



DOI: 10.30479/jmre.2019.8930.1139

تاثیر سیکل‌های تر - خشک شدن بر خواص فیزیکی، مکانیکی و گسیختگی ماسه‌سنگ

مهدی حسینی^{۱*}، محمد نعلبندان^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۲۳، پذیرش ۱۳۹۷/۰۸/۲۶)

چکیده

سنگ‌ها در شرایط متعددی در معرض تر و خشک شدن مداوم قرار می‌گیرند. تناوب چنین عملی باعث تشدید هوازدگی و کاهش مقادیر ویژگی‌های مکانیکی سنگ و در نتیجه وقوع مکرر بلایای زمین‌شناسی می‌شود. تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدن متناوب روی تخریب سنگ‌ها از تاثیر آن در تر شدن بلند مدت بیشتر است که یک امر بحرانی در پایداری مهندسی توده‌سنگ به حساب می‌آید. در این تحقیق نمونه‌های ماسه‌سنگ سازند لالون منطقه لوشان برای مطالعه استفاده شد و تاثیر تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن (۰، ۱، ۴ و ۱۶ سیکل) روی ویژگی‌های فیزیکی مانند تخلخل موثر، وزن مخصوص خشک و اشباع، سرعت امواج طولی و همچنین روی ویژگی‌های مکانیکی همچون مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری، ضریب ارتجاعی، مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بررسی شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن تخلخل موثر افزایش یافته ولی سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک و اشباع، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری و سه محوری، ضریب ارتجاعی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابند.

کلمات کلیدی

ماسه‌سنگ، ویژگی‌های فیزیکی، ویژگی‌های مکانیکی، سیکل تر و خشک شدن.

۱- مقدمه

شدن (در سیکل‌های ۰، ۱، ۴ و ۸) روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ یکی از مناطق چین (ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ شامل: ۷۳ درصد کوارتز، ۱۵ درصد فلدسپات، یک درصد زیرکن، ۹ درصد سیمان عمدتاً رسی و ۲ درصد میکا) به این نتیجه دست یافتند که در سیکل‌های اولیه تر و خشک شدن، دانه‌های ماسه‌سنگ درشت، زیر و خشن‌اند ولی به تدریج با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، این ذرات به دلیل پدیده آریلیتی شدن، نرم‌تر می‌شود که باعث تضعیف سیمان بین دانه‌ها و افزایش فاکتور آسیب ماسه‌سنگ می‌شود [۲].

ژوانگ^۳ و همکاران با بررسی تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدن (در سیکل‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ در یکی از مناطق چین (ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ شامل: ۱۶٫۸۵ درصد امفاسیت، ۴۲٫۷۴ درصد کوارتز، ۱۳٫۹ درصد کلسیت، ۱۱٫۱۹ درصد هماتیت، ۹٫۰۸ درصد فلدسپات و ۴٫۹۸ درصد کانی‌های رسی) به این نتیجه رسیدند که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، ترک‌های ریز اولیه، از نظر تعداد، طول و عرض افزایش می‌یابد و باعث تضعیف مقاومت سنگ می‌شود. آن‌ها همچنین با بررسی تاثیر سیکل‌های مختلف تر و خشک شدن (در سیکل‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) روی چگالی، تخلخل و جذب آب نمونه‌های ماسه‌سنگ، رابطه‌ای نمایی مطابق شکل ۱، بین چگالی و تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن ارائه کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، تخلخل و جذب آب نمونه‌ها افزایش می‌یابد و رابطه‌ای نمایی بین سیکل‌های تر و خشک شدن و تخلخل نمونه‌های ماسه‌سنگی مطابق شکل ۲ ارائه کردند [۳].

ژانگ و همکاران با انجام آزمایش تعیین سرعت امواج طولی روی ماسه‌سنگ منطقه تری گورژ نتیجه گرفتند که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن (در سیکل‌های ۰، ۱، ۴ و ۸)، سرعت امواج طولی به دلیل افزایش درزه‌ها و تخلخل در نمونه‌ها، کاهش می‌یابد؛ آن‌ها ارتباط بین سیکل‌های تر و خشک شدن با سرعت امواج طولی و تخلخل را مطابق شکل ۳ ارائه کردند.

گکانگ^۴ و همکاران پژوهشی بر روی اثر تعداد سیکل‌های خشک و تر شدن روی خواص مقاومت و تغییر شکل ماسه‌سنگ با انجام آزمایش سه محوری انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد سیکل‌های خشک و تر شدن مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی و چسبندگی کاهش می‌یابد.

کاربرد علم مکانیک سنگ در احداث تونل‌های راه‌آهن، کارگاه‌های استخراج، تحلیل پایداری شیب و حفاری سنگ و نظایر آن است که در این موارد احتمال تر و خشک شدن مداوم سنگ وجود دارد که باعث تاثیر در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و ویژگی‌های گسیختگی ماسه‌سنگ شده و اثرات مخربی را ایجاد کرده است که باعث ناپایداری این سازه‌های مهندسی می‌شود. به دلیل مشکلات ناشی از خستگی و فرسودگی سنگ، هوازدهی سنگ، تخریب ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ در اثر تر و خشک شدن مداوم اتفاق می‌افتد [۱].

دلایل تر و خشک شدن مداوم سنگ به شرح زیر است:

الف- جذب و تیخیر آب [۱]

ب- جابه‌جایی آب‌های زیرزمینی [۱]

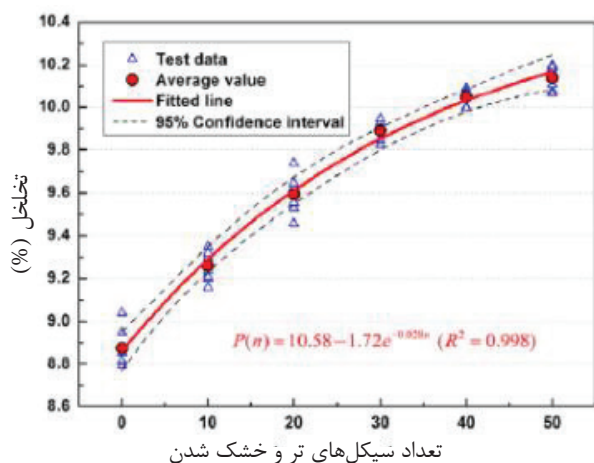
پ- نوسانات سطح آب موجود در سدها [۲].

حساسیت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و ویژگی‌های مقاومتی تکیه‌گاه‌های سد نسبت به نوسانات سطح آب سد، موجب شکستن و ناپایداری تکیه‌گاه‌های سد می‌شود. به طور مثال در سد تری گورژ^۱ در کشور چین، سطح آب سد در ژوئن ۲۰۰۳ تا ۱۳۵ متر بالا می‌آمد و سپس در اکتبر ۲۰۰۶ تا ۱۵۶ متر و در اکتبر ۲۰۱۰ تا ۱۷۵ متر بالا می‌آمد و بین ۱۳۵ متر تا ۱۷۵ متر نوسان می‌کرد. با تجمع آب در سد، تکیه‌گاه‌های سد تحت تغییراتی قرار می‌گیرند؛ وقتی آب سد افزایش یابد، فشار موثر سنگ کاهش یافته و به علت واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین سنگ و آب، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد [۲].

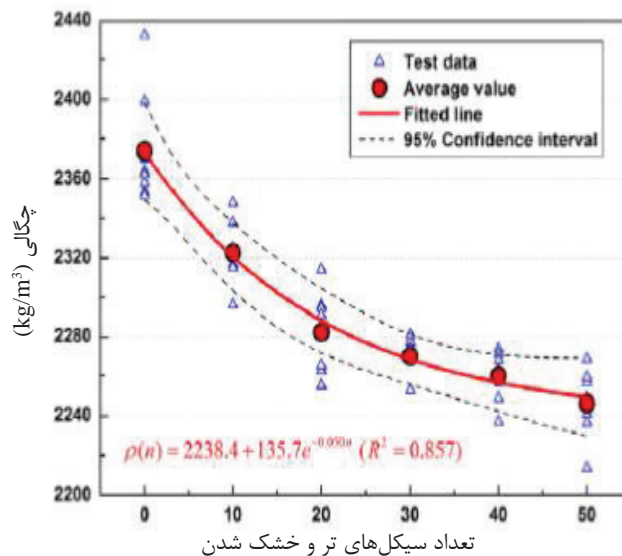
وقتی که سطح آب کاهش یابد، در حالی که سنگ فرآیند خشک شدن را طی می‌کند، فشار موثر افزایش می‌یابد و تضعیف سیمان بین دانه‌های سنگ، باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود که برای پایداری تکیه‌گاه‌های سد امری نامطلوب است، به همین دلیل تاثیرات تر و خشک شدن مداوم روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی باید بررسی شود و علت استفاده از ماسه‌سنگ در این کار تحقیقاتی فراوانی آن در اکثر سازندهای موجود در ایران است.

تحقیقاتی درباره تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدن روی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ویژگی‌های گسیختگی انجام شده است که در زیر به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود.

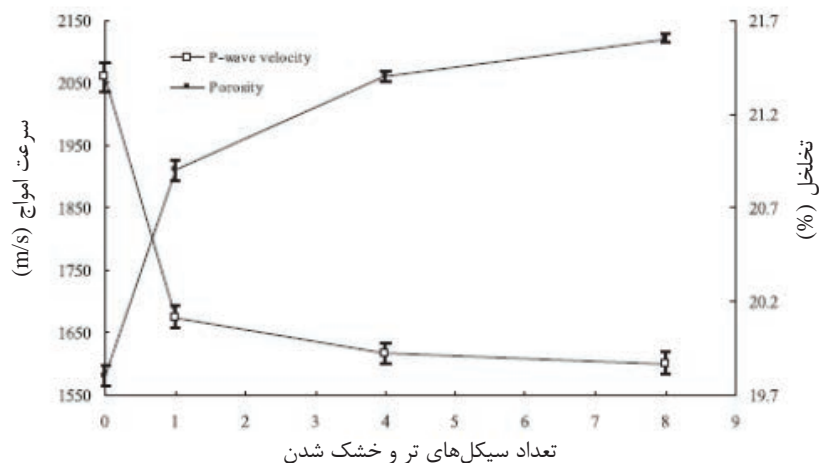
ژانگ^۲ و همکاران با بررسی تاثیر سیکل‌های تر و خشک



شکل ۲: رابطه بین تخلخل و تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن [۳]



شکل ۱: رابطه بین چگالی و تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن [۳]



شکل ۳: تأثیر تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن روی تخلخل و سرعت امواج طولی ماسه‌سنگ تری گورژ [۲]

اسمکتیت، ایلیت و کائولینیت) در نتیجه بارگذاری و باربرداری تنش کششی در سنگ‌ها در طول جذب و از دست دادن آب، می‌تواند باعث افزایش رشد و گسترش ترک‌های موجود در سنگ شود [۴].

هال و شکور^۶ نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، تخلخل افزایش می‌یابد که تأثیر منفی روی مقاومت فشاری تک محوری و ضریب ارتجاعی سنگ دارد [۵].

ژانگ و همکاران با بررسی تأثیر تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن (در سیکل‌های ۰، ۱، ۴ و ۸) روی مقاومت فشاری

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ماسه‌سنگ درجه‌های مختلفی از ترک‌ها و درزه‌های داخلی دارد، علاوه بر آن ترکیب مواد چسباننده ذرات ماسه زیاد مستحکم نیست در نتیجه با افزایش سیکل‌های خشک شدن و تر شدن منافذ درونی بزرگتر شده و آب از داخل منافذ ایجاد شده جریان یافته و باعث تضعیف نیروی بین اتصال ذرات و نیروی اصطکاک می‌شود. در نهایت در اثر این فرآیند ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد [۱].

سارمان^۵ و همکاران اظهار داشتند که در نمونه‌های ماسه‌سنگ (شامل برخی کانی‌های رسی متورم مانند

طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و سپس ثابت باقی می‌ماند ولی مقاومت فشاری ماسه‌سنگ نوع II حتی با قرار گرفتن در معرض تعداد زیادی سیکل‌های تر و خشک شدن تقریباً ثابت باقی می‌ماند [۷].

ژانگ و همکاران همچنین به تحلیل پایداری سطح شیب‌دار متشکل از ماسه‌سنگ قرمز تحت سیکل‌های تر و خشک شدن مداوم پرداختند [۸].

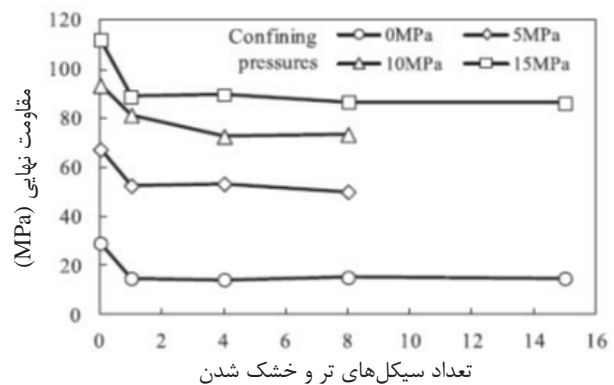
بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشتر تحقیقات گذشته، روی اثر سیکل‌های تر و خشک شدن بر مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت سنگ در آزمایش سه محوری، تخلخل و سرعت امواج طولی انجام شده است. در این تحقیق علاوه بر موارد یاد شده، اثر سیکل‌های تر و خشک شدن روی مقاومت کششی (حاصل از آزمایش برزیلی)، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیر تر و خشک شدن مداوم روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و ویژگی‌های گسیختگی سنگ، باعث می‌شود بررسی این موضوع امری ضروری در پایداری سنگ تلقی شود. در این مقاله تأثیر تر و خشک شدن مداوم روی مقاومت فشاری تک محوری، ضریب ارتجاعی، مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، سرعت امواج طولی، مقاومت کششی، تخلخل و وزن مخصوص بررسی شد.

۲- نمونه مورد مطالعه

نمونه ماسه‌سنگی استفاده شده در این تحقیق، از سازند لالون منطقه لوشان تهیه شده است که مطابق آنچه در قسمت (۱-۲) عنوان خواهد شد، این سنگ یکی از گسترده‌ترین سازندهای ایران است که تقریباً در تمام نقاط ترکیب مشابهی دارد، بنابراین در صورت احداث سازه‌های سنگی در این سازند که تحت سیکل‌های تر و خشک شدن مداوم قرار بگیرند، می‌توان به نتایج به دست آمده از این تحقیق به عنوان یکی از موارد مورد مطالعه برای تخمین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مراجعه کرد. این سنگ از ۱۵ درصد کوارتز، ۷ درصد فلدسپات، ۱۵ درصد کلسیت، ۸ درصد خرده سنگ‌هایی مانند چرت، ۷ درصد کانی‌های اوپک و ۴۸ درصد از خمیره این ماسه‌سنگ، از دانه‌های ریز کوارتز و رس (کانی کلریت) تشکیل شده است. کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه مورد مطالعه در این تحقیق، با نمونه مورد مطالعه در تحقیقات پژوهشگرانی مانند ژانگ و همکاران

ماسه‌سنگ یکی از مناطق کشور چین با فشارهای جانبی (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵)، به این نتیجه رسیدند که در فشار جانبی یکسان، با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن مقاومت فشاری ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد؛ همچنین کاهش مقاومت در اولین سیکل تر و خشک شدن به طور چشمگیری بیشتر از سایر سیکل‌ها است، یعنی پس از اولین سیکل تر و خشک شدن، مقاومت یا ثابت می‌ماند یا تغییر اندکی دارد (شکل ۴).



شکل ۴: تأثیر تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن روی مقاومت ماسه‌سنگ تحت فشارهای جانبی مختلف [۲]

ژو و همکاران همچنین با بررسی تأثیر تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن (در سیکل‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) روی مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌سنگ به این نتیجه رسیدند که با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن ضریب ارتجاعی و مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد [۳].

یاو^۶ و همکاران به این نتیجه رسیدند که هنگامی که ماسه‌سنگ اشباع شود یا تحت شرایط تر و خشک شدن قرار گیرد، در هر دو صورت مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی آن کاهش می‌یابد ولی درجه آسیب در تر و خشک شدن مداوم نسبت به زمان طولانی در آب قرار گرفتن جدی‌تر است [۶].

ژانگ و همکاران با مطالعه آزمایشگاهی روی تفاوت مقاومت دو نوع ماسه‌سنگ با شرایط کانی‌شناسی مختلف (ماسه‌سنگ نوع I متشکل از کانی‌هایی مانند: کوارتز، فلدسپات، مسکویت، کلسیت و سیمان آرژیلیتی و ماسه‌سنگ نوع II متشکل از کانی‌هایی مانند: کوارتز، فلدسپات، سریسیت و سیمان آرژیلیتی) تحت تر و خشک شدن متناوب، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری ماسه‌سنگ نوع I در سیکل‌های اولیه تر و خشک شدن به

۳- آزمایش تعیین تخلخل موثر و وزن مخصوص

برای تعیین تخلخل، وزن مخصوص خشک و اشباع بعد از هر سیکل تر و خشک شدن از روش اشباع و اندازه‌گیری ابعاد نمونه استفاده شده است. ابتدا ابعاد نمونه با دقت با کولیس اندازه‌گیری می‌شود و به این ترتیب حجم نمونه به دست می‌آید، سپس نمونه در داخل آب به مدت یک ساعت با فشار خلا کمتر از ۸۰۰ پاسکال اشباع می‌شود [۱۱]. آنگاه نمونه در داخل گرمخانه به مدت ۶ تا ۷ ساعت نگه داشته می‌شود پس از آن جرم خشک نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت به کمک روابط ۱، ۲ و ۳ وزن مخصوص خشک و اشباع و تخلخل موثر به دست می‌آید [۱۲].

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V} \quad (2)$$

$$n(e) = \frac{V_{ve}}{V} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه‌ها:

W_s : وزن خشک

W_{sat} : وزن اشباع

V_{ve} : حجم منافذ موثر

V : حجم کل است.

نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق این ویژگی‌ها بعد از ۴، ۱ و ۱۶ سیکل تر و خشک شدن تعیین شده است.

برای نمونه‌هایی که ۱، ۴ و ۱۶ سیکل تر و خشک شدن را تحمل کرده‌اند مقدار متوسط وزن مخصوص خشک به ترتیب ۲۱،۷۷، ۲۱،۴۷ و ۲۱،۱۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب، مقدار متوسط وزن مخصوص اشباع به ترتیب ۲۲،۸۵، ۲۲،۸ و ۲۲،۷۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب و مقدار متوسط تخلخل موثر به ترتیب ۹،۸۴، ۱۰،۴۷ و ۱۵،۰۱ درصد است. همچنین یک سری آزمایش هم بر روی نمونه‌هایی که سیکل تر و خشک شدن را تحمل نکرده‌اند، انجام شده است که میانگین وزن مخصوص خشک، اشباع و مقدار تخلخل موثر به ترتیب ۲۱،۹۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب، ۲۲،۹۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب و ۹،۲۱ درصد است. وزن مخصوص خشک، اشباع و تخلخل در حالت ۱۶ سیکل نسبت به حالت صفر سیکل به ترتیب ۳،۵ درصد کاهش، ۰،۸ درصد کاهش و ۶۳ درصد افزایش می‌یابد.

[۲] و [۷] و همچنین ژو و همکاران [۳] مطابقت داشته است، بنابراین مشابه شدن نتایج تحقیق حاضر با تحقیق این پژوهشگران، دور از ذهن نیست.

۲-۱- مشخصات زمین‌شناسی نمونه‌های طبیعی ماسه‌سنگ منطقه لالون

ماسه‌سنگ لالون یکی از گسترده‌ترین سازندهای کامبرین پیشین ایران است که به تقریب در همه جا ترکیب سنگ‌شناسی مشابه دارد. شباهت‌های ظاهری به ویژه رنگ و سنگ‌شناسی این سازند با ماسه‌سنگ‌های دونین اروپا (ماسه‌سنگ سرخ قدیم سبب شده بود تا این سازند به سندونین دانسته شود ولی جایگاه چینه‌شناسی و نشانه‌های فسیلی موجود، تعلق آن را به کامبرین پیشین حتمی ساخته است). در محل برش الگو واقع در دامنه شرقی دره لالون و دیگر نقاط ایران، سازند لالون شامل ضخامت متغیری (۴۰۰-۶۰۰ متر) از ماسه‌سنگ‌های آרקوزی، متوسط دانه، کوارتزی، به رنگ سرخ ارغوانی است که به داشتن چینه‌بندی متقاطع و موج نقش، شاخص است. رنگ ماسه‌سنگی که به عنوان نمونه برداشت شده است به دلیل نبود آهن در آن به رنگ خاکستری است [۹].

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق از دو بلوک A و B برای انجام آزمایش‌های مختلف استفاده شده است که هر یک از نمونه‌ها با اندیسی از سایر نمونه‌ها جدا می‌شود، مانند A21 که A نشانگر نام بلوک، اندیس ۲ نشانگر شماره مغزه و اندیس ۱ نشانگر قطعه اول از مغزه ۲ است. کلیه مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شده است. نمونه‌هایی که برای آزمایش سه محوری آماده شده است قطر حدود ۵۴،۷ میلی‌متر و بقیه نمونه‌ها قطر حدود ۵۱ میلی‌متر دارند.

قبل از انجام آزمایش‌ها نمونه‌های صیقل داده شده داخل تشت آب به مدت ۴۸ ساعت (سیکل تر شدن) قرار می‌گیرند، سپس نمونه‌ها از داخل تشت خارج شده و داخل خشک‌کن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ثابت ۱۰۵ درجه (سیکل خشک شدن) قرار داده می‌شوند و سپس نمونه‌ها در محیط قرار داده می‌شوند تا خنک شوند. این فرآیند یک سیکل تر و خشک شدن را شامل می‌شود. طرح فرآیند تر و خشک شدن مطابق با پژوهش هوا^۱ و همکارانش انجام شده است [۱۰].

جدول ۱: وزن مخصوص خشک و اشباع و تخلخل موثر به دست آمده پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	نمونه‌ها	وزن مخصوص خشک ($\frac{kN}{m^3}$)	وزن مخصوص اشباع ($\frac{kN}{m^3}$)	تخلخل موثر (درصد)
۱	B ₆₇	۲۱,۶۲	۲۲,۸۳	۹,۹۱
	B ₆₃	۲۱,۹۲	۲۲,۸۸	۹,۷۷
۴	B ₆₄	۲۰,۵۰	۲۲,۸۱	۱۰,۴۷
	B ₆₁₀	۲۰,۴۵	۲۲,۷۹	۱۰,۴۸
۱۶	B ₆₅	۲۱,۱۶	۲۲,۷۴	۱۵,۳۳۷
	B ₆₉	۲۱,۲۳	۲۲,۷۱	۱۴,۶۹



شکل ۵: نحوه قرارگیری ترانس دیوسرها روی نمونه

۴- آزمایش تعیین سرعت امواج طولی

- برای انجام آزمایش وسایل زیر مورد نیاز است:
- دستگاه اولتراسونیک (ژنراتور مولد پالس)
- ترانس دیوسرها (شامل گیرنده و فرستنده)
- وازلین (برای جلوگیری از اتلاف انرژی عبوری از ترانس دیوسرها)
- سیم‌های رابط ترانس دیوسرها
- نمونه کالیبراسیون

بعد از اینکه نمونه‌ها سیکل‌های تر و خشک شدن را تحمل کردند، محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها طوری روی سطوح انتهایی نمونه علامت‌گذاری می‌شود که محل عبوری از مراکز آن‌ها با محور مرکزی نمونه بیش از ۲ درجه اختلاف نداشته باشد، سپس مسافت حرکت موج که فاصله مرکز تا مرکز ترانس دیوسرهاست، با دقت ۰,۰۱ اندازه‌گیری می‌شود. یک لایه نازک از وازلین در محل قرار گرفتن ترانس دیوسرها مالیده می‌شود تا انرژی عبوری از ترانس دیوسرها کاهش پیدا نکند.

ترانس دیوسرها در محل علامت زده قرار می‌گیرند و فرستنده با فشاری معادل ۱۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع به نمونه فشرده شده و زمان عبور موج قرائت می‌شود [۱۳]. برای به دست آوردن زمان تلف شده در حد فاصل نمونه و ترانس دیوسرها، ترانس دیوسرها را روی هم قرار می‌دهند و زمان نشان داده از زمان‌های قرائت شده کم می‌شود. نحوه قرارگیری ترانس دیوسرها بر روی نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. برای به دست آوردن سرعت امواج طولی در نمونه از رابطه ۴ استفاده می‌شود [۱۱].

$$V_p = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (4)$$

که در آن:

V_p : سرعت موج فشاری (m/s)

t : زمان گذر موج فشاری (μs)

L : طول نمونه (mm) است.

مقدار متوسط سرعت امواج طولی برای نمونه‌هایی که ۱، ۴ و ۱۶ سیکل تر و خشک شدن را تحمل کرده‌اند به ترتیب مقدار ۳۴۲۱,۶۶، ۳۲۲۰,۶۴ و ۳۰۸۶,۹۸ متر بر ثانیه است. مقدار متوسط سرعت امواج طولی برای نمونه‌هایی که سیکل تر و خشک شدن را تحمل نکرده‌اند، ۳۶۰۰,۱۹ متر بر ثانیه است. سرعت امواج طولی در حالت ۱۶ سیکل نسبت به حالت صفر سیکل ۱۴,۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

۵- آزمایش برزیلی

نمونه‌هایی که در این آزمایش استفاده شد، نمونه‌های دیسکی شکل‌اند که قطر ۵۱ و ضخامت حدود ۲۶ میلی‌متر دارند. نمونه در داخل دستگاه آزمایش به نحوی قرار داده می‌شود که فک‌های بارگذاری (شکل ۶) به صورت قطری بار وارد کنند. بار به طور پیوسته و یکنواخت به نمونه وارد می‌شود به نحوی که نمونه بین ۱۵ تا ۳۰ ثانیه دچار شکست شود. شکل ۷ نمونه‌های ماسه‌سنگ آماده شده برای آزمایش را نشان می‌دهد. مقاومت کششی نمونه‌های سنگ از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D t} \quad (5)$$

که در آن:

P : بار در لحظه شکست (kN)

D : قطر نمونه (mm)

t : ضخامت نمونه (mm)

σ_t : مقاومت کششی (MPa) است.

نتایج آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار متوسط مقاومت کششی برای نمونه‌هایی که ۱، ۴ و ۱۶ سیکل تر و خشک شدن را تحمل کرده‌اند به ترتیب ۵٫۷۷، ۵٫۴۸ و ۴٫۵۳ مگاپاسکال است. مقدار متوسط مقاومت کششی برای نمونه‌هایی که سیکل تر و خشک شدن را تحمل نکرده‌اند ۶٫۱۰ مگاپاسکال است.

مقاومت کششی در حالت ۱۶ سیکل نسبت به حالت صفر سیکل ۲۵٫۷ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۳: مقاومت کششی مربوط به نمونه‌ها پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	نمونه‌ها	مقاومت کششی (MPa)
۱	B ₁₂	۵٫۷۳
	B ₁₃	۵٫۸۲
۴	B ₂₁	۵٫۶۰
	B ₂₂	۵٫۳۸
۱۶	B ₃₃	۴٫۵۳
	B ₄₂	۴٫۵۳

۶- آزمایش فشاری تک محوری

هدف از این آزمایش بررسی اثر سیکل‌های تر و خشک شدن روی مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب ارتجاعی است. مقاومت فشاری تک‌محوری از تقسیم نیروی محوری ماکزیمم بر سطح مقطع اولیه به دست می‌آید. شیب منحنی نیروی محوری- کرنش محوری در قسمت خطی برابر ضریب ارتجاعی است [۱۵]. نتایج این آزمایش در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه‌ای که سیکل تر و خشک شدن را تحمل نکرده است ۶۷٫۵۶ مگاپاسکال و ضریب ارتجاعی ۱۷٫۷۱ گیگاپاسکال است. مقاومت فشاری تک محوری و ضریب ارتجاعی در حالت ۱۶ سیکل نسبت به حالت

جدول ۲: سرعت امواج طولی برای هر یک از نمونه‌ها پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	نمونه‌ها	سرعت امواج طولی ($\frac{m}{s}$)
۱	A ₁₁	۳۳۸۴٫۷۷
	A ₂₂	۳۲۷۹٫۹۳
	A ₃₁	۳۵۱۲٫۹۰
	A ₃₂	۳۳۵۲٫۳۵
	A ₄₁	۳۵۷۸٫۳۴
۴	-	-
	A ₅₁	۳۱۶۰٫۸۱
	A ₆₃	۳۲۹۱٫۸۶
	A ₆₅	۳۱۷۷٫۶۴
۱۶	A ₇₁	۳۲۴۳٫۱۶
	A ₇₂	۳۲۲۹٫۷۷
	-	-
	B ₁₁	۳۰۳۴٫۲۱
	B ₂₃	۳۱۵۸٫۴۰
	B ₂₅	۳۰۶۸٫۳۵
	B ₃₁	



شکل ۶: فک‌های بارگذاری



شکل ۷: نمونه‌های مناسب برای آزمایش برزلی

صفر سیکل به ترتیب ۹،۷ درصد و ۲۹،۵۷ کاهش می‌یابد.

جدول ۴: مقاومت فشاری تک محوری مربوط به نمونه‌ها پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	نمونه‌ها	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
۱	A ₁₁	۶۶،۳۴
۴	A ₄₄	۶۴،۶۳
۱۶	A ₇₂	۶۰،۹۵

جدول ۵: ضریب ارتجاعی مربوط به نمونه‌های ماسه‌سنگی پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	ضریب ارتجاعی (GPa)
۱	۱۶،۶۸
۴	۱۴،۹۶
۱۶	۱۲،۴۷

۷- آزمایش فشاری سه محوری

برای مطالعه تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدن روی مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، بر روی نمونه‌ها آزمایش فشاری سه محوری انجام شد. دستگاه مورد استفاده از چهار بخش مجزا شامل سلول آزمایش، جک اعمال‌کننده بار محوری، پمپ اعمال‌کننده فشار

جانبی و جک خارج کردن نمونه تشکیل شده است. در ادامه هر بخش دستگاه به صورت جداگانه توضیح داده می‌شود.

سلول آزمایش: سلول آزمایش مورد استفاده در این تحقیق، سلول هوک است که دارای دو درپوش فولادی، یک غشای انعطاف‌پذیر برای در برگرفتن نمونه سنگ و دو شیر (یک شیر برای اعمال فشار جانبی و شیر دیگر برای هواگیری سلول) است. این سلول برای نمونه‌هایی با قطر ۵۴ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر مناسب است و مجهز به سنسوری است که مقدار فشار جانبی را اندازه‌گیری می‌کند.

جک اعمال‌کننده بار محوری: این جک، برقی، دیجیتال و نیمه خودکار است (ساخت شرکت ELE) و ظرفیت اعمال نیرو تا ۲۰۰۰ کیلو نیوتن را دارد. همچنین قابلیت ثبت نتایج آزمایش با اتصال به کامپیوتر نیز امکان‌پذیر است.

پمپ اعمال‌کننده فشار جانبی: دستگاه اعمال و کنترل فشار جانبی (ساخت شرکت ELE) ظرفیت اعمال فشار جانبی تا ۶۰ مگاپاسکال را دارد. این دستگاه به سلول هوک وصل شده است و با پمپ کردن روغن به سلول، فشار به غشای انعطاف‌پذیر که در برگیرنده نمونه است، اعمال می‌شود.

جک خارج کردن نمونه: برای خارج کردن نمونه از سلول هوک کاربرد دارد.

آزمایش‌ها مطابق استاندارد ISRM انجام شد [۱۶]. آزمایش بر روی نمونه‌هایی که ۱، ۴ و ۱۶ سیکل تر و خشک شدن را تحمل کرده‌اند تحت فشار جانبی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ مگاپاسکال انجام شده که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: مقاومت فشاری سه محوری مربوط به نمونه‌ها پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	نمونه‌ها	فشار جانبی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۱	A ₂₂	۳	۸۷،۰۰
	A ₃₁	۵	۱۰۰،۵۶
	A ₃₂	۷	۱۰۳،۷۸
	A ₄₁	۱۰	۱۳۵،۸۸
۴	A ₅₁	۳	۸۰،۴۶
	A ₆₃	۵	۹۷،۰۵
	A ₆₅	۷	۱۰۱،۳۰
	A ₇₁	۱۰	۱۳۰،۷۶
۱۶	B ₁₁	۳	۸۰،۲۳
	B ₂₃	۵	۹۴،۰۱
	B ₂₅	۷	۱۰۰،۸۶
	B ₃₁	۱۰	۱۲۵،۹۷

۸- تحلیل نتایج

برای بررسی تأثیر سیکل‌های تر و خشک شدن روی وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع و تخلخل موثر ماسه‌سنگ لوشان، ابتدا میانگین اعداد، به دست آمده سپس ارتباط بین وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، تخلخل موثر و تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن با نرم‌افزار اکسل به دست آمد. شکل‌های ۸ تا ۱۰ این تغییرات را نشان می‌دهد. روند تغییرات با تحقیقات ژو و همکاران [۳] و ژانگ و همکاران [۲] مطابقت دارد. در شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که وزن مخصوص خشک و اشباع با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد و در شکل ۱۰ نشان‌دهنده افزایش تخلخل موثر با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن است.

در شکل ۱۱ روند تغییرات سرعت امواج طولی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن نشان داده شده است که موید یک کاهش غیرخطی سرعت امواج با افزایش تعداد سیکل‌ها است که با پژوهش‌های ژانگ و همکاران [۲] مطابقت دارد. در شکل ۱۲ نیز روند تغییرات مقاومت کششی ارایه شده است که با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن به صورت خطی کاهش می‌یابد.

در مورد مقاومت فشاری تک محوری و ضریب ارتجاعی نیز همانگونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن مقاومت فشاری تک محوری و ضریب ارتجاعی کاهش می‌یابد که روند تغییرات با پژوهش‌های ژو و همکاران [۳] مطابقت دارد.

با استفاده از روابط ۶ و ۷ زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه‌های ماسه‌سنگی در هر سیکل تر و خشک شدن به دست می‌آید [۱۷] که نتایج آن در جدول ۷ ارایه شده است.

جدول ۷: چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به نمونه‌ها پس از سیکل‌های تر و خشک شدن

سیکل	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (MPa)
۰	۴۸٫۰۵	۱۲٫۹۸
۱	۴۷٫۳۹	۱۲٫۸۴
۴	۴۶٫۹۲	۱۲٫۳۴
۱۶	۴۶٫۶۱	۱۲٫۱۰

$$\phi = \sin^{-1} \frac{m-1}{m+1} \quad (6)$$

$$C = b \frac{1-\sin\phi}{2\cos\phi} \quad (7)$$

در این روابط:

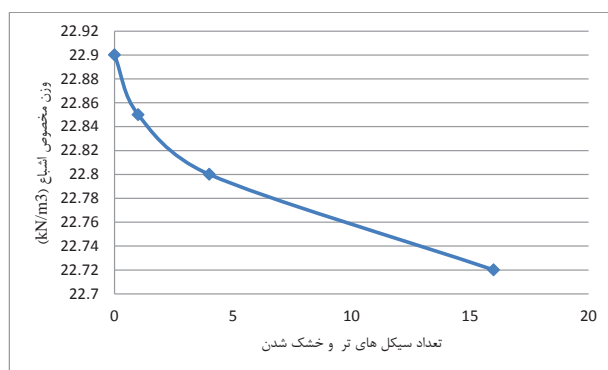
ϕ : زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

C : چسبندگی (مگا پاسکال)

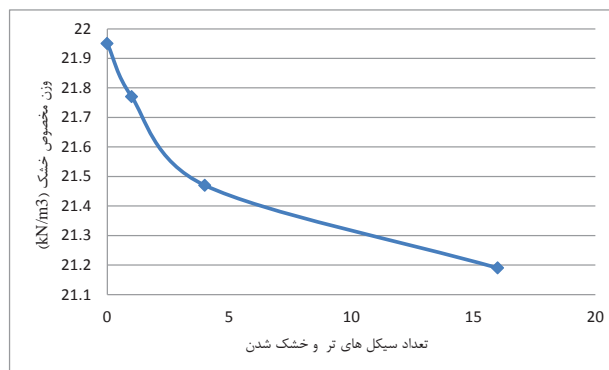
m : شیب نمودار تنش محوری - فشار جانبی

b : عرض از مبدا نمودار تنش محوری - فشار جانبی است.

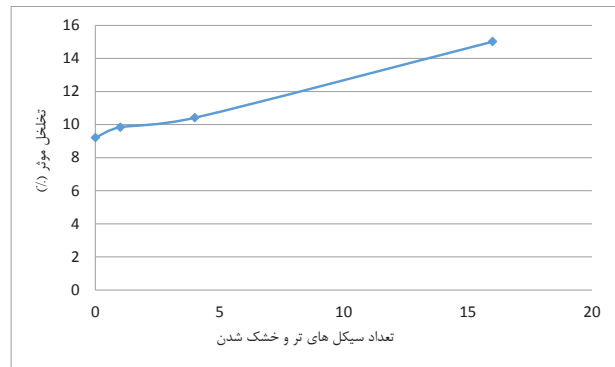
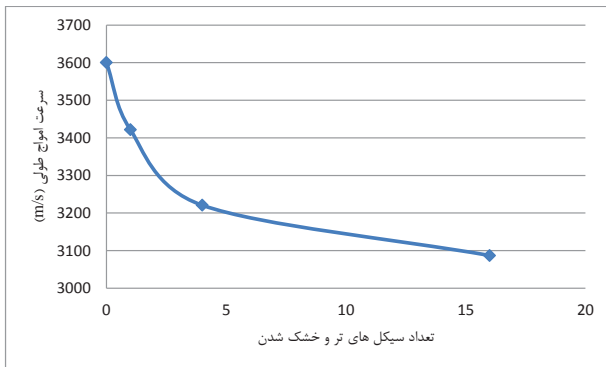
یک سری آزمایش در فشارهای جانبی ۳، ۵ و ۱۰ مگاپاسکال روی نمونه‌هایی که سیکل تر و خشک شدن را تحمل نکرده‌اند، انجام شد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در حالت ۱۶ سیکل نسبت به حالت صفر سیکل به ترتیب ۶٫۷ و ۳ درصد کاهش می‌یابد.



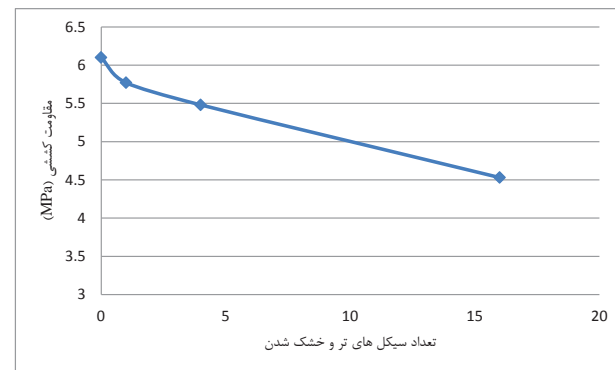
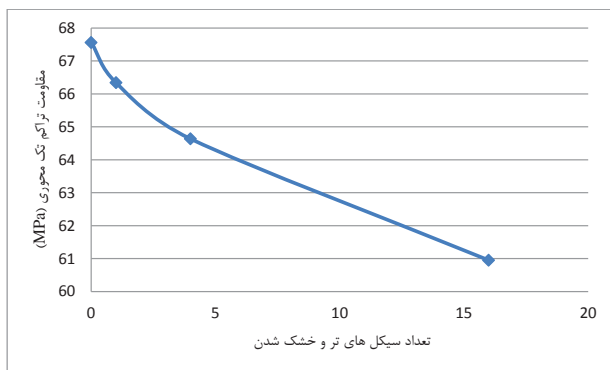
شکل ۹: روند تغییرات وزن مخصوص اشباع با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن



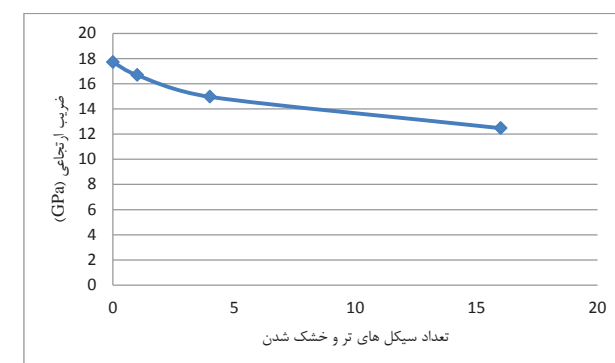
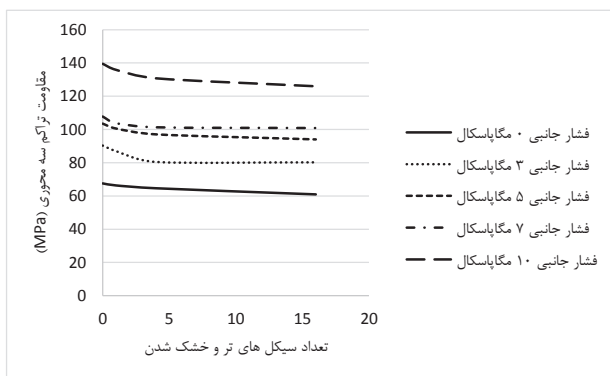
شکل ۸: روند تغییرات وزن مخصوص خشک با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن



شکل ۱۰: روند تغییرات تخلخل موثر با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن
شکل ۱۱: روند تغییرات سرعت امواج طولی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن



شکل ۱۲: روند تغییرات مقاومت کششی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن
شکل ۱۳: روند تغییرات مقاومت فشاری تک محوری با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن



شکل ۱۴: روند تغییرات ضریب ارتجاعی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن
شکل ۱۵: روند تغییرات مقاومت فشاری سه محوری با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن

روند تغییرات مقاومت فشاری سه محوری که با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد، با نتایج ژانگ و همکاران مطابقت دارد. در ضمن تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز

در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به ترتیب تغییرات مقاومت فشاری سه محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن مشاهده می‌شود.

دلیل افزایش منافذ سنگ آب از منافذ بین ذرات جریان یافته و نیروی چسباننده ذرات سنگ کاهش می‌یابد. تمرکز تنش در مرزهای فضاهای خالی اتفاق می‌افتد و ترک‌ها و صفحات شکست مطابق با تمرکز تنش در مرز فضاهای خالی گسترش می‌یابند [۱۹]. در نهایت با افزایش ترک‌ها و کاهش نیروی چسباننده ذرات سنگ که در اثر مجموع آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی اتفاق می‌افتد باعث افزایش تخلخل و کاهش وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، مقاومت تراکم تک محوری، سه محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود.

در این مقاله نتایج آزمایش سه محوری با نتایج حاصل از معیار هوک و براون نیز مقایسه شده است. برای این منظور با استفاده از رابطه ۸ [۲۰] می‌توان ضریب ثابت معیار هوک و براون را برای هر یک از سیکل‌های تر و خشک شدن (۱، ۴ و ۱۶) محاسبه کرد؛ این نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[\frac{\sum xy - (\sum x \sum \frac{y}{n})}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right] \quad (8)$$

که در آن:

m_i : ضریب ثابت معیار هوک و براون

σ_{ci} : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر

$x = \sigma_3$ ، $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ است.

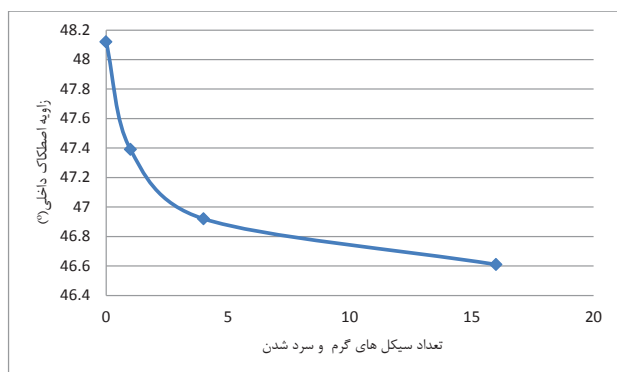
جدول ۸: ضریب ثابت معیار هوک و براون برای سیکل‌های تر و خشک شدن (۱، ۴ و ۱۶)

سیکل ۱	سیکل ۴	سیکل ۱۶
۱۶،۰۷	۱۵،۴۲	۱۵،۳۷

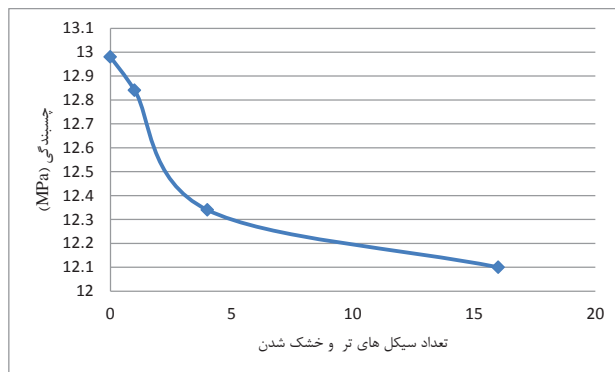
به صورت غیرخطی با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد که این نتایج با نتایج کگانگ و همکاران [۱] مشابه است.

دلیل تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را می‌توان چنین بیان کرد، هنگامی که سنگ در آب در مرحله تر شدن قرار داده می‌شود، آب به تدریج از طریق میکرو ترک‌ها، تخلخل یا سطوح تماس بین دانه‌ها در سنگ حرکت می‌کند و به عنوان یک نوع حلال، برخی از کانی‌های سنگ را تجزیه می‌کند و بخشی از سیمان را از بین می‌برد. چون ماتریکس این نوع ماسه‌سنگ حاوی رس (کانی کلریت) است به خوبی با آب واکنش می‌دهد [۱۸] و باعث افزایش تخلخل می‌شود. پس در مرحله تر شدن به ویژه در سیکل اول آسیب شیمیایی در سنگ اتفاق می‌افتد.

در مرحله خشک شدن، نمونه در خشک‌کن منبسط و در هنگام خنک شدن نمونه در محیط انقباض اتفاق می‌افتد، به دلیل ضرایب انبساط حرارتی مختلف کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ این انبساط و انقباض در ذرات ماسه‌سنگ تنش‌های کششی و فشارشی ایجاد می‌کند در صورتی که این تنش‌ها از مقاومت سنگ بیشتر باشد در سنگ ترک جدید ایجاد می‌شود و در اثر آن، ترک‌های اولیه گسترش می‌یابد و در مرحله خشک شدن آسیب فیزیکی اتفاق می‌افتد. چون بیشترین آسیب شیمیایی در اولین سیکل علاوه بر آسیب فیزیکی اتفاق می‌افتد، کاهش ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و گسیختگی ماسه‌سنگ در اولین سیکل تر شدن - خشک شدن بیشتر از سایر سیکل‌ها است. با تداوم فرآیند تر و خشک شدن این گسترش ترک ادامه می‌یابد و میزان تخلخل و جذب آب افزایش می‌یابد که یک اثر منفی روی خواص مکانیکی ماسه سنگ به همراه دارد. به



شکل ۱۷: روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن



شکل ۱۶: روند تغییرات چسبندگی با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌هایی برای تعیین تخلخل موثر، وزن مخصوص و سرعت امواج طولی، همچنین مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری و سه محوری در فشارهای جانبی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ مگاپاسکال بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ که سیکل‌های مختلف تر و خشک شدن (۰، ۱، ۴ و ۱۶) را تحمل کرده‌اند انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها به شرح زیر است:

- با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، تخلخل افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن به دلیل افزایش تخلخل، وزن مخصوص خشک و اشباع کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تغییرات مقاومت فشاری با فشار جانبی به ترتیب برای سیکل‌های تر و خشک شدن (۱، ۴ و ۱۶) بر اساس نتایج تحقیق حاضر و معیار هوک و براون (رابطه ۹) نشان داده شده است که بیانگر مطابقت معیار هوک و براون با نتایج تحقیق حاضر است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \sigma_3 \sigma_c + \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

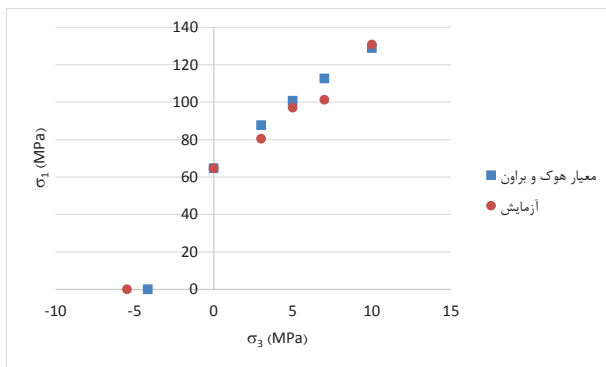
که در آن:

σ_1 : مقاومت فشاری سه محوره

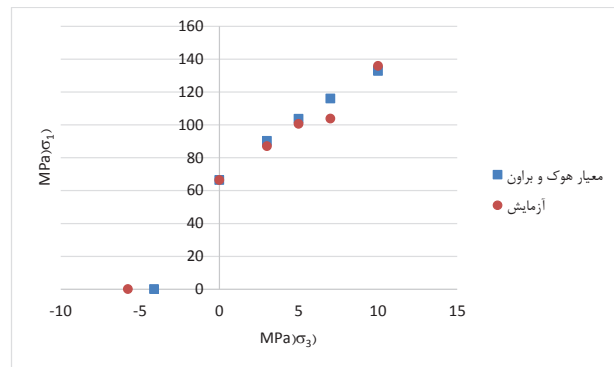
σ_3 : فشار جانبی

m_i : ضریب ثابت

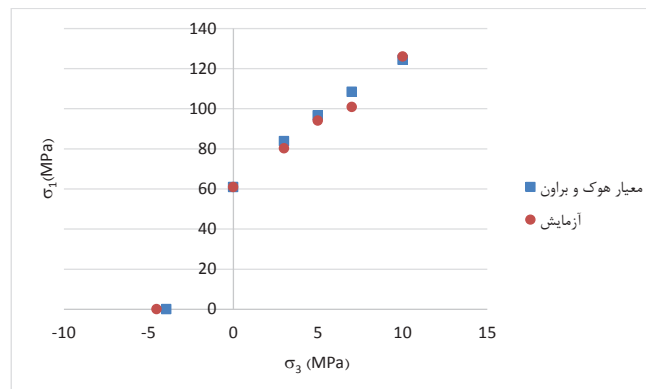
σ_c : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر است.



شکل ۱۹: مقایسه نتایج معیار هوک و براون با نتایج آزمایش‌ها در مورد تغییرات مقاومت فشاری سه محوری با افزایش فشار جانبی برای ۴ سیکل تر و خشک شدن



شکل ۱۸: مقایسه نتایج معیار هوک و براون با تحقیق انجام شده در مورد تغییرات مقاومت فشاری سه محوری با افزایش فشار جانبی برای یک سیکل تر و خشک شدن



شکل ۲۰: مقایسه نتایج معیار هوک و براون با نتایج آزمایش‌ها در مورد تغییرات مقاومت فشاری سه محوری با افزایش فشار جانبی برای ۱۶ سیکل تر و خشک شدن

- [5] Hale, P. A., and Shakoor, A. (2003). "A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones". *Environmental and Engineering Geoscience*, 9(2): 117-130.
- [6] Yao, H., Zhu, Y., and Wu, P. (2013). "Research on Uniaxial Compression and Tension Tests of Sandstone Subjected to Drying wetting Cycle". *Disaster Advances*, 6(3): 388-392.
- [7] Zhang, Z. H., Xue, J. J., and Yao, H. Y. (2012). "Experimental study on the strength difference of two types of sandstones with different composition of minerals under the conditions of dry and wet cycles". In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 374: 2217-2220.
- [8] Zeng, S., Li, Z., Wei Hui, G., and Wang, J. (2013). "Stability analysis of red sandstone bedding slope under rainfall infiltration and dry-wet cycling". *Rock and Soil Mechanics*, 34(6): 1536-1540.
- [۹] مطیعی، و. ه.؛ ۱۳۷۰؛ "چینه‌شناسی زاگرس". سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ص ۵۳۶.
- [10] Hua, W., Dong, S., Peng, F., Li, K., and Wang, Q. (2017). "Experimental investigation on the effect of wetting-drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93: 242-249.
- [۱۱] فهیمی فر، ا.، سروش، ح.؛ ۱۳۸۰؛ "آزمایش‌های مکانیک سنگ". جلد اول، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ویرایش اول، ص ۷۴۰.
- [12] ISRM, (1979). "Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16: 141-156.
- [13] ISRM, (1978). "Suggested methods for determining sound velocity". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech Abstr*, 15: 53-58.
- [14] ISRM, (1978). "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech Abstr*, 15: 99-103.
- [15] ISRM, (1979). "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16: 138-140.
- [16] ISRM, (1978). "Suggested methods for determining
- با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن مقاومت کششی ماسه‌سنگ کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن ابتدا سرعت امواج طولی در سیکل‌های تر و خشک شدن پایین، کاهش زیادی پیدا می‌کند ولی در سیکل‌های تر و خشک شدن بالاتر، سرعت امواج طولی تغییرات کمی پیدا می‌کند.
- با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن مقاومت فشاری تک محوری کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن ضریب ارتجاعی (شیب نمودار تنش- کرنش) نیز کاهش می‌یابد.
- با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، مقاومت فشاری سه محوری در فشارهای جانبی یکسان کاهش می‌یابد ولی آهنگ کاهش مقاومت با افزایش فشار جانبی کاهش می‌یابد یعنی در فشار جانبی بالا، با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن، مقاومت فشاری سه محوری کاهش کمتری نسبت به حالتی که فشار جانبی کم باشد، دارد به عبارت دیگر با افزایش فشار جانبی میل به تخریب کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نیز کاهش می‌یابد.
- بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج آزمایش را می‌توان با استفاده از معیار هوک و براون تخمین زد. در ضمن ضریب ثابت معیار هوک و براون با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن کاهش می‌یابد.

۱۰- مراجع

- [1] Kegang, L., Lin, M., Xiangxing, L., and Shoujian, P. (2016). "Effect of drying-wetting cycles on triaxial compression mechanical properties of sandstone". *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 9(3): 66-73.
- [2] Zhang, Z., Jiang, Q., Zhou, C., and Liu, X. (2014). "Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting - drying conditions". *Geophysical Journal International*, 198(2): 1034-1044.
- [3] Zhou, Z., Cai, X., Chen, L., Cao, W., Zhao, Y., and Xiong, C. (2017). "Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone". *Engineering Geology*, 220: 1-12.
- [4] Sarman, R., Shakoor, A., and Palmer, D. F. (1994). "A multiple regression approach to predict swelling in mud rocks". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer, 31(1): 107-112.

the strength of rock materials in triaxial compression". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech Abstr, 15: 47-51.

¹ Three Gorges

² Zhang

³ Zhou

⁴ Kegang

⁵ Sarman

⁶ Hale and Shakoor

⁷ Yao

⁸ Hua

[۱۷] حسینی، م.، ملکی، س.؛ ۱۳۹۵؛ "بررسی معیار شکست‌های هوک و همکاران، بینیاوسکی و جانستون در خصوص تخمین مناسب مقاومت ماسه سنگ". سومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، برق، مکانیک و معماری ایران، ص ۹-۱.

[18] Lin, M. L., Jeng, F. S., Tsai, L. S., and Huang, T. H. (2005). "Wetting weakening of tertiary sandstones—microscopic mechanism". Environmental Geology, 48(2): 265-275.

[19] Hua, W., Dong, S. M, Li, Y. F., Xu, J. G., Wang, Q. Y. "The influence of cyclic wetting and drying on the fracture toughness of sandstone". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 78: 331-335.

[20] Shen, J., and Karakus, M. (2014). "Simplified Method for Estimating the Hoek-Brown Constant for Intact Rocks". Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 140(6): 04014025.



DOI: 10.30479/jmre.2019.8930.1139

Effect Of Wetting - Drying Cycles On Physical, Mechanical And Failure Properties Of Sandstone

Hosseini M.^{1*}, Naalbandan M.²

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
meh_hosseini18@yahoo.com

2- M.Sc Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
mohammadnaalbandan74@gmail.com

(Received: 13 Jun. 2018, Accepted: 17 Nov. 2018)

Abstract: In many environments, rocks are usually exposed to continuous wetting and drying cycles. The number of wetting-drying cycles will exacerbate weathering and reduce the mechanical quality of the rock which results in geological disasters. The effects of alternating wetting and drying cycles on rocks degradation have a greater impact than long-time soaking, which is a critical issue in the sustainability of rock mass engineering. In this research, sandstone specimens of Lalun Formation in Lushan area were investigated and the effect of wetting-drying cycles (0, 1, 4, 16) was examined on the physical properties including effective porosity, P-wave velocity, dry and saturated specific weight, mechanical properties including indirect tensile strength, uniaxial compressive strength, elasticity modulus, triaxial compressive strength, cohesion, and internal friction angle. The results indicate that by increasing the wetting-drying cycles, the effective porosity increased while the dry and saturated specific weight, P-wave velocity, tensile strength, uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength, elasticity modulus, cohesion, and internal friction angle decreased.

Keywords: Sandstone, Physical properties, Mechanical properties, wetting-drying cycle.

INTRODUCTION

Rock mechanics is applicable to tunnel construction, mining, slope stability analysis, rock drilling, and other applications. In such uses, continuous rock wetting-drying cycles affect the physical, mechanical and failure characteristic properties of sandstones that lead to destructive effects and deteriorate the stability of such engineering structures. The continuous wetting-drying cycles results in some problems including rock fatigue and wear and tear, rock weathering and degradation of the physical and mechanical properties of rocks [1].

The continuous rock wetting-drying cycles occur for the following reasons:

1. Water absorption and evaporation [1]
2. Groundwater flow [1]

3. Water level fluctuations in dams [2]

Most of the previous studies investigated the effect of wetting-drying cycles on uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength, porosity, and longitudinal wave velocity. In addition to items mentioned above, this study also investigated the effect of drying-wetting cycles on the tensile strength (using the Brazilian test), rock internal friction angle, longitudinal wave velocity, porosity, and specific gravity.

The effect of continuous drying-wetting cycles on the physical, mechanical, and fracture properties of rocks highlights the significance of this investigation. This article studies the effect of continuous wetting-drying cycles on the uniaxial compressive strength, elasticity modulus, triaxial compressive strength, cohesion, internal friction angle, longitudinal wave velocity, tensile strength, porosity, and specific gravity.

METHODS

The sandstone sample used in this study was obtained from the Lalun formations of the Lushan region, which consists of 15 percent quartz, 7 percent feldspar, 15 percent calcite, 8 percent chert, 7 percent opaque minerals, and 48 percent of this rock were made of fine quartz and clay particles. Before all tests, the polished samples were placed inside the water basin for 48 hours (wet cycle); then the samples were taken from the basin and placed in the oven for 24 hours in a fixed 105° temperature (dry cycle). Then, the samples were left in the environment to cool down. This process includes a wet and dry cycle. The longitudinal wave velocity test, the Brazilian test, uniaxial and triaxial compression tests, and the effective porosity and specific gravity tests were performed on samples that were subjected to wetting-drying cycles.

FINDINGS AND ARGUMENT

In this study, effective porosity, specific gravity, longitudinal wave velocity, tensile strength test, and uniaxial and triaxial compressive strength tests in 3, 5, 7 and 10 MPa lateral pressures were performed on sandstone samples that were subjected to 0, 1, 4 and 16 wetting-drying cycles. The results are as follows:

1. Increased wetting-drying cycles increase porosity; decrease dry and saturated unit weight and increase porosity. These changes are compatible with the findings of Zhou et al. in 2017 [3] and Zhang et al. in 2014 [2].
2. Increasing drying-wetting cycles decreases sandstone tensile strength.
3. Initially, increasing wetting-drying cycles greatly reduces longitudinal wave velocity in the lower wetting-drying cycles, but in higher wetting-drying cycles, longitudinal wave velocity changes slightly. This is compatible with the findings of Zhang et al. in 2014 [2] and Zhou et al. in 2017 [3].
4. Increasing wetting-drying cycles decreases the uniaxial compressive strength (Figure 1) as well as the elasticity modulus. These changes are compatible with the findings of Zhou et al. in 2017 [3].

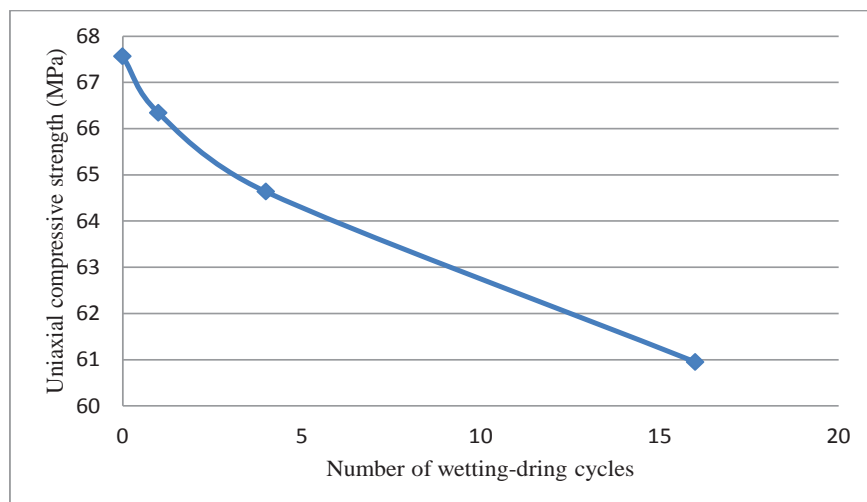


Figure 1. The variation of uniaxial compressive strength with the number of wetting-drying cycles

5. At the same lateral pressure, increasing wetting-drying cycles reduces triaxial compressive strength. The changes are compatible with the findings of Zhang et al. in 2014. Increasing lateral pressure reduces the strength rate of reduction, which means by increasing wetting-drying cycles in higher lateral pressures, the triaxial compressive strength is reduced less than the lower lateral pressure. In other words, increasing lateral pressure reduces the destruction tendency. Also, increasing wetting-drying cycles reduces internal friction angle and cohesion.

6. The studies showed that the results can be estimated using the Hoek and Brown criterion. Also, increased wetting-drying cycles decrease the Hoek and Brown criterion constant.

CONCLUSIONS

In this research, sandstone specimens of Lalun Formation in Lushan area were used and the effect of wetting-drying cycles (0, 1, 4, 16) was investigated on the physical properties including effective porosity, P-wave velocity, dry and saturated specific weight and mechanical properties including indirect tensile strength, uniaxial compressive strength, elasticity modulus, triaxial compressive strength, cohesion, and internal friction angle.

The results indicate that by increasing the wetting-drying cycles, effective porosity increased but dry and saturated specific weight, P-wave velocity, tensile strength, uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength, elasticity modulus, cohesion, and internal friction angle decreased.

REFERENCES

- [1] Kegang, L, Lin, M., Xiangxing L., and Shoujian, P. (2016). "Effect of drying-wetting cycles on triaxial compression mechanical properties of sandstone". Journal of Engineering Science & Technology Review, 9(3): 66-73.
- [2] Zhang, Z., Jiang, Q., Zhou, C., and Liu, X. (2014). "Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting-drying conditions". Geophysical Journal International, 198(2): 1034-1044.
- [3] Zhou, Z., Cai, X., Chen, L., Cao, W., Zhao, Y., and Xiong, C. (2017). "Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone". Engineering Geology, 220: 1-12.