



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد علوم و تحقیقات

رساله دکتری در رشته:

مهندسی معدن - استخراج

عنوان:

مدل سازی عیارهای حد بهینه روش هیدرومتالورژی در صنعت مس

**Modeling of Optimum Cut off Grades of Hydrometallurgical
Method in Copper industries**

استاد راهنما :

دکتر سید کاظم اورعی

دکتر سید ضیاء الدین شفاهی

استاد مشاور :

دکتر حسن قاسم زاده

نگارش:

سید اسماعیل رحیمی

تابستان ۱۳۹۳

صلى الله عليه وسلم

فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان مطالب

۸.....	چکیده.....
۹.....	مقدمه.....

فصل اول: مقدمه

۱۳.....	۱-۱-هدف و ضرورت انجام تحقیق.....
۱۳.....	۱-۲-روش تحقیق.....
۱۴.....	۱-۳-ساختار تحقیق.....

=====

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

۱۶.....	۲-۱-هیدرومتالورژی.....
۱۹.....	۲-۲-عیار حد.....
۲۰.....	۲-۳-مروری بر تاریخچه موضوع.....
۲۰.....	۲-۳-۱-پژوهش های انجام شده در زمینه پیشرفت دانش هیدرومتالورژی.....
۳۰.....	۲-۳-۲-پژوهش های انجام شده در زمینه عیارهای حد بهینه.....

=====

فصل سوم: استخراج پارامترها و معادلات حاکم بر فرایند

۴۶.....	۳-۱-مقصد مواد استخراجی.....
۴۶.....	۳-۲-الگوریتم لین.....
۴۶.....	۳-۲-۱-پارامترهای بررسی شده در الگوریتم.....
۴۷.....	۳-۲-۲-مدل سازی عیارهای حد بهینه.....
۵۰.....	۳-۳-الگوریتم جدید تعیین عیارهای حد بهینه روش های فراوری.....
۵۰.....	۳-۳-۱-مفاهیم اولیه.....
۵۰.....	۳-۳-۲-تغییرات عیار و روش های فراوری معادن مس.....
۵۲.....	۳-۳-۳-پارامترهای مؤثر در الگوریتم ارائه شده.....

=====

فصل چهارم: محاسبه عیارهای حد بهینه

۹۷.....	۴-۱-مقدمه.....
---------	----------------

۹۷	۴-۲-بهینه‌سازی چند متغیره.....
۹۸	۴-۳-مقاصد مواد معدنی.....
۱۰۰	۴-۴-مدلسازی ریاضی.....
۱۰۱	۴-۴-۱-پارامترهای مدل.....
۱۰۳	۴-۴-۲-سناریو اول.....
۱۰۶	۴-۴-۳-سناریو دوم.....
۱۱۵	۴-۴-۴-سناریو سوم.....
۱۱۶	۴-۵-الگوریتم تعیین عیارهای حد بهینه براساس بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی.....
۱۱۸	۴-۶-محدودیت‌های مدلسازی.....

=====

فصل پنجم: ارزیابی مدل‌ها

۱۲۲	۵-۱-مقدمه.....
۱۲۲	۵-۲-سناریو اول.....
۱۲۹	۵-۳-سناریو دوم (حالت اول).....
۱۲۹	۵-۳-۱-مورد مطالعه اول.....
۱۳۳	۵-۳-۲-مورد مطالعه دوم.....
۱۵۰	۵-۴-سناریو دوم (حالت دوم).....
۱۵۷	۵-۵-سناریو دوم (حالت سوم).....
۱۵۹	۵-۱-نمونه‌گیری.....
۱۶۱	۵-۲-آزمایش‌های انجام شده.....
۱۶۱	۵-۳-خردایش، مخلوط کردن، تهیه نمونه‌های نماینده از دو توده کانسنگ.....
۱۶۲	۵-۴-آنالیز شیمیایی و مینرالوژی.....
۱۶۲	۵-۵-آزمایش‌های مصرف اسید.....
۱۶۳	۵-۶-آزمایش‌های ظروف لرزان.....
۱۶۴	۵-۷-تست‌های ستونی.....
۱۶۶	۵-۸-محاسبه عیارهای حد بهینه.....
۱۸۲	۵-۶-بحث و بررسی.....

=====

فصل ششم: نتیجه‌گیری

=====

فهرست منابع

=====

چکیده

تکامل روش‌های استخراجی به سمت فرایندهایی است که دارای هزینه‌های کمتر باشند و برای محیط‌زیست نیز زیان‌آور نباشند. این عوامل باعث پیشرفت و افزایش توجه به روش‌های هیدرومتالورژی، برای استحصال مس شده است. از طرفی با توجه به کاهش عیارهای حد میانگین معادن مس و استخراج عیارهای بالای معادن، استفاده از این روش‌ها در دامپ‌های کم‌عیار سولفیدی ضروری است.

در این پروژه، پس از ارزیابی فرایندهای صنعتی مرسوم تولید مس، سناریوهای واقعی شرایط معادن مس شامل دامپ‌های اکسیدی و سولفیدی به صورت یک فلوچارت عملیاتی، تعریف شده است. در ادامه، بر مبنای فلوچارت ارائه شده، تابع جریان نقدینگی این معادن شامل پارامترهای مختلف روش تغلیظ و هیپ‌لیچینگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت عیارهای حد بهینه معادن با در نظر گرفتن هزینه‌های مختلف، ملاحظات زیست‌محیطی و تأثیر تغییرات عیار بر بازیابی با استفاده از روش ریاضی بهینه‌یابی مشروط و یک الگوریتم‌های تکرار بهینه‌سازی، تحت محدودیت‌های مختلف محاسبه شده است.

مدل ارائه شده با یک مطالعه موردی در معدن مس سونگون در شرایط گوناگون ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از روش بیوهیپ‌لیچینگ در این معدن با موفقیت همراه است. همچنین مشاهده شد که استفاده از روش‌های بیوهیپ‌لیچینگ برای کانسارهای کم‌عیار مس نه تنها سبب سودآوری بیشتر بلکه سبب کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی و عیارهای حد بهینه این معادن شده است.

تعیین عیارهای حد، از جمله مسائل مهم در مبحث اقتصاد معدن است که تأثیر بسزایی بر چگونگی طراحی معادن نیز دارد. انتخاب دقیق عیارهای حد، علاوه بر قابلیت مشخص کردن مقصد ارسال مواد معدنی (دپوهای کم عیار، پرعیار و باطله)، درپیش‌بینی عمر بهینه معادن و سوددهی عملیات معدن‌کاری نیز مؤثر است. تعیین عیارهای حد، برای ارزیابی دقیق میزان ذخیره قابل برداشت معادن، ضرورت دارد. میزان عیارهای حد معادن، با سنجش پارامترهای اقتصادی مؤثر و به همراه آن، ارزیابی هزینه‌هایی که منجر به تولید محصول نهایی قابل فروش شده است، مشخص می‌شود [1]. در این راستا، از جمله مهم‌ترین هزینه‌های تولید، هزینه‌های فراوری مواد معدنی است. در سال‌های اخیر صنعت تولید مس از خاک‌های معدنی حاوی آن، دارای پیشرفت‌ها و چالش‌های گوناگونی بوده است. تقریباً ۹۰ درصد کانه‌ی مس اولیه‌ی دنیا به‌صورت کانه‌های سولفیدی است که استحصال مس از آن‌ها به روش‌های پیرومتالورژیکی^۱ و هیدرومتالورژیکی^۲ ممکن است [۲]. تکامل روش‌های استخراجی به سوی فرایندهایی است که مصرف انرژی پایینی داشته و برای محیط‌زیست نیز زیان‌آور نباشند. این عوامل باعث پیشرفت و افزایش توجه به روش‌های هیدرومتالورژیکی برای استحصال مس شده است. به‌علاوه، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای پایین این روش‌ها، بر مطلوبیت استفاده از آن‌ها افزوده است.

هیدرومتالورژی ریشه در زمانی دارد که کیمیاگران تمام تلاش خود را در تبدیل فلزات پایه به طلا متمرکز کرده بودند. یکی از دلایل توجه روزافزون به روش‌های هیدرومتالورژی برای کانی‌های مس، انحلال سریع آن‌ها در حلال‌هایی از قبیل اسید سولفوریک بوده است. البته نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که کانی‌های سولفیدی مس تنها با استفاده از اسید سولفوریک حل نمی‌شوند. بدین صورت توانایی برخی میکروارگانیسم‌ها^۳ در حلالیت این کانی‌ها مشخص شد. امروزه روش بیولیچینگ^۴ به منظور استحصال مس در مقیاس صنعتی استفاده می‌شود اما به‌علت پیچیدگی مکانیزم فرایند و گستردگی عوامل مؤثر در بازیابی آن، نیاز به تحقیقات بیشتری وجود دارد.

فروشویی (لیچینگ) در مقیاس صنعتی با استفاده از روش‌های مختلفی نظیر لیچینگ درجا، توده‌ای، ستونی، لیچینگ با همزن و غیره صورت می‌پذیرد. در این میان برای استحصال مس از کانی‌های کم‌عیار سولفیدی آن، روش لیچینگ توده‌ای به همراه باکتری، بیشتر استفاده می‌شود. بیوهیپ لیچینگ (لیچینگ توده‌ای با باکتری)، تحت تأثیر پارامترهای فنی و اقتصادی گوناگونی قرار می‌گیرد که شناسایی و بهینه‌نمودن آن‌ها سبب افزایش بازیابی فرایند و در نهایت افزایش سودآوری پروژه‌های مرتبط با آن خواهد شد. تأثیر عوامل مختلفی از قبیل مینرالوژی کانی‌ها [۳]، ارتفاع هیپ، تعداد و شکل آن، دمای محیط انجام واکنش [۴]، نوع باکتری‌ها و نحوه عمل

1 - Pyrometallurgy
2 - Hydrometallurgy
3 - Microorganisms
4 - Bioleaching

آن‌ها[۵]، مصرف اسید، pH محیط[۶] و زمان لیچینگ بر بازیابی فرایند[۷]، مورد تحقیق قرار گرفته است. تغییر هر یک از پارامترهای ذکر شده در بالا علاوه بر تغییر میزان بازیابی فرایند، سبب تغییر فاحش در نتایج ارزیابی‌های اقتصادی معادن می‌شود.

فعالیت‌های معدن‌کاری و کارخانه‌های فراوری مواد معدنی، با تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی مختلف همراه هستند. لذا در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی معادن در سودآوری و فرایند تولید سالم معادن از اهمیت فراوانی برخوردار هستند. زمانی که در معادن از روش‌های مختلف فراوری استفاده می‌شود، عوامل آلاینده زیست‌محیطی آن‌ها نیز بیشتر می‌شوند. ملاحظات زیست‌محیطی معادن در سودآوری فرایند تأثیرگذار هستند[۸] از این رو سبب تغییر عیارهای حد بهینه معادن نیز می‌شوند. لذا تعیین مقصد ارسال مواد معدنی، وابستگی کامل به ملاحظات زیست‌محیطی روش‌های فراوری دارد[۹]. به منظور تکمیل الگوریتم تعیین عیارهای حد بهینه روش‌های فراوری، ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط با رفع آلاینده‌های زیست‌محیطی معادن و روش‌های فراوری تغلیظ، هیپ‌لیچینگ، ذوب و پالایشگاه، کارخانه استخراج با حلال و الکترووینینگ^۱ در محاسبات در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی و پاکسازی آلاینده‌های معادن ناشی از فرایند لیچینگ از قبیل تراوش اسید از سنگ، بر اقتصاد فرایند مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌های گوناگونی برای تعیین عیارهای حد بهینه با توابع هدف مختلف ارائه شده است. اغلب این مدل‌ها به منظور تکمیل الگوریتم ارائه شده توسط لین^۲ در معادن مس پیشنهاد شده است. تحقیقات انجام شده اغلب برای مدل‌سازی عیارهای حد در معادنی بوده است که از روش‌های پیرومتالورژی برای استحصال مس استفاده کرده‌اند. در این میان الگویی برای بدست آوردن عیارهای حد معادن مسی که با روش هیدرومتالورژی و یا ترکیبی از این روش با روش پیرومتالورژی فعالیت می‌کنند، ارائه نشده است. همچنین، تعیین عیارهای حد معادنی که تنها از روش بیولیچینگ بدین منظور استفاده می‌نمایند، ضروری است. هدف از این تحقیق، شناسایی کلیه پارامترهای فنی و اقتصادی مؤثر در فرایند بیوهیپ لیچینگ مس و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر عیارهای حد است و در نهایت برای تعیین عیارهای حد این معادن، الگوریتم بهینه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی ارائه می‌شود.

1 - Electrowining

2 - K.F.Lane

فصل اول

مقدمه

۱-۱- هدف و ضرورت انجام تحقیق

مس سومین فلز پرمصرف دنیا و میزان مصرف آن، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رشد اقتصادی کشورها محسوب می‌شود [۱۰]. فلز مس در حدود ۰/۰۰۵ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد و به سه صورت سنگ‌های اکسیدی، سولفیدی و مس طبیعی در پوسته زمین یافت می‌شود. در این بین استخراج مس با استفاده از معدن‌کاری و استحصال مس از کانی‌های اکسیدی و سولفیدی آن به ترتیب با استفاده از روش لیچینگ و تغلیظ صورت می‌پذیرد [۱۱]. همچنین به منظور فراوری کانی‌های کم عیار سولفیدی مس، استفاده از روش بیولیچینگ نیز مورد تحقیق قرار گرفته است.

شرایط بازارهای کالا و سرمایه با وجود بحران جهانی اقتصاد دچار تحول‌های فراوانی شده و این مسأله نوسان‌های شدید قیمت مس در سال‌های اخیر را در پی داشت. این اتفاق اگرچه شرایط فعلی بازار را تحت تأثیر قرار داده و مشکلات مالی برای بخش‌های صنایع و معادن در دنیا ایجاد کرده است اما تحلیل‌های اقتصادی، دورنمایی روشن از افزایش تقاضای مس در سطح جهانی را نشان می‌دهند که خود افزایش قیمت‌ها را در بردارد. نگاهی اجمالی به قیمت تمام‌شده محصول داخلی نشان می‌دهد که یک بخش کاملاً خصوصی می‌تواند هزینه‌های تمام شده مس را تا بیست درصد دیگر نیز افزایش دهد.

مزایای ویژه روش‌های هیدرومتالورژی سبب کاربرد روزافزون آن‌ها در معادن مس شده است. لذا با توجه به توسعه دانش و پیشرفت‌های فنی این روش‌ها، استفاده از آن‌ها در حال گسترش است. برخی از ویژگی‌های خاص این روش، سبب انتخاب آن به عنوان روش اصلی فراوری در معادن کوچک شده است. هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی پایین [۱۲]، از جمله این ویژگی‌ها است. علاوه بر آن، آلایندگی کمتر زیست‌محیطی این روش‌ها [۱۳]، سبب افزایش کاربرد آن‌ها در معادن بزرگ نسبت به روش‌های پیرومتالورژی گردیده است. علی‌رغم مزایا و ویژگی‌های خاص این روش و سادگی فرایند آن، تولید نسبتاً پایین آن نسبت به روش‌های پیرومتالورژی، شاخص‌ترین ضعف آن در نظر گرفته می‌شود. همچنین بازیابی کمتر این روش‌ها نسبت به روش‌های پیرومتالورژی نیز مورد توجه بوده است. با توجه به تولید پایین روش‌های هیدرومتالورژی، بازیابی نسبتاً پایین و هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی پایین آن‌ها، فراوری مواد معدنی کم‌عیار با استفاده از این روش‌ها بیشتر مورد تأکید قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، این روش‌ها در فراوری کانسارهای اکسیدی مس نسبت به روش‌های پیرومتالورژی موفق هستند. با توجه به موارد ذکر شده، روش‌های هیدرومتالورژی معمولاً همراه با روش‌های پیرومتالورژی در معادن مس مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین تعیین مقصد ارسال مواد معدنی و عیارهای حد بهینه، در این شرایط حائز اهمیت می‌شود. روش هیپ‌لیچینگ، از جمله کاربردی‌ترین روش‌های هیدرومتالورژی است. این روش در مقیاس صنعتی بخوبی مورد استفاده قرار گرفته و دارای ویژگی‌های ممتازی می‌باشد. موارد

متعددی از استفاده صنعتی این روش‌ها برای کانسارهای سولفیدی مس وجود دارد [۱۴] و این در حالی است که موفقیت این روش در فراوری کانسارهای اکسیدی مس اثبات شده است.

روش هیپ‌لیچینگ در مقیاس صنعتی در فراوری کانسارهای سولفیدی اولیه و ثانویه^۱ مس، به کمک لیچینگ باکتریایی و یا شیمیایی استفاده می‌شود [۱۵]. با توجه به مطالب ذکر شده، هم‌اکنون تمایل به استحصال محصول نهایی حتی از خاک‌های کم‌عیار سولفیدی مس با استفاده از روش‌های هیدرومتالورژی به شدت افزایش یافته است. لذا محاسبه عیارهای حد بهینه معادنی که از این روش فراوری استفاده می‌نمایند، دارای اهمیت بیشتری می‌شود.

روش بیوهیپ لیچینگ یکی از انواع این روش‌ها است که با کمتر شدن عیارهای قابل استخراج معادن مس، از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. همچنین با کاهش ذخایر معادن مس سولفیدی با عیار بالا که قابلیت استفاده از روش فلوتاسیون را داشتند، استفاده بیشتر از روش‌های هیدرومتالورژی مدنظر قرار گرفته است. در این شرایط تعیین عیارهای حدی که منجر به ایجاد بیشترین میزان ارزش خالص فعلی می‌شود، حائز اهمیت است.

هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی عیارهای حد بهینه روش‌های هیدرومتالورژی با تکیه بر روش بیولیچینگ، در صنعت مس است. انجام این تحقیق بدان علت ضرورت دارد که با کاهش عیار معادن مس، استفاده از روش‌های تغلیظ حتی به دلایل فنی نیز با مشکلاتی مواجه است؛ در آن حال که روش بیولیچینگ قابلیت استحصال مس از معادن با عیارهای پایین را دارد.

تاکنون بسیاری از پارامترهای مؤثر بر بازیابی و اقتصاد فرایند بیوهیپ لیچینگ مس شناسایی شده است. چگونگی اثرگذاری آن‌ها بر فرایند و همچنین ایجاد شرایط مناسب برای تامین حالت بهینه برای هریک، مورد بررسی قرار گرفته است. ارتباط بسیاری از این پارامترها با میزان بازیابی فرایند شبیه‌سازی شده و در مواردی چگونگی تأثیر برخی از پارامترها بر روی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی فرایند نیز مورد تحقیق قرار گرفته و معادلاتی برای آن ارائه شده است [۱۶]. این در حالی است که با توجه به استفاده گسترده از روش‌های هیدرومتالورژی در معادن مس، تأثیر این پارامترها بر عیارهای حد بهینه این روش‌های فراوری مورد بررسی کامل قرار نگرفته است. لذا یکی از اهداف مشخص این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بر میزان عیارهای حد بهینه روش‌های فراوری می‌باشد.

۱ - کانسارهای سولفیدی اولیه مس بیشتر شامل کانی‌های کالکوپیریت ($CuFeS_2$) و بورنیت (Cu_5FeS_4) هستند و با انواع روش‌های پیرومتالورژی قابلیت استحصال دارند [۱۶]. از طرفی کانسارهای سولفیدی ثانویه بیشتر شامل کالکوسیت (Cu_2S) و کوولیت (CuS) هستند که قابلیت بالای لیچینگ آن‌ها اثبات شده است.

در شرایطی که معادن مس از چندین روش فراوری استفاده می‌نمایند، تعیین عیارهای حد بهینه و مقصد ارسال مواد نه تنها از جنبه‌های اقتصادی و فنی حائز اهمیت است، بلکه تأثیرات بسزایی در مدیریت زیست‌محیطی معادن دارد. از طرف دیگر ایجاد مدل تعیین عیارهای حد بهینه، نیازمند مشخص شدن دقیق پارامترهای تأثیرگذار در سودآوری معادن می‌باشد. لذا باید عوامل تأثیرگذار در عیارهای حد بهینه مورد بازتعریف قرار گیرند. از این رو در این تحقیق، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی روش‌های فراوری مواد معدنی و معدن‌کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مدلسازی تعیین عیارهای حد بهینه معادن با هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی انجام می‌شود. علاوه بر آن، با توجه به استفاده از روش‌های مختلف فراوری در معادن و آلاینده‌های مخرب زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها، ملاحظات زیست‌محیطی روش‌های فراوری در تعیین مقصد ارسال مواد معدنی مورد ارزیابی مجدد قرار می‌گیرد. به منظور تکمیل مدلسازی، باید تغییرات بازیابی روش‌های فراوری منظور شده در مدل، نسبت به عیار میانگین مورد توجه دقیق قرار گیرد. لذا تأثیر روابط عیار- بازیابی در روش‌های پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی بر میزان عیارهای حد بهینه معادن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت با توجه به وجود پارامترهای مستقل و وابسته گوناگون و محدودیت‌های تعریف شده در مدل، به کمک یک روش بهینه‌سازی چند متغیره مشروط، مقدار عیارهای حد بهینه روش‌های لیچینگ و تغلیظ و مقدار بیشینه ارزش خالص فعلی محاسبه شده است.

۱-۲- روش تحقیق

روش تحقیق بدین گونه خواهد بود که ابتدا توسط مطالعات میدانی گسترده در چندین معدن فعال مس و مطالعات کتابخانه‌ای بر روی مقالات و کتب موجود، اطلاعات مورد نیاز فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فرایندهای این معادن جمع‌آوری خواهد شد. همچنین معادلات و روابط ارائه شده در این زمینه مورد بررسی و تحقیق قرار خواهد گرفت. در ادامه بعد از بررسی و شناسایی کلیه پارامترهای مؤثر بر عیارهای حد بهینه روش‌های فراوری، الگوریتم تعیین عیارهای حد بهینه ارائه خواهد شد. تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی و آلاینده‌های فرایندهای تغلیظ و بیولیچینگ در مدلسازی عیارهای حد بهینه در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اهمیت بالای هزینه‌های سرمایه‌ای در سودآوری فرایندهای تولید، این هزینه‌ها در مدلسازی عیارهای حد وارد می‌شوند. از طرفی با انجام تست‌های فراوری بر نمونه‌های معدن مس سونگون و ساخت ستون‌های آزمایشگاهی لیچینگ، تأثیر عیار میانگین ماده معدنی بر بازیابی فرایندهای تغلیظ و بیولیچینگ و عیارهای حد بهینه، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در نهایت بعد از تکمیل الگوریتم تعیین عیارهای حد بهینه، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی به عنوان تابع هدف این الگوریتم تعریف می‌شود. بدین منظور لازم است جریان‌های نقدینگی سالیانه ناشی از درآمدها و هزینه‌های روش‌های فراوری و معدن، محاسبه شود. متغیرهای تابع جریان‌های نقدینگی بیشینه، عیارهای حد بهینه روش‌های

فراوری می‌باشند. با تعیین این عیارهای حد بهینه و به کمک یک الگوریتم تکرار، مقدار بیشینه ارزش خالص فعلی و همچنین عیارهای حد بهینه قابل محاسبه است. با توجه به شرایط بیشینه‌سازی مشروط جریان‌های نقدینگی که ناشی از محدودیت ظرفیت تولید کارخانه‌های مختلف می‌باشد، از روش بیشینه‌سازی مشروط ضریب لاگرانژ استفاده شده است. به علت پیچیدگی محاسبات و فرایند تکرار، کلیه مراحل تعیین عیارهای حد بهینه و تعیین مقدار ارزش خالص فعلی بیشینه، از قبیل محاسبات ریاضی، توابع مقایسه‌ای و اجرای الگوریتم تکرار به کمک کدنویسی با زبان برنامه‌نویسی مطلب صورت پذیرفته است. در نهایت مدل ایجاد شده برای چند معدن که دارای روش‌های فراوری مختلف هستند، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- ساختار تحقیق

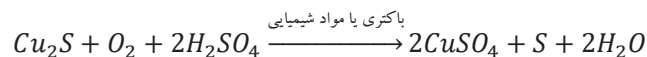
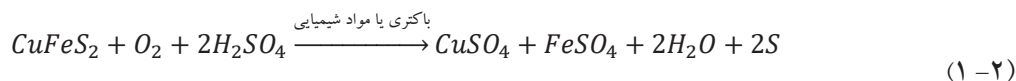
در این پروژه، پس از ارائه مقدمه‌ای کوتاه در فصل اول، ادبیات موضوع، تاریخچه و اهم فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه عیارهای حد روش‌های هیدرومتالورژی، در فصل دوم مرور شده است. سپس در فصل سوم، پارامترهای مؤثر در مطالعات فنی و اقتصادی فرایندهای هیدرومتالورژی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این فصل علاوه بر بررسی پارامترهای مؤثر، الگوریتم‌های ارائه شده برای تعیین عیارهای حد بهینه بررسی شده است. در ادامه مراحل تست‌های فراوری انجام شده ذکر گردید و نتایج حاصل از این تست‌ها تشریح شده است. در فصل چهارم، مدل‌سازی تعیین عیارهای حد بهینه صورت پذیرفته است و نتایج حاصل از تست‌های فراوری و مطالعات میدانی صورت گرفته، در مدل‌سازی وارد شده‌اند. روابط ریاضی، محدودیت‌ها، الگوریتم‌ها و فلوچارت محاسبه مقدار بیشینه ارزش خالص فعلی در این فصل ارائه شده‌اند. در فصل پنجم بعد از محاسبه عیارهای حد بهینه روش‌های فراوری، نتایج حاصل از این تحقیق در معدن مس سونگون مورد ارزیابی قرار گرفته است و مدل ارائه شده در این معدن در شرایط مختلف اعتبارسنجی شده است. همچنین مدل ارائه شده در شرایط مختلفی از یک معدن فرضی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در فصل ششم، نتیجه‌گیری پروژه ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع

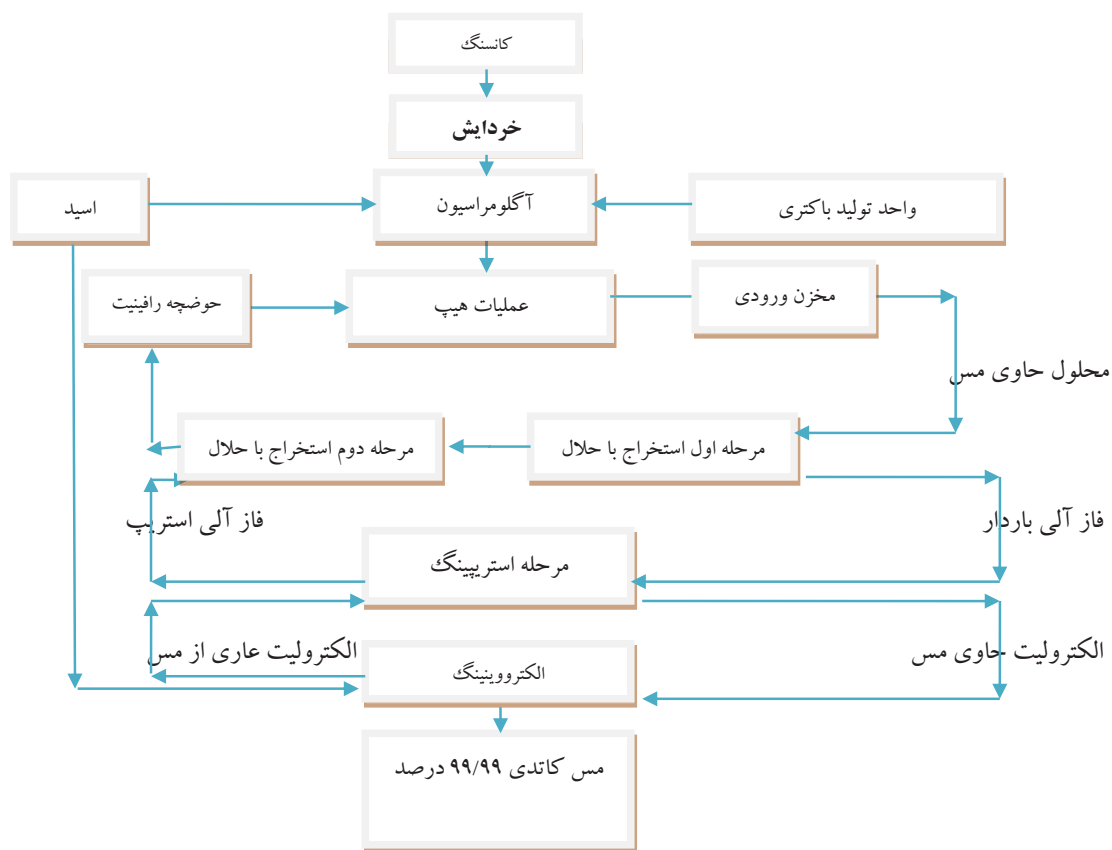
۱-۲- هیدرومتالورژی

هیدرومتالورژی یک شاخه تخصصی از متالورژی استخراجی است که برای بازیابی فلزات از کانه‌ها، کنسانتره‌ها و دیگر محصولات میانی متالورژی، به روش تر انجام می‌شود. فلز مس را می‌توان با روش‌های هیدرومتالورژی، از بیشتر کانی‌های مس استخراج کرد؛ هر چند میزان بازیابی آن‌ها متفاوت است. مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی سولفیدی مس که بیشترین ارزش اقتصادی را دارد، کالکوپیریت است. کانی‌های بورنیت، کالکوسیت و کوولیت، در رتبه‌های بعدی ارزش اقتصادی هستند. درجه حلالیت این کانی‌ها در اسید سولفوریک، در ابتدای تماس با حلال بالاست و بعد از مدتی به سرعت کاهش می‌یابد. علت این تغییر در سرعت انحلال، ماهیت سولفیدی این کانی‌هاست که باعث تشکیل نمک نامحلول جاروسیت^۱ می‌شود. این مسأله در مورد کالکوپیریت، به علت وجود آهن شدیدتر است و کانی‌های ثانویه سولفیدی مس یعنی کالکوسیت، کوولیت و آنارگیت، راندمان بیشتری در فرایندهای هیدرومتالورژی دارند. این مسأله باعث می‌شود که استفاده از باکتری‌ها و یا روش‌های شیمیایی خاص تحت شرایط کاتالیزوری مشخص، برای تغییر ساختار کانه‌های سولفیدی اولیه و ثانویه مس، ضرورت پیدا کند. رابطه (۱-۲) تأثیر استفاده از باکتری و یا لیچینگ شیمیایی بر روی سولفیدهای اولیه (کالکوپیریت) و ثانویه مس (کالکوسیت) را بیان می‌کند.



یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های هیدرومتالورژی استحصال مس از سنگ معدن آن، روش هیپ‌لیچینگ است که برای انواع کانسارهای اکسیدی و سولفیدی مس در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۱-۲)، شماتیک عملیات در روش بیوهیپ‌لیچینگ را نشان می‌دهد.

1 - Jarrosite ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)



شکل (۱-۲): فرایند تولید مس در کارخانه بیوهیپ لیچینگ مس

مراحل مختلف عملیات در روش هیپ لیچینگ، عبارتند از: آماده سازی بار اولیه، عملیات هیپ، استخراج با حلال و الکترووینینگ.

- آماده سازی بار اولیه

بسته به نوع عملیاتی که بر روی ماده معدنی انجام می شود، بار اولیه باید به طور مناسب آماده شده باشد. این آماده سازی مزایایی دارد که عبارتند از:

- (۱) هزینه عملیات هیدرومتالورژی را کاهش می دهد.
- (۲) منجر به افزایش بازدهی عملیات می شود.
- (۳) باعث بهبود کیفیت محصول می شود.

انحلال عنصر یا کانی مورد نظر، وقتی امکان‌پذیر است که بتواند با حلال تماس پیدا کند. هر چه تخلخل ماده معدنی بیشتر باشد، انحلال با سرعت بیشتری انجام می‌شود. در صورت عدم وجود تخلخل کافی، باید ماده معدنی را تا ابعاد مناسب خرد کرد. این مسأله سبب می‌شود بلورهای عنصر یا کانی مورد نظر، سطح تماس مناسبی با حلال داشته باشد. مطالعات کانی‌شناسی می‌تواند راهنمای خوبی برای تعیین میزان خرد کردن مواد معدنی باشد. هر چه دانه‌های ماده با ارزش کوچک‌تر باشد سرعت انحلال بیشتر می‌شود. خرد شدن بیش از حد معمول مواد، مقدار نرمه را افزایش می‌دهد که خود منجر به بروز مشکلاتی در جدا کردن محصول غنی شده از مواد جامد باقیمانده می‌شود. بنابراین یکی از رایج‌ترین عملیات در مراحل آماده‌سازی، جداسازی نرمه از ماده معدنی است که باعث افزایش بازدهی عملیات فراوری در مواد دانه‌درشت می‌شود. در مورد مواد معدنی ریزدانه، آگلومراسیون یکی از مراحل آماده‌سازی است. آگلومراسیون به تغییرات فیزیکی گفته می‌شود که ذرات دانه‌ریز را به یکدیگر متصل کرده کلوخه‌های بادوام از آن‌ها تشکیل می‌دهد. این کلوخه‌ها باید به اندازه‌ای تخلخل داشته باشند تا حلال بتواند در آن‌ها نفوذ کرده ماده مورد نظر را حل کند.

در بعضی موارد برای آماده‌سازی سنگ‌های معدنی از عملیات تشویه استفاده می‌شود. تشویه یعنی اکسایش کانی با هوا در دمای ۷۰۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد که در کوره‌های تشویه اجاقی یا تشویه‌کننده با بستر سیال در شرایط کاملاً کنترل شده صورت می‌گیرد.

- عملیات هیپ

سنگ معدنی خردشده پس از نرمه‌گیری و یا آگلومراسیون، با دقت زیاد روی یک بستر ضد اسید و نفوذ ناپذیر انباشت و سپس محلول اسیدی از حوضچه رافینیت به سطح توده منتقل و روی آن پاشیده می‌شود. این محلول پس از عبور از توده مواد معدنی، از زیر هیپ (روی بستر نفوذ ناپذیر) جمع‌آوری شده و به حوضچه محلول باردار فرستاده می‌شود. برای استخراج مس، محلول باردار از حوضچه به واحد استخراج با حلال منتقل می‌شود. اگر غلظت مس در حوضچه محلول باردار کم باشد، این محلول دوباره به روی هیپ برگشت داده می‌شود تا عیار مس موجود در آن برای فرایند استخراج با حلال مناسب شود. بعد از استحصال مس از محلول باردار، محلول باقی‌مانده اصطلاحاً بی‌بار شده و به حوضچه رافینیت برگشت داده می‌شود. در عملیات هیپ‌لیچینگ، مسدود شدن مجاری حرکت عامل لیچینگ، اتلاف عامل لیچینگ به دلیل تبخیر و نشست محلول از کف هیپ و کانال‌ها، از جمله مشکلات مهم است.

- استخراج با حلال

استخراج با حلال عبارت است از: تماس دادن یک حلال آلی با محلول حاوی فلز مورد نظر. طی این فرایند، فلز از محلول (فاز آبی) به فاز آلی منتقل می‌شود. از آنجا که این دو فاز مایع با هم قابلیت اختلاط ندارند، برای

ایجاد تماس بین آن‌ها، لازم است دو محلول توسط یک همزن مخلوط شوند. پس از توقف عملیات همزنی، این دو مایع از هم جدا می‌شوند. به این ترتیب می‌توان فلز مورد نظر را از سایر ناخالصی‌های موجود در محلول جدا کرد. همچنین پس از جدا کردن فاز آبی و آلی از یکدیگر، فاز آلی را می‌توان پاک‌سازی کرد و آن را مجدداً مورد استفاده قرار داد.

- الکترووینینگ

در عملیات استخراج با حلال، محلول‌هایی حاوی ۳۰-۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب مس تولید می‌شود. مس از درون این محلول‌ها به صورت کاتد مسی با استفاده از الکترووینینگ بازیابی می‌شود. الکترووینینگ فرایندی است که در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی بین آند خنثی و کاتد مسی که هر دو در محلول محتوی مس فرو رفته‌اند برقرار می‌شود. با برقراری جریان الکتریسته، یون‌های Cu^{2+} بر روی صفحات کاتد رسوب می‌کنند. تفاوت روش الکترووینینگ و پالایش الکتریکی مس در این است که در الکترووینینگ، مس از آند به سمت کاتد منتقل نمی‌شود بلکه کاتیون‌های مس از محلول، روی سطح کاتد رسوب می‌کنند و آند بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان گفت در الکترووینینگ به علت استفاده از آند خنثی (غیر محلول)، تمامی مس که بر روی کاتد رسوب می‌کند از الکترولیت استحصال می‌شود؛ در صورتی که در پالایش الکترولیتی، مس از آند مس جدا شده و در الکترولیت وارد می‌شود.

۲-۲- عیار حد

به‌طور کلی عیار حد به حداقل عیاری گفته می‌شود که در آن، درآمد حاصل از فروش یک تن ماده معدنی با هزینه‌های استخراج و تغلیظ آن برابر شود. براساس تعریف ارائه شده برای عیار حد، می‌توان در ارتباط با استخراج و یا عدم استخراج بلوک‌های ماده معدنی بر اساس عیار آن‌ها تصمیم‌گیری کرد. در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی در توسعه مدل و روابطی انجام گرفته است که به موجب آن، عیارهای حد بهینه با هدف بیشینه کردن ارزش خالص فعلی محاسبه می‌شود. در این روابط علاوه بر منظور کردن عوامل اقتصادی، شرایطی چون ظرفیت تولید (استخراج) ماده معدنی، ظرفیت کارخانه تغلیظ، ظرفیت کارخانه ذوب و پالایش و ارزش زمانی پول نیز در نظر گرفته شده‌اند. مهم‌ترین مرجع در این زمینه کتاب کنت لین^۱ است که اولین بار در سال ۱۹۸۸ به چاپ رسیده و سپس در سال ۱۹۹۱ تجدید چاپ شده است [۱۸]. این کتاب با توضیحات ساده، ارائه روابط و حل مثال‌های متعدد، اصول اولیه محاسبه عیار حد و نقش آن در طراحی معادن را بیان کرده است.

1- Kenneth F Lane

علاوه بر تحقیقات انجام شده توسط لین، تلاش‌های بسیاری در جهت بهینه‌سازی عیارهای حد توسط افراد دیگر صورت پذیرفته است. دگدلن^۱ [۲۰، ۱۹]، محمد^۲ [۲۱]، مینیت^۳ [۲۲]، ویتل^۴ و وارتون^۵ [۲۴، ۲۳]، رندیو^۶ [۲۵]، اسد^۷ [۲۷، ۲۶]، عطایی [۲۸] و اصائلو [۳۰، ۲۹]، از جمله این افراد بوده‌اند. بسیاری از این تلاش‌ها در جهت تکمیل الگوریتم ارائه شده توسط لین بوده است. با این که تلاش‌های این محققان در تکمیل الگوریتم‌های بهینه‌سازی عیارهای حد مؤثر بوده ولی هیچ‌کدام تأثیر روش‌های مختلف فراوری به‌ویژه هیدرومالتورژی را در تعیین عیارهای حد بهینه مورد بررسی قرار نداده‌اند. همچنین تأثیر پارامترهای زیست‌محیطی برای معادنی که در آن‌ها از روش‌های مختلف فرآوری استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار نگرفته؛ اگرچه محققانی مانند کینگ^۸ [۳۱]، رزگونی^۹ [۳۲] و رشیدی‌نژاد [۳۳]، فقط ملاحظات زیست‌محیطی روش تغلیظ را در تعیین عیارهای حد بهینه در نظر گرفته‌اند.

در مدل‌سازی‌های ارائه شده توسط اکثر محققان به‌منظور تعیین عیارهای حد بهینه، از تأثیر هزینه‌های سرمایه‌ای روش‌های فراوری چشم‌پوشی شده است. در حقیقت فرض شده که کارخانه‌های فراوری وجود دارند و در نتیجه فقط هزینه‌های عملیاتی کارخانه‌های فراوری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در شرایطی که هدف، تعیین عیارهای حد روش‌های مختلف فراوری باشد، در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌ای در محاسبه عیارهای حد بهینه ضرورت دارد. این ضرورت بدان علت است که روش‌های فراوری دارای هزینه‌های سرمایه‌ای متفاوتی هستند.

۲-۳- مروری بر تاریخچه موضوع

به منظور تعیین عیارهای حد بهینه، با توجه به تأثیر پارامترهای فرایندی روش‌های هیدرومالتورژی، پژوهش‌هایی صورت گرفته است. با توجه به تأثیر پارامترهای روش‌های فراوری بر اقتصاد معادن، سعی شده تحقیقاتی مورد بررسی قرار گیرد که در اقتصاد فرایندهای هیدرومالتورژی تأثیرگذار باشند. همچنین تحقیقات صورت گرفته در زمینه تعیین عیارهای حد بهینه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۳-۱- پژوهش‌های انجام شده در زمینه پیشرفت دانش هیدرومالتورژی

بشر از هزاران سال قبل، روش ساخت کوره‌ها و ذوب سنگ‌ها برای تولید فلزات را آموخته بود، اما استفاده از آب در فراوری کانه‌ها اساساً از زمان کیمیاگران شروع نشده و به دوره‌ای باز می‌گردد که بازها و اسیدها کشف

-
- 1- Dagdelen K
 - 2- Mohammad
 - 3- Minniti R.C.A
 - 4- Jeff Whittle
 - 5- Wharton C.L.
 - 6- Rendu J.M.
 - 7- Asad M.W.A.
 - 8- King B.M.
 - 9- Rozgoni T.G.

شدند و مورد استفاده قرار گرفتند. هیدرومتالورژی در اواخر قرن ۱۹ با کشف دو فرآیند مهم گسترش یافت: یکی، سیانوراسیون، توسط جان استوارت^۱ و مک آرتوز^۲ برای استخراج طلا و نقره و دیگری فرآیند بایر^۳ توسط کارل جوزف^۴ برای استحصال آلومینا^۵ از بوکسیت^۶ [۳۴].

کشف تیزاب توسط جابر بن حیان، پیشرفت بزرگی در علم هیدرومتالورژی به وجود آورد. در قرن شانزدهم استخراج مس به روش تر مورد توجه قرار گرفت. هیدرومتالورژی روی و تولید تجاری آن توسط لئون لترنز^۷ برای اولین بار در سال ۱۸۸۱ در فرانسه مطرح شد [۳۴]. روش‌هایی که وی در آن زمان مطرح کرده، امروزه پایه و اساس روش‌های تولید روی به طریقه تر است.

در سال ۱۹۱۶، از هیدروکسید آمونیوم برای لیچینگ کانه‌های مالاکیت و آزوریت، استفاده شد. در دهه ۱۹۴۰ همراه با توسعه تکنولوژی تولید اورانیوم در پروژه مانهاتان^۸، که هدف آن تولید بمب اتم بود، از لیچینگ توده‌ای و درجا برای استحصال مس از مواد معدنی کم‌عیار استفاده شد [۳۴]. کاربرد لیچینگ تحت فشار برای مواد خام مانند اورانیوم و کاربرد استخراج با حلال برای مس در سال‌های ۱۹۶۰ انجام شده است. در سال ۱۹۷۰ مکانیزم انحلال سولفیدها مطرح شد و لیچینگ تحت فشار کنسانتره سولفیدی روی در مقیاس صنعتی در کانادا انجام شد.

در سال ۱۹۸۹، جیمز آلن^۹ روش نوینی برای استحصال منگنز در شرایط دمایی مشخص و با مخلوطی از اسید سولفوریک و آب اکسیژنه ارائه کرد [۳۵]. در همین زمینه، آبرازس^{۱۰}، قابلیت لیچینگ منگنز با استفاده از دی‌اکسید گوگرد را در دمای اتاق آزمایش کرد و به‌عنوان تابعی از میزان نرخ پاشش اسید و زمان، مورد بررسی قرار داد [۳۶]. در همان سال، توانایی اکسیداسیون باکتریایی برای استحصال طلا از کنسانتره سولفیدی طلا-آرسنیک توسط کامنتساس^{۱۱} به اثبات رسید. او آزمایش‌های بیولیچینگ خود را در رآکتورهای پاچوکا^{۱۲} به منظور تخمین تأثیر چگالی پالپ بر میزان اکسیداسیون پیریت و آرسنوپیریت انجام داد [۳۷]. همچنین مدل‌سازی ریاضی برای تعیین بازیابی طلا و درجه اکسیداسیون انجام شد. پترسن^{۱۳}، اثر استفاده از میکروارگانیزم‌ها در لیچینگ طلا، نقره و مس با استفاده از طیف سنجی جذب اتمی را مورد بررسی قرار داد [۳۸]. او در ابتدا با

1- John Stewart

2- Mack Artoz

3 - Buyer

4 - Carl Jozepeh

5 - Alumina

6 -Bauxite (Al_2O_3)

7 - Leon Letrenzh

8 - Manhattan

9- James P Allen

10- C.Abruzzese

11- C.Komntsas

12- Pachuca

13- F.W.Petersen

استفاده از روش جذب اتمی میزان فلز و عیار آن را محاسبه و سپس تأثیر میکروارگانیزم‌ها را با استفاده از روش نول^۱ تحقیق کرد. وی در نهایت تغییرات به وجود آمده را ثبت و ارائه کرده است.

اهونن^۲ و تووینن^۳، برای اولین بار تأثیر استفاده از کاتالیست نقره در بیولیچینگ کانی‌های کالکوپریت در رآکتورهای ستونی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۹]. طبق تحقیق صورت گرفته، با حضور ۳۰ تا ۴۵ میلی گرم بر لیتر یون نقره، سرعت انجام واکنش‌های لیچینگ کالکوپریت افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر یون نقره بر روی جاروسیت‌های تشکیل شده بوضوح مشاهده شده است.

در سال ۱۹۹۰، قوش^۴ و دات^۵ تأثیر انجام عملیات پیش فراوری بر کالکوپریت را با استفاده از آلکالی مورد تحقیق قرار دادند [۴۰]. تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از آلکالی سبب کاهش سرعت ته‌نشینی یون‌های آهن و در نهایت تشکیل جاروسیت کمتر می‌شود.

در سال ۱۹۹۱، اسمیت^۶ و میسرا^۷، به شناسایی و معرفی تأثیر استفاده از باکتری‌ها در فراوری کانی‌های سولفیدی پرداختند و نتایج خود را به صورت رساله‌ای منتشر کردند [۴۱]. در همان سال، اسپنسر^۸ و بودن^۹ به آثار مثبت استفاده از باکتری‌ها در تجزیه کانی‌های سولفیدی اشاره کرده‌اند [۴۲]. آن‌ها چندین نوع باکتری را مورد تحقیق قرار دادند و در نهایت اعلام کردند که استفاده از باکتری‌ها در جدایش کمپلکس کانی‌های باارزش بسیار مفید بوده است.

ونکاتچلام^{۱۰}، استفاده از تکنیک‌های مختلف روش هیدرومتالورژی را برای لیچینگ کالکوپریت مورد تحقیق قرار داده است [۴۳]. این روش‌ها شامل بهسازی گرمایی قبل از فرایند لیچینگ، لیچینگ مستقیم و روش الکتروشیمیایی مستقیم بوده است. همچنین او تأثیر استفاده از اسید نیتریک در لیچینگ کانی‌ها را نیز بررسی کرده است.

استانگ^{۱۱}، فرایند سمانتاسیون را با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و اقتصادی بهینه کرد [۴۴]. هدف او مدل‌سازی میزان جذب سطحی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در آن بوده است.

شیلا^{۱۲} و سانکاران^۱، استحصال منگنز با خلوص بالا از منگنزهای عیار پایین و دامپ‌های باطله آن را با استفاده از دی اکسید کربن فشرده مورد تحقیق قرار دادند [۴۵]. آن‌ها نشان دادند که فاکتورهای زمان، دما، فشار، ابعاد

¹- Novel

²- L.Ahonen

³- O.H.Tuovinen

⁴- N.Ghosh

⁵- T.K.Datt

⁶- R.W.Smith

⁷- M.Misra

⁸- P.A.Spencer

⁹- J.R.Budden

¹⁰- S.Venkatachalam

¹¹- W.Stange

¹²- D.Sheila

ذرات، نسبت مایع به جامد و دمای تکلیس، در بازیابی هر چه بیشتر منگنز مؤثر هستند. همچنین ایشان مقدار بهینه هر فاکتور را برای آن شرایط خاص گزارش کردند.

در سال ۱۹۹۲، اکف^۲ و نیر^۳ تأثیر استفاده از میکروارگانیزم‌ها در فرایند استخراج با حلال را مورد مطالعه قرار دادند و قابلیت حذف آن‌ها را از سیستم فراوری بررسی کردند [۴۶]. آن‌ها همچنین روش استخراج با حلال را به‌عنوان روش مناسبی برای فراوری روی از اکسیدهای باطله آن ارزیابی کردند. جوردن^۴ و بار^۵ [۴۷]، به ایجاد سولفات‌های آهن در محلول‌های لیچینگ اشاره کردند و تنظیم pH و استفاده از میکروارگانیزم‌ها را به‌عنوان راهی برای کاهش ایجاد این پدیده و در نهایت تولید جاروسیت، معرفی کردند. تأثیر مثبت استفاده از باکتری‌های مزوفیل در طول فرایند لیچینگ، به منظور کاهش رسوب جاروسیت پیشنهاد شده است.

پاسکو^۶ به ارزیابی دقیق هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای احداث یک کارخانه فراوری پرداخته است [۴۸]. هر چند تمرکز او بیشتر بر فرایند تغلیظ بوده، از نظر نحوه برآورد هزینه‌ها و چگونگی طبقه‌بندی آن‌ها، جزء اولین افراد بوده است.

بارت^۷ و هوگز^۸، کتابی با مضمون استخراج فلزات به کمک اکسیداسیون باکتریایی منتشر کردند [۴۸]. این کتاب تأکید فراوانی بر استفاده از میکروبیولوژی در استحصال برخی کانی‌ها دارد. این کتاب همچنین به ارائه روش‌های تحلیلی و اقتصادی فرایند بیولیچینگ پرداخته و هزینه‌های این روش را به‌صورت نسبتاً کاملی معرفی کرده است.

در سال ۱۹۹۴، واران^۹ و اریک^{۱۰} به فرایند لیچینگ کرومیت اشاره کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در مخلوطی از اسید سولفوریک و کرومیت در بازه دمایی ۲۱۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند [۴۹]. تأثیر دما و غلظت اسید سولفوریک در این مطالعه به‌طور مفصل بررسی شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده افزایش سرعت واکنش‌ها با اضافه کردن اسید کلریدریک به محلول و همچنین ایجاد سولفات‌های نامحلول در اثر افزایش غلظت اسید سولفوریک در آن بوده است.

هولتوم^{۱۱} و مورای^{۱۲} استفاده از روش اکسیداسیون باکتریایی بایکس^۱ در استحصال کانی‌های کم‌عیار سولفیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۵۰]. آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های ریاضی، نتایج لیچینگ ستونی را با

¹- C.Sankaran

²- T.J.Okefe

³- M.Neir

⁴- M.A.Jordan

⁵- W.Barr

⁶- R.D.Pascoe

⁷- J.Barrett

⁸- M.N.Hughes

⁹- E.Varar

¹⁰- R.H.Eric

¹¹- D.A.Holtum

¹²- D.M.Murray

باکتری در مقیاس آزمایشگاهی پیش‌بینی کردند و همچنین در ارتباط با فاکتورهای اقتصادی فرایند و عوامل مؤثر بر آن مسائلی را مطرح کردند.

در سال ۱۹۹۵، والنزولا^۲، آندراد^۳ و ساپج^۴، میزان بازیابی مس و مولیدن از محلول باردار توسط سیستم استخراج با حلال را مطالعه کرده‌اند [۵۱]. مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از اسید نیتریک و اسید سولفوریک در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بر میزان بازیابی مؤثر بوده است. آن‌ها استفاده از استخراج کننده PC-88A را برای مولیدن و LIX864 را برای مس مؤثرتر دانسته‌اند.

می‌یر^۵، بالستر^۶ و بلاز کوئس^۷، تأثیر استفاده از چندین یون فلزی در فرایند بیولیچینگ کالکوپریت، در حضور باکتری‌های سولفوبوس را بررسی کردند [۵۲]. یون‌های مورد استفاده Hg ، Co ، Mo و Ru بودند و از هر کدام ۱۰ گرم به ازای هر کیلوگرم استفاده شده بود. همچنین استفاده از یون نقره به همراه بیسموت نیز مورد تحقیق قرار گرفته است. آن‌ها نتایج تحقیق خود را به صورت رساله‌ای ارائه کردند.

هاولیک^۸ و کامل^۹، استفاده از $FeCl_3$ و CCl_4 را در ارتباط با فرایند لیچینگ کالکوپریت مورد تحقیق قرار دادند [۵۳]. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده بازیابی بالای مس در حضور CCl_4 بوده است. وجود CCl_4 سبب انجام یک واکنش شیمیایی شده که انرژی آن واکنش در بازه دمایی ۴۵-۸۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۶۸/۹ کیلوژول بر مول بوده است.

در سال ۱۹۹۶، پولین^{۱۰} و لاورنس^{۱۱}، چهار فرایند مختلف در روش هیدرومتالورژی را بررسی و مقایسه کرده‌اند [۹]. این بررسی بیشتر شامل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی بوده است. روش‌های مورد بررسی، روش بیواکسیداسیون طلای خرد شده، استخراج مس از سولفیدها، بازیابی فلز با استفاده از کربن فعال از کانی‌های سولفیدی و بازیابی فلز با استفاده از وتلنس^{۱۲} بوده است. آن‌ها در این مطالعات بر جایگاه ویژه روش بیوهیدرومتالورژی، از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی تأکید کرده‌اند. ایشان سادگی اجرای روش‌های هیدرومتالورژی را به عنوان دیگر مزیت این روش معرفی کردند.

¹ - BIOX

² - F.R.Valenzuela

³ - J.P.Andrade

⁴ - J.Sapage

⁵ - J.L.Mier

⁶ - A.Ballester

⁷ - M.L.Blazques

⁸ - T.Havlik

⁹ - R.Kammel

¹⁰ - R.Poulin

¹¹ - R.W.Lawrence

¹² - Wetlans

گومز^۱ و بلازس^۲، تأثیر استفاده از نوعی باکتری ترموفیل را در استحصال کالکوپیریت بررسی کردند [۵۴]. آن‌ها فرایند فوق را با استفاده از دو روش *SEM* و *EPS* مورد کنترل و نظارت قرار دادند. مشاهدات آن‌ها حاکی از بازیابی ۸۰ درصد و حلالیت بالای Fe^{2+} بوده است.

در سال ۱۹۹۷، گومز^۳، فیگوروا^۴ و میونز^۵ [۵۵]، رفتار الکتروشیمیایی توده کالکوپیریت در اثر لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. باکتری‌های مورد استفاده، تیوباسیلوس فرواکسیدانس، تیوباسیلوس تیواکسیدانس و لیپتوسپرلیوم فرواکسیدانس بوده‌اند. نتایج با استفاده از روش ولتامتریک ثبت شده و نشان‌دهنده تأثیر باکتری‌ها بر جلوگیری از رسوب یون‌های فلزی و تأثیر بیشتر اسید بر سطح کالکوپیریت بوده است.

رابرت بارتلت^۶ [۱۱]، تلاش فراوانی جهت مدل‌سازی تمامی فرایندهای موجود در درون هیپ‌های طلا کرده است. نتیجه تحقیقات او ارائه روابطی بوده که بر اساس آن‌ها تأثیر کلیه پارامترهای مؤثر در بازیابی هیپ، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در سال ۱۹۹۸، ساروسورا^۷ و رای^۸، استفاده از فرایند لیچینگ آمونیاکی را برای استحصال سولفیدهای فلزی مورد آزمایش قرار دادند [۵۶]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده اثر مثبت این فرایند بر استحصال مس از کالکوپیریت (تا ۹۵ درصد)، روی از اسفالریت و سرب از گالن بوده است. آن‌ها در این آزمایش‌ها متوجه شدند که پیریت به‌وجود آمده در هنگام اکسیداسیون ترکیبات سرب، یون‌های آهن حاصل از انحلال کالکوپیریت را اکسید می‌کند که این مسأله از مزیت‌های این روش است.

در سال ۱۹۹۹، گومز^۹ و بلاز کوئس^{۱۰}، فرایند لیچینگ باکتریایی را برای سولفیدهای فلزی مورد بررسی قرار داده‌اند [۵۷]. نتایج این تحقیقات، نشان‌دهنده تأثیر نحوه تغذیه باکتری‌ها، همزنی، غلظت پالپ، دما و اضافه کردن CO_2 به همراه هوادهی باکتری‌ها، در نرخ لیچینگ بوده است. گریک^{۱۱} و پینچس^{۱۲} استفاده از نوعی باکتری ترموفیل مطلق را برای فرایند بیولیچینگ کالکوپیریت بررسی کردند [۵۸]. آن‌ها به تأثیر درصد جامد پالپ بر روی سینتیک واکنش اکسیداسیون اشاره کرده‌اند. همچنین نتایج تحقیق آنان نشان‌دهنده کاهش زمان ماند پالپ در سلول‌های تحت فشار، در اثر استفاده از باکتری برای این فرایند بوده است.

¹- E.Gomez

²- M.L.Blazques

³- G.Gommez

⁴- M.figueroa

⁵- J.Munoz

⁶- Robert W.Bart Lett

⁷- K.Sarveswara

⁸- H.S.Ray

⁹- C.Gomez

¹⁰- M.L.Blazquez

¹¹- M.Gericke

¹²- A.Pinches

در سال ۲۰۰۰، ممبوت^۱ و ریوتر^۲ مزایا و معایب روش هیدرومتالورژی را مورد بررسی قرار دادند [۵۹]. آنها در مورد مزایای این روش به بحث پرداخته و توان تولید بالا به همراه هزینه‌های عملیاتی پایین و همچنین تناسب زیست‌محیطی را از مهم‌ترین مزایای این روش برشمرده‌اند.

دیوید دیکسون^۳، تراوش و انتشار سیال در درون هیپ را به کمک توابع ریاضی، مدل‌سازی کرد [۶۰]. او همچنین تأثیر نرخ دمش هوا، نرخ تولید گرما، حلالیت و کاربرد محافظ‌های بخار بر روی هیپ را بررسی کرده است.

در سال ۲۰۰۱، کوریا^۴، کاروال‌هو^۵ و مونهمتو^۶ تأثیر ترکیب‌های تتراهدریت بر رفتار لیچینگ با استفاده از کلرید سدیم، کلرید آهن و اسید سولفوریک را بررسی کرده‌اند [۶۱]. تتراهدریت ترکیبی از مس به فرمول شیمیایی $Cu_2(SbAs)_4Si_3$ است که به آن مس خاکستری نیز گفته می‌شود. نتایج بدست آمده با استفاده از اشعه ایکس مورد سنجش قرار گرفت و تأثیر مینرالورژی بر نرخ لیچینگ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مثال آنها افزایش درصد آهن در تتراهدریت را باعث افزایش سرعت واکنش‌های لیچینگ دانستند. داس^۷ و سن^۸ اولین افرادی هستند که فرایند بیولیچینگ را در رآکتورها، مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند [۶۲]. هدف آنها بیشتر توسعه فرایند بیولیچینگ طلا با استفاده از مدل‌سازی ریاضی بوده است. نتایج مدل‌سازی‌های آنها مکانیزم اتصال مستقیم و غیرمستقیم را برای باکتری‌های گوناگون تایید کرده است. نگوین^۹ و تران^{۱۰} به بررسی فرایند هیدرومتالورژی با مطالعه انرژی گیس آنها پرداختند [۶۳]. این دو یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن پارامترهای زیست‌محیطی که توانایی حل محاسبات بسیار پیچیده را داشته است، ارائه کردند.

در سال ۲۰۰۲، رویو^{۱۱} و گارکرو^{۱۲}، تأثیر چگالی پالپ و غلظت مس درون آن را در فرایند بیولیچینگ مورد بررسی قرار دادند [۶۴]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در غلظت ۱۰ درصدی پالپ، میزان استحصال مس در مدت ۱۰ روز به ۹۴ درصد و در غلظت ۲۰ درصدی، در مدت ۱۴ روز به ۸۰ درصد رسیده است. همچنین آنها مطالعات خود را در شرایط مختلف برای طلا و مس نیز تکرار کردند. پترسن^{۱۳} و دیکسن^{۱۴} حضور باکتری‌های ترموفیل در استحصال مس از کالکوپیریت را بسیار مؤثر دانسته‌اند [۶۵]. آنها به پدیده ایجاد و گسترش گرما در

¹- R.C.M.Mambote

²- M.A.Reuter

³- David Dixon

⁴- M.J.Correia

⁵- J.Carvalho

⁶- J.Monhemtu.

⁷- T.Das

⁸- P.K.Sen

⁹- A.V.Nguyen

¹⁰- T.Tran

¹¹- A.Rubio

¹²- F.J.Garcu

¹³- J.Peterson

¹⁴- D.G.Dixon

اثر انجام واکنش‌های گرم‌آزاد درون هیپ اشاره کرده و نقش دما را در کارایی این نوع از باکتری‌ها در این فرایند مورد تاکید قرار داده‌اند.

سادوسکی^۱ و جازدیک^۲، در سال ۲۰۰۳ استفاده از فرایند بیولیچینگ را برای کنسانتره کالکوپیریت بررسی کرده و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی آن را بیان کردند [۶۶]. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی کنسانتره حاصل از فلوتاسیون کالکوپیریت و کنسانتره طلا و مس به همراه باکتری‌های مزوفیل انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها در فلاکس‌های ۲۵۰ میلی‌متری و رآکتورهای گردشی صورت گرفت. نتایج نشان‌دهنده بازیابی مس تا ۶۵ درصد در مدت ۴۸ ساعت بوده است.

در سال ۲۰۰۴، وانگ^۳، هنگ^۴ و دنگ^۵، مکانیزم تأثیر باکتری به همراه کاتالیزت نقره را بر روی کالکوپیریت مورد بررسی قرار دادند [۶۷]. طبق نتایج تحقیق آن‌ها، یون‌های مس و آهن جایگزین یون نقره شده، به دلیل این جایگزینی سولفیدهای نقره تشکیل می‌شود. همچنین Fe^{2+} با استفاده از باکتری‌های تیوباسیلوس فرواکسیدانس، تبدیل به Fe^{3+} می‌شود. ایشان با استفاده از این مکانیزم، مدل سینتیکی جدیدی را با استفاده از باکتری لیچینگ و در حضور یون نقره برای کالکوپیریت ارائه دادند.

در سال ۲۰۰۵، دباراجی میشر^۶، دونگ جین کیم^۷ و جونگ جوان اهن^۸، به بررسی نحوه تأثیر باکتری‌ها و چگونگی توزیع آن‌ها در درون هیپ پرداختند [۱۴]. آن‌ها همچنین سعی کردند کلیه هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی فرایند بیوهیپ لیچینگ مس را نشان دهند.

لین^۹ و میلر^{۱۰}، فرایند انتشار مواد درون هیپ را مدل‌سازی کردند و تأثیر فضاهای کوچک خالی در توزیع جریان درون هیپ را مورد مطالعه قرار دادند [۶۸]. آن‌ها از اسکتر میل.سی.تی^{۱۱} به منظور مشاهده نحوه توزیع مواد در هیپ استفاده کردند. مدل‌سازی هیپ در سلول‌های ستونی بزرگی صورت گرفت. تصاویر سه بعدی برگرفته شده از این اسکتر، شبیه‌سازی بولتزمن را برای انتشار مواد و گرما در درون هیپ، تصدیق کرد.

کیلینگ^{۱۲} و پارمر^{۱۳}، در فرایند هیپ لیچینگ کالکوپیریت و اسفالریت از باکتری‌هایی که به صورت طبیعی در فرایند هیپ لیچینگ کالکوسیت ایجاد شده بودند استفاده کردند [۶۹]. نتایج نشان‌دهنده بازیابی بیشتر این فلزات

¹- Z.Sadowski

²- E.Jazdyk

³- M.Wang

⁴- Y.Zhang

⁵- T.Deng

⁶- Debaraj Mishra

⁷- Dong-Jin Kim

⁸- Jong-Gwan Ahn

⁹- C.L.Lin

¹⁰- J.D.Miller

¹¹- Mill-CT

¹²- S.E.Keeling

¹³- M.L.Parmer