، استفاده بهینه از انرژی و کاهش منابع معدنی با عیار بالا، درسالهای اخیر سبب توجه بیشتری به روشهای هیدرومتالوژی شده است [۱۹و۱۸].

### هیدرومتالوژی

استحصال فلزات از مواد معدنی به روش هیدرومتالوژی شامل دو مرحله است:

الف – فروشویی کانیهای معدنی به‌کمک مواد مناسب به‌نحوی که در این فرایند قسمت بیشتر فلز موردنظر به‌صورت محلول یالجن درآمده و از باطله همراه خود جدا شود؛

ب – جداسازی مجدد فلز حل‌شده یا ته‌نشین‌شده به‌کمک روشهای مختلف، از جمله رسوب‌دهی[6] با سایر فلزات؛ استخراج به‌کمک حلال[7] و روشهای الکترولیز[8]. گاهی لازم است قبل از مرحله اول، عملیات تشویه[9] انجام شود و یا آنکه برای تولید فلز با خلوص بالا، بر روی محصول مرحله دوم، عملیات پالایش و تصفیه صورت‌گیرد.

هیدرومتالوژی از پیشینه تاریخی و طولانی برخوردار است. شواهد نشان می‌دهد، در قرن ۱۴، ۱۶ به‌ترتیب در مجارستان، آلمان و اسپانیا، با استفاده از روش هیدرومتالوژی، در مقیاس وسیعی مس استخراج می‌شده است. روشهای هیدرومتالوژی از دیدگاههای مختلف فیزیکی، شیمی فیزیک، بیولوژیکی و تکنولوژیکی، طی سالهای متمادی، مورد بررسی و توسعه و تکامل قرار گرفته است. امروزه، قریب ۱۵ درصد مس آمریکا به‌کمک روشهای مختلف هیدرومتالوژی از منابع کم‌عیار استخراج می‌شود. این رقم، درحدود ۱۰ درصد تولید مس جهان است [۲۰]. سنگهای معدنی اکسیده، سولفوره کم‌عیار، اکسیده سولفوره و باطله‌های کم‌عیار معادن به‌روش هیدرومتالوژی استخراج می‌شوند. سنگهای اکسیدهٔ بسیاری از فلزات به‌راحتی در حلال حل‌شده و سپس از فلز جداسازی می‌شود، اما فروشویی پاره‌ای از منابع معدنی بدون تشویه اولیه امکان‌پذیر نیست. آب، اسیدسولفوریک، آمونیاک، سولفات آهن III و محلولهای سیانیدی، مهمترین حلالهای مورد استفاده در هیدورمتالوژی هستند. برای ترکیبات اکسیده، محلول اسید سولفوریک رقیق از همه ارزانتر و متداولتر است، اما مواد سولفوره را در خود حل نمی‌کند. آمونیاک، به‌خوبی منابع اکسیدی را درخود حل می‌کند ولی قادر به فروشویی کانیهای‌سولفوره نیست. محلول اسیدی سولفات آهن III بهترین حلال برای منابع سولفوره است. به‌طورکلی فعل و انفعالات شیمیایی مختلفی، بسته به ماده مورد استفاده، در جریان فروشویی روی می‌دهد، این واکنشها برای اسیدسولفوریک و سولفات‌فریک در کانیهای اکسیده و سولفوره به‌صورت زیر است:

الف ـ برای مواد اکسیده:

$$MeO+H_2SO_4 \rightarrow MeSO_4+H_2O$$

ب ـ برای مواد سولفوره (برای مثال پیریت):

$$FeS_2+Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2S+3FeSO_4$$

سولفات‌آهن‌تولیدشده در مجاورت اکسیژن و در حضور اسید سولفوریک به سولفات آهن III تبدیل و در فرایند مورد استفاده قرارمی‌گیرد.

$$4FeSO_4+2H_2SO_4+O_2 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3+H_2O$$

به‌هرصورت نوع کانی و گانگ موجود، در انتخاب حلال مناسب مؤثر است. برای مثال گانگهای همراه با اکسید مس در اسید سولفوریک حل نمی‌شوند و درعوض گانگهایی که خاصیت بازی دارند، همراه با مس در اسید حل می‌شوند. از این‌رو برای این کانیها از مواد آمونیاکی به‌عنوان حلال استفاده می‌شود. در صورتی‌که مواد معدنی در شرایط معمول در هیچ‌یک از حلالها حل نمی‌شوند مگر عملیات تشویه ابتدایی در مورد آنها صورت گیرد. در این رابطه، استخراج مس از کالکوپیریت یا آزادسازی طلای موجود در پیریت یا آرسنوپیریت شایان ذکر است [۲۰]. عملیات تشویه در منابع معدنی با استفاده از روش هیدرومتالوژی به‌طرق مختلف قابل اجراست، مهمترین آنها عبارت است از:

۱ـ تشویه حرارتی؛ درحضور اکسیژن یا هوا که عمل تشویه با

استفاده از حرارت انجام می‌شود؛

۲ـ تشویه سولفاتی؛[10] در این روش کانی به سولفات تبدیل می‌شود که در آب یا اسید قابل‌حل است؛

۳ـ تشویه کلریدی؛ در این روش عملیات تشویه در نتیجه فعل و انفعالات پیچیده‌ای که پس از اضافه کردن نمک طعام، در درجه حرارت ۵۵۰°C تا ۶۰۰°C، رخ می‌دهد، کلریدهای قابل‌حل به‌دست می‌آید تا شرایط برای ادامهٔ عملیات استخراج مهیا شود [۲۱]؛

۴ـ روش جایگزینی که به‌تازگی برای انحلال کانیهای غیر قابل حل مورد توجه قرار گرفته است، انجام عملیات در فشارهای[11] بسیار بالاست [۲۳و۲۲]. در این روش با افزایش فشار و درجه حرارت، سرعت فعل و انفعالات شیمیایی که به حل‌شدن ماده می‌انجامد، افزایش می‌یابد. معمولاً عملیات در فشار ۱۶۰ اتمسفرو در درجه حرارت ۲۰۰°C انجام می‌شود. به‌طورکلی روشهایی نظیر تشویه حرارتی، سولفاتی و کلریدی ولیچینگ تحت‌فشار که برای کانیهای غیر قابل حل مورد استفاده قرار می‌گیرند، ضمن آنکه روشهای آلوده‌کننده محیط‌زیست هستند، به سرمایه‌گذاری و تجهیزات بسیارپیشرفته‌ای نیازمندند. از این‌رو فرایندهای اکسیداسیون میکروبی که طی آن عملیات فروشویی عناصر و ترکیبات غیرقابل‌حل در شرایط اتمسفری و درجه حرارت محیط صورت می‌گیرد، جایگزین بسیار خوبی قلمداد می‌شود[۲۴].

**اکسیداسیون وفروشویی زیستی**

به‌کارگیری میکروارگانیسمها برای تسریع واکنشهای موردنظر در فروشویی که درنهایت با اکسیداسیون کانیهای فلزی به آزادسازی آنها منجر می‌شود، فروشویی زیستی[12] نامیده می‌شود. مزایای این روش نسبت به روشهای دیگر عبارت است از:

ـ اثرات زیست‌محیطی به‌مراتب کمتر بر روی منابع آبی یا هوا؛

ـ نیاز کمتر به انرژی؛

ـ انجام واکنشها در شرایط معمولی اتمسفر و درجه حرارت نسبتاً پایین؛

ـ عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و درنتیجه سرمایه‌گذاری کمتر.

محدودیتهای عمده به‌کارگیری این روش از لحاظ مهندسان شاغل در بخش معدن، به دانش فنی و آگاهی وسیع و عمیق مبانی بیوتکنولوژی نیاز دارد. برای نمونه دست‌اندرکاران پروژه‌های پژوهشی در این زمینه، باید از مبانی میکروب‌شناسی، بیوشیمی و بیوتکنولوژی اطلاع کافی داشته باشند.

از آنجایی که میکروارگانیسمهای موثر در فرایند اکسیداسیون در خاکها و آبهای مناطق معدنی یافت می‌شود، فرایند فروشویی‌زیستی به‌طور طبیعی نیز اتفاق می‌افتد. اسیدی بودن آبهای جاری در معادن مس، ریشه در فعالیت همین میکروارگانیسمها دارد. اولین یافته‌ها در این مورد، بدون اطلاع کافی از اصول قوانین و حتی

**■کاربرد مثبت واکنشهای متابولیکی موجودات زنده در زمینه فراوری مواد معدنی و استخراج فلزات قلمرو جدیدی است که تحقیقات پیرامون آن بیشتر در بخشهای تحقیقاتی بیوتکنولوژی و میکروبیولوژی صورت می‌گیرد.**

نقش میکروارگانیسم، به قرن شانزدهم میلادی در آلمان برمی‌گردد. بعدها در قرن ۱۸ و ۱۹ نیز مواردی از نقش میکروارگانیسمها در مورد استخراج فلز مس از کانیهای سولفوره مشاهده شد و در سال ۱۹۴۷ برای نخستین‌بار میکروارگانیسمهای موثر در فرایند اکسیداسیون میکروبی شناخته شد، سپس اولین اختراع در زمینه استفاده از این میکروارگانیسمها در دهه ۱۹۵۰ در آمریکا به ثبت رسید [۱۰].

## ملاحظات اقتصادی و مقایسه تکنولوژیکی اکسیداسیون میکروبی نسبت به سایر روشها

در حقیقت عامل اصلی انتخاب یک فن‌آوری جدید در مقیاس صنعتی، نسبت به فن‌آوریهای مشابه، مزیتهای اقتصادی است. برتریهای موجود سبب گسترش کاربرد یک فن‌آوری از مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به مقیاس صنعتی می‌شود و حتی آن فن‌آوری را در مسیر جایگزینی روشهای موجود قرار می‌دهد. از این‌رو روشن‌شدن مزیتهای اقتصادی روشهای فروشویی میکروبی، قابلیت کاربرد و گسترش آن‌را در آینده روشن می‌کند.

بررسیهای اقتصادی روشهای استخراج میکروبی از عوامل و ملاحظات محلی تاثیر می‌پذیرد، بنابراین برای هر مورد خاص پس از مطالعات اختصاصی می‌توان گفت که چه روشی نسبت به روشهای مشابه از نظر اقتصادی بهتر است. هزینه‌های اقتصادی روشهای میکروبی به دو گروه سرمایه‌گذاری ثابت و هزینه‌های بهره‌برداری تقسیم می‌شود. سرمایه‌گذاری ثابت مجموعه‌ای از هزینه‌های مربوط به ساخت سازه‌ها، تجهیز ماشین‌آلات و خدمات ثابت موردنیاز را دربرمی‌گیرد. هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه‌های مواد اولیه و مصرفی، انرژی و نیروی انسانی و... است.

**سرمایه‌گذاری ثابت**

سرمایه‌گذاری ثابت برای احداث یک واحد فروشویی میکروبی

به‌ترتیب زیر افزایش می‌یابد:

ـ توده‌ای؛

ـ انباشته‌ای و عبوری؛

ـ راکتورهای متلاطم.

در فروشویی میکروبی در راکتور، بررسیهای اقتصادی باید مبین برتری اقتصادی آن نسبت به روشهای رقیب (اکسیداسیون تحت‌فشار و تشویه حرارتی) باشد. درمورد آن گروه از منابع معدنی که از روشهای توده‌ای، انباشته‌ای، عبوری و در محل استفاده می‌شود، استفاده از فروشویی میکروبی با رقابت جدی از سوی روشهای دیگر روبرو نیست.

در فرایند فروشویی میکروبی در راکتور در مقیاس صنعتی تجهیزاتی از قبیل: تانکها و مخازن مجهز به تیغه‌های همزن و سیستم مکانیکی مربوط، دمنده‌های هوا، صافی برای جداسازی مایع از جامد، پمپهای انتقال و سایر وسایل کنترل لازم است.

در مقابل در روش اکسیداسیون تحت‌فشار به لوله‌های تحت‌فشار، پمپهای مخصوص، سیستمهای ایمنی و کنترل پیشرفته و تأسیسات تولید اکسیژن نیاز است. در روش اکسیداسیون تحت فشار، تهیه اکسیژن خالص ضروری است که این امر سبب سرمایه‌گذاری بیشتر می‌شود. درمورد تشویه، به کوره با بستر سیال و از همه مهمتر سیستمهای تصفیه دود و جلوگیری از خروج گازهای گوگرد به محیط نیاز است. درمجموع، روش اکسیداسیون میکروبی به سرمایه‌گذاری ثابت کمتری برای تجهیزات نیاز دارد تا دو روش دیگر.

موادی که در ساخت تجهیزات، از جمله مخازن در روش اکسیداسیون میکروبی، استفاده می‌شود باید در مقابل اسید و درجه حرارت ۳۰°C تا ۴۰°C مقاوم باشد. این مواد انواع فولادهای ضدزنگ، لاستیک ضداسید، بتون و... است که به مقدار زیادی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین طبیعی است که هزینه‌های ساخت در روشی که در درجه حرارت و فشار بالا انجام نمی‌شود به‌مراتب کمتر از روشهای دیگر است.

واحدهای جانبی مختلفی در هر فرایند صنعتی وجود دارد، برای مثال در واحدهای تشویه از خروج گازهای فرایند به اتمسفر باید جلوگیری شود، از این‌رو غلظت عناصر و گازهای سمی در گازهای خروجی باید به سطح استانداردهای زیست‌محیطی برسد. در روش تشویه، تولید اسیدسولفوریک از گازهای SO2 و SO3 خروجی، به‌عنوان یک واحد جنبی در کنار کارخانه درنظر گرفته می‌شود، همین امر باعث افزایش سرمایه‌گذاری ثابت یک واحد تشویه می‌شود، باتوجه به اینکه در بسیاری از نقاط، بازار قابل اطمینانی برای اسیدسولفوریک تولیدی در واحدهای تشویه وجود ندارد. بنابراین پیش‌بینی مخازن نگهداری اسید نیز ضروری است. در مورد فرایند اکسیداسیون تحت فشار، به‌دلیل نیاز به اکسیژن خالص در فرایند، استقرار واحد تولید اکسیژن ضروری است. در غیراین‌صورت اکسیژن باید از منابع دیگری تامین شود که عملاً دستیابی به آن در بسیاری از نقاط معدنی دشوار است. روش فروشویی میکروبی به واحدهای جنبی کمتری نیاز دارد. اکسیژن و دی‌اکسیدکربن به‌راحتی از هوا تأمین می‌شوند. نیروی الکتریکی لازم برای همزنها و کمپروسورهای هوا و پمپها، نیازمند احداث نیروگاه در کنار واحد نیست. پسابهای خروجی نیز پس از جداسازی فلز، با افزودن موادی نظیر آهک، هیدروکسیدسدیم و پتاسیم خنثی می‌شوند.

اما در روش اکسیداسیون میکروبی، وسعت عملیات ساختمانی و سازه‌ای مثل ساخت مخازن و استخرها از دو روش دیگر بیشتر است و در نتیجه سرمایه‌گذاری ثابت در این بخش افزایش می‌یابد.

کنترل واحدهای استخراج میکروبی، محدود به کنترل درجه حرارت (در محدوده حرارتی پایین)، کنترل PH محلولی که اکسیژن در آن حل‌شده و یا غلظت بعضی از یونهاست، بنابراین، سیستم کنترل در این واحد از پیچیدگی کمتری برخوردار بوده و درنتیجه سرمایه‌گذاری در آن نیز کمتر است.

## هزینه‌های بهره‌برداری

درصورتی‌که قیمت مواد اولیه و کنستانتره در سه روش فوق یکسان درنظر گرفته شود، هزینه‌های بهره‌برداری در سه روش مذکور تا حدودی با یکدیگر قابل‌مقایسه هستند. هرچند میزان انرژی موردنیاز در روش میکروبی به‌مراتب کمتر از دو روش دیگر است اما طولانی بودن مدت‌زمان عملیات، سبب توازن هزینه‌های انرژی مربوط به این سه روش می‌شود. هزینه‌های تعمیر، نگهداری و استهلاک، به‌دلیل سادگی تجهیزات روش میکروبی و شرایط کارکرد غیربحرانی نیز، از دو روش دیگر کمتر است. سادگی روش و تجهیزات، نیاز به مهارت و نیروی‌انسانی کمتری را فراهم می‌سازد. در هزینه‌های بهره‌برداری، عوامل محلی نظیر قیمت انرژی، موقعیت منطقه و وضعیت دستمزد بسیار موثر است.

درمورد اکسیداسیون میکروبی برخلاف دو روش دیگر، محصولات جانبی قابل‌فروش نظیر اسیدسولفوریک و تری‌اکسیدآرسنیک که در روش تشویه تولید می‌شود، وجود ندارد، زیرا بازیافت مواد از پسابهای خروجی در روش فروشویی‌میکروبی تاکنون از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبوده است. اسیدسولفوریک تولیدشده در این روش نیز از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. در جدول یک، سرمایه‌گذاری ثابت و هزینهٔ بهره‌برداری در ظرفیت ۱۵۰ هزار تن درسال، برای سه روش مختلف مقایسه شده است. برای نتیجه‌گیری نهایی از این بخش می‌توان گفت: سرمایه‌گذاری ثابت در روش میکروبی به‌مراتب کمتر از دو روش دیگر است. در

مقایسه با روش اکسیداسیون تحت فشار، هزینه بهره‌برداری اکسیداسیون میکروبی کمتر است. در پایان شایان ذکر است که این بررسیها جنبه عمومی ندارد، بلکه برای هر موقعیت براساس نتایج به‌دست آمده در مقیاس نیمه‌صنعتی باید برای احداث یک واحد صنعتی مورد ارزیابی و محاسبه قرار گیرد.

**جدول ۱ـ مقایسه سرمایه‌گذاری ثابت و هزینه‌های بهره‌برداری، روش فروشویی‌زیستی و اکسیداسیون تحت‌فشار و تشویه‌حرارتی در ظرفیت ۱۵۰ هزارتن**

| | بیولیچینگ | اکسیداسیون تحت‌فشار | تشویه |
|---|---|---|---|
| سرمایه‌گذاری ثابت (میلیون دلار) | ۳/۷۸ | ۷/۴۸ | ۴/۸۹ |
| هزینه‌های بهره‌برداری (دلار بر تن) | ۴۳/۰۹ | ۴۲/۷۹ | ۵۵/۹۰ |

■

## یادداشتها

1- Natural
2- Artificial
3- Leaching
4- Floatation
5- My Cobacterium Femi
6- Cementation
7- Solvent Extraction
8- Electrowinning
9- Roasting
10- Sulphating Roasting
11- Pressure Leaching
12- Bioleaching

## مراجع


1- Smith, R. W., Misra, M. and Dubel, J., (1991), Mineral bioprocessing and future, *Minerals Engineering*, Vol 4, No.s 7-11,1127-1141.

2- Townsley, C.C., Ross, I.S. and Atkins, A.S., (1985) Biorecovery of metallic residues from Various industrial effluent using filamentons fungi, *Fundemental and Applied Biohydrometallurgy*, Proceeding of the Sixth International Symposium on Biohydrometallurgy. Vancover, Canada, 279-291.

3- Brierley, J.A., Brierley,C.L. and Goyak, G.M,AMT-Bioclaim: A new wastewater treatment and metal recorery technology, *Ibid*, 291-305.

4- Cruseberye, T.C and Baker, E.F., (1991) *Biological processing* , 3:91-97.

5- Olsson,G., (1982) Licentiate thesis , Department of chemical Engineering, University of lund Sweden.

6-Beyer, M. Ebner,H.G.and klein,J.,(1985) Bacterial desulfurization of German hard coal. *Fundemental and Applied Biohydrometallurgy,* procceding of the sixth international symposium on biohydrometallurgy,Vancover, Canada,151-165.

7- Gorbani,M.,(1992)Third International of Corrission, 40-51,Tehran.

8-William ,R.E.Ziamek,E.and Martin,W.G.,(1986) *NACE,* 184-190.

9- Licinia, G.J.and Cubicciote ,D., (1989) *JOM,* 41 (1), 23-27.

10-Torma, A.E. (1988) *Leaching of metals,* P.367-400.In H.J.Rehm,and G.Reed. Biotechnology Vol.66, Special microbial processes.VCH.Germany.

11-Brierly, J.A.,(1990)Biotechnology for the extractive metals industries, *JOM,* 42(1),28-300.

12- Dubel,J.(1990)Report no 234, University of Nevada.

13- Finnetrly, W.R., (1988) Interfacial phenomena inbiotchnology and material processing, Elsevierpublication,pp 75-88.

14- Chen,C., Skidomoro, D,R.,(1987) Flocculation in Biotechnology and Separation System Symposium,Elsevier Science publication, 415-420.

15- Whetloch,J.,(1989) *JOM,* 41(12), 46-49.

16- Becker,E.W,(1983) *Water reasearch Journal,* Vol 117, 459-466.

17- Habashi, F.,(1980) principles of extractive metallurgy, vol 1, 2. Science publication.

18- Petters,E., (1992) Hydrometallurgy, 29,431-459.

19- Shon, H.y. and Cho, W.D.,(1993) *JOM,* 45(2),40-44.

20- Brierley,C.L.,(1978) Bacterial Leaching, CRC Crit Rev microbial., 6:207-262.

21- Thomas,K.C.,(1991) *JOM,* 43(2),16-19.

22- Mason,D.G., (1990) *JOM,* 42(9) 15-18.

23- Barrett, J. Hughes, M.N., Karavaiko,G,I. and Spencer,p.A., (1993) Metal Extraction by Bacterial Oxidation of Minerals, published by Ellis Horwood Limited.

24- Barrett,J., Hughes, M.N.,Karavaiko,G.L., and Spencer,P.A. (eds),(1993)Metal extraction by bacterial oxidation of minerals,Ellis-Horwood,New Yourk 50-55.