

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان انحلال و مقاومت فشاری تک‌محوری مصالح حاوی ژئیس (مطالعه موردی: سد مراش زنجان)

علیرضا معظمی*^۱، سیدمجتبی حسینی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

^۲ کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۳/۲۸

چکیده

وجود ژئیس (Gypsum) و انیدریت (Anhydrite) در پی و ساختگاه‌های سازه‌های آبی مانند سدها و ... می‌تواند مشکلاتی را به‌لحاظ پایداری و ... بستر ایجاد نماید. در این تحقیق انحلال مصالح حاوی ژئیس ساختگاه سد مراش در استان زنجان در حضور سه نوع حلال مختلف (آب مقطر، آب رودخانه سد مراش و آب مقطر حاوی یک درصد کلرید سدیم) و در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله رطوبت نسبی، تخلخل و ... بر میزان مقاومت فشاری تک‌محوری (Unconfined Compression Test) (UCS) و مدول الاستیسیته (Young's modulus) با تهیه ۱۰ نمونه سنگ ژئیس‌دار (Gypsum rock's) از ساختگاه سد مراش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات انحلال نشان می‌دهد که قابلیت انحلال مصالح ژئیس‌دار در محلول حاوی یک درصد کلرید سدیم بیشتر از محلول آب مقطر و هر دو بیشتر از آب رودخانه سد مراش می‌باشد. با افزایش میزان تخلخل، مقادیر مدول الاستیسیته و حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد و شیب کاهش مقاومت فشاری نسبت به درصد تخلخل در مقایسه با نمودار مدول الاستیسیته بیشتر است. با افزایش میزان دانسیته نسبی، مدول الاستیسیته افزایش و حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش و همبستگی مقاومت حداکثر فشاری به دانسیته نسبی، نسبت به مدول یانگ (Young's modulus) بیشتر می‌باشد. شیب تغییرات مدول یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به ضریب پواسون (Poisson's ratio) کاهشی می‌باشد و از تغییرات مدول یانگ و تنش فشاری تک‌محوری نسبت به درصد رطوبت می‌توان دریافت که مصالح مارنی (Marl materials) باعث جذب رطوبت بیشتر و در نهایت موجب کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی شده است.

کلیدواژه‌ها: قدرت انحلال، ژئیس و انیدریت، پی سد، رطوبت نسبی، مدول یانگ، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS).

۱- مقدمه

و همچنین مقاومت نهایی سنگ‌های مذکور در رطوبت‌های مختلف بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

طبق تحقیقات Hoxha و همکاران در سال ۲۰۰۶، اثر رطوبت بر تغییر شکل مصالح ژئیزی کاملاً مشهود بوده و بعضاً می‌تواند منجر به کاهش و یا افزایش مقاومت مصالح ژئیزی در شرایط خاص گردد. در فشارهای بالا و در حضور رطوبت، میزان انحلال و همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های ژئیزی و انیدریتی دارای رفتارهای پیچیده‌ای بوده و بسته به میزان ناحیه تماس مصالح نسبت به هم و میزان درصد رطوبت، میزان انحلال می‌تواند در گذر زمان کاهش و مقاومت افزایش یابد. بر اساس توضیحات ارائه شده و تحقیقات دیگران، در تحقیق حاضر با توجه به شرایط ساختگاه، نمونه‌های سنگ از عمق‌های مختلف (۱۰ نمونه) جهت انجام آزمایشات تک‌محوری و تعیین مدول

سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند ژئیس و انیدریت جزو سنگ‌های مسئله‌دار در علوم مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک می‌باشد. وجود این سنگ‌ها در ساختگاه سازه‌های آبی مانند پایه‌های پل، دیوارهای ساحلی، بند‌های انحرافی و سدها و ... به‌دلیل خاصیت انحلال‌پذیری و مکانیسم رفتاری و تغییر شکل‌پذیری مصالح حاوی ژئیس چالش‌های جدی را به‌لحاظ پایداری رقم می‌زند. ساختگاه سد مراش که در حدود ۹۸ کیلومتری شهر زنجان واقع شده است، به‌دلیل وجود مصالح حاوی ژئیس و انیدریت در کنار مصالح مارن دارای پیچیدگی‌های خاصی است. با توجه به این‌که مصالح بستر سد که حاوی مصالح ژئیس و انیدریت می‌باشند در معرض بارگذاری و رطوبت و نیز انحلال‌پذیری به‌طور هم‌زمان هستند لذا بررسی مکانیسم انحلال‌پذیری

صورت اشباع نبودن قادر به انحلال سنگ‌ها هستند. برای مثال: وجود گاز کربنیک، حلالیت کربنات کلسیم را به‌طور محسوس افزایش می‌دهد و می‌تواند به حدود ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر (۴۰۰ ppm) برسد. این مقدار ۳۰ مرتبه بیشتر از حلالیت آن در آب خالص است و در این شرایط میزان گاز کربنیک بیش از ۱۳۲۰ ppm می‌باشد. اما در صورت کم بودن غلظت گاز کربنیک حلالیت کربنات‌ها در آب خالص بیشتر می‌باشد.

در تحقیقات Farid و Habibagahi در سال ۲۰۰۷ وضعیت انحلال مصالح حل‌شونده در پی سدها و در نتیجه انحلال این کانی‌ها در آب جریان یافته از پی سدها مورد بررسی قرار گرفته است.

Hong و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحقیقی را بر روی مصالح سنگی با مقایسه نتایج آزمایشگاهی تک‌محوری و عددی در نرم‌افزار UDEC انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به عدم لحاظ جهت‌های درزه و ترک‌ها در سنگ‌ها، نتایج مدل سنتی UCS برای زوایای درزه کمتر از ۱۰ درجه محافظه‌کارانه می‌باشد و برای مقادیر زوایای بالاتر این مورد بیشتر و مشهودتر است.

Zhu و همکاران در سال ۲۰۱۴، تأثیر گچ نمک را در تشکیل سنگ‌های موجود در مخزن سازند لیکوپو^۲ در منظر رخساره‌های رسوبی، فرآیند دیاژنتیکی و تکتونیزه^۳ مورد بررسی قرار دادند.

مطالعات انجام شده در سال ۲۰۱۶ بر روی سد موصل طی سال‌های اخیر نشان داد که کارهای تزریقی در بهترین حالت فقط می‌توانند به‌عنوان راه حل موقت در نظر گرفته شوند و این کار باید در اسرع وقت انجام شود زیرا سد با گذشت زمان بیشتر علائم ضعف را نشان می‌دهد.

نتایج تحقیقات Feng و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان داد که هندسه شکاف، تأثیر زیادی بر مشخصات جریان عبوری از شکاف و سپس بر روی انحلال دارد.

بررسی‌های آزمایشگاهی Hong و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان داد که در انحلال سنگ ژبیس خصوصیات فیزیکوشیمیایی سنگ بسیار مهم می‌باشد.

بر اساس تحقیق AbdulRahman و همکاران در سال ۲۰۲۱، هنگامی نمونه‌های سنگ ژبیس در معرض رطوبت در محیط بسته قرار می‌گیرند وزن سنگ‌ها در دوره ۲۴ ساعت افزایش یافته و هیچ اثری از ژبیس در محیط که ناشی از انحلال باشد دیده نشد.

در پژوهش حاضر با هدف تعیین قدرت انحلال مصالح گچی، نمونه‌هایی از ساختگاه سد مراش در نزدیکی شهر زنجان تهیه و آزمایشات انحلال‌پذیری بر روی این نمونه‌ها با محلول‌های آب

یانگ^۱ و سایر پارامترها شامل دانسیته طبیعی و درصد رطوبت و ضریب پواسون و میزان تخلخل به آزمایشگاه انتقال داده شد. در کنار آزمایشات تعیین مقاومت، آزمایشات انحلال‌پذیری نیز جهت تعیین حداکثر میزان انحلال‌پذیری مصالح حاوی ژبیس و انیدریت در شرایط مختلف (آب سد مراش و آب مقطر و آب حاوی یک درصد کلرید سدیم) انجام پذیرفت. با انجام تحلیل‌های آماری و نموداری، وضعیت رفتاری نمونه‌های سنگ‌های ژبیزی نسبت به پارامترهای مختلف بررسی و نتایج آن ارائه شده است.

۲- سوابق تحقیقاتی

انحلال‌پذیری سنگ فرآیندی است که با جریان یافتن آب بر روی سنگ و یا با نفوذ و حرکت آب در درون سنگ اتفاق می‌افتد. طی این فرآیند، کانی‌های انحلال‌پذیر به‌صورت بار محلول توسط آب حمل شده و به‌جای آن فضاهای خالی در توده سنگ باقی می‌ماند. این پدیده در پی سدها موجب بروز مشکلاتی در زمینه پایداری سد خواهد شد. بالا بودن میزان انحلال با توسعه ترک‌ها و شکاف‌ها به افزایش نفوذپذیری پی سنگ منجر می‌شود. اولین کسانی که در مورد انحلال‌پذیری سنگ مطالعات نسبتاً جامعی را شروع کردند، Calcano و Alzura (۱۹۶۷) می‌باشند که در سال ۱۹۶۷ پدیده انحلال‌پذیری سنگ‌های سولفاته (گچ و انیدریت) را بررسی و از دیدگاه مهندسی مورد بحث قرار دادند. پژوهشگران یاد شده سپس چگونگی تراوش آب را در محل تماس سولفات کلسیم با سایر مواد و نحوه ایجاد و گسترش پدیده‌های حاصل از انحلال را مطالعه نمودند.

Nancolas و Liu (۱۹۷۱) انحلال کریستال‌های ریز گچ را تابعی خطی از غلظت عادی (C) و غلظت اشباع (C_s) محلول حاوی گچ دانستند و به‌صورت رابطه (۱) بیان کردند:

$$dM/dt \propto (C_s - C) \quad (1)$$

که در آن dM تغییرات جرم یا وزن، dt تغییرات زمانی، C غلظت اولیه یون کلسیم، C_s غلظت یون کلسیم در حالت اشباع می‌باشد.

Fabuos و همکاران (۱۹۶۹) نیز برای انحلال انیدریت رابطه (۲) را ارائه کردند:

$$dM/dt \propto (C_s - C)^2 \quad (2)$$

نوع آب‌های موجود در مناطق متشکل از سنگ‌های کربناته از نظر ترکیب شیمیایی کربناته هستند. چنین آب‌هایی در

غربی شده است (شکل (۲) و (۳)). همان گونه که در این تصاویر مشخص شده، ضخامت لنزهای حاوی گچ کم و فاصله این لایه‌ها زیاد بوده و در داخل لایه‌های سنگ بستر نفوذناپذیر محصور می‌باشند. واحد تبخیری که عموماً از جنس گچ می‌باشند به شکل‌های مختلف تظاهر نموده‌اند. این واحدها گاه به صورت لایه‌ای و گاه به صورت لنزی دیده می‌شوند که البته با توجه به رخنمون‌های سطحی محدود، این احتمال وجود دارد که طبقات لایه‌ای شکل، در ابعاد وسیع‌تر گسترش جانبی چندانی نداشته و با توجه به شرایط تشکیل این واحدها در حوضه‌های تبخیری، فشار حاصل از وزن طبقات فوقانی و یا عوامل تکتونیکی در مقیاس وسیع‌تر به صورت لنزی گسترش داشته باشند.



شکل ۲- تناوب واحدهای مارنی، گچ و سیلتستون در تکیه‌گاه راست



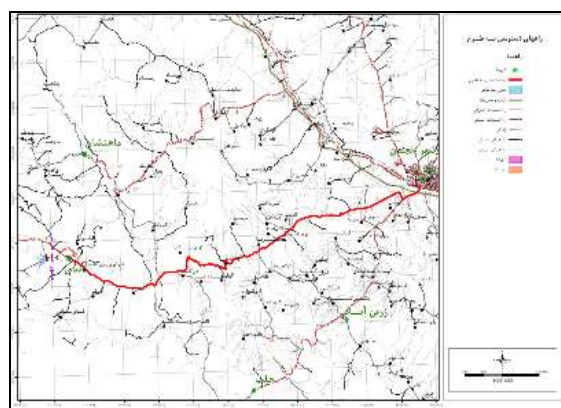
شکل ۳- وضعیت لایه‌های حاوی گچ در تکیه‌گاهها

مقطر و آب سد مراش و آب حاوی یک درصد کلرید سدیم انجام گردید. سپس آزمایشات مقاومت فشاری و تعیین مدول الاستیسیته با استفاده آزمایش تک‌محوری ۱۰ نمونه تهیه شده انجام گردید و با توجه به پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده، تحلیل‌های لازم در خصوص تغییرات مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به سایر پارامترها انجام گرفت.

۳- روش تحقیق

۳-۱- منطقه مورد مطالعه (سد مراش زنجان)

سد خاکی مراش با هدف تأمین آب کشاورزی زمین‌های زراعی پایین‌دست سد، همچنین تأمین آب صنعت و شرب، در حال ساخت است. حوزه آبریز سد خاکی مراش، دارای مساحتی بالغ بر ۳۷۹ کیلومتر مربع یکی از زیر حوزه‌های رودخانه بزرگ قزل‌اوزن بوده که در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. حوزه مذکور در قسمت جنوبی شهرستان ماهنشان قرار گرفته است. دسترسی به محور سد از طریق جاده اصلی زنجان - دندی به طول ۹۸ کیلومتر و سپس جاده آسفالت فرعی دندی به روستای مراش به طول ۱۲ کیلومتر امکان‌پذیر است. راه‌های دسترسی به محل طرح در نقشه (۱) نشان داده شده است.



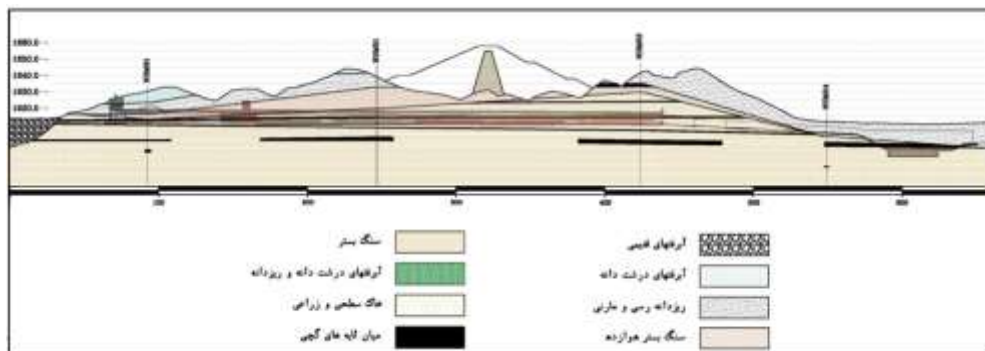
شکل ۱- راه‌های دسترسی به محل سد خاکی مراش زنجان

محل سد و مخزن در محدوده تپه ماهورهایی از طبقات دوره پیلیوسن^۴ با لایه‌های از سنگ‌های رسی، مارتی^۵، سیلتی و ماسه سنگی قرار گرفته است. لنزهای گچی در ضخامت‌های بسیار کم در بخش‌های رسی و مارنی به‌طور موازی با طبقات اصلی و با گستردگی محدود در سطح دیده می‌شود. این لایه‌ها حدود ۵ تا ۸ درجه به طرف جنوب تا جنوب شرقی شیب دارد و این مقدار شیب موجب پایداری لایه‌ها در شیب‌های رو به شمال تا شمال

4. Peliocene
5. Marl Stone

مصالح بعضاً توسط مصالح ریزدانه رسی و مارنی احاطه شده که رفتار متفاوت نسبت به مصالح ژیبس دارند و این تغییر رفتار به نوبه خود تأثیر زیادی بر مکانیسم مقاومتی و انحلال پذیری مصالح حاوی ژیبس و انیدریت خواهد داشت.

مطابق شکل (۴)، میان لایه‌های ژیبسی و انیدریتی در ساختگاه سد وجود دارد و پتانسیل بروز انحلال در این مصالح پس از آبیگری مخزن وجود خواهد داشت. میان لایه‌های گچی به صورت لایه‌های سیاه رنگ در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. این



شکل ۴- پروفیل زمین شناسی ساختگاه سد مراش

۳-۲-۲- آزمایشات تعیین حداکثر ژیبس محلول

برای اندازه‌گیری هدایت محلول‌ها دستگاهی به نام هدایت سنج یا کنداکتومتر^۶ به کار می‌رود. هر دستگاه هدایت سنج دارای دو الکترود یکسان فلزی پلاتینه شده هستند. الکترودها در یک محفظه شیشه‌ای پیرکس یا شیشه مقاوم دیگر، موازی هم قرار گرفته‌اند. به مجموعه این الکترودها در محفظه شیشه‌ای، پیل کنداکتومتر می‌گویند. برای اندازه‌گیری هدایت یک محلول، پیل کنداکتومتر را در آن محلول قرار داده و دستگاه با ولتاژ مناسبی که بین الکترودها می‌فرستد، هدایت محلول را نشان می‌دهد.

یکی از پارامترهای مهم در تعیین قابلیت انحلال مواد انحلال پذیر، تعیین حداکثر مقدار انحلال حل شونده در حلال است. بدین صورت که مقدار مشخصی از مواد انحلال پذیر به صورت پودر تهیه شده و در حجم مشخصی از حلال به صورت مرحله‌ای ریخته می‌شود و در هر مرحله غلظت حل شونده و عدد کنداکتومتر قرائت می‌شود تا زمانی که با افزایش پودر مواد در داخل حلال، تغییری در عدد کنداکتور حاصل نشود و به اصطلاح به مرحله اشباع برسد. واحد عدد قرائت شده از کنداکتومتر در سیستم SI، $\mu\text{S/cm}$ (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) است.

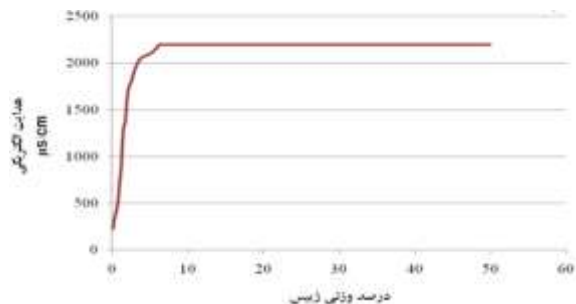
برای تعیین حداکثر میزان انحلال گچ، در یک مقدار مشخص از سه محلول (آب مقطر، آب مقطر و یک درصد سدیم کلرید، آب سد مراش) به تدریج پودر گچ تهیه شده از پی سد مراش ریخته و به وسیله یک همزن، کاملاً بهم زده شد و تغییرات هدایت الکتریکی آب به وسیله هدایت سنج (کنداکتومتر) اندازه‌گیری گردید (شکل (۶)).

۳-۲-۳ روش انجام کار

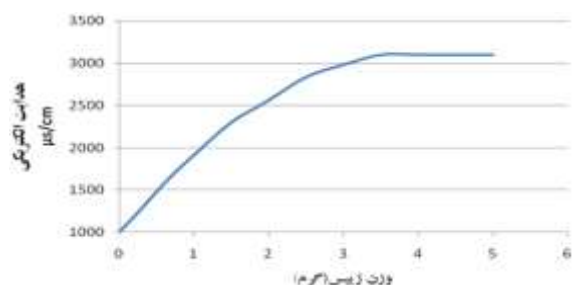
در این پژوهش ابتدا نمونه‌های حاوی گچ از ساختگاه سد مراش تهیه و برای انجام آزمایشات به آزمایشگاه منتقل گردید. با توجه به این که هدف تحقیق، تعیین قابلیت انحلال مصالح گچی در شرایط و محلول‌های مختلف و همچنین تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری مدول الاستیسیته این مصالح می‌باشد، در ادامه با استفاده از کنداکتومتر و آزمایش هدایت الکتریکی، میزان قدرت حلالیت این مصالح در محیط‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از تعیین پارامترهای مهندسی نمونه‌های مورد آزمایش، تحلیل و آنالیزهای لازم در خصوص مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ نسبت به پارامترهای دیگر انجام گرفت.

۳-۲-۳-۱ تهیه نمونه مورد آزمایش

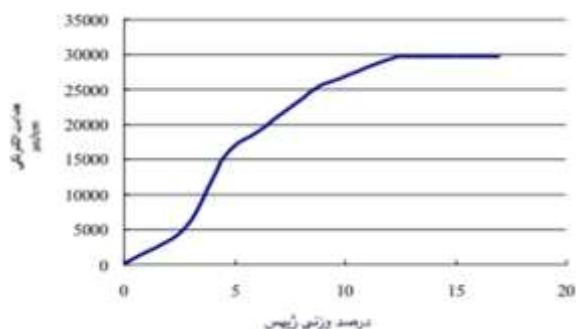
پس از استخراج نمونه‌ها از ساختگاه سد مراش زنجان و از عمق‌های مختلف، نمونه‌ها به محل آزمایشگاه حمل گردید و سپس به ابعاد دلخواه برش داده شد. شکل (۵)، فرآیند استخراج و تهیه نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. نمونه‌های تهیه شده در یک مرحله برای انجام آزمایش تعیین حداکثر ژیبس محلول و در مرحله بعد جهت انجام آزمایشات تک‌محوری و اندازه‌گیری دیگر پارامتر مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۷- نمودار تغییرات هدایت الکتریکی در مقابل درصد وزنی گچ در محلول آب مقطر



شکل ۸- نمودار تغییرات هدایت الکتریکی در مقابل وزن گچ در محلول آب سد مراش



شکل ۹- نمودار تغییرات هدایت الکتریکی گچ در مقابل درصد وزنی گچ در محلول آب مقطر و سدیم کلرید ۱٪

همان‌طور که در جدول بالا آمده است مقدار حداکثر گچ محلول در آب و حداکثر هدایت الکتریکی هر نمونه با یکدیگر متفاوت و در نمونه آب و یک درصد سدیم کلرید این فاصله به صورت فاحشی قابل رویت می‌باشد. حداکثر ژپس محلول در آب مقطر ۲۲۰۰ میکروژیمنس بر سانتی‌متر در آب سد مراش ۳۱۰۰ میکروژیمنس بر سانتی‌متر و در آب مقطر با یک درصد نمک معادل ۲۹۷۵۰ میکروژیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد که نشان می‌دهد هرچه میزان املاح و نمک‌ها داخل آب بیشتر باشد، میزان هدایت الکتریکی بیشتر می‌شود. همچنین جدول (۱) نشان می‌دهد که حداکثر مقدار گچ محلول در آب سد مراش علی‌رغم بالا بودن میزان هدایت الکتریکی آن، کمتر از حداکثر



شکل ۵- فرآیند تهیه نمونه از ساختگاه سد مراش زنجان



شکل ۶- آزمایش تعیین میزان حداکثر ژپس محلول در آب‌های مختلف

با افزایش میزان پودر هدایت الکتریکی محلول افزایش می‌یافت ولی در نهایت افزایش پودر دیگر سبب افزایش هدایت الکتریکی محلول نشد و هدایت الکتریکی به یک مقدار ثابت رسید. برای اطمینان مقدار بیشتری پودر به محلول اضافه گردید و به مدت چندین ساعت بهم‌زده شد اما در طول این مدت هدایت الکتریکی محلول همچنان ثابت باقی ماند و این نشان از رسیدن به حد اشباع محلول بود. در این حالت مقادیر اندازه‌گیری شده ثبت و نمودارهای تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به درصد وزنی و وزن گچ ترسیم شد (شکل‌های (۷)، (۸) و (۹)). این آزمایش سه بار با آب‌های فوق انجام شده است (شکل (۶)).

مطابق جدول (۲)، مقادیر نیروهای وارده و اعمالی به نمونه‌ها حداقل و حداکثر به ترتیب ۲۸ و ۱۱۳ کیلونیوتن می‌باشد و حداقل و حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب ۵/۸۵ و ۲۱ مگاپاسگال به دست آمده است. همچنین محدوده درصد‌های رطوبت به دست آمده از نمونه‌ها در بازه ۵/۷۹ تا ۱۱/۳ درصد تغییر می‌کند. این مقادیر نشان می‌دهد که مشخصه سنگ‌های دارای ژئیس بسیار متغیر بوده و با توجه به درصد رطوبت‌ها می‌توان این‌گونه برداشت نمود که سنگ‌های حاوی ژئیس به دلیل وجود میان لایه‌های مارنی دارای جذب رطوبت و درصد رطوبت اشباع متفاوتی بوده و نیز دارای مقاومت‌های متفاوتی هستند که این موضوع باعث اختلاف زیاد نتایج آزمایشات شده است.

مقدار گچ محلول در آب مقطر است و این موضوع بدان علت است که املاح و نمک‌های موجود در آب سد مرآش بیشتر از آب مقطر بوده و لذا هدایت الکتریکی آن بیشتر است ولی از طرفی وجود نمک‌ها و برخی املاح داخل محلول آب سد مرآش باعث کاهش حلالیت ژئیس در این آب شده و لذا میزان گچ محلول در آب سد مرآش کاهش می‌یابد.

۳-۲-۳- آزمایشات تک‌محوری نمونه‌های ژئیس

مطابق جدول (۲)، نمونه‌های تهیه شده از ساختگاه سد مرآش از عمق‌ها و قطر و طول‌های مختلف تحت آزمایش تک‌محوری با اعمال نیروی فشاری تک‌محوری (UCS) قرار گرفت و مقادیر مدول الاستیسیته و سایر پارامترها استخراج گردید.

جدول ۲- نتایج آزمایش تک‌محوری و اندازه‌گیری سایر پارامترهای نمونه‌های ده‌گانه تهیه شده از ساختگاه سد مرآش

ردیف	ابعاد نمونه (mm)		نیروی نهایی فشاری تک‌محوری F (kN)	حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری σ_c (Mpa)	مدول الاستیسیته E (Gpa)	ضریب پواسون v	درصد رطوبت RH %	دانسیته طبیعی ρ (gr/cm ³)	تخلخل e %
	طول	قطر							
۱	۱۲۰,۰۶	۷۵,۷۲	۷۲,۳۱	۱۳,۵۹	۰,۹۹	۰,۲۶	۵,۳۳	۱,۹۸	۲۶,۴۰
۲	۹۴,۶۷	۷۲,۳۱	۲۸,۸۰	۵,۹۳	۰,۵۰	۰,۲۹	۷,۳۷	۲,۱۲	۲۰,۱۵
۳	۱۲۶,۹۶	۶۴,۱۲	۳۶,۶۲	۹,۶۰	۰,۸۱	۰,۲۰	۹,۳۵	۲,۱۷	۲۳,۲۵
۴	۱۱۹,۱۴	۷۰,۵۶	۳۱,۰۰	۶,۷۲	۰,۶۲	۰,۲۲	۱۰,۴۰	۱,۹۶	۲۱,۳۹
۵	۱۳۳,۷۷	۷۵,۶۲	۳۴,۹۶	۶,۶۰	۰,۴۷	۰,۲۰	۹,۵۴	۲,۰۱	۲۲,۰۸
۶	۱۴۶,۴۶	۷۶,۴۵	۹۲,۹۲	۱۷,۱۶	۲,۶۲	۰,۲۱	۶,۴۳	۲,۱۰	۱۸,۶۴
۷	۹۸,۸۱	۷۶,۳۶	۱۰۳,۹۶	۱۹,۳۲	۱,۹۸	۰,۱۹	۵,۹۴	۱,۹۸	۱۷,۵۴
۸	۱۴۷,۲۰	۵۶,۱۲	۵۳,۳۶	۱۸,۳۱	۱,۸۶	۰,۲۲	۹,۱۶	۲,۰۱	۱۷,۳۹
۹	۱۱۵,۷۴	۷۱,۸۵	۲۵,۷۶	۵,۳۸	۰,۲۶	۰,۱۸	۵,۹۸	۲,۱۳	۲۴,۵۳
۱۰	۱۷۷,۵۶	۷۶,۱۱	۸۱,۸۸	۱۵,۲۴	۲,۶۰	۰,۲۱	۱۱,۹۶	۲,۰۸	۲۲,۲۵

۴- نتایج و بحث

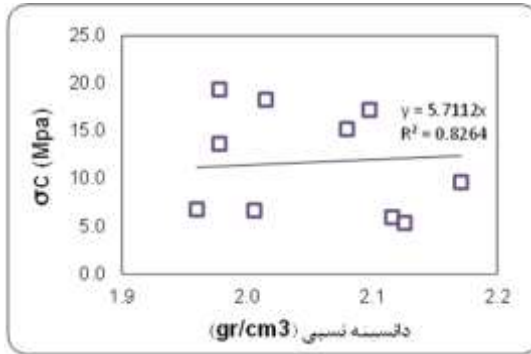
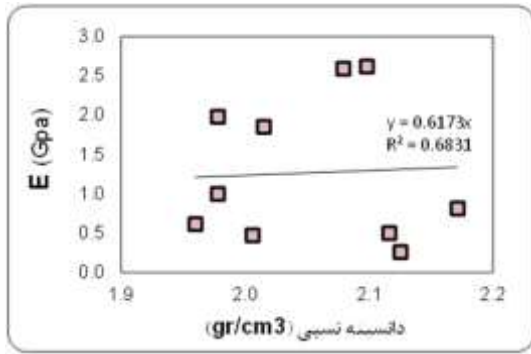
در ادامه تحلیل‌های مربوط به آزمایشات تک‌محوری نمونه‌های ژئیس نسبت به پارامترهای مختلف ارائه شده است.

با توجه به شکل (۱۰)، تغییرات درصد تخلخل بین ۱۷ تا ۲۷ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد نمونه‌ها نسبت به هم دارای حفرات خالی معنی‌داری هستند که حاکی از عدم یکنواختی تخلخل و شکستگی سنگ‌های ساختگاه می‌باشد و همچنین با افزایش میزان تخلخل، مقادیر مدول الاستیسیته و حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد که شیب کاهش مقاومت فشاری نسبت به درصد تخلخل در مقایسه با نمودار مدول الاستیسیته بیشتر است. همبستگی دو نمودار نسبت به درصد تخلخل نسبتاً یکسان می‌باشد.

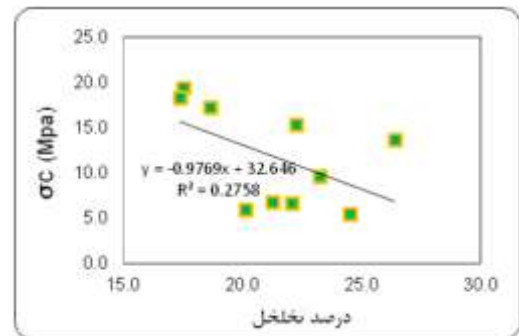
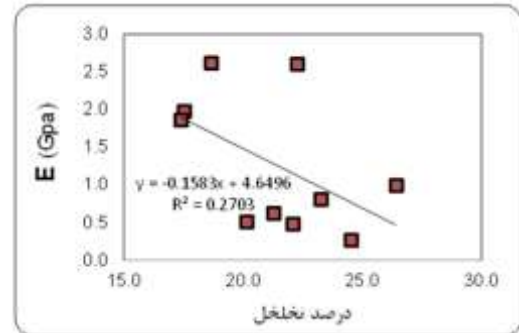
با توجه به شکل (۱۱)، تغییرات دانسیته نسبی بین ۱/۹۶ تا ۲/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. با افزایش میزان دانسیته نسبی، به‌طور نسبی مقادیر مدول الاستیسیته افزایش و حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد. همچنین همبستگی مقاومت حداکثر فشاری به دانسیته نسبی نسبت به مدول یانگ بیشتر بوده و روند کلی هر دو پارامتر نسبت به دانسیته نسبی تقریباً افزایشی می‌باشد.

با توجه به شکل (۱۲)، تغییرات درصد رطوبت بین ۵ تا ۱۲ درصد می‌باشد. با افزایش درصد رطوبت میزان حداکثر تنش فشاری کاهش و میزان مدول یانگ افزایش می‌یابد. به‌عبارتی روند نمودار حداکثر تنش فشاری و مدول یانگ نسبت به درصد رطوبت کاهشی و افزایشی است. میزان ضریب همبستگی پایین هر دو پارامتر نسبت به درصد رطوبت نشان‌دهنده آن است که

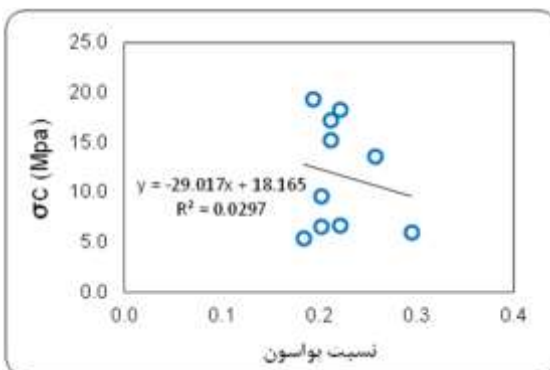
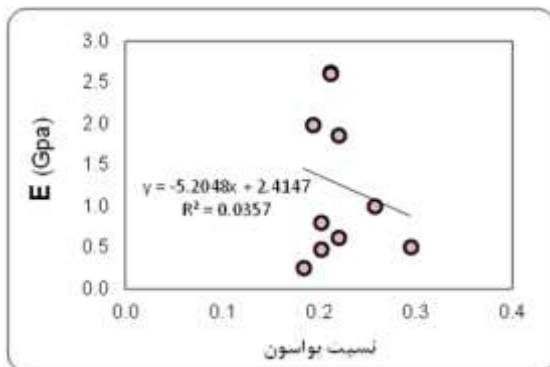
ارتباط خاصی بین درصد رطوبت و این دو پارامتر وجود نداشته و تغییرات مدول یانگ و حداکثر مقاومت فشاری نسبت به درصد رطوبت معنی‌دار نمی‌باشد.



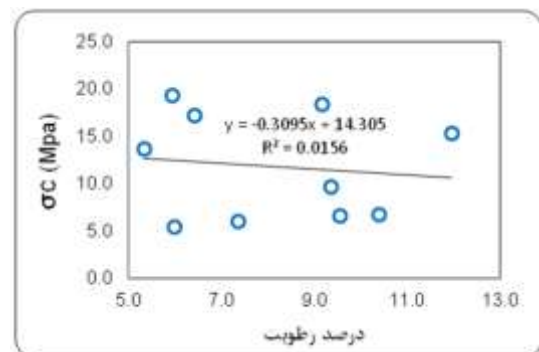
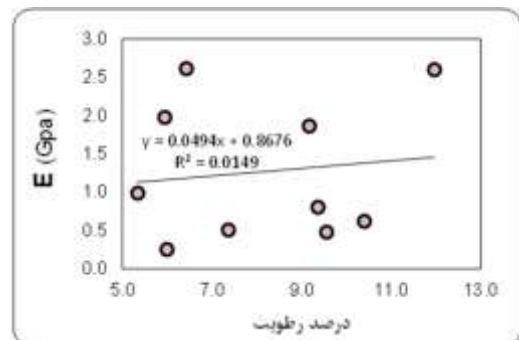
شکل ۱۱- نمودار تغییرات حداکثر تنش فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نسبت به دانسیته نسبی



شکل ۱۰- نمودار تغییرات حداکثر تنش فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نسبت به درصد تخلخل



شکل ۱۳- نمودار تغییرات حداکثر تنش فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته در مقابل نسبت پواسون



شکل ۱۲- نمودار تغییرات حداکثر تنش فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نسبت به درصد رطوبت

۵- نتیجه گیری

حدود بیش از سه برابر کاهش یافته است می تواند به شکل پذیری بالای نمونه های سنگ به دلیل وجود مصالح مارنی باشد که بر اساس نمودارهای تغییرات مدول یانگ و تنش فشاری تک-محوری نسبت به درصد رطوبت می توان دریافت که درصد رطوبت نیز در این محدوده ها بالاتر بوده که مصالح مارنی هم باعث جذب رطوبت بیشتر و هم افزایش ضریب پواسون و در نهایت موجب کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک-محوری نهایی شده است.

۶- مراجع

- Adamo N, Al-Ansari N, "Mosul dam full story: Safety evaluations of mosul dam", *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 2016, 6 (3), 185-212. Doi:10.5829/IJE.2021.34.02B.08
- Binnie J, Reavey P, "Development and implications of pornography use: A narrative review", *Sexual and Relationship Therapy*, 2020, 35 (2), 178-194. Doi:10.1080/14681994.2019.1635250
- Calcano CE, Alzura PR, "Problems of dissolution of gypsum in some dam sites", *Bulletin of Venezuelan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1967, 75-80.
- Farid Arvin M, Habibagahi Gh, "Dissolution-seepage coupled analysis through formations containing soluble materials", *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133 (6), 713-722. Doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:6(713)
- Feiz Nia, Sadat, *Igneous Sedimentary Rocks*, Tehran University Press, 1371 ISBN: 978-9640358375
- Feng P, Brand AS, Chen L, Bullard JW, "In situ nanoscale observations of gypsum dissolution by digital holographic microscopy", *Chemical Geology*, 2017, 460, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.008>
- Hasan F, Ibrahim A, "The effect of saturation methods on natural gypsum rocks", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 877 (1), 012006. IOP Publishing. Doi:10.1088/1755-1315/877/1/012006
- Hong D, Fan M, Yu L, Cao J, "An experimental study simulating the dissolution of gypsum rock", *Energy Exploration & Exploitation*, 2018, 36 (4), 942-954.
- Hoxha D, Homand F, Auvray C, "Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions", *Engineering Geology*, 86 (1), 1-17. Doi:10.1177/0144598717751927
- Huang F, Shen J, Cai M, Xu C, "An empirical UCS model for anisotropic blocky rock masses", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (9), 3119-3131. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01771-2>
- James AN, Lupton ARR, "Gypsum and anhydrite in foundation of hydraulic structures geotechnique", 1978, 28 (3), 249-272. <https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.3.249>
- Pluymakers AM, Niemeijer AR, "Healing and sliding stability of simulated anhydrite fault gouge: Effects of water, temperature and CO₂", *Tectonophysics*, 656, 111-130. Doi:10.1016/j.tecto.2015.06.012

(۱) میزان حلالیت ژپس در محلول های حاوی یک درصد کلرید سدیم بیشتر از نمونه های آب سد مرآش می باشد و این موضوع نشان می دهد که وجود نمک باعث افزایش میزان انحلال ژپس می گردد.

(۲) بر اساس تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به درصد وزنی گچ، در نمونه آب سد مرآش در مقایسه با دو محلول دیگر در درصد وزنی پایین تری به حالت اشباع رسیده است که نشان می دهد انحلال مصالح حاوی ژپس در محلول آب سد مرآش پایین تر از نمونه های آب مقطر و محلول آب حاوی یک درصد کلرید سدیم است که می تواند به دلیل وجود ناخالصی های موجود در آب سد مرآش باشد.

(۳) تغییرات درصد تخلخل بین ۱۷ تا ۲۷ درصد نشان می دهد که نمونه ها نسبت به هم دارای حفرات خالی معنی داری هستند که حاکی از عدم یکنواختی تخلخل و شکستگی سنگ های ساختگاه می باشد و همچنین وجود لایه های مارنی بین سنگ های ژپسی را تأیید می کند.

(۴) با افزایش میزان تخلخل، مقادیر مدول الاستیسیته و حداکثر مقاومت فشاری تک محوری کاهش می یابد که شیب کاهش مقاومت فشاری نسبت به درصد تخلخل در مقایسه با نمودار مدول الاستیسیته بیشتر است. با توجه به پرشدگی سنگ های حاوی ژپس با مصالح مارنی، افزایش میزان تخلخل می تواند به علت شسته شدن مصالح مارنی و افزایش حجم حفرات باشد که به نوبه خود باعث کاهش ظرفیت باربری مصالح سنگ ژپس دار می گردد.

(۵) تغییرات دانسیته نسبی سنگ های ژپس دار در محدوده ساختگاه سد محسوس نبوده (۱/۹۶ تا ۲/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب) و با افزایش میزان دانسیته نسبی، به طور نسبی مقادیر مدول الاستیسیته افزایش و حداکثر مقاومت فشاری تک محوری کاهش می یابد. همچنین همبستگی مقاومت حداکثر فشاری به دانسیته نسبی نسبت به مدول یانگ بیشتر می باشد.

(۶) تغییرات درصد رطوبت بین ۵ تا ۱۲ درصد می باشد. با افزایش درصد رطوبت میزان حداکثر تنش فشاری کاهش و میزان مدول یانگ افزایش می یابد. به عبارتی روند نمودار حداکثر تنش فشاری و مدول یانگ نسبت به درصد رطوبت کاهشی و افزایشی است.

(۷) تغییرات ضریب پواسون بین ۰/۱۸ تا ۰/۲۹ می باشد که تغییرات بین حداقل و حداکثر ضریب پواسون در حدود ۵۰ درصد می باشد و عدد قابل ملاحظه ای است. شیب تغییرات مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری نسبت به ضریب پواسون کاهشی می باشد و با توجه به این که در مقادیر بالای ضریب پواسون، مقادیر مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوری در

Zhu T, Wang XZ, Shen ZM, Li L, Li H, Wang P, "The origin of gypsum-salt rock of Leikoupo Formation and its influence on the gas reservoir in central Sichuan Basin", *Geology in China*, 2014, 41 (1), 122-134.
<http://geochina.cgs.gov.cn/en/article/id/20140109>

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the Effect of Different Factors on The Dissolution Rate and Single-Site Compressive Strength of Gypsum- Containing Materials (Case study: Marash Zanjan Dam)

Alireza Moazzami^{*}, Seyed Mojtaba Hosseini

Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 23 October 2021; Review: 13 June 2022; Accepted: 18 June 2022

Keywords:

Dissolution strength, Gypsum and anhydrite, Barrier, Relative humidity, Young modulus, Uniaxial compressive strength (UCS).

1. Introduction

Soluble rocks such as gypsum and anhydrite are problematic rocks in geological engineering and geotechnics. The presence of these rocks in the construction of water structures such as bridge piers, coastal walls, diversion dams and dams, etc. due to their solubility and behavioral mechanism and deformability of gypsum-containing materials poses serious challenges in terms of stability. The construction of Marash Dam, which is located about 98 km from Zanjan city, has special complications due to the presence of gypsum and anhydrite materials along with marl materials. Due to the fact that the materials of the dam bed, which contain gypsum and anhydrite materials, are exposed to loading and moisture, as well as solubility at the same time, so it is very important to study the mechanism of solubility and final strength of these rocks at different humidity. The effect of moisture on the deformation of gypsum materials is quite obvious and can sometimes lead to a decrease or increase in the strength of gypsum materials in certain conditions, Hooke et. al. (2006). At high pressures and in the presence of moisture, the dissolution rate as well as the compressive strength of gypsum and anhydrite samples have complex behaviors and depending on the contact area of the materials relative to each other and the moisture content, the dissolution rate can decrease and increase resistance over time, Hasan F, Ibrahim A, (2021). Based on the explanations provided and others' research, in the present study, according to the site conditions, rock samples from different depths (10 samples) to perform uniaxial tests and determine the Young's modulus and other parameters including natural density, moisture content and Poisson's ratio. And the porosity was transferred to the laboratory. In addition to resistance tests, solubility tests were performed to determine the maximum solubility of materials containing gypsum and anhydrite under different conditions (Marash dam water and distilled water and water containing 1% sodium chloride). By performing statistical and graphical analyzes, the behavioral status of gypsum rock samples in relation to various parameters has been investigated and its results have been presented.

2. Methodology

In this study, samples containing gypsum were first prepared from the Marash Dam site and transferred to the laboratory for testing. Considering that the purpose of this research is to determine the solubility of gypsum materials in different conditions and solutions and also to determine the uniaxial compressive strength of the modulus of elasticity of these materials, then using a conductor and electrical conductivity test, the solubility of these materials in different environments was examined. Finally, after determining the engineering

* Corresponding Author

E-mail addresses: moazzami@znu.ac.ir (Alireza Moazzami), smh1763403@gmail.com (Seyed Mojtaba Hosseini).

parameters of the tested samples, the necessary analysis was performed on the uniaxial compressive strength and Young's modulus relative to the other parameters.

3. Results and discussion

3.1. In the following, the analyzes related to uniaxial tests of gypsum specimens with respect to different parameters are presented.

According to Fig. 1, the changes in porosity percentage are between 17 and 27%, which shows that the samples have significant empty cavities relative to each other, which indicates the non-uniformity of porosity and fracture of site rocks, and also with increasing porosity, the values of modulus of elasticity and maximum uniaxial compressive strength are reduced, the slope of reduction of compressive strength is greater than the percentage of porosity compared to the modulus of elasticity. The correlation of the two graphs to the porosity percentage is relatively the same.

According to Fig. 2, the relative density changes are between 1.96 to 2.17g/cm³. As the relative density increases, the modulus of elasticity values increase relatively and the maximum uniaxial compressive strength decreases. Also, the correlation of maximum compressive strength to relative density is higher than Young's modulus and the general trend of both parameters to relative density is almost incremental.

According to Fig. 3, the variation in moisture content is between 5 and 12%. As the moisture content increases, the maximum compressive stress decreases and the Young's modulus increases. In other words, the trend of the diagram is the maximum compressive stress and Young's modulus with respect to the percentage of moisture decreasing and increasing. The low correlation coefficient of both parameters to the percentage of moisture indicates that there is no significant relationship between the percentage of moisture and these two parameters and changes in Young's modulus and maximum compressive strength to the percentage of moisture are not significant.

According to Fig. 4, the Poisson's ratio changes between 0.18 and 0.29. The slope of changes in Young's modulus and uniaxial compressive strength is decreasing compared to Poisson's coefficient and the correlation coefficient of both graphs is very low, which shows that with changes in Poisson's coefficient, the parameters of uniaxial compressive strength and Young's modulus do not change much.

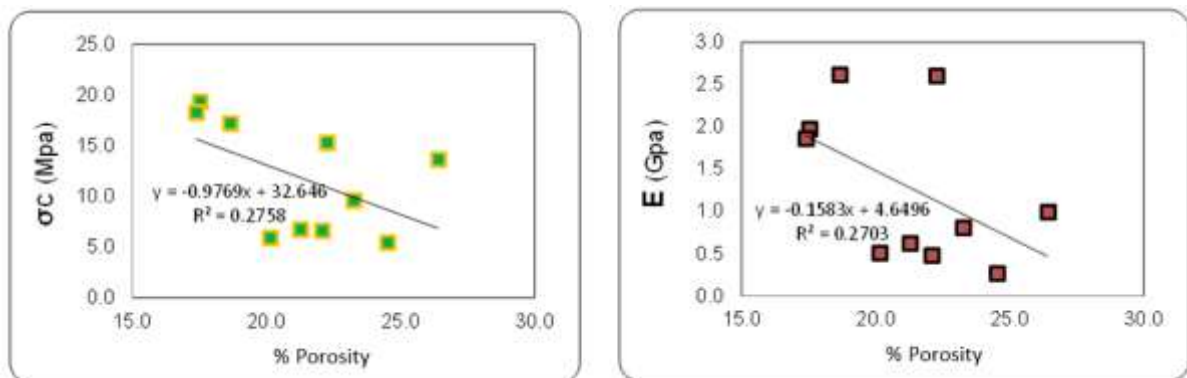


Fig. 1. Diagram of changes in maximum uniaxial compressive stress and modulus of elasticity relative to porosity percentage

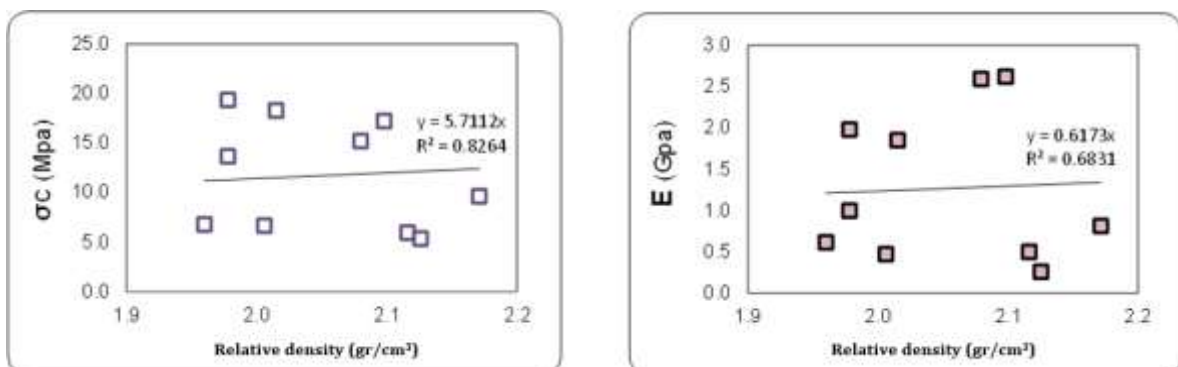


Fig. 2. Graph of more changes in uniaxial compressive stress and modulus of elasticity than relative density

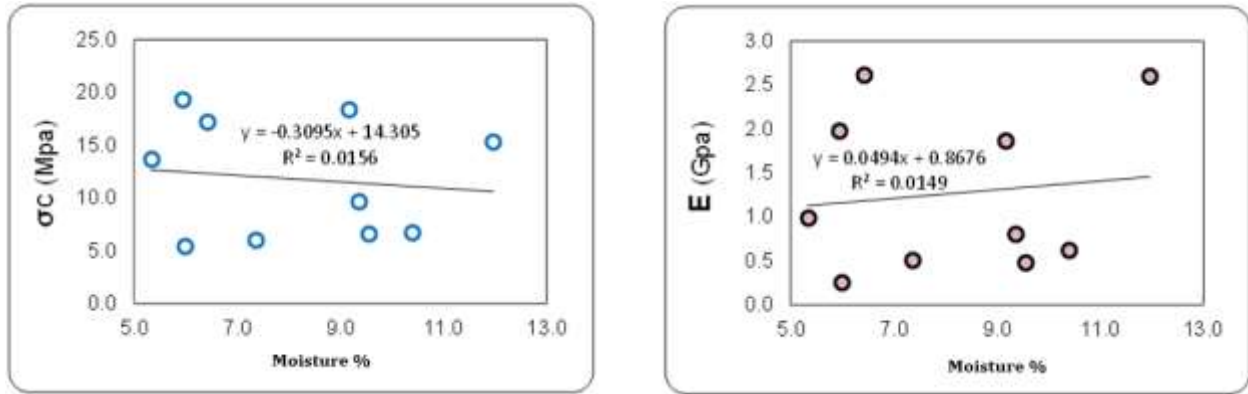


Fig. 3. Diagram of changes in maximum uniaxial compressive stress and modulus of elasticity with respect to moisture content

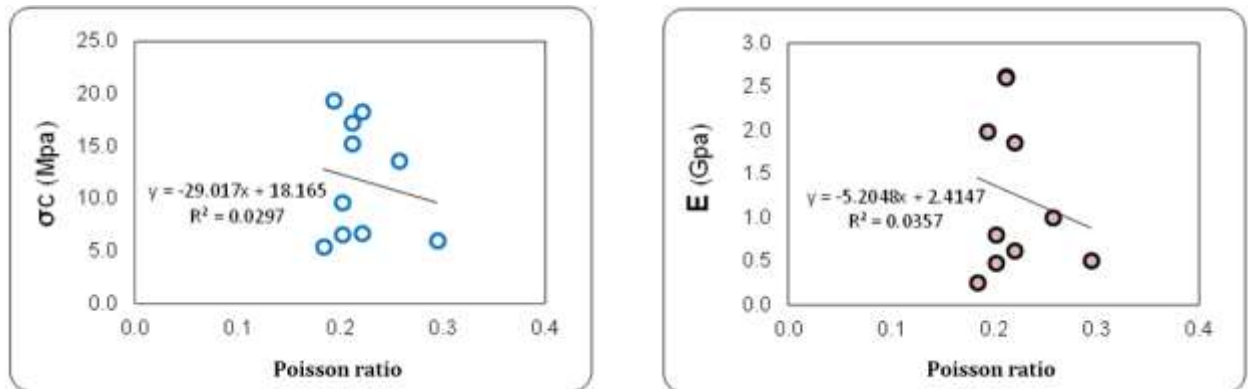


Fig. 4. Graph of changes in maximum uniaxial compressive stress and modulus of elasticity versus Poisson ratio

4. Conclusions

1) The solubility of gypsum in solutions containing 1% sodium chloride is higher than the water samples of Marash dam and this shows that the presence of salt increases the solubility of gypsum.

2) Based on the changes in electrical conductivity relative to the weight percentage of gypsum, in the water sample of Marash dam compared to the other two solutions at a lower weight percentage has reached saturation, which indicates the dissolution of gypsum-containing materials in the water solution of Marash dam lower than the sample Distilled water and water solution contain one percent of sodium chloride, which can be due to the presence of impurities in the water of Marash Dam.

3) Changes in porosity percentage between 17 to 27% show that the samples have significant empty cavities relative to each other, which indicates non-uniformity of porosity and fracture of the site rocks and also confirms the presence of marl layers between gypsum rocks. he does.

4) With increasing porosity, the values of modulus of elasticity and maximum uniaxial compressive strength decrease, the slope of decreasing compressive strength is greater than the percentage of porosity compared to the modulus of elasticity. Due to the filling of gypsum-containing rocks with marl materials, the increase in porosity can be due to leaching of marl materials and increasing the volume of cavities, which in turn reduces the bearing capacity of gypsum-bearing materials.

5) Changes in the relative density of gypsum rocks in the area of the dam site are not noticeable (1.96 to 2.17 g / cubic centimeter) and with increasing the relative density, the values of modulus of elasticity increase relatively and the maximum uniaxial compressive strength decreases. Find. Also, the correlation of maximum compressive strength to relative density is higher than Young's modulus.

6) Humidity percentage changes are between 5 to 12%. As the moisture content increases, the maximum compressive stress decreases and the Young's modulus increases. In other words, the trend of the diagram is the maximum compressive stress and Young's modulus with respect to the percentage of moisture decreasing and increasing.

7) Poisson's coefficient changes are between 0.18 to 0.29, the changes between the minimum and maximum Poisson's coefficient is about 50% and is a considerable number. The slope of changes in Young's modulus and uniaxial compressive strength is lower than the Poisson's ratio, and due to the fact that at high values of Poisson's ratio, Young's modulus values and uniaxial compressive strength are reduced by more than three

times can be high ductility The rock samples are due to the presence of marl materials, which based on the Yang modulus change diagrams and uniaxial compressive stress relative to the moisture content, it can be seen that the moisture content is higher in these areas that marl materials both absorb more moisture and increase coefficient. Poisson ultimately reduces the modulus of elasticity and ultimate uniaxial compressive strength.

5. References

- Hasan F, Ibrahim A, "The effect of saturation Methods on natural gypsum rocks", InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 877 (1), 012006). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/877/1/012006>
- Hoxha D, Homand F, Auvray C, "Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions", Engineering Geology, 2006, 86 (1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.04.002>