

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

**آنالیز برگشتی و تحلیل عددی داده های ابزار دقیق مغار نیروگاه سد مسجد
سلیمان به روش اجزاء منفرد**

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن - مکانیک سنگ

محمد رضا خادم الحسینی

اساتید راهنما

دکتر علیرضا باغبانان

دکتر راحب باقرپور



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن - مکانیک سنگ آقای

محمد رضا خادم‌الحسینی

تحت عنوان

آنالیز برگشتی و تحلیل عددی داده‌های ابزار دقیق مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان به روش اجزاء منفرد

در تاریخ ۹۰/۱۱/۱۵ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| دکتر علیرضا باغبانان | ۱- استاد راهنمای اول پایان‌نامه |
| دکتر راحب باقرپور | ۲- استاد راهنمای دوم پایان‌نامه |
| دکتر لهراسب فرامرزی | ۳- استاد مشاور پایان‌نامه |
| دکتر حمید هاشم‌الحسینی | ۴- استاد داور (داخلی) |
| دکتر عباس اسلامی حقیقت | ۵- استاد داور (خارجی) |
| دکتر راحب باقرپور | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و تشویق اساتید راهنما، آقایان دکتر علیرضا باغبانان و دکتر راحب باقرپور، کمال تشکر را داشته باشم. همچنین از آقایان کردنظیری، عبدی، خادمی و سایر دوستان عزیز که در انجام این پایان نامه، از راهنمایی‌های آنها بهره‌مند شدم، تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

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

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هفت	فهرست مطالب
۱	چکیده
فصل اول: مروری بر کارهای گذشته	
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ مکانیزم‌های عمده‌ی فیزیکی - شیمیایی
۳	۳-۱ فرآیند تورم
۴	۴-۱ فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس
۵	۵-۱ بررسی رفتار تورمی و اثرات مربوط به آن
۸	۶-۱ تست‌های تورم
۱۰	۷-۱ خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری
۱۱	۸-۱ حساسیت خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری، به تغییرات درصد رطوبت، و مدل‌های پیش بینی
۱۵	۹-۱ تأثیر اشباع بر پارامترهای مکانیکی
۱۷	۱۰-۱ محتوای فصل‌ها
فصل دوم: ابزاربندی	
۱۸	۱-۲ مقدمه
۱۹	۲-۲ رفتار ساختاری حفریات زیرزمینی
۲۰	۳-۲ فرآیند تصمیم‌گیری در حفر فضاهای زیرزمینی
۲۱	۴-۲ اساس ابزاربندی و اندازه‌گیری‌های صحرائی
۲۱	۵-۲ اهداف ابزاربندی‌ها و اندازه‌گیری‌های صحرائی
۲۲	۶-۲ توسعه روش‌های مشاهده‌ای
۲۳	۷-۲ ایده‌های مفهومی در روش مبتنی بر مشاهده
۲۵	۸-۲ تئوری چگونگی کاهش میزان غیرقطعیت در روش مبتنی بر مشاهده
۲۶	۹-۲ پارامترهای مورد سنجش در رفتارسنجی
۲۶	۱۰-۲ ویژگی‌های کلی سیستم‌های رفتارسنجی
۲۷	۱۱-۲ ابزار مورد نیاز در رفتارسنجی
۲۸	۱۲-۲ کشیدگی سنج گمانه‌ای یک نقطه‌ای و چند نقطه‌ای
۲۸	۱۳-۲ ابزار دقیق مغار نیروگاه فاز یک سد مسجدسلیمان
فصل سوم: تحلیل برگشتی	
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۴	۲-۳ مقایسه تحلیل برگشتی و تحلیل عادی
۳۷	۳-۳ روش‌های تحلیل برگشتی

۴-۳ تحلیل برگشتی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی ۳۹

۵-۳ روش تحلیل برگشتی مستقیم ۴۰

فصل چهارم: ابزاربندی در مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان

۱-۴ موقعیت مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان ۴۷

۲-۴ جابجایی‌های نسبی ۵۱

۳-۴ تفسیر ابزارهای نصب شده در مقاطع نصب ابزار ۵۲

۱-۳-۴ مقطع ۱-۶/۷۵+ (در متر اژ ۶/۷۵ متری از محل اتصال به مغار فاز توسعه) ۵۲

۲-۳-۴ مقطع ۲-۲۱/۷۵+ ۵۳

۳-۳-۴ مقطع ۳-۳۴/۷۵+ ۵۴

۴-۳-۴ مقطع ۴-۶۰/۷۵+ ۵۵

۵-۳-۴ مقطع ۵-۸۵/۷۵+ ۵۵

۶-۳-۴ مقطع ۶-۱۰۹/۷۵+ ۵۶

۷-۳-۴ مقطع ۷-۱۲۷/۷۵+ ۵۷

۸-۳-۴ مقطع ۸-۱۴۰/۷۵+ ۵۸

۴-۴ انتخاب داده‌های ابزار به منظور استفاده در تحلیل برگشتی ۵۹

فصل پنجم: تحلیل برگشتی جابجایی‌ها در مغار نیروگاه فاز اول سد مسجد سلیمان و ارائه نتایج

۱-۵ مدل‌سازی عددی تحلیل برگشتی ۶۰

۱-۱-۵ روش‌های عددی ۶۰

۲-۱-۵ روش اجزاء منفرد ۶۱

۲-۵ معرفی نرم افزار UDEC ۶۲

۳-۵ روش مطالعه عددی تحلیل برگشتی اثر تورمی لایه‌ها در مغار مسجد سلیمان ۶۳

۱-۳-۵ ساخت مدل و اعمال شرایط مرزی ۶۴

۲-۳-۵ ایجاد هندسه‌ی مدل ۶۵

۳-۳-۵ تعادل اولیه در مدل ۶۵

۴-۳-۵ نصب سیستم نگهداری ۶۸

۴-۵ انتخاب روش ۷۳

۵-۵ انتخاب پارامترهای معلوم و مجهول ۷۳

۶-۵ انتخاب خصوصیات مربوط به حد فاصل لایه‌ی گل سنگ ۷۸

۷-۵ ارائه مدل‌های پیش‌بینی ۷۹

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه‌گیری ۸۵

۲-۶ پیشنهادات ۸۶

مراجع ۸۸

چکیده:

در مراحل اولیه طراحی یک سازه‌ی سنگی و یا خاکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و درجا و جداول و نمودارهای پیشنهادی، ابزار مناسبی جهت قضاوت هستند. اما به دلیل محدودیت در انجام آزمایش‌ها و عدم آگاهی از عکس‌العمل توده‌ی خاک یا سنگ نمی‌توان نتیجه‌ی نهایی را گرفت. به همین دلیل پس از شروع ساخت سازه، در مراحل مختلف، اطلاعات مهندسی از سازه و محیط اطراف آن کامل‌تر می‌شود. رفتارنگاری سریع‌ترین و ارزان‌ترین روش برای تکمیل این اطلاعات بشمار می‌رود. از بین روش‌های مختلف رفتارنگاری اندازه‌گیری جابجایی‌ها به دلیل سادگی و بیان صریح عکس‌العمل سازه، بیش از دیگر روش‌ها کاربرد دارد. طرح سد نیروگاه برق آبی مسجد سلیمان در جنوب غربی ایران، در استان خوزستان و در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان، بر روی رودخانه کارون اجرا شده است. زمین شناسی منطقه مورد نظر در محل نیروگاه سد مسجد سلیمان همانند وضعیت زمین شناسی زاگرس کوهپایه‌ای، چین‌خورده می‌باشد. این واحد زمین‌شناسی از توالی لایه‌های گل‌سنگ، کنگلومرا و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. مغار اصلی فاز یک با عرض ۳۰ متر، ارتفاع ۵۰ متر و طول ۱۲۵ متر، در این لایه‌ها حفر شده است. ویژگی بارز این واحد زمین‌شناسی، تورم پذیر بودن لایه‌های گل‌سنگی آن است. با توجه به اهمیت تأثیر این رفتار تورمی بر جابجایی‌های رخ داده در مغار و با بررسی برخی کارهای انجام شده در خصوص تورم تاکنون، ویژگی‌های مربوط به حد فاصل لایه‌های تورمی گل‌سنگ با سایر لایه‌ها، سختی نرمال و سختی برشی، به منظور انجام تحلیل برگشتی انتخاب شدند. زمانی که درزه‌ها و لایه‌بندی، مغار را قطع می‌کند، روش المان مجزاء، که محیط‌های ناپیوسته و درزه‌دار را بررسی می‌کند، یک ابزار قوی برای مدل‌سازی این محیط‌ها مطرح می‌شود. تحلیل حساسیت در خصوص پارامترهای سنگ بکر، چسبندگی و زاویه اصطکاک و همچنین پارامترهای مربوط به حد فاصل انجام و پارامترهای مهم شناسایی و کالیبره گردیدند. نتایج نشان دادند که جابجایی‌ها نسبت به پارامترهای سنگ بکر و همچنین پارامترهای مقاومتی حد فاصل، چسبندگی و زاویه اصطکاک، حساسیت کمتری نشان می‌دهد. در این پایان‌نامه، مدل عددی منطقه اطراف مغار نیروگاه فاز اول سد مسجد سلیمان ساخته و رفتار تورمی لایه‌های گل‌سنگی موجود در منطقه بررسی گردید که بدین منظور، خصوصیات مربوط به حد فاصل لایه‌ی گل‌سنگ با سایر لایه‌ها در منطقه، با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل برگشتی و تحلیل حساسیت پارامترها، کمترین مقدار تابع خطا در میان مدل‌های موجود، شناسایی گردید که نهایتاً بهترین مقدار برای سختی نرمال و سختی برشی مربوط به حد فاصل لایه گل‌سنگ با سایر لایه‌ها، به ترتیب 5×10^8 پاسکال/متر و 2×10^7 پاسکال/متر به دست آمد و مطابق با این مقادیر، یکسری مدل‌های پیش‌بینی به منظور ارزیابی جابجایی‌ها در آینده ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی حاکی از آن است که اکثر جابجایی‌های به دست آمده در محدوده سمت راست سقف مغار و دیواره‌های راست و چپ آن، از مقادیر مجاز جابجایی‌های مربوط به بولت‌های نصب شده، متجاوز است که این موضوع، وضعیت ناپایداری را در این محدوده‌ها نشان می‌دهد و تقویت سیستم نگهداری و استفاده از بولت‌ها با طول و ظرفیت بالاتر را می‌طلبد.

کلمات کلیدی: رفتارنگاری، طرح سد و نیروگاه برق آبی مسجد سلیمان، لایه‌های تورمی، تحلیل برگشتی، سختی

نرمال، سختی برشی، UDEC

فصل اول

مروری بر کارهای گذشته

۱-۱ مقدمه

تورم، ترکیب واکنش‌های فیزیکی-شیمیایی، شامل آزاد شدن آب و تنش می‌باشد. (ISRM, 1983). در سنگ‌های رسی (گل سنگ، شیل و...)، تورم توسط یک یا ترکیب سه مکانیزم ایجاد می‌گردد: مکانیکی، اسمزی و آب‌گرفتن (انیشترین^۱، ۱۹۹۶).

بر اساس استاندارد (ISRM (1983، واکنش فیزیکی-شیمیایی با آب، معمولاً نقش عمده را در تورم بازی می‌کند. اما این مسئله به طور همزمان تنها، همراه یا با پیروی آزادسازی تنش رخ خواهد داد. پدیده تورم، پدیده برگشت‌پذیر است؛ یعنی خاک بعد از کم‌شدن رطوبت، منقبض می‌شود.

انیشترین (۱۹۹۶)، معتقد است که این جمله باید بدین صورت گفته شود که تغییرات تنش، معمولاً تأثیرات بسزایی دارند. حفاری فضاها، زیرزمینی، باعث توسعه ترک‌ها و تغییر در وضعیت تنش و توزیع فشار آب منفذی (حفره ای) در توده‌سنگ مجاور بازشدگی می‌گردد. چنین تغییراتی، باعث تغییر در خواص مکانیکی توده‌سنگ اطراف، مانند مقاومت^۲، دگرشکل‌پذیری^۳ و خواص هیدرولیکی می‌گردد. این پدیده به چند عامل مهم بستگی

¹ Einstein

² Strength

³ Deformability

دارد: جنس مواد، شرایط مرزی، فشار حفره‌ای منفی و مهمتر از همه، تاریخچه تنش در نقاطی از تونل در اطراف سینه کار پیشروی.

۲-۱ مکانیزم‌های عمده فیزیکی - شیمیایی

مکانیزم‌های عمده فیزیکی - شیمیایی ناشی از آب به شرح زیر می‌باشند که در این جا تنها مورد (الف) توضیح داده می‌شود [۱]:

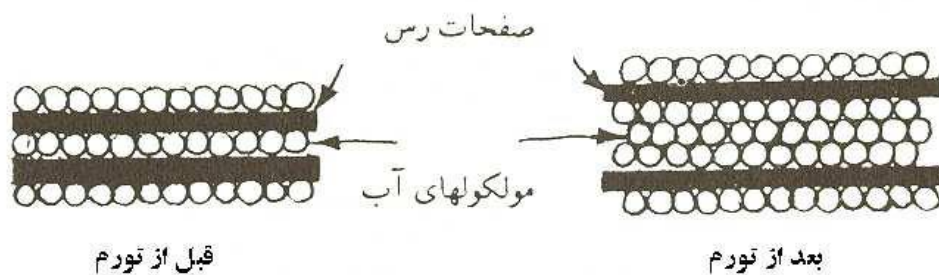
الف) کانی‌های رسی

ب) انیدریت - ژپس

ج) پیریت و مارکاسیت

الف) کانی‌های رسی

آب به سطح خارجی کانی‌های رسی می‌چسبد و در سطوح داخلی کانی‌های رسی، لایه‌های متورم‌شونده، قرار گرفته‌اند. فشار تورم بستگی به فاصله بین ذره‌ای (ذره‌های رس) داشته و نیز تابعی از فاصله‌ی میان توده‌های مابین لایه‌های متورم‌شونده می‌باشد. برآمدگی ناشی از تورم، بستگی به مقدار ذرات رسی و کانی‌های قابل تورم دارد. سنگ حاوی ذراتی از نوع لایه‌های قابل تورم، معمولاً بیشتر از آنچه که ذرات، فقط از سطح خارجی، آب جذب می‌کنند، متورم می‌شوند. شکل ۱-۱، ورود مولکول‌های آب در بین صفحات رس را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- تورم لایه‌های رسی

۳-۱ فرآیند تورم

به استثنای انیدریت، که به علت الحاق شیمیایی آب به آن، به فرم ژپس متبلور و متورم می‌شود، تورم، اغلب در سنگ‌هایی که حاوی کانی‌های رس فراوان یا ذراتی در اندازه‌های رس هستند، اتفاق می‌افتد. کانی‌های

رسی، خصوصاً مونت موریلونیت، آب را جذب کرده و وقتی آب جذب شده به مقدار کافی رسید، متورم می‌شوند. تورم سنگ‌های خیلی دانه‌ریز که حاوی مونت‌موریلونیت نیستند، کمتر مشخص می‌شود و اصولاً علت تورم این گونه سنگ‌ها، جذب آب توسط سطح ذرات کانی می‌باشد [۱].

نمونه‌ای از سنگ‌هایی که استعداد تورم دارند، شیل، گل‌سنگ و رس‌سنگ می‌باشند. این سنگ‌ها خیلی دانه‌ریز بوده و محدوده وسیعی از ترکیبات کانی‌شناسی را شامل می‌شود. کانی‌های سازنده معمول دیگر این سنگ‌ها؛ کوارتز، کلسیت، دولومیت، مواد کربنی و اکسیدهای آهن می‌باشند. استعداد تورم، مستقیماً متناسب با کانی‌های رسی، مخصوصاً مونت‌موریلونیت و کانی‌های حاوی مونت‌موریلونیت و دیگر کانی‌های رسی می‌باشد. شیل‌ها، گل‌سنگ‌ها و رس‌سنگ‌ها، غنی از کانی‌های رسی هستند و از ترکیبات دیگر کانی‌ها در آن‌ها کم یافت می‌شود و عموماً نرم و دارای مقاومت ضعیفی هستند [۱].

۴-۱ فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس

پایداری فضاهای زیرزمینی بزرگ تحت شرایط مختلف، یک مسئله مهم در ساخت این فضاهاست. در سال‌های اخیر، مطالعات مربوط به پایداری فضاهای زیرزمینی بزرگ، اغلب بر روی پروژه‌های موردی، تأکید داشتند. از این میان می‌توان به چند مورد اشاره داشت:

یوشیدا و هوری^۱ (۲۰۰۴)، و برخی محققان، تحلیل پایداری پروژه‌های مشخصی را با به‌کارگیری روش‌های المان محدود، بررسی کرده‌اند. استرم و لاتا^۲ (۲۰۰۲)، مدل‌های مکانیکی جدیدی را برای سنگ‌های اطراف مغار در توده‌های سنگی درزه‌دار، پیشنهاد کردند. اشتبل و سمانی^۳ (۲۰۰۳) و لی^۴ و همکارانش (۱۹۹۵)، مطالعات جامعی را بر روی طراحی، ساخت و تحلیل‌های عددی انجام داده‌اند. هیبینو و متوجیما^۵ (۱۹۹۹)، قانون دگرشکل‌پذیری را برای بیش از ده نیروگاه بزرگ مقیاس زیرزمینی، بررسی کردند. آن^۶ (۲۰۰۳)، الگوریتم ژنتیک، هوش مصنوعی و شبکه عصبی را برای تحلیل خود به کار برد [۲].

¹ Yoshida and Horii

² Stharam and Latha

³ Stable and Samani

⁴ Lee

⁵ Hibino and Motojima

⁶ An

اگرچه محققین پیشین، تحقیقات زیادی را در خصوص پایداری مغار به وسیله تحلیل عددی یا مانیتورینگ برجا انجام دادند، اما مطالعات جامع و سیستماتیک در مورد پایداری فضاهای بزرگ مقیاس تحت شرایط گوناگون، به ندرت گزارش شده است.

اگر یک مغار زیرزمینی در یک محیط زمین شناسی پیچیده ساخته شود، فاکتورهای جدیدی می بایست در طراحی و ساخت، در نظر گرفته شود. به طور کلی، عوامل مؤثر شامل، سختی^۱ سنگ های اطراف، توزیع و خواص مکانیکی زون های آلتزه شده، خصوصیات دسته درزه، تأثیر آب زیرزمینی، ضخامت روباره، بزرگی و جهت تنش-های برجا، اندازه مغار، فاصله میان مغارها و همچنین توالی حفاری و نگهداری و ... می باشد [۳].

روش ها و مطالعات محدودی به منظور طراحی و ساخت تونل های زیرزمینی و مغار در سنگ های تورمی، موجود است که از این میان می توان به مطالعات جیسل^۲ (۱۹۸۷)، کواری^۳ و همکارانش (۱۹۸۸)، و کیو و ژانگ^۴ (۲۰۰۰) اشاره کرد. مطالعات، مربوط به رفتار مونت موریلونیتی سنگ و توف فرورونده و سنگ های رسی می باشد که افرادی چون انیشتن^۵ (۲۰۰۰)، ارگولر و الوسای^۶ و ورسینا^۷ و همکارانش (۲۰۰۴)، نیز در این زمینه فعالیت هایی را انجام دادند [۴].

۱-۵ بررسی رفتار تورمی و اثرات مربوط به آن

پتانسیل تورم سنگ های شامل کانی های رسی در مناطق خشک و نیمه خشک، جایی که سنگ ها دارای شرایط کاملاً خشک تا اشباع کامل هستند، یک مسئله پیچیده محسوب می شود. روشی برای تعیین رفتار تورم-انقباض چنین سنگ هایی تحت شرایط درصد رطوبت متفاوت و شرایط مرزی معمول در حفاری های زیرزمینی، وجود ندارد. منطقه ای که در آن، پارامترها به واسطه حفاری تغییر می کند، تعبیر به منطقه خرد شده حفاری^۸ می شود. معمولاً سنگ های تورمی، در خلال حفاری به دلیل مقدار آب طبیعی پایین، کاملاً خشک به نظر می رسند. بنابراین، سؤال در مورد اساس پدیده ی تورم توسط آب، توجیه پذیر می باشد.

¹ stiffness

² Gysel

³ Kovari

⁴ Cui and Zhang

⁵ Einstein

⁶ Erguler and Ulusay

⁷ Wersina

⁸ EDZ

ارزیابی موارد بیشماری مشخص می‌کند که معمولاً این آب، از سفره‌های آب زیرزمینی مجاور یا از ورودی‌های تونل، سرچشمه می‌گیرد.

در منطقه‌ی خردشده حفاری، تخلخل افزایش یافته و نرخ جریان بالاتر آب، امکان‌پذیر است. با آغاز پروسه‌ی تورم، یک تغییر حجم اتفاق افتاده و فشار تورم، تخلخل و جریان آب داخل توده‌سنگ را کاهش می‌دهد. در نتیجه، یک تأثیر خودآب‌بندی که جذب و مکش تنش را کاهش می‌دهد، اتفاق افتاده و پروسه‌ی تورم، پایان می‌یابد.

در مناطق خشک با تغییرات فصلی مشخص، دو مرحله اصلی تغییر شکل تورمی، بعد از حفاری اتفاق خواهد افتاد:

(a) تغییر شکل تورمی در دوره‌ی رطوبت نخست.

(b) تغییر شکل تورمی در دوره‌های رطوبت متوالی در طول سال‌ها پس از تحمل پروسه‌های خشک کننده. پژاند و زوکت^۱ (۲۰۰۲) و موسوی و همکارانش (۲۰۰۶)، نشان دادند که تمامی این تغییر شکل‌ها، وابسته به کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی، خواص زمین، هیدرولوژی، وضعیت تنش و شرایط هوازدگی ویژه می‌باشد [۵]، [۶]. اگر سازه‌هایی همچون لاینینگ، در تونل ایجاد شوند، تغییر شکل تورمی، فشاری را در پشت ساختار، ایجاد می‌کند. رفتار تورمی چنین زمین‌هایی و آسیب‌های وارده به سیستم نگهداری حفاری‌های زیرزمینی، توسط برخی افراد همچون جیسل^۲ (۱۹۸۷)، انیشتین (۱۹۹۶)، بارلا^۳ (۱۹۹۹) و هالادر^۴ (۲۰۰۳، ۲۰۰۵) بررسی شده است.

در تمامی چنین تحقیقاتی، رفتار تورمی تنها در یک دوره اشباع مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه، از مرحله انقباض در فصل خشک، صرف نظر شده است. این سیکل رطوبت‌گیری - خشک شدن، و مدل کردن نتایج رفتار تورم - انقباض و تأثیرات آن‌ها بر سیستم نگهداری در مدت طول عمر سازه‌های زیرزمینی، از بررسی‌های ضروری محسوب می‌شوند. در مورد رس‌های متورم‌شونده^۵، تحقیقات زیادی همچون، چن^۶ و همکارانش (۱۹۸۵)، چن و ما^۷ (۱۹۸۷)، راوو و ساتیاداس^۸ (۱۹۸۷)، دیف و بلومل^۹ (۱۹۹۱) و باسما^{۱۰} و همکارانش (۱۹۹۶)، در خصوص مشکلات تورم دوره‌ای و پدیده‌ی انقباض، انجام شده است.

¹ Pejon and Zuquette

² Gysel

³ Barla

⁴ Hawlader

⁵ Expansive Clays

⁶ Chen

⁷ Ma

⁸ Subba Rao and Satyadas

⁹ Dif and Bluemel

¹⁰ Basma

این گونه نتیجه می شود که زمانی که رس ها به طور مرتب، تحت تورم کامل قرار می گیرند و سپس تا مقدار درصد رطوبت اولیه خود، خشک می شوند، به تدریج، تورم کمتری را نشان می دهند. از سوی دیگر، پوپسکو^۱ (۱۹۸۰)، ازیوو^۲ و همکارانش (۱۹۸۷)، دی^۳ (۱۹۹۴) و باسما و همکارانش (۱۹۹۶)، نشان دادند که پتانسیل تورم با تعداد دوره های رطوبت گیری و خشک شدن، افزایش می یابد، زمانی که به نمونه ها اجازه داده می شود تا به مقدار آب معادل یا کمتر از حد انقباض، به طور کامل منقبض شوند. این مطالعات، نشان دهنده ی تأثیر مرحله انقباض بر دوره بعدی تورم، می باشند.

مطابق با تحقیقات سیدمن^۴ در سال ۱۹۹۳، زمانی که رطوبت خاک یا سنگ کاهش می یابد، هوا به حفره ها داخل شده و زمانی که رطوبت توسط خاصیت موینگی بازگشت، هوا به دام افتاده و فشارش در حفره های داخلی افزایش یافته و منجر به فشار تورمی بیشتری می شود [۷].

هانگ^۵ و همکارانش در سال ۱۹۹۵، تعدادی تست رطوبت گیری و خشک شدن دوره ای، بر روی شیل انجام دادند و رابطه ای را میان ماکزیمم پتانسیل تورمی (برای مثال، ماکزیمم فشار و کرنش)، میان سیکل های اول و دوم تست، تقریب زدند [۸]. فشار ماکزیمم تورمی اندازه گیری شده در سیکل دوم تست، به طور قابل توجهی کاهش یافت و زمان لازم برای دستیابی به فشار حداکثر، به مقدار زیادی کاهش یافت. پژاندر و زوکت در سال ۲۰۰۲، برخورد سیکل رطوبت گیری و خشک شدن بر روی رفتار تورمی گل سنگ ها را توصیف کردند. آن ها نشان دادند که تراکم حداکثر کرنش تورمی محوری گل سنگ های مختلف، بر اساس تعداد سیکل های رطوبت گیری و خشک شدن تغییر می کند. آن ها خط راستی را بر حداکثر کرنش تورمی محوری در مقابل تعداد سیکل ها، منطبق کردند. سرعت تورم، وابسته به رفتار سنگ های رسوبی رسی مختلف در زمان حضور آب، می باشد [۹].

به نظر می رسد که بافت، ساختار، مقدار رس، چگالی حجمی، وزن مخصوص، چگالی خشک، مقدار رطوبت اولیه، مقدار متیلن بلو^۶، قابلیت مبادله کاتیون^۷، شاخص فعالیت رس^۸، مقدار کربن محتوی و چگالی جیوه، پارامترهای موثری هستند.

¹ Popesco

² Osipov

³ Day

⁴ Seedsman

⁵ Huang

⁶ vb

⁷ CEC

⁸ Acb

تعداد زیادی از این پارامترها که بر این رفتار مؤثرند، بدین گونه هستند که هیچ روش ریاضی معمول ساده، نمی تواند آنها را توصیف کند.

۱-۶ تست های تورم

انجمن بین المللی مکانیک سنگ^۱، روش هایی را برای تست های آزمایشگاهی سنگ های تورمی، که اساساً برای سنگ های تورمی یا سنگ های دارای رس و آنهیدریت کاربرد دارد، پیشنهاد کرده است. افرادی چون ون و چن^۲ (۱۹۹۲)، کاریوکی و میر^۳ (۲۰۰۳) و راواس^۴ (۱۹۹۹)، تست های تورمی را بر روی شیل های رسی و گل سنگ انجام و فاکتورهای مؤثر اصلی بر رفتارهای تورمی را آنالیز کرده که به شرح زیر می باشند [۴]:

(a) مقدار درصد رطوبت اولیه: پایین ترین درصد رطوبت اولیه، بیشترین پتانسیل تورمی را در پی دارد. نشان داده شده است که افزایش حجم، تقریباً به صورت خطی، وابسته به درصد رطوبت اولیه است. درصد رطوبت اولیه، بر کرنش تورمی ماکزیمم مؤثر است. اما، تنش برای حفظ حجم اولیه، به همان اندازه مؤثر است.

(b) چگالی خشک اولیه: چگالی حجمی خشک، تأثیر بسزایی بر قابلیت تورم سنگ ها دارد. مقدار تغییر-حجم، با چگالی حجم خشک، افزایش و موجب می شود که درصد رطوبت ثابت باشد.

(c) شرایط تنش برجا: بر اساس تست تورم بر روی گل سنگ، مشخص شد که کرنش تورمی محوری، به-طور خطی، با لگاریتم تنش محوری، رابطه دارد.

(d) بافت سنگ: سنگ رسی سیمانی نشده خشک، زمانی که در آب غوطه ور می شود، متورم شده و گاهی اوقات از هم می پاشد. تغییر حجم می تواند به بزرگی ۱۰ برابر باشد.

تست های تورم، به منظور مطالعه رفتار تورمی گرانیت آلتزه شده، در سال ۲۰۰۴ توسط چن و لیو^۵ انجام شده است. ضمناً، تست هایی به منظور تعیین پارامترهای مهندسی نظیر مدول های تغییر شکل پذیری، مقاومت برشی و غیره، انجام شده است [۱۰].

¹ ISRM

² Wen and Chen

³ Kariuki and van der Meer

⁴ Rawas

⁵ Chen and Lio

آلتراسیون هیدروترمال، نه تنها کانی‌ها و خواص شیمیایی سنگ بکر، بلکه بافت و خواص هیدرولیکی، مکانیکی و فیزیکی را تغییر می‌دهد. تورم مونت‌موریلونیت در آب، یک فاکتور مضر در پایداری سنگ می‌باشد. با مراجعه به روش‌های انجام تست برای سایر سنگ‌های تورمی که توسط ISRM و افرادی چون ژانگ و زو (۱۹۹۸)، مادسن^۱ (۱۹۹۹) و ارگولر و الوسای (۲۰۰۳)، انجام شده است، تعداد اندکی از خواص مهم هیدرولیکی، مکانیکی و فیزیکی، تعیین گردیده است. ون و چن (۱۹۹۲) مشاهده کردند، که رابطه روشنی میان کرنش تورمی آزاد، با مقدار جذب و مقدار آب وجود ندارد. که این متفاوت با نتایج، برای سنگ‌های تورمی رسی می‌باشد [۴].

در سال ۲۰۰۷، دوست‌محمدی^۲ و همکارانش به بررسی رفتار تورمی لایه‌های گل‌سنگ موجود در طرح نیروگاه سد مسجدسلیمان با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. فشار تورمی گل‌سنگ در سیکل‌های رطوبت‌گیری و خشک‌شدن، ترکیب رفتارهای غیرخطی و دینامیک می‌باشد. تغییرات فشار تورمی در سیکل‌های گذشته، به منظور دستیابی به رفتار دینامیک و سیگنال بارندگی، که شامل اصلاح مقدار بارندگی و تعداد دوره‌های رطوبت‌گیری و خشک‌شدن، که مشخص‌کننده رفتار خطی است، به کار می‌رود. شبکه عصبی مصنوعی، به عنوان یک ابزار قوی برای مدل‌سازی رفتارهای غیرخطی، به کار رفته است [۱۱].

یک شبکه عصبی با ۴ نرون، شامل ۳ خط تأخیر سیگنال فشار تورمی، مقدار بارندگی و تعداد دوره‌های تورم-انقباض در لایه خروجی، به منظور پیش‌بینی فشار تورم-انقباض گل‌سنگ، واقع شده بر سیستم نگهداری نیروگاه زیرزمینی برق-آبی مسجدسلیمان، به کار گرفته شده است. مدل پیشنهادی، قادر به پیش‌بینی رفتار تورم-انقباض گل‌سنگ در این نیروگاه، در ۶ ماه پس از ارائه مدل، با کمترین خطا و بهترین شاخص تطبیق در مقایسه با سایر مدل‌های معمول می‌باشد.

درصد رطوبت، به عنوان یکی از فاکتورهای مهم در کاهش مقاومت سنگ، شناخته می‌شود. یک افزایش کوچک در درصد رطوبت ممکن است باعث کاهش قابل توجه در مقاومت و تغییر شکل‌پذیری گردد. در پروژه‌های مهندسی سنگ، این تأثیر، برای ایمنی و پایداری شيروانی‌ها و بازشدگی‌های زیرزمینی، بسیار با اهمیت است. به علاوه، برای نگهداری و احیاء ساختمان‌های قدیمی و آثار باستانی، تعیین تأثیر درصد رطوبت بر مقاومت سنگ، حائز اهمیت است. این رفتار بیشتر در سنگ‌های رسوبی ریزدانه، به خصوص در سنگ‌های رسی، مشخص است. در تعدادی از تحقیقات انجام‌شده در خصوص تأثیر درصد رطوبت بر پارامترهای مکانیکی، تأکید بر چند نمونه سنگ، از جمله سنگ آهک، ماسه‌سنگ و شیل، به عنوان یک سنگ رسی می‌باشد [۱۲].

¹ Modsen

² Doostmohammadi

سنگ‌های رسی به طور مشخص، کاهش را در مقاومت و تغییر شکل پذیری، از خود نشان می‌دهند. ایکات^۱، که تأثیر درصد رطوبت بر مقاومت را بررسی کرده است، ۵ فرآیند کاهش مقاومت در شیل‌ها از جمله، کاهش انرژی شکستگی، کاهش فشار موینگی^۲، افزایش فشار حفره‌ای، کاهش اصطکاکی و خرابی شیمیایی و خوردگی را لیست کرده است. به طور مشابه، به منظور بررسی چنین تغییراتی در پارامترهای مکانیکی، مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته چنین سنگ‌هایی با درصد رطوبت مختلف، تحقیقاتی توسط محققین زیادی، انجام شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق‌ها، حاکی از آن است که پارامترهای مکانیکی سنگ‌های رسی، به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش درصد رطوبت، کاهش یافته و این کاهش، گاهی اوقات تا ۶۰٪ نیز می‌رسد [۱۳].

هاو کینز^۳، چنین استدلال کرد که برای کارهای مهندسی، تست نمونه‌های سنگی می‌بایست مناسب شرایط زمین پروژه خاص باشد و زمانی که کارهای مهندسی در زیر سطح آب زیرزمینی گسترش می‌یابد، تست‌ها می‌بایست بر روی نمونه‌های مرطوب، انجام شود.

در تحقیقات اخیر، بیشترین توجه به انتشار یک رابطه میان مقاومت فشاری تک‌محوره^۴ و درصد رطوبت، بوده است. اما، هیچ روش یا دیدگاهی برای پیش‌بینی حساسیت سنگ‌های رسی به درصد رطوبت، با به کارگیری پارامترهای ساده فیزیکی سنگ، معرفی نشده است. دو تحقیق، حساسیت سنگ‌ها را نسبت به درصد رطوبت، بررسی کرده است.

بر اساس تست‌ها بر روی ۱۵ ماسه‌سنگ از انگلستان، هاو کینز و مکائل^۵، رابطه زیر را میان مقاومت فشاری تک‌محوره و درصد رطوبت یافتند [۱۴]:

$$\sigma_{ci} = ae^{-b\omega} + c$$

۱-۲

جائیکه σ_{ci} ، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (Mpa)، ω درصد رطوبت (%). و a و b و c ، ضرائب ثابت هستند.

۱-۲ خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل پذیری

به منظور ارزیابی تأثیر درصد رطوبت، بر مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول الاستیک (مدول میانگین^۱)، یک سری تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها با درصد رطوبت متفاوت، مطابق فرآیندهای پیشنهادی JSRM،

¹ V.Eeckhout

² capillary tension decrease

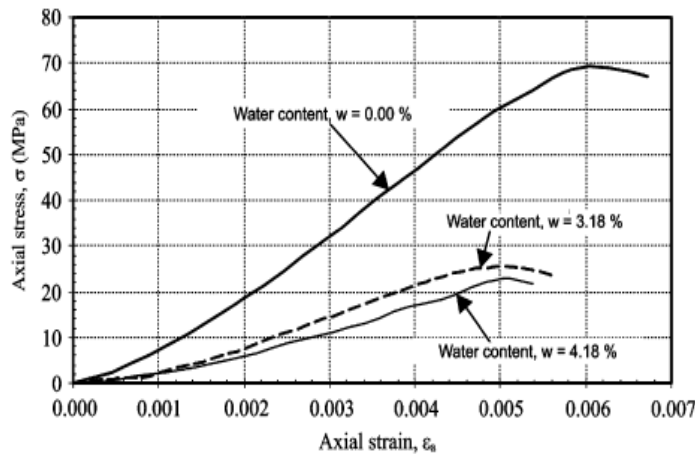
³ Hawkins

⁴ Uniaxial Compressive Strength (UCS)

⁵ McConnell

انجام شده است. مقادیر مدول میانگین الاستیک، از بهترین برازش بر قسمت خطی یا الاستیک منحنی تنش - کرنش در شرایط بارگذاری، به دست آمده است [۱۳].

تست‌های برزیلی، همچنین به منظور تعیین غیرمستقیم مقاومت کششی، مطابق روش‌های پیشنهادی JSRM، انجام شده است. به‌خاطر مشکلات ناشی از چسباندن کرنش‌سنج بر روی نمونه‌های مرطوب، مدول الاستیک از طریق مبدل تفاضلی متغیر خطی^۲، تعیین شده است. در مجموع به ترتیب ۲۱۵، ۲۸۶ و ۲۱۵ نمونه آزمایشی برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی و مدول الاستیک، آزمایش شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که کاهش در مقاومت، در ارتباط با افزایش درصد رطوبت، حدود ۶۴٪ است (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲- منحنی تنش - کرنش نمونه گل‌سنگ، با درصد رطوبت مختلف [۱۳].

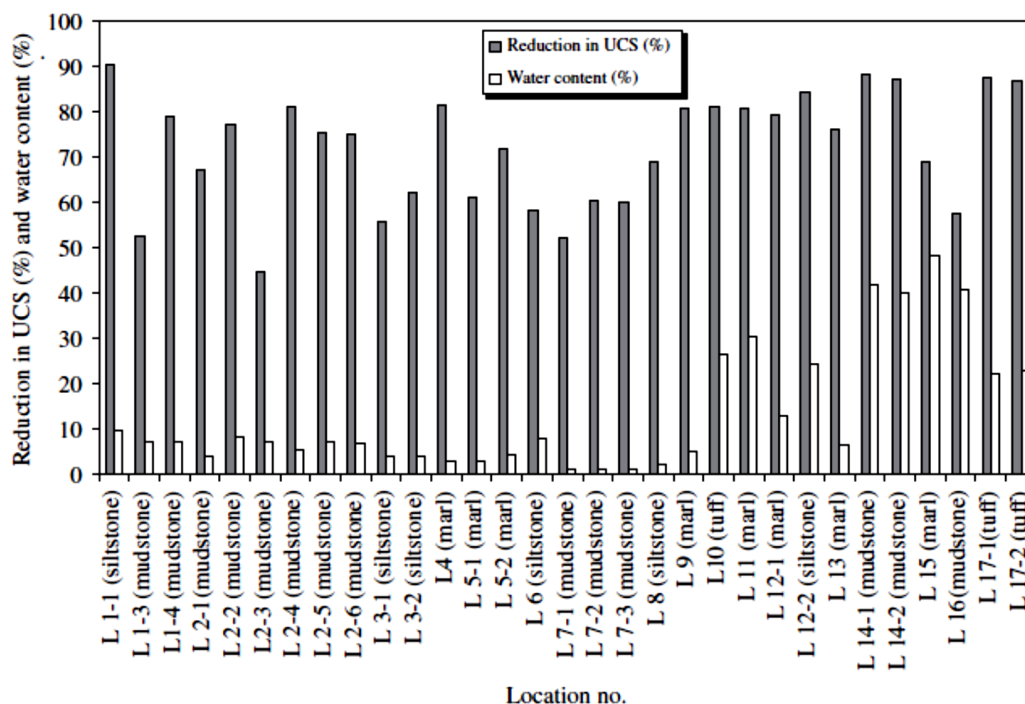
۸-۱ حساسیت خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری، به تغییرات درصد رطوبت، و مدل‌های پیش

بینی

بر اساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی، کاهش در مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیک و مقاومت کششی سنگ‌های رسی مطالعه شده، از شرایط کاملاً خشک تا اشباع، به ترتیب بیش از ۹۰٪، ۹۳٪، ۹۰٪ می‌باشد. کاهش در مقاومت فشاری تک‌محوره تمامی نمونه‌های سنگی بر اساس درصد رطوبت، در یک نمودار در شکل (۱-۳)، نمایش داده شده است. این شکل حاکی از آن است که حتی افزایش کوچک در مقدار درصد رطوبت، باعث کاهش چشمگیری در پارامترهای مکانیکی می‌شود [۱۳].

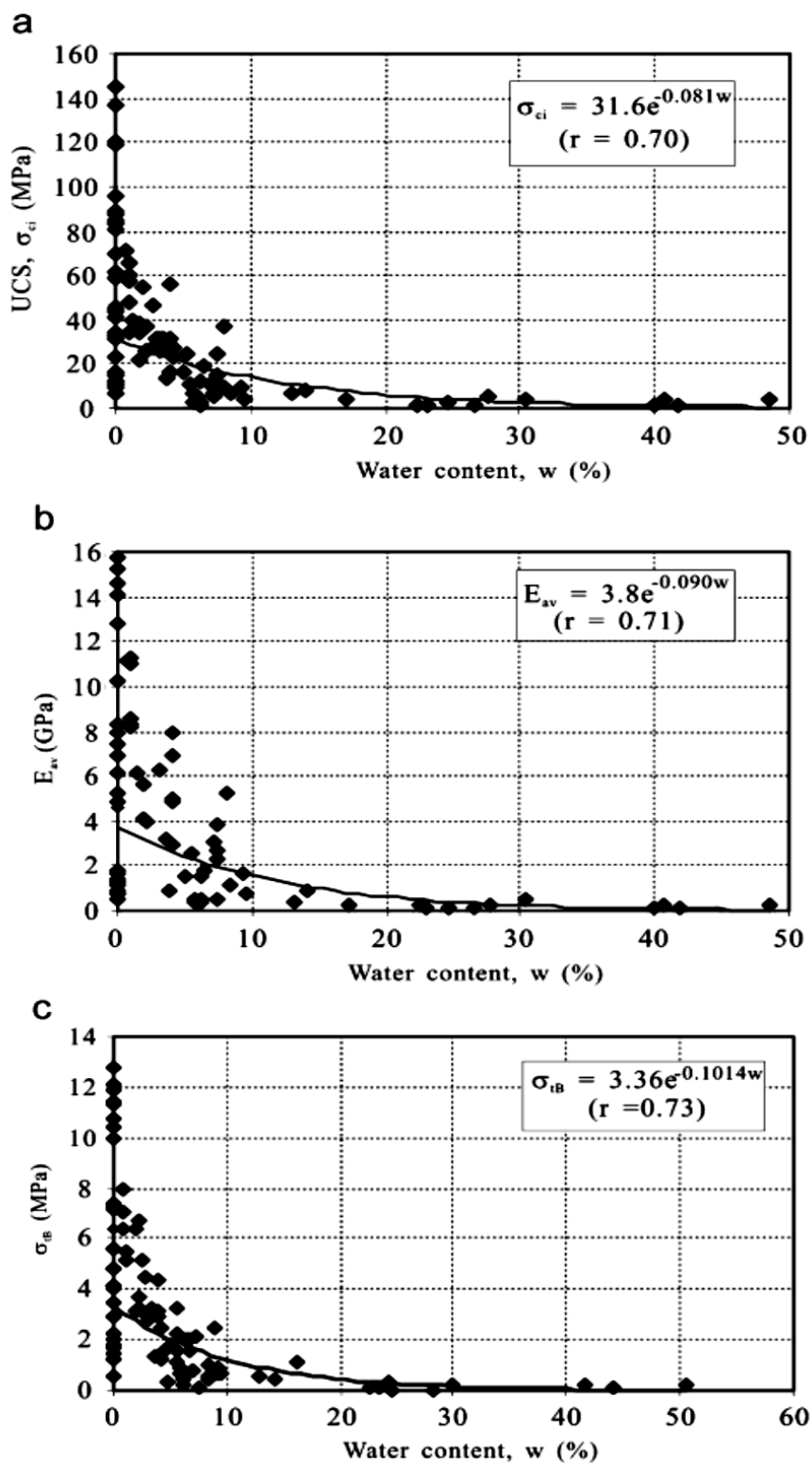
¹ E_{av}

² LVDT



شکل ۳-۱- نمودار مربوط به کاهش در مقدار مقاومت فشاری تک محوره، در ارتباط با درصد رطوبت [۱۳].

مقاومت و تغییر شکل پذیری اندازه گیری شده، به عنوان تابعی از درصد رطوبت، رسم شده است. (شکل ۴-۱). این طور پدیدار گشته که، مقاومت فشاری تک محوره، مدول تغییر شکل پذیری و مقاومت کششی، به صورت نمایی، با درصد رطوبت در ارتباط هستند.



شکل ۴-۲- روند (a) کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره (b) مدول الاستیک میانگین (c) مقاومت کششی برزیلی، با افزایش مقدار درصد رطوبت برای تمامی نمونه‌های سنگی رسی [۱۳].