**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی معدن

# تحلیل شیمیایی- هیدرو- مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار- مطالعه موردی معدن دره‌زار کرمان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ

**محمدرضا اکبری فروز**

اساتید راهنما

**دکتر علیرضا باغبانان**

**دکتر حمید هاشم‌الحسینی**

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی معدن

# تحلیل شیمیایی- هیدرو- مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار- مطالعه موردی معدن دره‌زار کرمان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ

**محمدرضا اکبری فروز**

اساتید راهنما

**دکتر علیرضا باغبانان**

**دکتر حمید هاشم‌الحسینی**

۱۳۹۰

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن – مکانیک‌سنگ آقای محمدرضا اکبری‌فروز

تحت عنوان

# تحلیل شیمیایی- هیدرو- مکانیکی توده‌سنگ‌درزه‌دار- مطالعه‌موردی معدن دره‌زار کرمان

در تاریخ ۹۰/۱۱/۲۵ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای اول پایان‌نامه | دکتر علیرضا باغبانان |
| ۲- استاد راهنمای دوم پایان‌نامه | دکتر حمید هاشم‌الحسینی |
| ۳- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر علی احمدی عامله |
| ۳- استاد داور خارجی | دکتر محمود هاشمی اصفهانیان |
| ۴- استاد داور داخلی | دکتر مسعود چراغی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر راحب باقرپور |

از حمایت و راهنمایی اساتید راهنما عزیز، دکتر علیرضا باغبانان، دکتر حمید هاشم‌الحسینی و دکتر علی احمدی عامله؛ در سرتاسر این پایان‌نامه تشکر می‌نمایم.
برخود لازم می‌دانم، که از حمایت مالی شرکت ملی صنایع مس ایران (NINICO) در پیشبرد این پایان‌نامه سپاسگزاری کنم. همچنین، از کمک‌های مسئولان بخش تحقیق و توسعه شرکت مس کرمان، آقایان مهندس قاسمی، مهندس سبزعلیان و مهندس خسروجردی تشکر می‌نمایم.
از راهنمایی‌های مهندس بهشتی و عادل امامی، مسئولین آزمایشگاه مکانیک‌سنگ و ژئوشیمی دانشگاه صنعتی اصفهان قدردانی می‌نمایم.

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه(رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

تقدیم به مادر عزیزم

# فهرست مطالب

**عنوان**


فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ..... ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱-۱ زمینه تحقیق ..... ۲

۱-۲ اهداف ..... ۷

۱-۳ نقش تحقیق کنونی در پیشبرد و حل مسئله ..... ۷

۱-۴ رئوس مطالب پایان‌نامه ..... ۹

**فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته**

۲-۱ فرآیندهای توأمان ..... ۱۱

۲-۲ اندرکنش سنگ و محلول خورنده ..... ۱۵

۲-۲-۱ تغییر تخلخل سنگ توسط محلول‌شیمیایی ..... ۱۷

۲-۲-۲ اثر محلول شیمیایی بر مقاومت‌فشاری تک‌محوره(UCS) و مدول‌الاستیسیته(E) سنگ ..... ۱۸

۲-۲-۳ تغییر مقاومت‌فشاری محصور سنگ توسط محلول شیمیایی ..... ۱۹

۲-۲-۴ اثر محلول شیمیایی بر خواص درزه‌سنگ ..... ۱۹

۲-۳ اسیدشویی ..... ۲۴

۲-۴ اندرکنش سنگ و محلول اسیدشویی مس ..... ۲۶

**فصل سوم: روش تحقیق و مواد**

۳-۱ نمونه‌سنگ مورد آزمایش ..... ۲۷

۳-۲ محلول خورنده اشباع‌کننده ..... ۳۰

۳-۳ آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی نمونه سنگ‌بکر ..... ۳۰

۳-۴ آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی نمونه سنگ‌بکر ..... ۳۲

۳-۴-۱ آزمایش مقاومت فشاری نامحصور یا تک‌محوره ..... ۳۲

۳-۴-۲ آزمایش مقاومت فشاری محصوریا سه‌محوره ..... ۳۴

۳-۴-۳ آزمایش تعیین سرعت امواج فشاری و مدول الاستیک دینامیکی ..... ۳۶

۳-۵ آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی درزه طبیعی ..... ۳۷

۳-۵-۱ آزمایش برش‌مستقیم ..... ۳۷

۳-۵-۲ پروفایل‌های زبری سطوح ناپیوستگی ..... ۳۹

۳-۶ تحلیل رفتار توده‌سنگ توسط نرم‌افزار دوبعدی UDEC ..... ۴۲

۳-۶-۱ ساخت شبکه‌درزه منفصل(DFN) ..... ۴۲

۳-۶-۲ مدلسازی عددی به روش اجزاء المان‌محدود- شبکه درزه مجزا ..... ۴۶

**فصل چهارم: ارائه یافته‌ها و نتایج**


۴-۱ اثر محلول اسیدی بر خواص فیزیکی سنگ بکر ..... ۵۱

۴-۲ اثر محلول اسیدی بر خواص مکانیکی سنگ بکر ..... ۵۵

۴-۲-۱ اثر محلول اسیدی بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر ..... ۵۵

۴-۲-۲ اثر محلول اسیدی بر مقاومت‌فشاری سه‌محوره سنگ‌بکر ..... ۵۷

۴-۲-۳ اثر محلول اسیدسولفوریک بر سرعت امواج‌فشاری و مدول الاستیک‌دینامیکی ..... ۶۰

۴-۳ اثر محلول اسیدی بر خواص مکانیکی و فیزیکی درزه‌سنگ ..... ۶۲

۴-۳-۱ اثر محلول اسیدی بر مقاومت برشی درزه‌سنگ طبیعی ..... ۶۲

۴-۳-۲ اثر محلول اسیدی بر زبری سطوح درزه‌سنگ طبیعی ..... ۶۷

۴-۴ داده‌های حاصل از مدلسازی ..... ۶۹


**فصل پنجم: جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات**


۵-۱ تفاسیر نهایی ..... ۷۴

۵-۱-۱ نتایج آزمایشگاهی ..... ۷۴

۵-۱-۲ نتایج مدلسازی‌عددی ..... ۷۷

۵-۲ پیشنهادات برای تحقیقات آینده ..... ۷۷

**پیوست ۱- منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره ..... ۷۹**

**پیوست ۲- منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری سه‌محوره ..... ۸۶**

**پیوست ۳- نمودارهای مربوط به اجرای آزمایشات برش مستقیم بر سطوح درزه طبیعی ..... ۹۱**

**مراجع ..... ۹۶**

## چکیده

هدف اصلی این پایان‌نامه درک تغییر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ آندزیتی واقع در زیر سطح انباشته اسیدشویی، به دلیل نفوذ محلول اسید سولفوریک مورد استفاده در استحصال فلز مس به روش اسیدشویی است. به عبارت دیگر، مقصود؛ تحلیل بهتر فرآیند توأمان شیمیایی- هیدرو- مکانیکی حاصل از تزریق یک سیال واکنشگر به توده سنگ می‌باشد. فن‌آوری اسیدشویی فلز به عنوان یک راه‌حل امیدبخش و انقلابی به جهان صنعت معرفی شده است. اهداف اولیه این روش کاهش چشمگیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و آلودگی محیط زیست است. یک راه حل کارآمد در تخمین رفتار توده سنگ، مدلسازی عددی با نگرش المان محدود- شبکه درزه مجزا است. پیش از آغاز مدلسازی، باید تعدادی داده ورودی به نرم‌افزار کامپیوتری معرفی گردد. این اطلاعات عمدتاً از آزمون‌های آزمایشگاهی اجرا شده بر نمونه‌های کوچک با ابعاد استاندارد حاصل می‌شوند. در مطالعات آزمایشگاهی اجراشده در این کار تحقیقاتی، پس از اینکه محلول اسیدی با مقادیر pH برابر ۱، ۳ و ۵ تهیه شد؛ نمونه‌های درزه سنگ وسنگ بکر به مدت ۱۴ روز درون محلول قرار داده شد. سپس خصوصیات فیزیکی سنگ بکر مانند چگالی، تخلخل، درصد جذب محلول و پارامترهای مکانیکی مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره و همچنین ویژگی‌های فیزیکی (زبری سطح) و مکانیکی (مقاومت برشی) درزه سنگ در نمونه‌های مشابه عادی با نمونه‌های فرسایش‌یافته توسط محلول اسیدی مقایسه شد. همچنین، توسط مدلسازی المان محدود؛ اثر محلول‌های شیمیایی بر نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار ارزیابی شده است. نتایج آزمایشات مؤید این نکته است، که با کاهش pH محلول، چگالی خشک و اشباع، مقاومت محصور و نامحصور، مدول الاستیک، سرعت امواج فشاری در نمونه سنگ بکر و مقاومت برشی درزه سنگ کاهش و درصد تخلخل و جذب محلول نمونه بکر افزایش یافت. لازم به ذکر است، تغییرات زبری سطح درزه آندزیتی از روند یکنواختی پیروی نمی‌کند. همچنین نتایج حاصل از مدلسازی مؤید این واقعیت است، که با کاهش pH محلول اسیدی؛ نفوذپذیری توده سنگ افزایش می‌یابد.


کلمات کلیدی: ۱- اسیدشویی ۲- فرآیندتوأمان ۳- pH محلول ۴- زبری سطح درزه ۵- تانسور نفوذپذیری معادل

# فصل اول
# مقدمه

## ۱-۱ زمینه تحقیق

مدلسازی توسط نرم‌افزارهای رایج مورد استفاده در علم مکانیک سنگ، به عنوان یک راه حل کارآمد در تخمین مقاومت مکانیکی توده‌سنگ؛ شناخته می‌شود. در شروع کار مدلسازی باید تعدادی داده ورودی به نرم‌افزار کامپیوتری معرفی گردد. این اطلاعات عمدتاً از آزمون‌های آزمایشگاهی اجرا شده بر نمونه‌های کوچک با ابعاد استاندارد حاصل می‌شوند. از آنجا که توده‌سنگ از ماده‌سنگ(سنگ‌بکر) و درزه‌سنگ‌ها تشکیل شده است، به منظور تخمین رفتار توده‌سنگ باید خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌بکر و درزه تعیین شوند.

خصوصیات مکانیکی نمونه آزمایشگاهی سنگ‌بکر شامل مقاومت‌فشاری تک‌محوره(نامحصور)، مقاومت‌فشاری سه‌محوره(محصور)، مقاومت‌کششی، شاخص مقاومت بارنقطه‌ای، چسبندگی، ضریب اصطکاک داخلی و غیره و پارامترهای فیزیکی مانند چگالی خشک و اشباع، درصد تخلخل، درصد پوکی، درصد جذب آب، میزان اشباع شدگی و غیره؛ به سادگی توسط آزمایش‌های مکانیک سنگی تعیین می‌شوند. پارامترهای مکانیکی(مثل چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی) و فیزیکی(مانند ضریب زبری سطوح درزه) درزه‌سنگ نیز به طور مشابه اندازه‌گیری می‌شوند.

حضور مواد شیمیایی خورنده در محیط‌سنگی موجب دگرگونی کلیه پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ بکر و درزه می‌شود. پی‌آمد این عوارض، تغییر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی و درنتیجه دگرسان‌شدن میزان نشست[1] و قابلیت باربری[2] توده سنگ خواهد بود. بنابراین در صورت حضور عوامل شیمیایی خورنده در محیط زیست منطقه معدنکاری، ارزیابی میزان تأثیرگذاری آن بر کلیه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌بکر و درزه‌سنگ امری ضروری است.

در معادنی که از روش اسیدشویی[3] به منظور استحصال فلزات بهره می‌برند، موادی با قابلیت خورندگی قابل توجه (مانند اسیدسولفوریک) استفاده می‌شود؛ که در صورت نفوذ به توده‌سنگ واقع در محدوده اسیدشویی، تأثیرات زیادی بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آن خواهد گذاشت.

زمانیکه در اجرا و عملکرد پروژه‌های مهندسی طراحی‌شده در توده‌سنگ با چنین موقعیت‌هایی مواجه شویم، مباحث همبستگی و فرآیندهای توأمان مطرح می‌شود.

به طور کلی فرآیندهای مؤثر در عملکرد توده‌سنگ به پنج دسته زیر تقسیم می‌شوند(یووا و هانت، ۲۰۰۲):

الف). گرمایش و سرمایش حرارتی(T): تا کنون اثرات گرمایش بر ساختارها و تجهیزات زیرزمینی، توسط محققان بررسی شده است؛ اما ارزیابی اثرات سرمایش، کمتر مخاطب قرار گرفته‌است.

ب). اثرات مکانیکی(M): اکثر پروژه‌های مکانیک‌سنگ با تنش‌هایی در حد چند ده مگاپاسکال مواجه هستند، که از وزن روباره چند صدمتری حاصل شده است.

پ). جریان هیدرولیکی(H): جریان آب و گاز اثرات مهمی( از جمله تأثیر فشارمنفذی بر وضعیت تنش) بر توده سنگ‌های درزه‌دار می‌گذارد.

ت). اثرات شیمیایی(C): فرآیندهایی مانند جوش‌خوردن(انعقاد) درزه، تجزیه یا ته‌نشینی کانی‌ها، تضعیف به دلیل هوازدگی یا انتقال موادآلاینده، جزء این دسته هستند؛ که هر کدام اثرات مهمی روی اجرای پروژه مهندسی در سنگ می‌گذارد.

ث). اثرات بیولوژیکی قارچ‌ها و باکتری‌ها(B): این فرآیندها در مقیاس‌محلی وضعیت شیمیایی سنگ را متأثر می‌کنند.

در فرآیند اسیدشویی نیز پیش‌بینی دقیق واکنش سنگ متخلخل درزه‌دار به تزریق سیال واکنشگر، بدون درنظرگرفتن همبستگی فرآیندها ممکن نیست. نیازمندی به شمول همبستگی فرآیندها، به نوع سیستم مهندسی مدنظر

---

1. Subsidence
2. Bearing Capacity
3. Leaching

وابسته است. امروزه در بسیاری از شاخه‌های‌مهندسی، مدل عددی شیمیایی- هیدرو- مکانیکی توأمان [1](CMH)، با هدف تحلیل دقیق‌تر رفتار سنگ؛ توسعه یافته است. به عنوان مثال، در پیش‌بینی واکنش یک ستون از توده‌سنگ تحت‌تنش، به تزریق سیال واکنشگر؛ می‌توان از مدل توأمان CMH بهره برد(لیو و بردی، ۲۰۰۴).

پیش‌بینی رفتار برخی فرآیندها مانند انتشارحرارتی، حتی در سنگ‌های درزه‌دار غیرهمگن؛ ساده است، زیرا تغییرات ضرایب انتشارحرارتی مواد مختلف موجود در زمین خیلی زیاد نیست. اما تحلیل رفتار برخی فرآیندهای مرتبط با عوارض شیمیایی یا هیدرولیکی مشکل‌تر است؛ زیرا معضلاتی از جمله تغییر مقادیر پارامترها، وجود ناپیوستگی‌ها و غیرهمگن‌بودن مدل مطرح می‌گردد، که فرد محقق را در مدلسازی دقیق منطقه با مشکل مواجه می‌سازد.

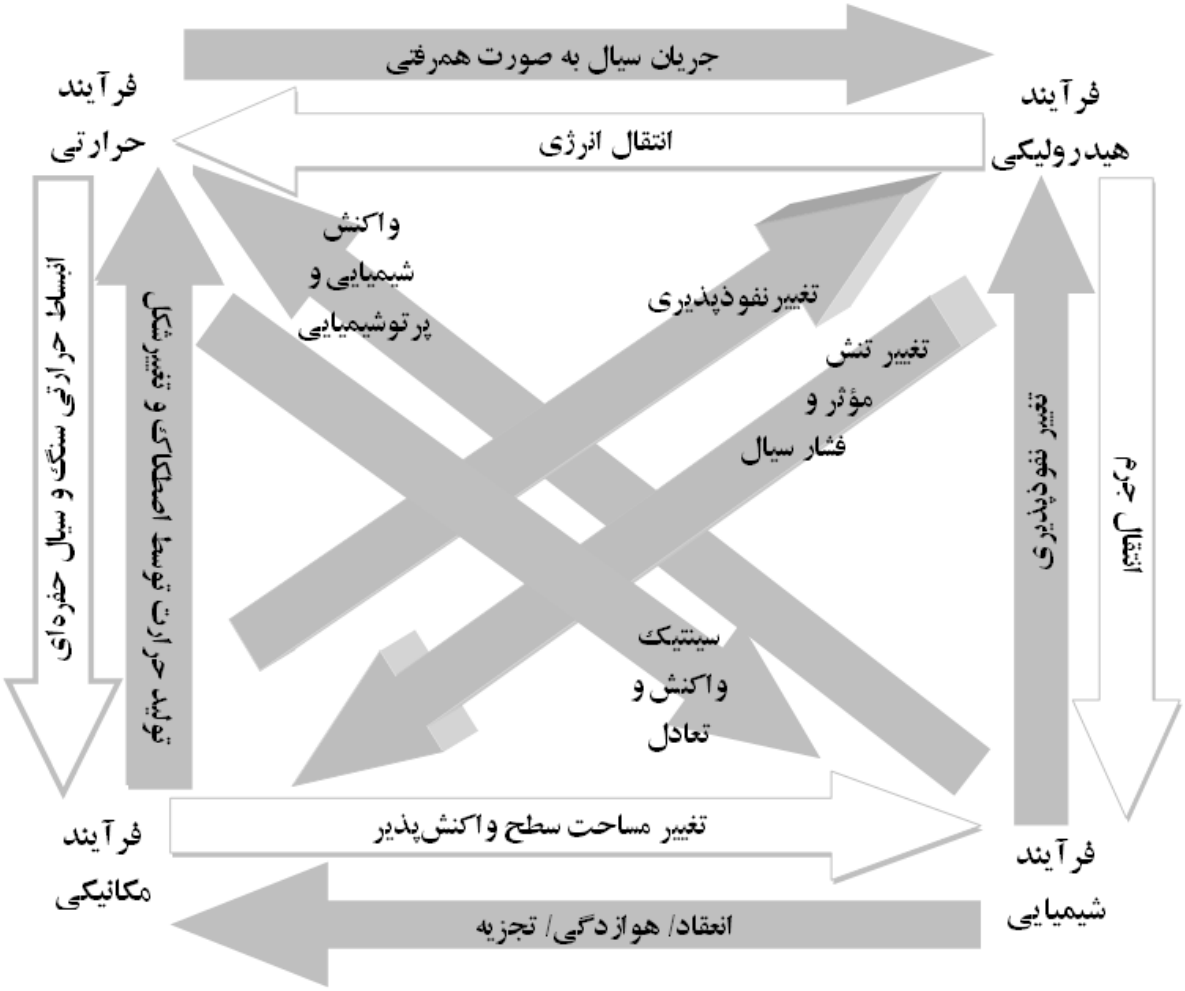
در جدول۱-۱، یک قیاس‌کیفی به منظور بررسی میزان تغییرپذیری پارامترها در چهار نوع فرآیند توأمان اصلی ارائه شده‌است(یووا و هانت، ۲۰۰۲).

جدول۱-۱- مقایسه کیفی فرآیندهای پایه مؤثر در فعالیت‌های اجراشده در توده‌سنگ(یووا و هانت، ۲۰۰۲).

| فرآیند | تغییرپذیری پارامترهای منطقه | توانایی مدل‌کردن اطلاعات منطقه |
|---|---|---|
| حرارتی | کمتر از ٪ ۲۵ | خوب |
| مکانیکی | به طور موضعی تا حد ضریب ۲ تا ۵ | نسبتاًخوب |
| هیدرولیکی | از مرتبه بزرگ | نسبتاًخوب تا بد |
| شیمیایی | از مرتبه بزرگ | گیج‌کننده |

1 . Chemo-Hydro-Mechanical Coupling

در شکل۱-۱ مهمترین اندرکنش‌های بالقوه فرآیندهای شیمیایی، مکانیکی، هیدرولیکی و حرارتی مرتبط با پروژه‌های مهندسی در سنگ؛ نمایش داده شده است. پیکان‌های تیره رنگ مؤید اهمیت بیشتر اندرکنش مد نظر در فعالیت‌های مهندسی سنگ می‌باشد(یووا و هانت، ۲۰۰۲).




شکل۱-۱- تأثیرات فرآیندهای توأمان برجا در رفتار توده‌سنگ(یووا و هانت، ۲۰۰۲).

افزایش روزافزون تقاضای فلزات، عامل تقلیل مداوم منابع جهانی سنگ‌های پر عیار شده است. با این وجود، هنوز حجم زیادی از ذخایر سنگ‌های کم عیار و کم سود؛ برای معدنکاری وجود دارد. مشکل عمده‌ای که صنعت جهانی با آن مواجه است، مصرف زیاد انرژی و سرمایه ورودی روش‌های مرسوم در بازیابی فلزات از سنگ‌های کم عیار و کم سود است. مشکل اصلی دیگر تأمین هزینه‌های محیط زیستی مرتبط با حجم‌زیاد آلودگی تولیدشده در این روش‌ها می‌باشد.

استانداردهای محیط زیست به ویژه در رابطه با زباله‌های سمی به طور دائمی سخت‌گیرانه‌تر می‌شود و هزینه‌های زیادی را در زمینه تأمین حفاظت از محیط‌زیست به خود اختصاص می‌دهد(دواسیا و ناتاراجان، ۲۰۰۴).

در قیاس با استحصال فلزات توسط حرارت[1]، فن‌آوری شستشو فلز توسط بیوتکنولوژی[2] به عنوان یک راه‌حل امیدبخش و انقلابی به جهان صنعت معرفی شد. اهداف اولیه این روش کاهش چشمگیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و آلودگی محیط‌زیست است. فرآیندهای بیولوژیکی در شرایط ملایم و معمولاً بدون اضافه‌کردن سموم شیمیایی انجام می‌شوند. از طرف دیگر، محصولات فرآیندهای بیولوژیکی به صورت محلول آبدار هستند؛ که از لحاظ محدودکردن و طرز عمل، رام‌شدنی‌تر از زباله‌های گازی هستند(دواسیا و ناتاراجان، ۲۰۰۴).

اگر با نصب عایق‌های مناسب بر سطح اسیدشویی، یک سطح کاملاً نفوذناپذیر تشکیل گردد؛ مضرات این روش بر محیط زیست منطقه تا حد قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

از جمله مهمترین فلزاتی که استحصال آن به کمک فن‌آوری اسیدشویی توسط محلول‌اسیدی، درصد بالایی از عرضه‌جهانی این فلز را به خود اختصاص می‌دهد؛ فلز مس است. عمده‌ترین کانی‌هایی که در معرض اسیدشویی قرار می‌گیرند، سیلیکات‌مس[3](مس دوظرفیتی)، سولفات‌ها، کربنات‌ها، کلریدها و اکسیدها هستند؛ که انحلال همگی اسیددوست است. گاهی سولفیدهای‌مس[4] مانند کالکوسیت[5] هم اسیدشویی می‌شوند(بین، ۲۰۰۱).

پس از استخراج سنگ‌معدن مس در کاواک‌های روباز[6]، مواد پرعیارتر توسط ذوب و کم‌عیارتر توسط اسیدشویی استحصال می‌شوند. در روش اسیدشویی، یک انباشته‌سنگ با ابعاد مناسب بر روی یک سطح نفوذناپذیر تعبیه می‌شود و پس از ترازکردن سطح بالایی، محلول شستشو بر روی انباشته پاشیده یا اسپری می‌شود. در انباشته جامداتی با اندازه تخته سنگ تا ماسه‌ریز و موادی با ترکیب‌کانی‌شناسی پیچیده حضور دارد. انباشته اسیدشویی مس، یک مسکن غیرهمگن[7] و مختلط برای باکتری‌ها است. مهاجرت باکتری‌ها عمدتاً در یک متر بالایی رخ می‌دهد. دما در بخش ورودی انباشته می‌تواند به ۹۰ درجه هم برسد، که یک محیط مناسب برای رشد موجودات میکروسکوپی بی‌هوازی یا هوازی گرماگرا است. در این مناطق، اسیدشویی غیرمستقیم توسط سولفات آهن‌فریک؛ پدیده غالب است(دواسیا و ناتاراجان، ۲۰۰۴).

---

1. Pyrometallurgy
2. Biotechnology
3. Cupric Silicates
4. Cuprous Sulfides
5. Chalcocite
6. Open Pit
7. Heterogen

در مرحله بعد، محلول اسیدشویی غنی مس؛ از کف انباشته خارج و به سمت تسهیلات بازیابی مرکزی هدایت می‌شود. در واحدهای عملیاتی بزرگ مقیاس، محلول شستشو محتوی ۰.۵ تا gr/litr ۲ مس؛ به واحدهای بزرگ جدایش پمپ می‌شود و در معرض تجزیه الکتریکی قرار می‌گیرد. عمر یک انباشته بزرگ اسیدشویی مس حتی گاهی به حد چند ده سال نیز می‌رسد(دواسیا و ناتاراجان، ۲۰۰۴).

پس‌از توقف اسیدشویی، معضلی که در فرجه طولانی مدت مطرح می‌شود، خنثی‌کردن سنگ‌هایی است؛ که در حین اسیدشویی به سولفاتهای دگرسان‌شده تبدیل شده‌اند. زمانیکه باطله شستشو توسط آب زیرزمینی تقریباً خنثی که حاوی مقدارکمی سولفات است، شسته شود؛ کانی‌های سولفات به سیلیکات‌ها یا اکسیدهای دارای یون هیدروژن‌آزاد تبدیل می‌شوند. مشکل دیگر خنثی‌سازی و رقیق‌کردن حجم زیاد محلول شستشو اسید- سولفات می‌باشد، که یک راه حل برای رفع این مشکل، کاهش میزان واکنش ماده شوینده با کانی‌باطله در طول اسیدشویی است(بین، ۲۰۰۱).

مشکل دیگری که در اسیدشویی مس رخ می‌دهد، نفوذ مواد خورنده اسیدی به سنگ بستر زیر سطح انباشته؛ در صورت عایق نبودن بخشی از سطح است، که پی‌آمد آن تغییر رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ زیرین خواهد بود. در واقع محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی باعث تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌بکر و درزه سنگ‌ها می‌شود و اگر قرار باشد، در آینده تأسیسات فرآوری دیگری مانند سنگ شکن در این منطقه احداث شود، باید میزان تغییرات ایجاد شده توسط محلول شستشو ارزیابی گردد و در محاسبه میزان نشست و قابلیت بارپذیری اعمال گردد.

### ۱-۲ اهداف

هدف اصلی این پایان‌نامه بهبود درک تغییر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ توسط نفوذ اسیدسولفوریک خورنده مورد استفاده در اسیدشویی مس است. به عبارت دیگر، مقصود فهم بهتر فرآیند توأمان CMH حاصل از تزریق سیال واکنشگر اسیدی به توده‌سنگ می‌باشد. این اهداف توسط مباحث زیر مخاطب قرار می‌گیرد:

- با اجرای تعدادی آزمون آزمایشگاهی، میزان تغییر خواص فیزیکی سنگ‌بکر از جمله چگالی خشک و اشباع، درصد تخلخل، درصد جذب آب؛ نسبت به حالت عادی اندازه‌گیری می‌شود.
- پس از فرسایش نمونه‌ها توسط محلول اسیدی، مقاومت‌فشاری تک‌محوره و مدول الاستیک سنگ توسط آزمون فشاری تک‌محوره محاسبه و با وضعیت طبیعی مقایسه می‌شود.

- با اجرای آزمون فشاری سه‌محوره در دو حالت متعارف و نمونه تضعیف‌شده توسط محلول‌اسیدی، مقدار تغییر کمیت‌های معرف مقاومت‌برشی سنگ بکر(مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) توسط فرسایش شیمیایی تعیین می‌شود.
- همچنین تفاوت خصوصیات دینامیکی(سرعت امواج و مدول الاستیک دینامیکی) نمونه آزمایشگاهی در دو حالت مذکور اندازه‌گیری می‌شود.
- از طرف دیگر، میزان تغییر خصوصیات برشی(مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و فیزیکی(ضریب زبری) درزه‌سنگ به دلیل فرسایش شیمیایی ارزیابی می‌گردد.
- پس از اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی، میزان تغییر نرخ جریان‌سیال و مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده سنگ؛ به علت فرسایش‌شیمیایی توسط محلول‌اسیدی محاسبه می‌گردد.

### ۱-۳ نقش تحقیق کنونی در پیشبرد و حل مسئله

دو پارامتر مهم در طراحی و احداث سازه‌های سنگین معدنی(مانند: سنگ‌شکن)، نشست و ظرفیت باربری است. این دو مشخصه با ویژگی‌های مقاومتی و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ بستر منطقه مورد مطالعه در ارتباط هستند. از طرف دیگر، با توجه به تأثیر غیر قابل انکار محلول‌های اسیدی مورد استفاده در اسیدشویی مس بر خصوصیات سنگ، در صورت تمایل به احداث سازه‌سنگی در محدوده‌ای که در معرض اسیدشویی قرار داشته است؛ باید میزان اثرگذاری محلول بر پارامترهای مذکور تعیین گردد.

معدن مس دره‌زار کرمان در کمربندماگمایی ارومیه دختر واقع شده است. عمده سنگ‌های منطقه، تناوبی از آندزیت دگرسان‌شده در سطح، آندزیت، آندزیت بازالت، آندزیت‌پورفیری و در برخی موارد توف و توف‌آندزیتی است. با توجه به این نکته، که بخش اصلی سنگ‌معدن موجود در منطقه هنوز استخراج نشده است؛ انتخاب فن‌آوری استحصال فلز مورد استفاده در معدن از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. در چند سال اخیر، از روش اسیدشویی به منظور فرآوری فلز مس استفاده شده است. اما در حال حاضر، مهندسان شرکت ملی صنایع مس در حال ارزیابی مزایا و معایب تغییر تأسیسات استحصال فلز هستند. در این مطالعه، به کمک حمایت مالی بخش تحقیق و توسعه شرکت مس؛ تعدادی آزمون آزمایشگاهی با هدف تعیین خصوصیات فیزیکی و مقاومتی محدوده سایت فرآوری معدن دره‌زار انجام شده است. همچنین، با توجه به تأثیر محلول شستشو مورد استفاده در روش اسیدشویی مس بر مشخصات سنگ؛ در شرایط مشابه، تعدادی آزمایش به منظور تعیین میزان اثرگذاری محلول مذکور اجرا شده است. هدف اجرای این آزمایشات، برآورد

تغییر پارامترهای مرتبط با طراحی و ساخت سازه‌های فرآوری(مانند: کارخانه تغلیظ) در توده‌سنگ بستر انباشته اسیدشویی است.

در گذشته، تحقیقات محققان عمدتاً بر اثر محلول‌های اسیدی مختلف بر خصوصیات آزمایشگاهی سنگ‌های بکر(مانند: انواع ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و گرانیت) تمرکز دارد. اما در رابطه با میزان تأثیر مقادیر مختلف pH محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده درفرآوری فلز مس به روش اسیدشویی بر خصوصیات سنگ آندزیت اطلاعاتی موجود نیست. از طرف دیگر، نبود منابع مناسب در رابطه با میزان تغییر خصوصیات فیزیکی درزه‌سنگ‌ها(از جمله زبری) ما را بر آن داشت، تا با اجرای تعدادی آزمون آزمایشگاهی؛ اثر مقادیر مختلف pH محلول اسیدسولفوریک بر زبری سطوح درزه‌سنگ آندزیتی را ارزیابی کنیم.

همچنین، در این پایان‌نامه تغییر رفتار توده‌سنگ به دلیل تضعیف‌شیمیایی توسط محلول مورد استفاده در اسیدشویی مس مطرح شده است. پس از تشکیل شبکه درزه تصادفی(DFN[1]) با ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر؛ به کمک مدلسازی عددی توسط نرم‌افزار ناپیوسته؛ میزان تغییرات نرخ‌جریان سیال و مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده سنگ تخمین زده شد.

اطلاعات حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی‌عددی را می‌توان به عنوان مقیاسی به منظور برآورد اثر محلول اسیدشویی بر محیط‌زیست محدوده معدن دره‌زار نیز به کار برد.

### ۱-۳ رئوس مطالب پایان‌نامه

این پایان نامه به ۵ فصل تقسیم می‌شود:

در فصل ۱، پیش‌زمینه تحقیق در رابطه فرآیندهای توأمان مرتبط با رفتار توده‌سنگ و نحوه تأثیر محلول شیمیایی مورد استفاده در اسیدشویی فلز مس بر خصوصیات توده‌سنگ مطرح شده است.

در فصل دوم سوابق‌تحقیق مرتبط با مباحث فرآیندهای توأمان و اندرکنش سنگ و سیال‌خورنده ارائه شده است.

فصل ۳ به تشریح جامع مواد و تکنیک‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه می‌پردازد.

در فصل ۴ نتایج و داده‌های فراهم‌شده ارائه می‌گردد و در رابطه با ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی بحث می‌شود. این فصل شامل ۵ بخش است، که به‌ترتیب عبارتند از:

---

1. Discrete Fracture Network

بخش ۴-۱ در رابطه با اثر محلول اسیدسولفوریک بر خصوصیات‌فیزیکی نمونه آزمایشگاهی سنگ بکر آندزیت (مانند: چگلی خشک و اشباع، درصد تخلخل و جذب‌محلول) بحث می‌کند.

در بخش ۴-۲ تأثیر محلول مذکور بر خواص مکانیکی سنگ‌بکر از جمله مقاومت‌فشاری محصور و نامحصور، مدول‌الاستیک و همچنین پارامترهای دینامیکی خروجی دستگاه PUNDIT ارزیابی شده است.

در بخش ۴-۳ اثرات محلول اسیدی بر ویژگی‌های مکانیکی(مقاومت‌برشی) و فیزیکی(زبری سطح) درزه سنگ مخاطب واقع شده است.

و در بخش ۴-۴ داده‌های حاصل از مدلسازی‌عددی محیط ناپیوسته، در رابطه با اثر محلول بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است.

فصل ۵ به جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات مورد استفاده در مطالعات آینده می‌پردازد.

# فصل دوم
# مروری بر تحقیقات گذشته

## ۲-۱ فرآیندهای توأمان

اصطلاح فرآیند توأمان مؤید این واقعیت است، که یک فرآیند می‌تواند روی آغاز و پیشروی فرآیند یا فرآیندهای دیگر اثر بگذارد. این تأثیرگذاری می‌تواند یک یا دوطرفه، قوی یا ضعیف باشد(لیو و بردی، ۲۰۰۴).

فرآیندهای‌توأمان به سه دسته دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه تقسیم می‌شوند، که هر کدام به نوبه خود دارای زیر شاخه‌هایی هستند.

فرآیندهای توأمان دوگانه تأثیرگذار عبارتند از: TM، HM، TH، TC، HC و CM؛ که در ذیل به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم.

### الف). T-M(ترمومکانیک)

اندرکنش میان میدان‌های تنش/کرنش و حرارت به دلیل انبساط و تنش حرارتی، فرآیند ترمومکانیکی توأمان نامیده می‌شود. این همبستگی به صورت افزایش انبساط‌حجمی و تنش‌حرارتی سنگ توسط گرادیان حرارتی(و تغییر بازشدگی درزه به طور غیر مستقیم) و تبدیل کار مکانیکی تلف‌شده به انرژی حرارتی(که معمولاً در مهندسی سنگ قابل‌صرف‌نظر