

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

معدنکاری زیستی

دی. ای. رالینگز

دی. بی. جانسون

مترجم: دکتر علی اکبر رحمانی

عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

سرشناسه	: رولینگز، داگلاس ای، Rawlings, Douglas E.
عنوان و نام پدیدآور	: معدنکاری زیستی / دی.ای. رالینگز، دی. بی. جانسون؛ مترجم علی اکبر رحمانی.
مشخصات نشر	: فروین: الای اندیشه، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۲۵۸ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۱۶۵۰۰۰ ریال: 978-600-94820-6-1
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Biomining, c2007.
موضوع	: مواد معدنی -- تکنولوژی زیستی
شناسه افزوده	: جانسون، باری دی.
شناسه افزوده	: Johnson, B. D. (Barrie D.)
شناسه افزوده	: رحمانی، علی اکبر، ۱۳۳۱ - مترجم
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ م ۶/۳/۲۶۸۸ TN
رده بندی دیویی	: ۶۶۹/۰۲۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۶۳۳۲۰۰

عنوان: معدنکاری زیستی

مترجم: علی اکبر رحمانی

ویراستار: شهره کریمی

ناشر: فروین: الای اندیشه

طراح جلد: مهندس کمیل رحمانی

چاپ اول: پاییز ۱۳۹۳

لینوگرافی چاپ و صحافی: سعیدی / قم

تیراژ: ۵۰۰

قیمت: ۱۶۵۰۰۰ ریال

پیشگفتار

معدنکاری زیستی (biomining)، اصطلاح کلی است که فرآوری کانه‌های حاوی فلزات و کنسانتره‌ها را با استفاده از (ریز) فناوری زیست‌شناختی توضیح می‌دهد و ناحیه‌ای از زیست‌فناوری (biotechnology) است که از سالهای ۱۹۶۰ تا کنون، وقتی که برای اولین بار در سنگ‌های باطله‌ای اساساً مهندسی‌شده جهت بازیافت مس از کانه‌هایی که فلز بسیار کمی داشتند و نمی‌توانستند توسط ذوب رایج فرایند شوند، مورد استفاده قرار گرفت، از نظر مقیاس و کاربرد، رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. تخلیص‌های طراحی مهندسی عملیات معدنکاری زیستی تجاری با درک عوامل زیست‌شناختی که فرایند را اداره می‌کنند، به صورت موازی پیشرفت کرده‌اند در نتیجه، اکنون معدنکاری زیستی، ناحیه‌ی چندشکلی علوم کاربردی است که اپراتورها و پژوهشگرانی در رشته‌های مختلف آن، شامل زمین‌شناسی، مهندسی شیمی، ریززیست‌شناسی و زیست‌شناسی مولکولی، کار می‌کنند. این امر، در محتوای کتاب، از مقالات افراد متخصص در صنعت و دانشگاه‌ها، که همگی از پژوهشگران طراز اول در رشته‌های مربوطه می‌باشند، منعکس گردیده است.

معدنکاری زیستی، به عنوان جایگزین روشهای فیزیکی - شیمیایی مرسوم کانه آرایی در انواعی از نواحی مهم، کاربرد ویژه‌ای دارد که شامل نهشت‌هایی می‌شود که در آن جا، مقادیر فلزات پایین هستند، حضور عناصر معین (برای مثال آرسنیک) به ذوب آسیب می‌رسانند، یا ملاحظات زیست‌محیطی، عملیات زیست‌شناختی را ترجیح می‌دهند. عملیات معدنکاری زیستی در مقیاس تجاری، به جز اروپا، در قاره‌های دیگر برقرار شده‌اند. در کشور فنلاند، اخیراً تحقیقات پیش‌تجاری (در مقیاس نیمه‌صنعتی)، جهت بررسی امکان استخراج نیکل و مس از کانه‌های فلزی کمپلکس، در انباشته‌های مهندسی شده، برقرار شده است. مس از طریق معدنکاری زیستی با موفقیت استخراج شده است، کانه‌ها و کنسانتره‌های فلزات پایه‌ی دیگر (از قبیل کبالت) و فلزات قیمتی (عمدتاً طلا)، نیز با استفاده از این زیست‌فناوری فرایند شده‌اند.

توسعه‌ها و تخلیص‌های عملیات مهندسی در معدنکای زیستی، در بهبود بازدهی بازیافت فلز، مهم تلقی می‌گردند. کاربرد شستشوی کپه‌ای (heap leaching)، در کانه آرایي در حال گسترش است در حالیکه این فرایند زمانی فقط به فرایند مس محدود می‌شد. تجربه‌ی قابل ملاحظه‌ای در کاربرد کپه‌ها برای بازیافت طلا در ذخایر کارلین ترند (Carlin Trend) آمریکا، به دست آمده است. همچنین در سالهای اخیر شستشوی کپه‌ای در مقیاس صنعتی با رویکرد متفاوتی (فرایند GEOCOAT) به کار برده شده است که در این کتاب، توضیح داده می‌شود. رویکرد مهندسی عمده‌ی دیگری که در معدنکاری زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد - کاربرد زیست‌واکنشگرهای مخزن همزن‌دار - بیش از ۲۰ سال است که برقرار شده است. در طی این زمان، به اثبات رسیده است این سامانه‌ها که عمدتاً برای فرایندکردن کانه‌های دیگرگذا به کار می‌رفتند، بسیار قوی‌تر از آنچه که در ابتدا تصور می‌شد، می‌باشند. مخازن بزرگ شستشو در بخشهای مختلف دنیا به کار گرفته می‌شوند و در این کتاب، توسط اپراتورهای تجاری که آنها را طراحی و ساخته‌اند، توضیح داده شده‌اند. این کتاب، شامل فصلی می‌شود که چگونگی کاربرد زیست-واکنشگرهای مخزن همزن‌دار با دمای بالا را برای بازیافت مس از کالکوپیریت، (از نظر کمی فراوان‌ترین کانی مس)، که در فرایندکردن زیست‌شناختی، از خود سرسختی نشان می‌دهد، شامل می‌شود.

دو جنبه‌ی مهم دیگر معدنکاری زیستی، در این کتاب پوشش داده شده‌اند. یکی مربوط به ماهیت و گوناگونی ریزموجودات زنده (microorganisms) است که برای زیست‌فرایندکردن کانه‌ها و اینکه اینها چگونه در عملیات تجاری پایش می‌شوند، حیاتی محسوب می‌گردند. راه کارهای زیست‌فیزیکی مورد استفاده توسط ریزموجودات و اشتراکات میکروبی برای زیست‌تبا‌پذیری (biodegradation) کانی پیریت همه جا حاضر و هم چنین آنچه که درباره‌ی مسیرها و ژنتیک آنزیمهای درگیر در اکسایش آهن و گوگرد دانسته شده است، نیز توضیح داده شده‌اند.

داگلاس ای. رالینگز

بری جانسون

مقدمه‌ی مترجم

معدنکاری زیستی، رویکرد جدید استخراج کانیهای مورد نظر از کانه‌هایی می‌باشد که توسط صنعت معدنکاری در چند سال گذشته کشف شده است. ریزموجودات زنده، به جای روشهای قدیمی تحت گرمای زیاد یا مواد شیمیایی سمی، که تأثیر مخربی بر محیط زیست دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایند کانیهای صنعتی، در بسیاری از کشورها شامل آفریقای جنوبی، برزیل، استرالیا و غیره توسعه یافته است. ریزموجودات زنده‌ی اکسنده‌ی آهن و گوگرد برای آزادسازی مس، طلا و اورانیوم محصورشده از سولفیدهای معدنی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکثر واحدهای صنعتی برای زیست‌اکسایش کنسانتره‌های حاوی طلا، در دمای 40°C ، با کشتهای آمیخته‌ی باکتریهای مزوفیلی (mesophilic) از جنس اسیدیتیوباسیلوس (*acidithiobacillus*) یا فرواکسیدانس (فرواکسنده) لپتوسپیریلوم (*leptospirillum*) (*ferrooxidans*)، عملیات می‌کنند. در مطالعات بعدی، نشان داده شد، آرکیاهای* کاهنده‌ی آهن، پیروکوکوس فوریوسوس (*pyrococcus furiosus*) و پیروباکتولولوم ایسلندیکوم (*pyrobaculum islandicum*)، کلرید طلا را به طلای غیرقابل حل کاهش دادند.

با استفاده از باکتریهای چون فرواکسیدانس اسیدیتیوباسیلوس، برای شستن مس از باطله‌های معدن، آهنگهای بازیافت را بهبود بخشیده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده است. از این گذشته، آن، استخراج از کانه‌های کم عیار را - علی‌رغم تهی‌شدگی کانه‌های برعیار - ممکن می‌سازد.

کاربردهای بالقوه‌ی زیست‌فناوری در معدنکاری و فرایند کردن، بی‌شمار است. بعضی از مثالهای پروژه‌های گذشته در زیست‌فناوری، شامل برنامه‌ی استخراج درجا، از نظر زیست‌شناختی مورد تأیید قرار گرفته است. روشهای زیست‌تباہ‌سازی، زیست‌اصلاح غیر فعال زهکشی سنگ اسیدی و زیست‌شستشوی کانه‌ها و کنسانتره‌ها می‌شوند. این پژوهش، اغلب، منجر به اجرای فناوری برای باردهی و تولید بیشتر یا حل‌های جدید برای مسائل کمپلکس می‌شود. توانایی‌های اضافی، شامل زیست‌شستشوی فلزات از مواد سولفیدی، فسفاتی یا زیست‌فرایند و زیست‌تغلیظ فلزات از محلولها می‌شود. اخیراً پروژه‌ای، روشهای زیست‌شناختی را

* آرکیا (*archaea*) (موجودات تک سلولی اولیه)، اعضای یکی از دو گروه مشخص موجودات تک‌سلولی اولیه‌ی زنده که از نظر اندازه مثل باکتریها ولی از نظر آرایش مولکولی از آنها متفاوت می‌باشند

برای کاهش گوگرد در کاربردهای شستشوی زغال سنگ، در دستور کار قرار داده است. از استخراج درجا تا کانه آرای و فناوری تصفیه، زیست فناوری، حل‌های صنعتی ابتکاری و مقرون به صرفه‌ای را در اختیار قرار می‌دهد.

پتانسیل آرکنیاهای اکسندهی سولفیدی گرمادوست در استخراج مس، به علت استخراج مناسب فلزات از کانه‌های سولفیدی که نسبت به انحلال سرسخت هستند، جلب توجه کرده است. چون سولفات مس تشکیل شده در حین اکسایش کانه‌های سولفیدی مس در آب بسیار قابل حل است، شستشوی میکروبی برای کانه‌های مس بسیار مفید است. تقریباً ۲۵٪ تمام مس استخراج شده در سرتاسر دنیا، امروزه از فرایندهای شستشو به دست می‌آید. آرکنیاهای اسیددوست (acidophilic)، سولفولوبوس متالیکوس (sulfolobus metallicus) و متالوسفائرا سدولا (metallosphaera sedula) تا ۴٪ مس را تحمل می‌کنند و برای زیست معدنکاری کانی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. بین ۴۰ و ۶۰٪ استخراج مس در واکنشگرهای اولتیه و بیش از ۹۰٪ استخراج در واکنشگرهای ثانویه، با زمانهای ماندگاری حدود ۶ days حاصل شده است.

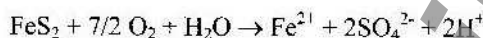
اکسایش یون فرو (Fe^{2+}) به یون فریک (Fe^{3+})، برای بعضی از ریزموجودات زنده، تولیدکننده انرژی است. چون فقط مقدار کمی انرژی به دست می‌آید، بنابراین مقادیر زیادی از (Fe^{2+}) باید اکسیده شوند. از این گذشته، Fe^{3+} رسوب $Fe(OH)_3$ غیرقابل حل در H_2O تشکیل می‌دهد. بسیاری از ریزموجودات زندهی اکسندهی Fe^{2+} ، گوگرد را نیز اکسیده می‌کنند و در نتیجه اسیددوستهای اجباری هستند که محیط را با تولید H_2SO_4 بیشتر اسیدی می‌کنند که بخشی برای حقیقت استوار است که در pH خنثی، Fe^{2+} در تماس با هوا از نظر شیمیایی به سرعت اکسیده می‌شود. در این شرایط، Fe^{2+} کافی وجود ندارد که رشد قابل ملاحظه را ممکن سازد. در pH پایین، Fe^{2+} بسیار پایدارتر است. این امر، توضیح می‌دهد چرا اکثر ریزموجودات زندهی اکسندهی Fe^{2+} فقط در محیطهای اسیدی یافت می‌شوند و اسیددوستهای اختیاری هستند.

بهترین باکتری اکسندهی Fe^{2+} ، اسیدیتوباسیلوس فرواکسیدانس، کمولیتوتروف اسیددوست، می‌باشد. اکسایش ریززیست‌شناختی Fe^{2+} ، جنبه‌ی مهم توسعه‌ی pH اسیدی در معادن می‌باشد و مشکل بوم-شناختی جذبی را تشکیل می‌دهد. به هر حال، این فرایند نیز وقتی که کنترل شود، می‌تواند به طور مفیدی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. کانه‌ی حاوی گوگرد، پیریت (FeS_2)، در آغاز این فرایند قرار دارد. پیریت، ساختار بلوری انحلال‌ناپذیری است که در زغال سنگ و کانه‌های معدنی به وفور یافت می‌شود و توسط واکنش زیر تولید می‌گردد:

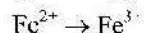


معمولاً پیریت از تماس با اکسیژن محافظت شده و برای ریزموجودات زنده، قابل دسترسی نیست. به

هر حال، پس از استخراج معدن، پیریت با هوا (اکسیژن) و ریزموجودات زنده تماس برقرار می‌کند و اکسایش شروع خواهد شد. این اکسایش، به ترکیبی از فرایندهای شیمیایی و ریززیست‌شناختی کاتالیز شده، متکی می‌باشد. دو پذیرنده الکترون، این فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهند: یونهای O_2 و Fe^{3+} . یون Fe^{3+} فقط در مقادیر زیاد در شرایط اسیدی ($pH < 2.5$)، حضور خواهد داشت. ابتدا، فرایند شیمیایی آهسته با O_2 ، به عنوان پذیرنده الکترون، اکسایش پیریت را شروع خواهد کرد:



این واکنش، محیط را اسیدی می‌کند و Fe^{2+} تشکیل شده، نسبتاً پایدار خواهد بود. در این محیط، اسیدیتوباسیلوس فروآکسیدانس، قادر خواهد بود به سرعت رشد کند. با اسیدی‌شدن بیشتر، فروپلازما (ferroplasma) نیز توسعه یافته و محیط را بیشتر اسیدی می‌کند. در نتیجه‌ی فعالیت میکروبی (واکنش تولیدکننده اسید)، Fe^{2+} به Fe^{3+} تبدیل می‌شود:



این Fe^{3+} ، که در pH پایین قابل حل باقی می‌ماند، فوراً با پیریت واکنش می‌دهد:

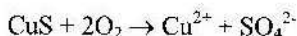
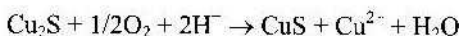


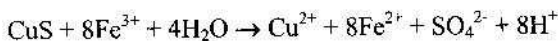
Fe^{2+} تولید شده می‌تواند دوباره توسط ریزموجودات زنده مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه، واکنش تکرار خواهد شد.

در فرایند شستشوی میکروبی صنعتی، کانه‌ی کم‌عیار به صورت کپه‌ی بزرگی انباشته می‌شود و محلول اسید سولفوریک رقیق ($pH = 2$)، بر روی کپه، پخش می‌شود. مایعی که از نظر کانی غنی می‌باشد از ته کپه خارج، جمع‌آوری و به واحد ته‌نشین‌سازی، جایی که فلز، رسوب داده شده و تصفیه می‌شود، حمل می‌گردد. آنگاه، مایع بدون فلز به بالای کپه پمپاژ شده و چرخه تکرار می‌گردد.

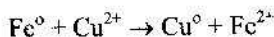
اسیدیتوباسیلوس فروآکسیدانس، قادر است Cu^+ در کالکوسیت (Cu_2S) را به Cu^{2+} اکسیده کند، در نتیجه، مقداری از مس را به شکل قابل حل، Cu^{2+} ، جدا می‌کند و کانی کوولیت (CuS) را تشکیل می‌دهد. آنگاه، کوولیت اکسیده شده، سولفات و Cu^{2+} قابل حل را به صورت محصولات، آزاد می‌کند.

دومین سازوکار، و شاید مهم‌ترین در عملیات معدنکاری، اکسایش شیمیایی کانه‌ی مس با یونهای فریک (Fe^{3+})، است که اکسایش میکروبی یونهای فرو را (که از اکسایش پیریت به دست می‌آیند) درگیر می‌کند. سه واکنش ممکن برای اکسایش کانه‌ی مس، به صورت زیر می‌باشند:

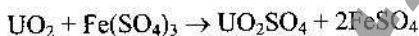




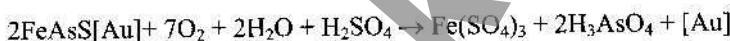
آنگاه مس فلزی با استفاده از Fe^0 ، از فوطیهای فولادی، بازیافت می‌شود:



دما در درون کپه‌ی شستشو، اغلب، در نتیجه‌ی فعالیت‌های میکروبی، فوراً افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه، کمپلکس‌های اکسنده‌ی آهن گرمادوست، از قبیل گونه‌های اسیدیتیوباسیلوس گرمادوست و لپتوسپیریلوم (leptospirillum)، و حتی در دماهای بالاتر، آرکئون گرمادوست - اسیددوست، سولفولوبوس (متالواسفائرا سدولا)، ممکن است در فرایند شستشو، در دمای بالای 40°C ، مهم تلقی گردند. مثل مس، اسیدیتیوباسیلوس فرواکسیدانس، می‌توانند U^{4+} را به U^{6+} ، با O_2 به عنوان پذیرنده‌ی الکترون، اکسیده کنند. به هر حال، احتمال دارد که فرایند شستشوی اورانیوم به اکسایش شیمیایی اورانیوم به وسیله‌ی Fe^{3+} ، بیشتر وابسته باشد، که آتی. فرواکسیدانس عمدتاً از طریق اکسایش مجدد Fe^{2+} به Fe^{3+} ، همانطور که در بالا توضیح داده شد، عمل می‌کند.



طلا، اغلب در طبیعت، همراه با کانیهای حاوی آرسنیک و پیریت، یافت می‌شود. در فرایند شستشوی میکروبی، آتی. فرواکسیدانس و وابستگان، قادرند کانیهای آرسنوپیریت را مورد حمله قرار داده و آن را حل کنند و در فرایند، طلای به تله افتاده (Au) را آزاد نمایند.



کتاب حاضر که با قلمی شیوا و علمی، به رشته‌ی تحریر درآمده، شاید اولین کتابی باشد که استخراج فلزات به وسیله‌ی ریزموجودات زنده را، همراه با مثالهای موردی صنعتی، مورد توجه قرار داده است. توصیه می‌گردد علاقمندان، جهت تکمیل دانش خود، به سه کتاب دیگر اینجانب، تحت عناوین:

- ۱- معدنکاری انحلالی، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۹.
- ۲- هیدرومتالورژی، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.
- ۳- الکتروشیمی شناورسازی کانیهای سولفیدی، انتشارات آفتاب اندیشه، ۱۳۹۱.

نیز مراجعه نمایند

از تمام عزیزانی که مرا در به ثمر رسیدن این کتاب یاری نمودند کمال تشکر را دارم

الحمد لله رب العالمین

خرداد ۱۳۹۲

فصل ۱: فرایند بیوکس برای فرایند کردن کنسانتره‌های طلای دیرگداز

۱-۱-۱	مقدمه	۱
۱-۲-۱	نمودار جریان فرایند بیوکس	۱
۱-۳-۱	وضعیت فعلی واحدهای بیوکس که در حال عملیات می‌باشند	۵
۱-۳-۱-۱	واحد بیوکس فیروبو	۵
۱-۳-۱-۲	واحد بیوکس ویلونا	۶
۱-۳-۱-۳	واحد بیوکس سن‌سو	۷
۱-۳-۱-۴	واحد بیوکس فوسترویل	۷
۱-۳-۱-۵	واحد بیوکس سوزدال	۷
۱-۳-۱-۶	عملیات آبی بیوکس	۸
۱-۴-۱	کشت باکتریایی بیوکس	۹
۱-۵-۱	طراحی مهندسی و الزامات فرایند	۱۰
۱-۵-۱-۱	واکنشهای شیمیایی و تأثیر کانی‌شناسی کانه	۱۰
۱-۵-۱-۱-۱	پیریت	۱۱
۱-۵-۱-۲-۱	پیریت / پیروتیت	۱۲
۱-۵-۱-۳-۱	آرسنوپیریت	۱۲
۱-۵-۱-۴-۱	کانیهای کربناتی	۱۲
۱-۵-۱-۲-۲	تأثیر دما و الزامات سرد کردن	۱۳
۱-۵-۱-۲-۳	کنترل pH	۱۴
۱-۵-۱-۴-۲	عرضه‌ی اکسیژن	۱۵
۱-۵-۱-۵-۲	مدل‌سازی فرایند تأثیر آرایش زیست‌واکنشگر	۱۶
۱-۵-۱-۶-۲	تأثیر سموم مختلف بر عملکرد باکتریایی	۱۸
۱-۶-۱	تفکیک هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بیوکس	۲۰
۱-۶-۱-۱	تفکیک هزینه‌ی سرمایه‌گذاری	۲۰

۲۳	۱-۲. تفکیک هزینه‌ی عملیاتی
۲۵	۱-۷. توسعه‌های جدید در فناوری بیوکس
۲۵	۱-۷-۱. توسعه‌ی برّهی جایگزین
۲۶	۱-۷-۲. بهینه‌سازی مصرف سیانور
۲۷	۱-۷-۳. ترکیب کردن زیست‌اکسایش مزوفیلیک و ترموفیلیک (گرمادوست)
۳۰	۸-۱. خنثی‌سازی مایع بیوکس و دفع آرسنیک
۳۰	۸-۱-۱. دورنما
۳۱	۸-۲. توسعه‌ی فرایند خنثی‌سازی بیوکس دومرحله‌ای
۳۲	۸-۳. فرایند طراحی و عملکرد خنثی‌سازی بیوکس
۳۵	۸-۴. کاربرد باطله‌ی شناورسازی در مدار خنثی‌سازی
۳۶	۸-۴. کاربرد باطله‌ی شناورسازی در مدار خنثی‌سازی
۳۷	۹-۱. نتیجه‌گیری
۳۷	منابع

فصل ۲: زیست‌شستشوی پیریت حاوی کبالت در واکنشگرهای همزن‌دار: مطالعه‌ی موردی مقیاس آزمایشگاهی تا کاربرد صنعتی

۳۹	۲-۱. مقدمه
۴۱	۲-۲. مطالعات امکان‌پذیری و مقیاس نیمه‌صنعتی
۴۱	۲-۲-۱. ویژگیهای کنسانتره‌ی پیریت
۴۲	۲-۲-۲. زیست‌شستشوی پیریت کبالت‌دار
۴۲	۲-۲-۳. تلقیح و جمعیت‌های میکروبی
۴۳	۲-۲-۴. بهینه‌سازی بازدهی زیست‌شستشو
۴۷	۲-۲-۵. عمل‌آوری محلول و بازیافت کبالت
۴۷	۲-۲-۵-۱. خنثی‌سازی دوغاب زیست‌شستشو
۴۹	۲-۲-۵-۲. حذف آهن از محلول باردار
۴۹	۲-۲-۵-۳. حذف روی
۵۰	۲-۲-۵-۴. حذف مس
۵۰	۲-۲-۵-۵. استخراج کبالت با حلال و برقکافت
۵۱	۲-۳. عملیات در مقیاس کامل: واحد کاسس
۵۲	۲-۱. توضیح عمومی نمودار جریان فرایند

۵۳	۲-۳-۲. احیای پیریت و آماده‌سازیهای فیزیکی
۵۳	۳-۳-۲. مدار زیست‌شستشو
۵۵	۴-۳-۲. بازگردانی سولفید در فرایند زیست‌شستشو
۵۵	۵-۳-۲. کنترل عملکرد فرایند زیست‌شستشو: بعضی از نتایج عملی
۵۷	۶-۳-۲. عملکرد زیست‌شستشو
۵۷	۷-۳-۲. فرایند کردن مایع باردار
۵۷	۱-۷-۳-۲. حذف آهن
۵۷	۲-۷-۳-۲. خالص‌سازی محلول و استخراج با حلال
۵۸	۳-۷-۳-۲. برقکافت و آماده‌سازی کبالت
۵۸	۴-۷-۳-۲. تصفیهی برون‌ریز و مدیریت باطله
۵۸	۴-۲. نتیجه‌گیری
۵۹	منابع

فصل ۳: کاربردهای تجاری زیست‌شستشوی گرمادوست

۶۱	۱-۳. مقدمه
۶۱	۲-۳. مفهوم تجاری فناوریهای فرایند کردن مس
۶۱	۱-۲-۳. شستشوی درجا
۶۳	۲-۲-۳. ذوب کردن
۶۳	۳-۲-۳. شستشوی کنسانتره
۶۵	۴-۲-۳. شستشوی کپهای و انباشتی
۶۵	۳-۳. عوامل کلیدی که تصمیمات تجاری برای پروژه‌های مس را تحت تأثیر قرار می‌دهند
۶۶	۱-۳-۳. هزینه‌های عملیاتی
۶۸	۲-۳-۳. هزینه‌های سرمایه‌گذاری
۶۸	۳-۳-۳. هزینه‌های استخراج
۶۹	۴-۳-۳. ناخالصی‌ها
۷۰	۵-۳-۳. سطح اکسایش لازم گوگرد برای دفع
۷۰	۶-۳-۳. کاربرد اسید جایگزین
۷۱	۴-۳. موقعیت فنی - تجاری برای زیست‌شستشوی گرمادوست
۷۱	۱-۴-۳. ویژگیهای زیست‌شستشوی مخزنی گرمادوست
۷۱	۱-۴-۳. الزام برای شرایط گرمادوست

۷۲	۲-۱-۴-۳. واکنشهای کاتالیزشدهی میکروبی
۷۳	۳-۱-۴-۳. آرایش واکنشگرها
۷۴	۴-۱-۴-۳. عرضه‌ی اکسیژن
۷۵	۵-۱-۴-۳. تولید اکسیژن
۷۵	۶-۱-۴-۳. دی‌اکسید کربن
۷۶	۷-۱-۴-۳. همزدن
۷۶	۸-۱-۴-۳. چگالی پالپ
۷۶	۹-۱-۴-۳. تبدیل آرسنیک به آرسنات
۷۷	۱۰-۱-۴-۳. بیوسین
۷۷	۱۱-۱-۴-۳. عوامل هزینه
۷۷	۱۲-۱-۴-۳. مواد برای ساختن واکنشگر
۷۸	۲-۴-۳. انتخابها و فرصتهای کاربرد زیست‌شستشوی مخزنی گرمادوست
۷۸	۱-۲-۴-۳. کاربردهای مس - طلا
۷۸	۲-۲-۴-۳. کاربردها برای توسعه‌ی واحدها
۷۹	۵-۳. زیست‌شستشوی کپهای گرمادوست کانه‌های با گوگرد پایین
۸۰	۱-۵-۳. طراحی اساسی کپه و اهمیت تولید گرما
۸۱	۲-۵-۳. مقدروبودن گوگرد
۸۱	۴-۵-۳. تلقیح
۸۲	۵-۵-۳. pH
۸۳	۶-۵-۳. عوامل بازدارنده
۸۳	۷-۵-۳. نگهداشتن گرما، دبی هوا و آهنگ آبیاری
۸۳	۱-۷-۱-۳. ارتفاع کپه
۸۳	۲-۷-۵-۳. آهنگهای آبیاری و هوا
۸۴	۶-۳. خلاصه
۸۴	منابع

فصل ۴: مروری بر توسعه و وضعیت فعلی عملیات زیست‌شستشوی مس در کشور شیلی: ۲۵ سال اجرای تجاری موفق

۸۷	۱-۴. زمینه‌ی تاریخی و توسعه‌ی هیدرومتالورژی مس در شیلی
۹۰	۲-۴. توسعه‌های فنی در شیلی برای شستشوی مستقیم کانه‌ها

۳-۴	وضعیت فعلی عملیات و پروژه‌های زیست‌شستشوی تجاری شیلی	۹۲
۱-۳-۴	معدن لواگوئیر	۹۳
۲-۳-۴	معدن سرو کلرادو	۹۴
۳-۳-۴	معدن کوبرادا بلانکا	۹۴
۴-۳-۴	معدن زالدیوار (Zaldivar)	۹۵
۵-۳-۴	معدن ایوان (Ivan)	۹۶
۶-۳-۴	شستشوی انباشت سولفید کم‌عیار چوکوکاماتا	۹۶
۷-۳-۴	معدن کارمن دو آنداکولو (Carmen de Andacollo)	۹۶
۸-۳-۴	عملیات استخراج با حلال - برقکات کولاهواسی (Collahuasi)	۹۷
۹-۳-۴	معدن داس آمیگوز (Dos Amigos)	۹۷
۱۰-۳-۴	واحد شستشوی کنسانتره‌ی مس الاینس (Alliance)	۹۸
۱۱-۳-۴	شستشوی کانه‌ی سولفید عیار پایین لا اسکوندیدا	۹۸
۱۲-۳-۴	پروژه‌ی معدن اسپنس	۹۹
۴-۴	پژوهش و توسعه‌ی کاربردی پیشرفته‌ی زیست‌شستشو در شیلی	۱۰۰
۵-۴	نتیجه‌گیری	۱۰۱
۱۰۲	منابع	۱۰۲

فصل ۵: فناوری ژئوکت ژئوبایوتیکس - پیشرفت و چالش

۱-۵	مقدمه	۱۰۳
۲-۵	فناوریهای ژئوکت و ژئولیچ	۱۰۴
۱-۲-۵	فناوریهای ژئوبایوتیکس مکمل	۱۰۵
۲-۲-۵	فرایند ژئوکت	۱۰۵
۴-۵	فناوریهای در حال توسعه	۱۱۹
۱۱۹	منابع	۱۱۹

فصل ۶: زیست‌اکسایش کپه‌های کانه‌های کامل حاوی طلا سولفیدی

۱-۶	مقدمه	۱۲۰
۲-۶	تاریخچه‌ی توسعه‌ی بایوپرو	۱۲۰
۳-۶	فرایند تجاری بایوپرو	۱۲۲
۱-۳-۶	مرور مختصری از تجهیزات زیست‌اکسایش	۱۲۲

۱۲۳	۲-۳-۶. توضیح فرایند زیستاکسایش
۱۲۸	۴-۶. عملکرد عملیات تجاری بایوپرو
۱۲۹	۱-۴-۶. جمع‌آوری داده‌ها و پایش عملکرد
۱۲۹	۲-۴-۶. مقایسه‌ی طراحی تجهیزات اولیه و سفارشی
۱۳۱	۳-۴-۶. تاریخچه‌ی عملکرد
۱۳۶	۴-۴-۶. جمعیت‌های میکروبی
۱۳۷	۵-۴-۶. پیشرفت‌های فرایند
۱۳۷	۵-۶. درس‌هایی که آموخته شدند
۱۳۷	۱-۵-۶. کنترل کانه
۱۳۸	۲-۵-۶. اندازه‌ی خردایش
۱۳۹	۳-۵-۶. تراکم و رسانندگی هیدرولیکی
۱۴۰	۴-۵-۶. افزودن ماده‌ی تلخ یا اسید و انهدام کریئات
۱۴۱	۵-۵-۶. شیمی زیست‌محلول
۱۴۱	۶-۵-۶. تأثیرات رسوبات
۱۴۲	۷-۵-۶. هوادهی سگو
۱۴۳	۸-۵-۶. آبیاری بلوک و عکس‌العمل دما
۱۴۴	۹-۵-۶. شرایط قاعده‌ی سگو
۱۴۵	۱۰-۵-۶. تجربه‌ی آسیای استخراج با کرین
۱۴۶	۱۱-۵-۶. انتظارات
۱۴۷	۶-۶. نظرات نهایی
۱۴۸	منابع

فصل ۷: شستشوی کپه‌ای شیبست سیاه

۱۵۰	۱-۷. مقدمه
۱۵۰	۲-۷. اهمیت و پتانسیل ذخیره‌ی تالوئوآرا
۱۵۲	۳-۷. پتانسیل زیستاکسایش و عواملی که زیست‌شستشو را تحت تأثیر قرار می‌دهند
۱۵۲	۴-۷. شستشوی کانه‌ی دانه‌ریز با رژیم‌های تعلیق مختلف
۱۵۵	۵-۷. شبیه‌سازیهای شستشوی کپه‌ای
۱۵۸	۶-۷. دینامیک جمعیت‌های زیست‌کاتالیزور
۱۶۰	منابع

فصل ۸: مدل سازی و بهینه سازی فرایندهای زیست شستشوی کپه‌ای

۱-۸. مقدمه.....	۱۶۲
۲-۸. فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی که زیست‌شستشوی کپه‌ای را در بر می‌گیرند.....	۱۶۳
۱-۲-۸. جریان محلول.....	۱۶۴
۲-۲-۸. جریان گاز.....	۱۶۴
۳-۲-۸. جریان گرما.....	۱۶۴
۴-۲-۸. حمل از طریق پخش.....	۱۶۵
۵-۲-۸. دینامیک جمعیت میکروبی.....	۱۶۶
۶-۲-۸. شیمی محلول.....	۱۶۶
۷-۲-۸. ساز و کارهای شستشوی کانی.....	۱۶۶
۸-۲-۸. توپولوژی (جانگاری) دانه.....	۱۶۷
۳-۸. مدل سازی ریاضی.....	۱۶۹
۱-۳-۸. سینتیک کانی.....	۱۷۰
۲-۳-۸. سینتیک میکروبی.....	۱۷۰
۳-۳-۸. انتقال جرم گاز - مایع.....	۱۷۱
۴-۳-۸. حمل از طریق پخش.....	۱۷۱
۵-۳-۸. مدل ترکیبی پخش - همرفت.....	۱۷۲
۶-۳-۸. حمل گاز.....	۱۷۳
۷-۳-۸. موازنه‌ی گرما.....	۱۷۴
۸-۳-۸. بسته‌ی هیپ سیم.....	۱۷۴
۴-۸. کاربرد مدل سازی ریاضی - از آزمایشگاه به کپه.....	۱۷۵
۱-۴-۸. پارامترهای مدل.....	۱۷۵
۲-۴-۸. کالیبره کردن مدل و اعتبار مقیاس آزمایشگاهی.....	۱۷۶
۳-۴-۸. گسترش به مقیاس کامل - کاربردهای مدل.....	۱۷۷
۵-۸. مطالعه‌ی موردی I - کالکوسیت.....	۱۷۸
۶-۸. مطالعه‌ی موردی II - اسفالریت و پیریت.....	۱۸۲
۷-۸. مسیر رو به جلو - کالکوپیریت.....	۱۸۵
۸-۸. نتیجه گیری.....	۱۸۵
منابع.....	۱۸۶

فصل ۹: ارتباط فیزیولوژی سلولی و سازگاری ژنتیکی ریزموجودات زنده‌ی زیست‌معدنکاری با

فرایندهای صنعتی

۱-۹. مقدمه.....	۱۸۸
۲-۹. زیست‌اکسایش کانیها، امتزاجی بین شیمی و زیست‌شناسی است.....	۱۸۸
۳-۹. شیمی عمومی زیست‌اکسایش کانی.....	۱۸۹
۴-۹. مزایای فرایندهای زیست‌اکسایش کانی در مقایسه با بسیاری از فرایندهای دیگری که به میکروب وابسته هستند.....	۱۹۱
۱-۴-۹. انواع زیادی از ریزموجودات زنده‌ی اکسنده‌ی آهن و گوگرد وجود دارند که به طور بالقوه برای فرایندهای استخراج فلز صنعتی مفید می‌باشند.....	۱۹۱
۲-۴-۹. سترونی (sterility) فرایندها ضرورت ندارد.....	۱۹۲
۳-۴-۹. انتخاب واکنشگرهای مخزن همزن‌دار جریان پیوسته برای مناسب‌ترین موجودات زنده.....	۱۹۲
۵-۹. آیا فرایندهای جدیدی که با کنسرسیومهای میکروبی برقرار شده، باید تلقیح شوند؟.....	۱۹۳
۶-۹. انواع موجودات زنده.....	۱۹۴
۸-۹. خودپروری (autotrophy).....	۱۹۶
۹-۹. نیتروژن، فسفات و عناصر ناچیز.....	۱۹۸
۱۰-۹. تولید انرژی.....	۱۹۸
۱-۱۰-۹. اکسایش آهن.....	۱۹۹
۲-۱۰-۹. اکسایش گوگرد.....	۲۰۰
۳-۱۰-۹. دهندگان الکترون بالقوه‌ی دیگر برای ریزموجودات زنده‌ی اسیددوست.....	۲۰۰
۴-۱۰-۹. اکسیژن و پذیرندگان الکترون جایگزین.....	۲۰۱
۵-۱۰-۹. خواص اسیددوستی.....	۲۰۲
۱۱-۹. سازش‌پذیری ریزموجودات زنده‌ی زیست‌معدنکاری.....	۲۰۳
۱۲-۹. تحمل و مقاومت فلز.....	۲۰۴
۱۳-۹. نتیجه‌گیری.....	۲۰۷
منابع.....	۲۰۸

فصل ۱۰: گونه‌های متنوع در اکسایش کانی سولفیدی

۱-۱۰. مقدمه.....	۲۱۲
۲-۱۰. اسیددوستها در اکسایش کانی سولفیدی.....	۲۱۲
۱-۲-۱۰. گونه‌های عمده در مطالعات آزمایشگاهی و عملیات صنعتی.....	۲۱۳
۱-۱-۲-۱۰. مزوفیلها.....	۲۱۳

۲۱۳	۲-۱-۲-۱۰. گرمادوستهای ملایم
۲۱۴	۳-۱-۲-۱۰. گرمادوستها
۲۱۴	۲-۲-۱۰. اسیددوستهای کمتر معروف اکسنده‌ی آهن
۲۱۵	۱-۲-۲-۱۰. موجودات زنده در حذهای اسیدینگی
۲۱۶	۲-۲-۲-۱۰. اسیددوستهای دگرپرور
۲۱۶	۳-۲-۲-۱۰. گونه‌های تحمل‌کننده‌ی نمک
۲۱۷	۳-۱۰. منابع انرژی دوگانه: انحلال کانی توسط باکتریهای اکسنده‌ی آهن و اکسنده‌ی گوگرد
۲۱۸	۴-۱۰. اسیددوستها در کانه آرای
۲۱۸	۱-۴-۱۰. کشتهای زیست‌واکشیگر مخزن همزن‌دار
۲۱۹	۱-۱-۴-۱۰. کشتهای مزوفیلی
۲۱۹	۲-۱-۴-۱۰. کشتهای تحمل‌کننده‌ی گرما و به طور ملایم گرمادوست
۲۲۰	۳-۴-۱۰. کشتهای در دماهای بالا
۲۲۱	۲-۴-۱۰. جمعیت میکروبی در شستشوی کته‌ی کانه
۲۲۱	۵-۱۰. تنوع در اکسایش آهن
۲۲۳	۱-۵-۱۰. مزوفیلها
۲۲۳	۲-۵-۱۰. گرمادوستها
۲۲۴	۶-۱۰. خلاصه
۲۲۵	منابع

فصل ۱۱: ریززیست‌شناسی کته‌های کانه‌های به طور ملایم گرمادوست و به طور موقت گرمادوست

۲۳۰	۱-۱۱. مقدمه
۲۳۱	۲-۱۱. تولید گرما در درون کته‌های زیست‌شستشو
۲۳۴	۳-۱۱. تأثیر دما بر ریزموجودات زنده‌ی زیست‌شستشو
۲۴۰	۴-۱۱. جمعیت‌های میکروبی کته‌های زیست‌شستشوی تجاری به طور ملایم گرمادوست یا به طور موقت گرمادوست
۲۴۰	۱-۴-۱۱. کته‌های زیست‌اکسایش نیومونت
۲۴۱	۲-۴-۱۱. زیست‌شستشوی کته‌های عملیات مس نیفتی
۲۴۳	۳-۴-۱۱. پروژه‌ی مونیوای شرکت مس ایوانه‌وی میانمار
۲۴۶	۵-۱۱. خلاصه
۲۴۷	منابع

فصل ۱۲: فنون آشکارسازی و شناسایی ریزموجودات زندهی اکسندهی کانیهای اسیددوست

- ۱۲-۱. زیست‌گوناگونی ریزموجودات زندهی اسیددوستی که در انحلال کانی‌ها نقشهای مستقیم و ثانویه دارند ۲۵۰
- ۱۲-۲. فنون کلی برای آشکارسازی و کلی کردن عمر میکروبی در محیطهای اکسندهی کانیها. ۲۵۲
- ۱۲-۲-۱. رویکردهای بر اساس روشهای میکروسکوپی ۲۵۲
- ۱۲-۲-۲. اندازه‌گیری زیست‌توده ۲۵۳
- ۱۲-۲-۳. اندازه‌گیریهای فعالیت ۲۵۴
- ۱۲-۳. رویکردهای وابسته به کشت ۲۵۵
- ۱۲-۳-۱. محیطهای غنی‌سازی ۲۵۵
- ۱۲-۳-۲. محتمل‌ترین تعداد ۲۵۶
- ۱۲-۳-۳. کشت در محیطهای جامد و بر روی فیلترهای غشایی ۲۵۶
- ۱۲-۴. واکنش زنجیر پلیمرار بر اساس تحلیل شناسایی و جمعیت میکروبی ۲۵۹
- ۱۲-۴-۱. شناسایی و آشکارسازی اسیددوستهای ویژه در جمعیت‌ها ۲۶۱
- ۱۲-۴-۲. فنون تجزیه‌ی جمعیت میکروبی ۲۶۲
- ۱۲-۴-۳. تقویت PCR از RNA جمعیت برای شناسایی ریزموجودات زندهی فعال ۲۶۴
- ۱۲-۴-۴. تجزیه‌ی شاخه‌زاد ژنهای تقویت‌شده برای شناسایی میکروبی ۲۶۵
- ۱۲-۴-۵. ژنهای مفید دیگر برای شناسایی میکروبی و تحلیل جمعیت ۲۶۶
- ۱۲-۵. آشکارسازی و شناسایی مولکولی اسیددوستهای مستقر PCR ۲۶۷
- ۱۲-۵-۱. آشکارسازی و شناسایی مصنوعیت‌شناختی اسیددوستها ۲۶۷
- ۱۲-۵-۲. آشکارسازی شمارش اسیددوستها به وسیله‌ی روشهای هدف‌گیری با RNA ۲۶۸
- ۱۲-۶. چشم‌اندازهای آتی بر روی فنون مولکولی برای آشکارسازی و شناسایی اسیددوستها ۲۷۰

فصل ۱۳: راه‌کارهای باکتریایی برای به دست آوردن انرژی شیمیایی با تباه کردن کانیهای

سولفیدی

- ۱۳-۱. مقدمه ۲۷۶
- ۱۳-۲. پیریت به عنوان یک سامانه‌ی مدل برای درک فعالیتهای شستشوی سولفید باکتریایی ۲۷۷
- ۱۳-۳. ساختار الکترونیکی و خواص ترمودینامیکی پیریت ۲۷۸
- ۱۳-۴. راه‌کار انرژی لهتوسپیریلیوم فرواکسیدانس ۲۸۲
- ۱۳-۵. راه‌کار انرژی اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس ۲۸۵
- ۱۳-۶. شیمی سطح، کلویدها و فعالیت باکتریایی ۲۸۷

۲۸۷.....	۷-۱۳. سازوکار جذب ذره‌ی کلوییدی به درون کپسول و اجسام بسیاری بیرونی.....
۲۸۸.....	۱-۷-۱۳. تشکیل گوگرد کلوییدی.....
۲۸۹.....	۲-۷-۱۳. تشکیل پیریت کلوییدی.....
۲۹۰.....	۸-۱۳. ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس نانو، مهارت استراتژیک که توسط باکتریها توسعه یافته است.....
۲۹۱.....	۹-۱۳. خلاصه.....
۲۹۲.....	منابع.....

فصل ۱۴: بینشهای ژنتیکی و زیست‌اطلاعاتی به درون سازوکارهای اکسایش آهن و گوگرد موجودات زنده‌ی زیست‌شستشو

۲۹۴.....	۱-۱۴. مقدمه.....
۲۹۵.....	۲-۱۴. واکنشهای زیست‌شیمیایی و شیمیایی مربوطه.....
۲۹۶.....	۳-۱۴. ژنتیک ریزموجودات زنده‌ی زیست‌شستشو.....
۲۹۶.....	۱-۳-۱۴. مقدمه.....
۲۹۷.....	۲-۳-۱۴. آبستن کردن ژن.....
۲۹۷.....	۳-۳-۱۴. سامانه‌های انتقال ژن.....
۲۹۸.....	۱-۳-۳-۱۴. اس پی پی اسیدی فلیوم.....
۲۹۸.....	۲-۳-۳-۱۴. اسیدیتوباسیلوس تیواکسیدانس.....
۲۹۸.....	۳-۳-۳-۱۴. اسیدیتوباسیلوس فرواکسیدانس.....
۲۹۹.....	۴-۳-۱۴. ایجاد جهنده.....
۳۰۰.....	۴-۱۴. اکسایش و احیاء آهن و گوگرد در اسیدیتوباسیلوس فرواکسیدانس.....
۳۰۰.....	۱-۴-۱۴. اکسایش آهن فرو.....
۳۰۰.....	۱-۱-۴-۱۴. مقدمه.....
۳۰۱.....	۲-۱-۴-۱۴. مسیر "سربایینی" الکترون.....
۳۰۳.....	۳-۱-۴-۱۴. مسیر "سربالایی" الکترون.....
۳۰۴.....	۲-۴-۱۴. اکسایش گوگرد.....
۳۰۹.....	۳-۴-۱۴. کاهش آهن فریک و گوگرد در اسیدیتوباسیلوس فرواکسیدانس.....
۳۱۰.....	۵-۱۴. اکسایش آهن در ریزموجودات زنده‌ی زیست‌شستشوی دیگر.....
۳۱۰.....	۱-۵-۱۴. مقدمه.....
۳۱۱.....	۲-۵-۱۴. اس پی پی فروپلازما.....
۳۱۳.....	۳-۵-۱۴. اس پی پی. لپتوسپیریلیوم.....

۳۱۴		۴-۵-۱۴. متالواسفائرا سدولا
۳۱۵		۵-۵-۱۴. اکسایش گوگرد در ریزموجودات زنده‌ی زیست‌شستشوی دیگر
۳۱۵		۱۴-۶. سوالات مهم و راهنمایی‌های آتی
۳۱۷		منابع
۳۲۲		واژگان انگلیسی - فارسی
۳۲۴		واژگان فارسی - انگلیسی
۳۲۶		نمایه‌ها