

## ارزیابی تورم پذیری واحدهای سنگی تونل شرقی معدن زغال سنگ طبس پروده

محدثه صادقی<sup>۱</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۲\*</sup>، محمد غفوری<sup>۳</sup>، مهرداد امیری<sup>۴</sup>، علی بشری<sup>۵</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

### چکیده

در حفاری تونل‌هایی با خواص سنگ‌های رسوبی متورم شونده تغییر ارتفاع کف و حرکت دیوارهای جانبی به سمت داخل اغلب مشاهده و سبب ایجاد تنش و تخریب سازه می‌شود. سنگ‌هایی که متورم می‌شوند رفتار ویسکو الاستیک نیز از خود نشان می‌دهند که احتمالاً به دلیل لغزش لایه‌های رسی است. این پژوهش به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی شیل، گلسنگ و ماسه‌سنگ دربرگیرنده تونل شماره ۳ شرقی معدن پرورده طبس، بر روی نمونه‌ها مطالعات سنگ‌شناسی، آزمایش‌های وزن مخصوص، تخلخل، درصد جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش مقاومت برزیلی، آزمایش تورم پذیری، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) و... صورت گرفته است. ایجاد روابط میان پارامترهای مکانیک سنگ مداخله کننده با میزان تورم سنگ‌های دربرگیرنده این تونل پرداخت شده است. تونل مورد مطالعه متشکل از ماسه‌سنگ دانریز، شیل و گلسنگ در هم‌جواری زغال‌سنگ است. سیمان موجود در سنگ‌های مورد مطالعه به صورت سیلیسی، آهک و اکسید آهن می‌باشد که عامل مهم در تأثیرپذیری مقاومت نمونه‌ها دارند. کانی‌های رسی غالب ایلیت و کلریت و به میزان کمتر مونت مورینیت و کائولینیت می‌باشد. ضریب تورم پذیری سنگ‌های مورد بررسی شامل شیل، گلسنگ و ماسه‌سنگ‌ها به ترتیب ۲۳/۶۴، ۱۷/۶ و ۱۲/۳ درصد پیش‌بینی شده است. با توجه به بررسی‌ها درصد تخلخل، جذب آب و چگالی می‌تواند بر روی میزان تورم پذیری تأثیر بگذارد و با افزایش میزان تورم پذیری مقاومت سنگ‌ها کاهش یافته است. همچنین میزان سرعت امواج در نمونه سنگ‌های مورد مطالعه نیز کاهش می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** تورم پذیری، معدن زغال‌سنگ پرورده، ماسه‌سنگ، شیل، گلسنگ.

۱. کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد [nhafezi@um.ac.ir](mailto:nhafezi@um.ac.ir)

۳. استاد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. دکترای زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵. دکترا، سرپرست دفتر فنی و طراحی شرکت زغال سنگ طبس

## ۱. مقدمه

سنگ‌های رسوبی دارای کانی‌های رسی با رفتار متورم شونده و انقباض دوره‌ای به دلیل حضور آب و قرار گرفتن در چرخه مرطوب و خشک شدن متناوب باعث بلاهای مهندسی مانند نشست فونداسیون و تغییر شکل بیش‌ازحد بستر راه‌آهن و بالآمدگی بستر و دهانه تونل‌ها و معادن زیرزمینی می‌شود (Selen et al, 2019). یکی از دشوارترین مشکلات استخراج زغال‌سنگ در تونل‌های زیرزمینی کنترل پایداری لایه‌ها است. کنترل لایه‌ها نه تنها برای ایمنی معدن‌چیان و حفظ دسترسی به سطح معدن ضروری است، بلکه برای تسهیل حمل‌ونقل زغال‌سنگ استخراج‌شده و جلوگیری از به دام افتادن تجهیزات ارزشمند، برای حفظ کار تعمیرات راه‌داری در حداقل سطوح لازم است (Jin, 2020). در داخل یک معدن زغال‌سنگ قبل از پایداری توده دربرگیرنده تونل سه بخش شامل سقف، ستون‌ها و کف باید تثبیت شود. در گذشته، تحقیقات زیادی برای بررسی مشکلات پایداری سقف و ستون انجام شده است که از جمله به مطالعات (Selen et al., 2019; Wu, 2020) می‌توان اشاره نمود. در مورد مشکلات کف مطالعات کمتری صورت گرفته است ولی اخیراً محققان علاقه زیادی به این عنصر پایداری معدن نشان داده‌اند. ویژگی‌های لایه‌های کف و نحوه واکنش آن‌ها به عوامل خارجی (مانند افزایش محتوای آب و تنش اعمالی) معمولاً در فرآیند طراحی معدن گنجانده نشده است (Yang et al, 2019). تغییر ارتفاع کف از دیرباز یک مشکل آزاردهنده نه تنها در معادن زغال‌سنگ، بلکه در سایر معادن و تونل‌ها و دیگر دهانه‌های بزرگ زیرزمینی وجود داشته است (Shi & Yang, 2016). همین عامل موجب ایجاد مشکلات زیادی از جمله آماس پذیری و تورم درون تونل‌ها شده است که

باعث توجه بسیاری از پژوهشگران و مطالعه در این زمینه شده که از جمله در آمریکا، تحقیقات پیرامون تغییرات ظاهری تونل‌های زغال‌سنگ شده است (Gadde, 2009). یکی دیگر از موارد تورم در حوضه زغال‌سنگ لوبلین در لهستان گزارش شد جایی که یک واحد سنگی ضعیف و حساس در برابر رطوبت تأثیر قابل توجهی بر ثبات کف داشت (Kwasniewski, 1990).

تورم نمونه‌ای از مشکلاتی است که در هنگام ساخت و طراحی تونل‌ها در مهندسی ژئوتکنیک به‌طور گسترده به آن توجه می‌کنند در نتیجه این عامل باعث شده است که محققین زیادی از جمله (Wang et al, 2014; Liu et al, 2016) بپردازند. برای توصیف مکانیسم‌های اساسی و روش‌های آزمایش مناسب با استاندارد ISRM ایجاد شده است که به توصیف نمونه و همچنین طراحی و تجزیه و تحلیل می‌پردازد که براساس استاندارد می‌باشد.

تورم در تونل‌ها عاملی است که می‌تواند به‌طور ناگهانی یا در طول حفاری و ساخت بسیار آرام رخ دهد. نمونه‌ای مانند تونل هاووستین در سوئیس که در مدت کوتاه و به صورت ناگهانی تورم باعث مسدود شدن دهانه تونل معدن زیرزمینی شده است (Taylor et al, 2018). فرایند تورم و تغییرات فیزیکی با اشاره به سنگ‌های گل شناخته شده است و سازند های دارای محتوای کانی‌های رسی انیدریت بیشترین میزان در انگلستان و ایالات متحده مورد توجه محققین قرار گرفته است. سنگ‌ها انواع مختلفی از اندازه‌های دانه، تخلخل و بافت را نشان می‌دهند که می‌توانند به عنوان عامل کنترل کننده رفتار تورم ناشی از ورود آب عمل کنند. برخی از افرادی که بر روی تورم پذیری و همچنین خصوصیات

مناسبی بین نتایج آزمایش مقاومتی با سرعت موج طولی در حالت خشک و اشباع وجود دارد. احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۳ پژوهشی تحت عنوان ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آرژیلیتی در منطقه مکران جنوبی (راه آهن چابهار- نیک شهر) انجام دادند که سنگ‌های منطقه مکران را مطابق طبقه‌بندی مهندسی سنگ به روش Q-System، RMR و GSI عمده توده سنگ در طبقه‌بندی ضعیف و خیلی ضعیف قرار دارند. پژوهشی توسط رحیمی شهید و همکاران (۲۰۲۲) بر روی سنگ آهک‌های همدان انجام شد آن‌ها بر روی خصوصیات مهندسی سنگ آهک کار کردند و با استفاده از آزمایش‌های بار نقطه‌ای و تخلخل پارامتری جدید ارائه داده‌اند. پژوهشی توسط آذر افزا و همکاران (۲۰۱۹) بر روی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مارن‌های عسلویه انجام گرفت. خواص فیزیکی شامل تخلخل، دانسیته، حدروانی و خصوصیات مکانیکی مارن‌های منطقه عسلویه شامل آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش دوام وارفنگی و تعیین شده‌اند. آن‌ها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که در سنگ‌های رسوبی دارای رس زیاد مانند مارن، در آزمایش دوام وارفنگی هر چه تعداد سیکل‌های آزمایش افزایش یابد میزان افت وزنی زیادی در نمونه‌ها رخ می‌دهد و بالعکس. امیری و همکاران (۲۰۳۲) مطالعه ای بر روی خصوصیات زمین شناسی سنگ آهک سازند ایلام در مقطع تیپ انجام داده‌اند. در این پژوهش به تاثیر سنگ سناسی بر روی خصوصیات زمین شناسی مهندسی پرداخته شده است.

به علت گسترش زیاد سنگ‌های رسوبی توجه به خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی آن‌ها ضروری می‌باشد. در پژوهش حاضر به بررسی تورم پذیری ماسه سنگ، شیل و گل‌سنگ معدن زغال سنگ پروده پرداخته شده است و ارتباط

زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مختلف مطالعاتی انجام دادند به صورت زیر است.

لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه‌ای بر روی خصوصیات مهندسی و تورم سنگ‌های مارنی سازند قرمز بالایی ساختگاه سد صفا داشتند آنها به این نتیجه رسیدند که نوع و مقدار کانی‌های موجود در مارن به ویژه کانی رسی و درصد کربنات کلسیم از عوامل موثر بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این نوع سنگ‌ها است. قبادی و همکاران (۲۰۱۵) ضمن بررسی خصوصیات سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک سازند ایلام و سروک به این نتیجه رسیدند که همبستگی مناسبی بین خصوصیات مهندسی و فیزیکی این سنگ‌ها وجود دارد. ترابی و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه سنگ آهک آسماری در محل سد کارون و خرسان ۳ روابطی برای تخمین مقاومت فشاری و مدول یانگ با توجه به خصوصیات ذاتی مانند تخلخل، چگالی و سرعت موج فشاری ارائه دادند. قبادی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌ها در شهرستان هرسین استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که انطباق بیشتری بین خصوصیات در شرایط خشک نسبت به اشباع را نشان می‌دهد.

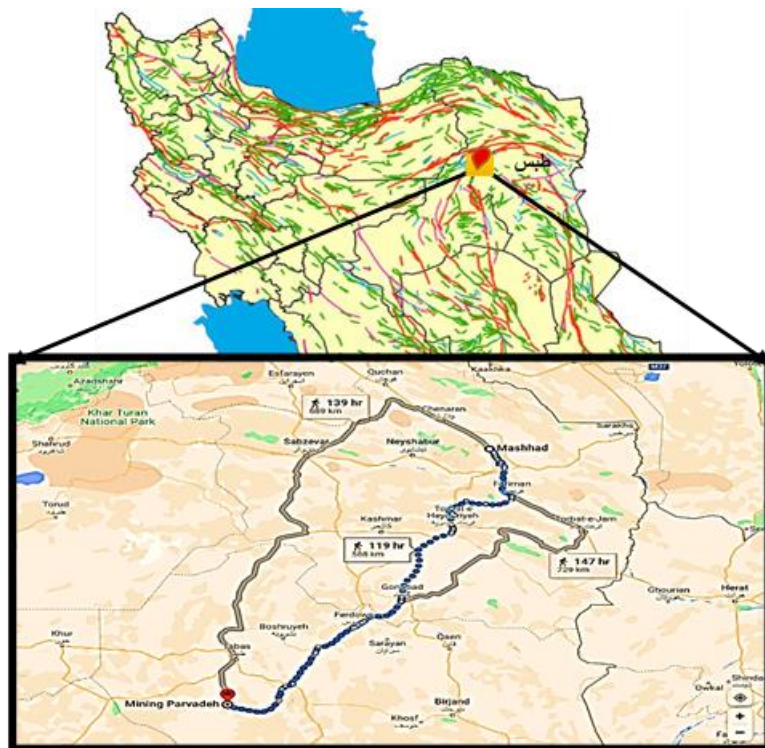
قبادی و همکاران (۲۰۲۰) همچنین بر روی هوازدگی و ارتباط آن با خصوصیات زمین شناسی پریدوتیت‌ها پژوهشی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات دانه‌ها مانند شکل و اندازه، نوع تماس، درجه هوازدگی و شاخص ریزترک بر روی خصوصیات زمین شناسی مهندسی تأثیر می‌گذارد. قبادی و همکاران (۲۰۲۱) خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی ماسه‌سنگ‌ها منجر به تغییر در خصوصیات مکانیکی آن‌ها شده است و انطباق

زغال دار به وسیله رسوبات کواترنری و بازالت های کواترنری پوشیده شده و تقریباً تا نزدیکی گسل نایبند امتداد دارد. شمال ناحیه پروده، یک دشت کاملاً هموار و باتلاق های نمک فرا گرفته و به سمت جنوب رسوبات تریاس و ژوراسیک ارتفاعات نه چندان مرتفع را به وجود آورده است. شرق ناحیه به ارتفاعات شتری و غرب آن به ارتفاعات «کمر مهدی» محدود می شود (صادقی، ۱۴۰۲). در شکل ۱ موقعیت محدود مورد مطالعه و شکل ۲ کروکی و نقشه همه تونل های معدن و شکل ۳ تصویر هوایی معدن زغال سنگ طبس به همراه مختصات جغرافیایی آورده شده است.

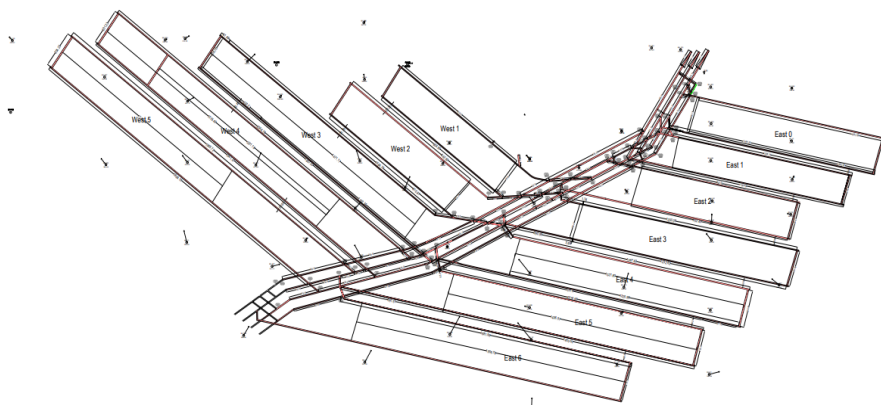
بین پارامتر تورم با سایر خصوصیات مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی

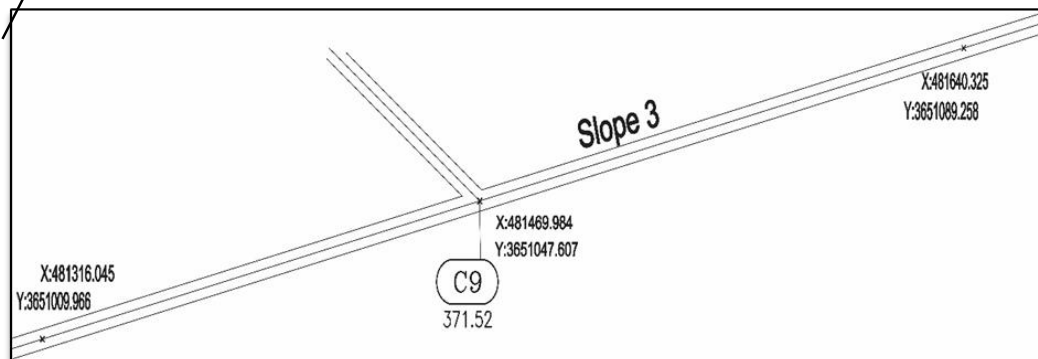
معدن زغال سنگ پروده بر اساس تقسیمات کشوری در شمال شرق خراسان جنوبی و ۷۵ کیلومتری جنوب طبس دارای جایگاه زمین شناسی ساختمانی در زون ایران مرکزی واقع شده است. منطقه زغال دار پروده در منطقه ساختمانی-تکتونیک آنتی کلین نایبند- طبس قرار گرفته است. از شمال به گسل رستم (رخنمون لایه های زغالی پروده)، از شرق به رخنمون های لایه های زغالی از جنوب به گسل قوری چای منطقه پروده شرقی و از غرب به گسل F31 جدا کننده پروده چهار و پروده شرقی در برگرفته محدود می شود. ساختمان زمین شناسی از یک تاقدیس بزرگ تشکیل شده که یال شمالی آن تقریباً به طور کامل به وسیله گسل پروده قطع شده است. در قسمت جنوب شرقی پروده، رسوبات



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- نمای کلی معدن زغالسنگ پروده طبس (گزارش زمین شناسی معدن زغالسنگ طبس



شکل ۳- تصویر شوماتیک از تونل مورد مطالعه و مختصات برداشت شده از داخل تونل

## ۳. مواد و روش‌ها

## ۳-۱. برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری

در این پژوهش خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ‌های تونل شرقی شماره ۳ معدن زغال‌سنگ طبس با نگاه ویژه به موضوع تورم پذیری سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا از روش کتابخانه‌ای استفاده شد. بدین منظور تعدادی منابع مختلف گردآوری و مطالعه شد. در مرحله‌ی بعد بازدیدهای میدانی انجام شده است. در این بازدیدها از افراد متخصص شاغل در معدن استفاده شد. در طی این بازدیدها ضمن آشنایی با شرایط فیزیکی محل اجرای طرح، اطلاعات محلی دیگر نیز جمع‌آوری می‌شوند. در مرحله بعد آزمون‌های آزمایشگاهی انجام گرفت که در آزمایشگاه ضمن تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی اخذ شده از گمانه‌های برداشته و بلوک‌های سنگی در هر آزمایش، بررسی برخی از عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش‌ها در دستور کار قرار گرفته است. نهایتاً روابط بین پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. تونل مورد مطالعه در عمق ۵۷۵ تا ۶۰۰ متری زیر

سطح زمین قرار گرفته است و واحدهای دربرگیرنده آن شامل سه لایه ماسه سنگ، گل‌سنگ و شیل می‌باشد. در مطالعه حاضر تعداد ۳۴ بلوک از نمونه سنگ‌ها انتخاب تا آزمایشات مختلف مکانیک سنگ بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. آزمایش مکانیک سنگ بر اساس استاندارد (ISRM(1981) تعیین خصوصیات فیزیکی بر اساس استاندارد (ISRM(1981) انجام شده است. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه فردوسی مشهد به انجام رسیده است. در شکل ۴ تعدادی نمونه‌های مغزه سنگی و مقداری از نمونه‌های پودر شده در آزمایشگاه آورده شده است.

## ۳-۲. تورم پذیری و مکانیزم و خطرات آن

تورم را می‌توان به عنوان افزایش حجمی که هر جسم جامدی در هنگام خیس شدن تجربه می‌کند تعریف کرد. کانی‌های تبخیری و رسی دو جزء شناخته شده انبساطی در مصالح سنگی هستند که عامل ایجاد این رفتار می‌باشند (Yang et al, 2019).



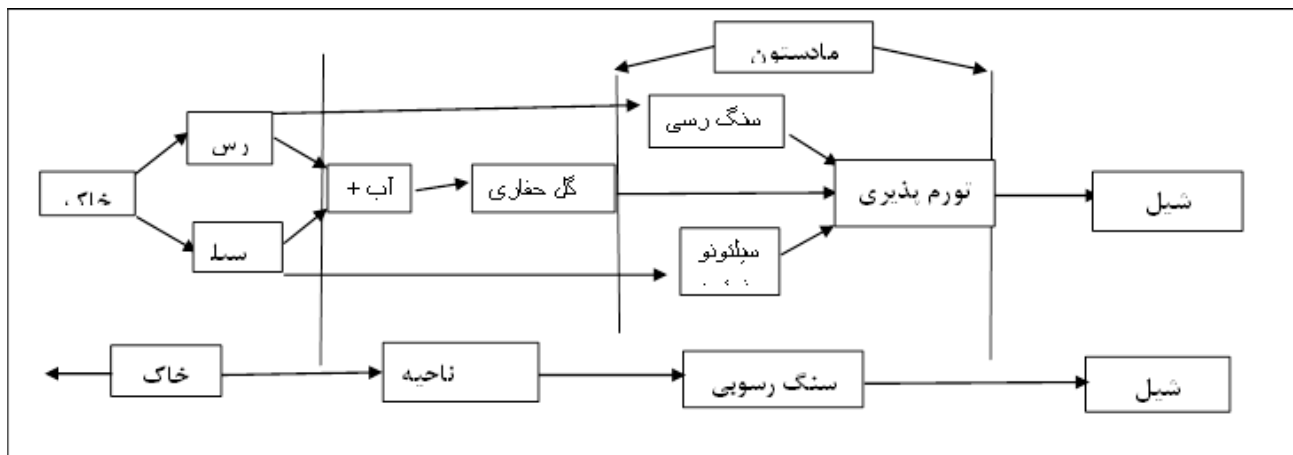
شکل ۴- تعداد نمونه‌های مغزه سنگی و مقداری از نمونه‌های پودر شده

است. تورم پدیده‌ای برگشت پذیر است به این صورت که خاک یا سنگ بعد از کم شدن رطوبت منقبض می‌شود. تورم

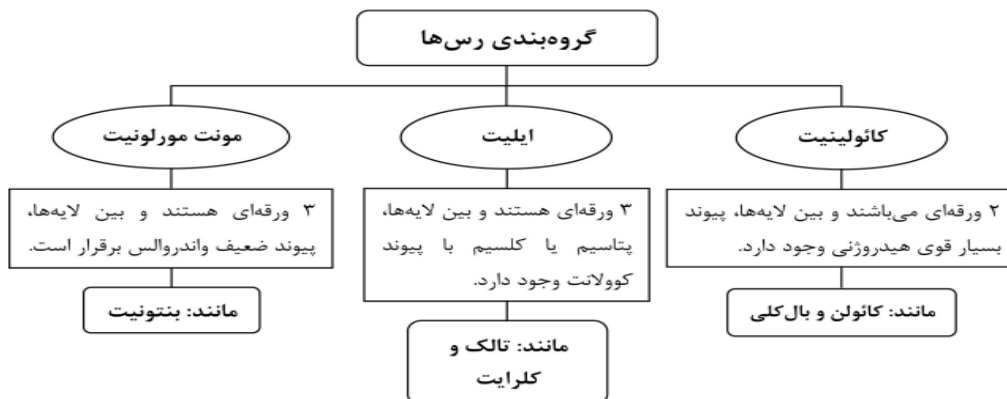
کرنش تورم را می‌توان به راحتی کمیت کرد و تعیین فشار تورم در بسیاری از آزمایشگاه‌های ژئوتکنیکی قابل دسترسی

خاصیت مربوط به نحوه‌ی قرار گرفتن ورقه‌های نازک میکا در ساخت و بافت شیل‌ها می‌باشد. برحسب وجود میکا خاصیت تورق در شیل‌ها متفاوت می‌باشد. در ترکیب شیل‌ها آلومینیوم به صورت آزاد بعد از کوارتز به‌عنوان مهم‌ترین کانی در ساختار شیل‌ها وارد می‌شود. در نتیجه رنگ شیل‌ها به درجه اکسیداسیون محتوای آهن بستگی دارد (Dick and Shakoore, 1994). (شکل ۵ و ۶). با توجه به بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده یکی از عوامل و مشکلات معدن دارای کانی‌های رسی در ساختار آن‌ها ایجاد تورم در آن محیط می‌باشد. بخصوص وجود رطوبت این حساسیت را بیشتر می‌کند. تورم معمولاً در سنگ غنی از خاک رس به صورت وابسته به زمان مشاهده می‌شود (Taylor, 1988). این واکنش خطرآفرین توسط پژوهشگران زیادی از جمله (Van Eeckhout & Peng, 1975; VanEeckhout, 1976; Singh & Cummings, 1983) مورد مطالعه قرار گرفت. اگرچه قرار گرفتن در معرض آب یا رطوبت به تمام انواع مکانیسم‌های بافت کف کمک می‌کند، اما نقش آب در مکانیسم‌های تورم از نظر ایجاد تخریب مواد در طول زمان ضروری است. در کوران‌بونگ در نیوکاسل زغال سنگ، ترکیبی از تورم و کمانش مشاهده شده است (Mo, 2019) (شکل ۷).

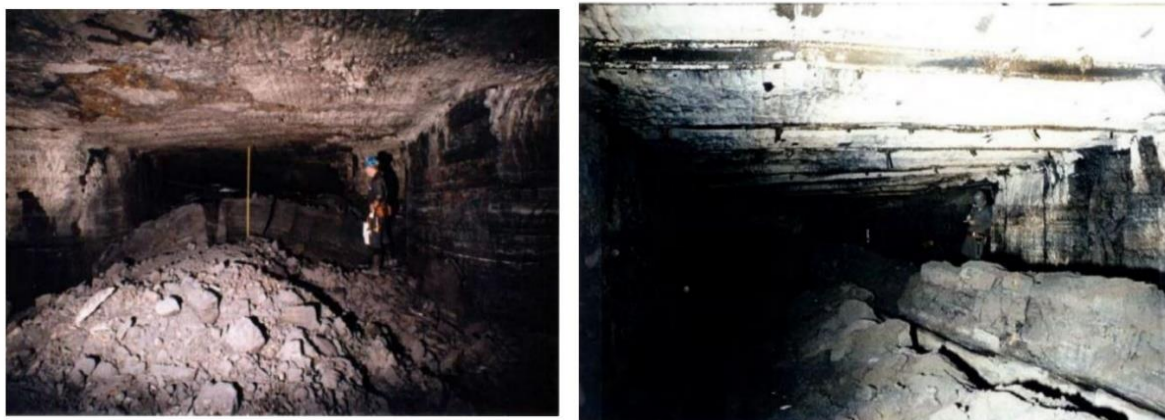
در تونل غالباً در کف ایجاد شده و فشار ناشی از تورم سبب ایجاد ترک و بالا آمدگی در کف می‌شود (Doosthamadi et al, 2011). طبق تعریف ارائه‌شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) مکانیسم تورم ترکیبی از واکنش‌های فیزیکی- شیمیایی درگیر با آب و آزاد شدن تنش می‌باشد. معمولاً واکنش فیزیکی- شیمیایی در تورم آنی همزمان با (یا بعد از) آزاد شدن تنش رخ دهد (Marco, 1990). تورم مکانیکی در خاک‌ها و سنگ‌های دارای کانی‌های رسی، آنیدریت، پیریت و مارکاسیت ایجاد می‌شود. این عامل بیشتر در رس‌ها، رس‌های سیلتی، سیلت رسی و سنگ‌های مرتبط با آن‌ها رخ دهد. تورم فیزیکی- شیمیایی بر اثر واکنش شیمیایی می‌تواند بین آب و ترکیبات کانی‌شناسی ایجاد شود که به کانی‌های موجود در سنگ بستگی دارد. در فرایند تورم وجود کانی‌های رسی و نوع آن بیشترین تأثیر را بر رفتار این عامل دارد. سنگ‌های رسوبی آرژیلیتی ریزدانه‌ترین رسوبات تخریبی که عمدتاً از خرده‌سنگ‌های سیلیکات پیچیده‌ای تشکیل شده‌اند که اندازه آن‌ها در حد سیلت‌های ریزدانه و رس دارای ساختمان ورقه‌ای هستند (DnnvBn, 1973). انواع مهم سنگ‌ها این خانواده گل‌سنگ، شیل و سیلتستون می‌باشد. خاصیت تورق یکی از خواص اصلی و اولیه شیل‌هاست این



شکل ۵- چرخه تشکیل شیل و سنگهای رسوبی (Dick and Shakoore, 1994)



شکل ۶- گروه بندی کانی های رسی، ساختار و مثال های از مواد اولیه در هر گروه



شکل ۷- بافت کف به دلیل ترکیب تورم و بافت کمانش معدن زغالسنگ در نیوکاسل

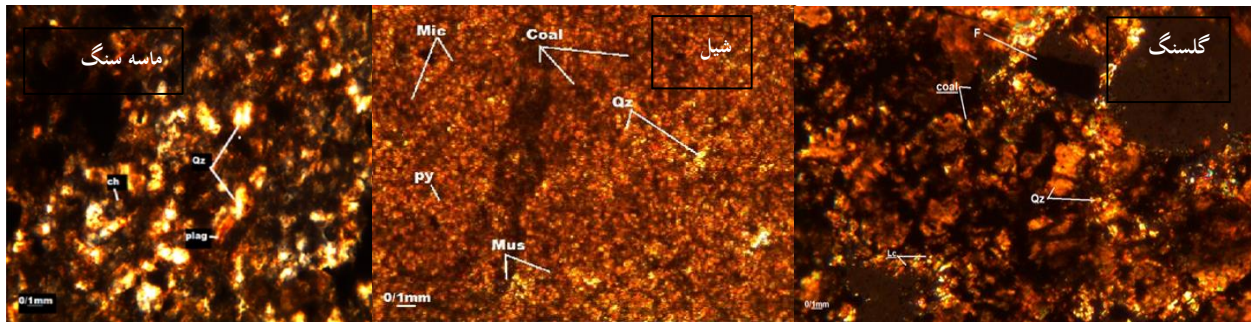
مهم‌ترین کانی‌های مشاهده شده کوآرتز، کانی‌های گروه میکا، کلسیت و کانی‌های گروه اسمکتیت که می‌تواند جزئی از کانی‌های واگرایی را نشان داده است. تفسیر نمودارهای به‌دست‌آمده از بخش رس تفکیک شده نشان داد بیشترین فراوانی کانی‌های رس به رس‌های ایلیتی، کائولینیتی و کلرایت مربوط است. همچنین حضور کوآرتز و دولومیت در این نمونه‌ها تشخیص داده شد اما این ذرات در مقایسه با سایر ذرات از اهمیت و تأثیرگذاری کمتری برخوردار است. شیمیایی و مکانیکی خاک برخوردار است. همچنین وجود درصد زیاد  $\text{SiO}_2$  در نمونه ماسه‌سنگ نسبت به نمونه‌های دیگر نشان از مقاومت بالاتر این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر است. قابل ذکر است به دلیل وجود سیمان آهکی زیاد نمونه گلسنگ درصد آزمایش کربنات کلسیم بسیار بالاتر از

### ۳-۳. بررسی پتروگرافی سنگ‌های مورد مطالعه

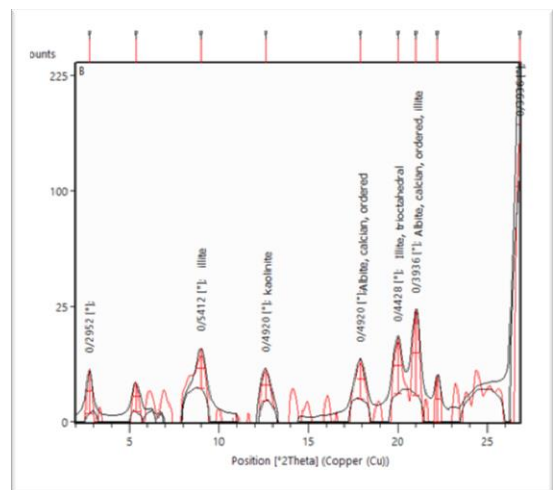
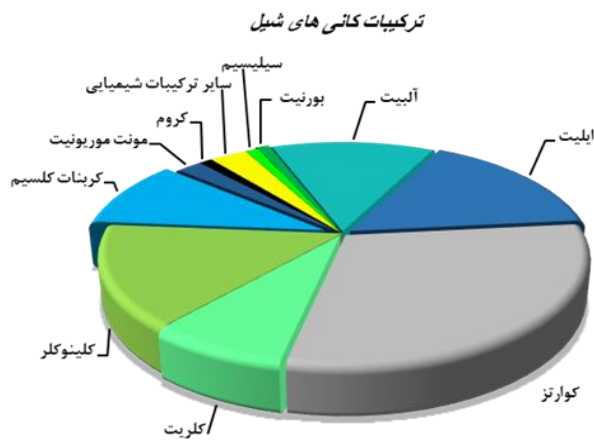
در این پژوهش برای بررسی و شناسایی منطقه و طبقه‌بندی صحیح سنگ‌ها و پی بردن به خواص زمین‌شناسی و ویژگی‌های رفتاری مهندسی و ژئومکانیکی سنگ‌های تونل به مطالعه ماکروسکوپی و کانی‌شناسی و آزمایش‌های XRD و مقدار کربنات کلسیم پرداخته شد و با توجه کانی‌شناسی و ساختار میکروسکوپی سنگ‌ها، سنگ اصلی دربرگیرنده خانواده شیل می‌باشد که علاوه بر دارا بودن سنگ‌های رسی، دارای دانه‌های ماسه و سیلت در ساختار خود هستند بنابراین باید برای بررسی رفتار تورم پذیری آن‌ها تأثیر هر دو عامل رسی و غیر رسی بودن کانی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات و نمودارهای حاصل بدون تفکیک رس

خلاصه‌ای از نتایج سنگ‌شناسی آورده شده است.

دو نمونه دیگر شده است. در شکل ۸ تصویر مقاطع نازک و در شکل ۹ درصد عناصر آورده شده است. در جدول ۱



شکل ۸- مطالعه مقاطع نازک نمونه های مورد مطالعه: Qz: کوارتز، Mus: مسکویت، F: فلدسپات پلاژیوکلاز، Slm: اسلیت و فیلیت، Mic: سیمان ریز بلور، Py: پیریت، Lc: اکسید آهن



شکل ۹- نمودار XRD جهت تشخیص کانی های رسی نمونه شیل

جدول ۱- نتایج سنگ شناسی نمونه های مورد مطالعه

نمونه	نام سنگ	نام کانی	نوع سیمان	RQD	درصد کربنات کلسیم
A	ماسه سنگ	میکروکلین-ایلیت-اکسید اورانیوم- کوارتز-کلریت-آنورتیت-فلئوریت- مسکویت- بورنیت	سیمان سیلیس هم محور و بین دانه ای و دانه های کوارتزدانه ریز	رده شاخص خوب و میزان شکستگی کم و گشاد	۱۸/۹
B	شیل	بورنیت-ایلیت-کائولینیت- کوارتز- آلپیت- مونتمورینیت- سیلیسیم-	دارای رگچه های اکسید آهن و خورده آواری زیاد	شاخص کیفیت ضعیف با	۹/۸

	شکستگی های فشرده	با زمینه میکریتی	کلریت - کروم - کلینوکلر		
۵۶/۴	شاخص کیفیت ضعیف و زیر دندان زبر است	دارای اکسید آهن هماتیت شده و سیمان کربناته از نوع کلسیتی در اطراف بلور های کوارتزی و مواد آلی فراوان	سانیدین - کروندم - کائولینیت - بورنیت - ایلیت - کوارتز - کلریت - آلبیت	گل‌سنگ	C

امواج فشاری و برشی، بررسی خصوصیات فیزیکی، آزمون برش مستقیم و غیرمستقیم و... انجام شده است و در انتها به میزان تاثیر پذیری و رابطه این عوامل با تورم پذیری ورودی‌های تونل پرداخته شده است (جدول ۲).

## ۱. بحث

### ۱-۱. ویژگی زمین‌شناسی مهندسی

به منظور تعیین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ماسه سنگ، شیل و گل‌سنگ علاوه بر مشخص شدن خصوصیات سنگ‌شناسی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها تعیین گردید. پارامترهای به دست آمده از آزمایشات فیزیکی و مکانیکی بانک اطلاعاتی شامل: دانسیته، تخلخل، جذب آب، مدول برشی، ضریب الاستیسیته، مدول یانگ، مدول پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول بالک، نسبت مدولی، نسبت سرعت فشاری به برشی تعیین شده است. براساس بانک اطلاعاتی به تحلیل داده‌ها و رسم همبستگی و ارتباط بین هر پارامتر با دیگر پارامترها با استفاده از روش‌های آماری پرداخته شده است. در جدول ۲ و ۳ میانگین نتایج آزمایشات مختلف بر روی هر واحد نشان داده شده است. براساس رده‌بندی ارائه شده توسط آنون (۱۹۷۹) دانسیته در رده متوسط و تخلخل نمونه‌ها در رده پایین تا متوسط قرار دارد.

### ۱-۳. بررسی آزمایشات و نتایج تورم‌پذیری

آزمایش شاخص‌های تورم‌پذیری (ارزیابی مستقیم پتانسیل تورم) به منظور بررسی درصد تورم و فشار تورمی نمونه‌ها مورد نظر مغزه‌هایی با قطر ۵/۴۷ سانتیمتر و به ضخامت ۱/۹۵ سانتیمتر تهیه‌شده و درون دستگاه تحکیم با استانداردهای مورد نظر قرار دادیم. با قرار دادن درون دستگاه و افزودن آب به سیستم تا نمونه کاملاً اشباع شد سپس با اضافه کردن آب، نمونه شروع به تورم کرده و گیج فشار، جابه‌جا می‌شود. در زمان‌های مشخص عدد گیج قرائت‌شده تا این‌که نمونه کاملاً متورم شود و گیج هیچ‌گونه جابه‌جایی نداشته باشد. در این مرحله با استفاده از روابط درصد کرنش تورمی یا تورم آزاد ( $S\% = \Delta h/h$ ) محاسبه می‌گردد.

### ۱-۲. بررسی آزمایشات و نتایج تورم‌پذیری

برای بررسی میزان آماس‌پذیری منطقه به مطالعات پتروگرافی و سنگ‌شناسی همچون مطالعه مقاطع نازک و آزمایش XRD و تست کربنات کلسیم همچنین آزمایشات مقاومتی و مکانیکی مانند آزمایش شاخص‌های تورم‌پذیری (ارزیابی مستقیم پتانسیل تورم)، مقاومت فشاری تک محوری، بررسی

جدول ۲- نتایج داده های حاصل از آزمایش های مقاومتی و خصوصیات فیزیکی نمونه ها

Rock code	A	B	C
Rock type	ماسه سنگ	شیل	گلسنگ
CaCO <sub>3</sub> (%)	۱۸/۹	۹/۸	۵۶/۴
p(%)	۶/۹۱	۱۱/۷۸	۴/۴۴
W (%)	۳/۲۱	۳/۴۶	۲/۳۵
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۲۰	۲/۱۳	۲/۵۵
G (GPa)	۱۷/۱۵	۱۴/۸	۱۰/۸
$\epsilon_t$	۱۵/۳۹	۳/۲۵	۳/۰۳
$\epsilon_r$	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۱۱
E (Gpa)	۴۵/۰۲	۴۰/۲۱	۲۵/۴۴
Vp/Vs	۱/۸۸	۱/۹۷	۱/۷۹
V	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۲۷
K	۳۱/۳۹	۲۸/۴۴	۱۹/۰۲
$\Phi$	۳۱/۰۰۷	۲۷/۱۹	۲۸/۲۶
C(Kg/cm <sup>2</sup> )	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۷

جدول ۳- متوسط نتایج آزمایشات مکانیکی

Rock code	A	B	C
Rock type	ماسه سنگ	شیل	گلسنگ
UCS (Mpa)	۷۱/۴۶	۳۸/۰۴	۲۶/۷۱
BTS (Mpa)	۱۳/۵۷	۸/۸۶	۶/۲۳
Vp (m/s)	۴۱۹۶	۳۹۸۴	۳۵۲۶
Vs(m/s)	۲۲۳۹	۱۴۰۳	۱۹۶۷
I <sub>d</sub> (%)	۹۸/۷۳	۹۰/۶۶	-
Is <sub>(50)</sub> (MPa)	۶/۷۹	۵/۶۲	۵/۲۷

علامت های جدول ۲ و ۳:

(UCS) مقاومت فشاری تک محوری (BTS) مقاومت کششی برزیلین (Vp) سرعت امواج فشاری (Vs) سرعت موج برشی (Is<sub>50</sub>)  
 مقاومت بار نقطه ای (CaCO<sub>3</sub>) کربنات کلسیم (p) تخلخل (W) جذب آب (γ) چگالی (G) مدول برشی (εt) ضریب الاستیسیته (εr)  
 نسبت مدولی (Vp/Vs) نسبت سرعت فشاری به برشی (E) مدول یانگ (V) نسبت پواسون (K) مدول بالک.

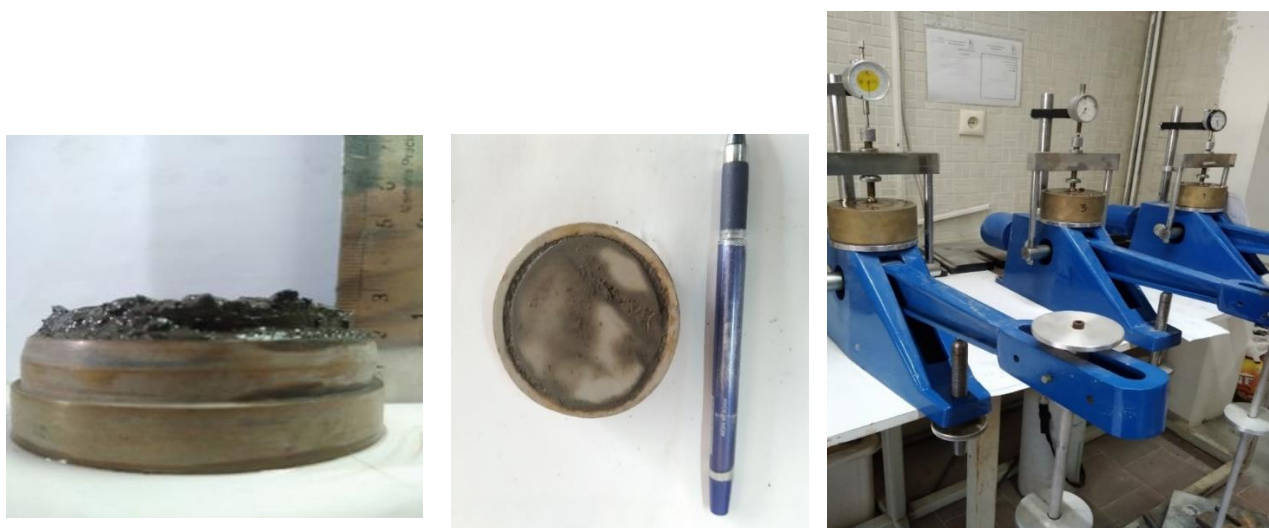
پس از این مرحله، روی نمونه بارگذاری کرده‌ایم تا حجم نمونه به حالت اول برگردد. برای بارگذاری از وزنه‌های کوچک (۱Kg) شروع کردیم هم‌زمان با بارگذاری، تغییرات تورم را از روی گیج ثبت کرده تا اینکه تورم نمونه صفر شد. سپس با استفاده از روابط مربوطه فشار تورمی را محاسبه کردیم ( $Ps = \frac{F}{A}$ ) (سربار نهایی = F).

با توجه به نتایج به دست آمده درصد تورم پذیری شیل‌ها در حدود ۲۳٪ و گلسنگ ۱۳/۶٪ و ماسه‌سنگ ۱۲/۳٪ به دست آمد که این تفاوت درصد شیل نسبت به ماسه‌سنگ و گلسنگ نشان از اثبات وجود درصد بالای کانی‌های رسی مانند ایلیت و کلریت دارد. در مجموع بررسی‌ها پتروگرافی و آزمایش XRD نمونه سنگ‌های این تونل علی‌الخصوص شیل‌های در برگیرنده، کانی‌های رسی موجود در این نوع سنگ‌ها عمدتاً به صورت ایلیت و کلریت بوده و مونتموریونیت و کائولینیت به طور ناچیز در برگرفته شده است. این نوع کانی‌ها در خاک به دلیل ویژگی‌های همچون مقاومت برشی پایین، تراکم‌پذیری بالا، نشانه‌ی خمیری (PI) کم که منجر به تغییر شکل ناگهانی خاک در مواجهه با رطوبت می‌گردد و همچنین میل به انقباض و تورم به عنوان خاکی مسئله‌دار شناسایی شده و عملاً نمی‌توان از این نوع خاک در اهداف سازه‌ایی استفاده نمود (Daraei. et al. 2019). ایلیت با ترکیب شیمیایی

$(K_{1.5}Al_4(Si_7Al_1O_{20})(OH)_4$  کانی سه ورقه‌ای متشکل از دو ورقه سیلیس و یک ورقه آلومین است که نمونه دستی آن سفیدرنگ یا بی‌رنگ و در صورت وجود ناخالصی زغال خاکستری یا سیاه دیده می‌شوند و به نام خاک صنعتی هم قابل شناسایی می‌باشد همچنین در محیط غنی از پتاسیم تشکیل می‌شود. کلریت سیلیکات‌هایی که دارای سیستم تبلور مونوکلینیک می‌باشد، دارای جلای شیشه‌ای و ظاهر بلوری، فلسی، دانه‌ای، رنگ آن سبز تا سفید است و این کانی در محیط‌های دگرسانی گرمابی، دگرگونی درجه پایین و دیاژنز ایجاد می‌شود. مونتموریونیت در رده سیلیکات‌ها به رنگ سفید تا خاکستری دارای جلای مات و متراکم و توده‌ای در کنار ایلیت و کوارتز ایجاد می‌شود، سازنده اصلی رس‌ها که توسط اشعه X قابل تشخیص است و کائولینیت ساختار بلوری، رنگ سفید تا خاکستری، معدنی،  $d(8,32-8,34)$  است که تمامی این خانواده با اشعه X قابل مشاهده می‌باشند. قابل ذکر است این تونل علاوه بر دارا بودن شیل‌ها، دارای ماسه‌سنگ دانه‌ریز و گلسنگ می‌باشد که در ترکیبات هر دو آن‌ها وجود کانی‌های رسی به اثبات رسیده است. شکل ۱۰ نمایی از دستگاه تحکیم و تورم آورده شده است. در جدول ۴ نتایج آزمایش تورم پذیری نشان داده شده است. در شکل ۱۱ تورم نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است

پس از این مرحله، روی نمونه بارگذاری کرده‌ایم تا حجم نمونه به حالت اول برگردد. برای بارگذاری از وزنه‌های کوچک (۱Kg) شروع کردیم هم‌زمان با بارگذاری، تغییرات تورم را از روی گیج ثبت کرده تا اینکه تورم نمونه صفر شد. سپس با استفاده از روابط مربوطه فشار تورمی را محاسبه کردیم ( $Ps = \frac{F}{A}$ ) (سربار نهایی = F).

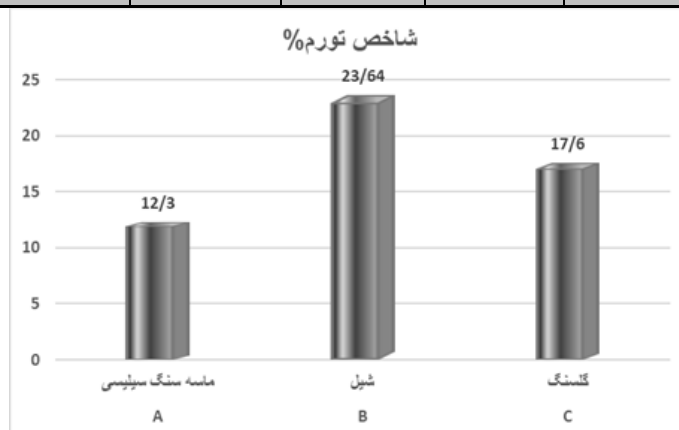
با توجه به نتایج به دست آمده درصد تورم پذیری شیل‌ها در حدود ۲۳٪ و گلسنگ ۱۳/۶٪ و ماسه‌سنگ ۱۲/۳٪ به دست آمد که این تفاوت درصد شیل نسبت به ماسه‌سنگ و گلسنگ نشان از اثبات وجود درصد بالای کانی‌های رسی مانند ایلیت و کلریت دارد. در مجموع بررسی‌ها پتروگرافی و آزمایش XRD نمونه سنگ‌های این تونل علی‌الخصوص شیل‌های در برگیرنده، کانی‌های رسی موجود در این نوع سنگ‌ها عمدتاً به صورت ایلیت و کلریت بوده و مونتموریونیت و کائولینیت به طور ناچیز در برگرفته شده است. این نوع کانی‌ها در خاک به دلیل ویژگی‌های همچون مقاومت برشی پایین، تراکم‌پذیری بالا، نشانه‌ی خمیری (PI) کم که منجر به تغییر شکل ناگهانی خاک در مواجهه با رطوبت می‌گردد و همچنین میل به انقباض و تورم به عنوان خاکی مسئله‌دار شناسایی شده و عملاً نمی‌توان از این نوع خاک در اهداف سازه‌ایی استفاده نمود (Daraei. et al. 2019). ایلیت با ترکیب شیمیایی



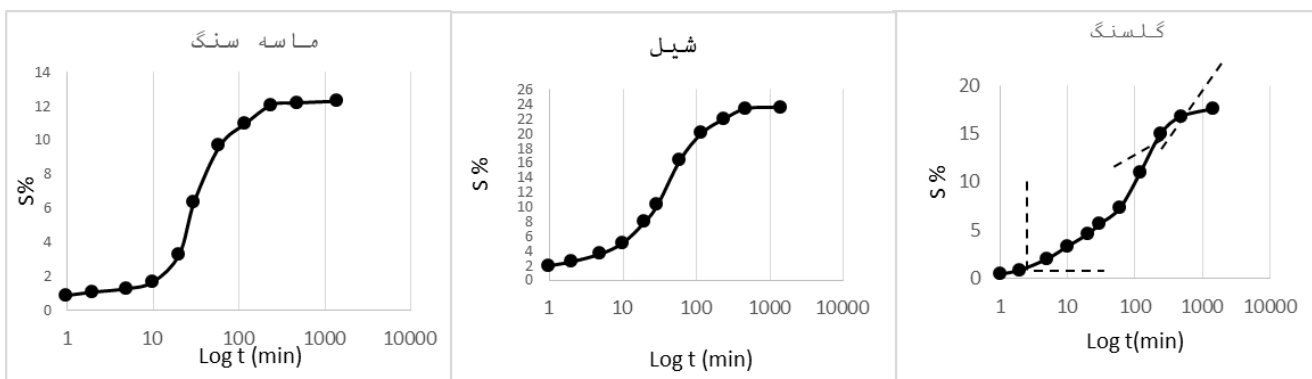
شکل ۱۰- نمایی از دستگاه تحکیم و تورم - مرحله آماده سازی- تغییرات یکی از نمونه ها بعد از آزمایش

جدول ۴- نتایج انجام مطالعات آزمایش تورم پذیری نمونه ها

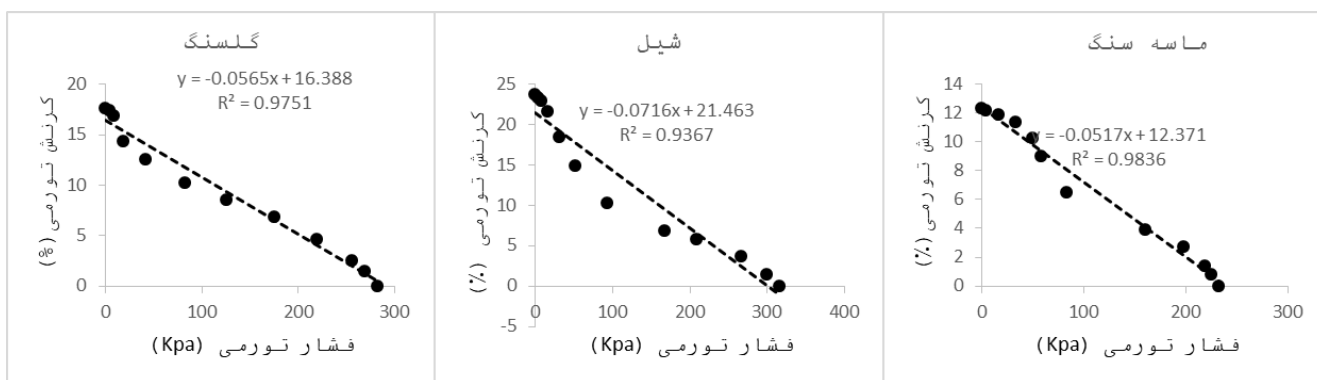
نمونه	جنس نمونه	سطح مقطع (cm <sup>2</sup> )	سربار نهایی (kg)	فشار تورم (kpa)	ضخامت اولیه (mm)	تغییرات ضخامت (mm0.01)	تورم آزاد (%)	رطوبت تورم (%)
A	ماسه سنگ	۲۳//۴۸	۵۵/۷۵	۲۳۲/۸۲	۱۹/۵	۲۳۹/۸۵	۱۲/۳	۱۲/۴
B	شیل	۲۳/۴۸	۷۵/۶	۳۱۵/۷۶	۱۹/۵	۴۶۱	۲۳/۶۴	۲۳/۶
C	گل‌سنگ	۲۳/۴۸	۶۷/۵۶	۲۸۲/۲	۱۹/۵	۳۴۳/۲	۱۷/۶	۱۳/۶



شکل ۱۱- نمودار شاخص تورم نمونه ها



شکل ۱۲- نمودارهای کرنش تورمی- زمان نمونه ها قبل بارگذاری



شکل ۱۳- نمودار لگاریتمی کرنش تورمی با زمان نمونه ها قبل بارگذاری - نمودار فشار تورم با میزان تورم آزاد بعد از بارگذاری

شکفته شدن سنگ گردد. در این مرحله بیشترین تورم رخ می دهد پس از آنکه سنگ وارد مرحله ثانویه می شود که جذب آب به کندی صورت گرفته و تورم با زمان به آهستگی پیش می رود. نمودار لگاریتمی (شکل ۱۲ و ۱۳) به خوبی نشان دهنده رفتار تورمی نمونه ها با زمان می باشد نمونه ها پس از ۳ الی ۹ ساعت تورم اولیه خود را نشان می دهند و وارد مرحله تورم ثانویه می شوند این زمان همان طور که در نمودار دیده می شود برای نمونه هایی که تورم بیشتری از خود نشان می دهند کمتر است. هرچند که تورم سنگ پس از زمان ۲۴ ساعت نیز ادامه پیدا می کند اما به نظر می رسد که بیش از ۹۰٪ تورم آزاد در ۲۴ ساعت و در مرحله تورم اولیه رخ دهد و هر کدام از نمونه ها در نمودار فشار تورم و کرنش تورمی معرف رفتار آن نمونه در شرایط تورم و فشار تورمی برای غلبه بر آن تورم است. همان طور که قابل مشاهده است

#### تحلیل تورم پذیری

۱) بررسی رابطه کرنش تورم نسبت به زمان - رابطه کرنش تورم نسبت به فشار تورم همان طور که مشاهده می شود تفاوت در ترکیب کانی های موجود در هر نمونه سنگ سبب شده که نمودار نمونه ها با یکدیگر تفاوت داشته باشد. نمودار تورم آزاد در برابر زمان سه مرحله تورم قابل تشخیص است در اولین مرحله آغازین رخ می دهد در ابتدای این مرحله سنگ در رطوبت طبیعی قرار دارد و جذب آب عمدتاً توسط حفرات سنگ صورت می گیرد و تا اشباع کامل سنگ، جذب بیشتر آن توسط اجزای آن ادامه می یابد. همان طور که مشاهده می شود این مرحله از تورم به کندی پیش می رود. در مرحله تورم اولیه جذب آب هرچه بیشتر توسط کانی های رسی صورت می گیرد و فشار منفذی زیادی در بافت سنگ ایجاد می شود که ممکن است منجر به

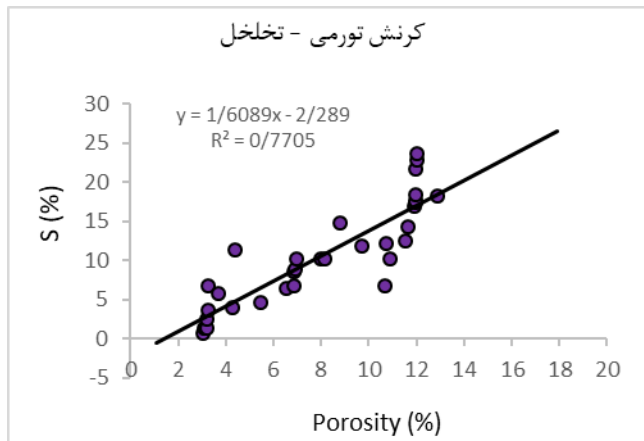
بوده و اکثراً از نوع سبک می باشد. با توجه به دانسیته بیشتر ذرات ریز نسبت به ذرات درشت دانه دلیل این عامل را به تخلخل زیاد نسبت داد.

تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه بین ۱۱/۷۸ تا ۴/۴۴ درصد تغییر می‌کند. میانگین تخلخل در ماسه سنگ ۶ درصد و در سنگ‌های شیل و گلسنگ به ترتیب ۱۱/۷۸ و ۴/۴۴ درصد می‌باشد. بر مبنای طبقه بندی آنون (۱۹۷۹) سنگ‌های تونل شرقی پرورده دارای دانسیته و تخلخل متوسط تا پایین می‌باشد و برافزایش میزان تخلخل دانسیته سنگ‌ها کاهش می‌یابد. و با توجه به شکل ۱۴ و ۱۵ و رابطه بین میانگین تخلخل و جذب آب و تورم پذیری در نمونه‌ها یک رابطه مستقیم و خطی می‌باشد که با افزایش تخلخل و جذب آب میزان تورم پذیری سنگ‌ها مورد نظر افزایش می‌یابد. در نمونه نسبت رابطه تخلخل و تورم دارای یک رابطه قابل استناد است.

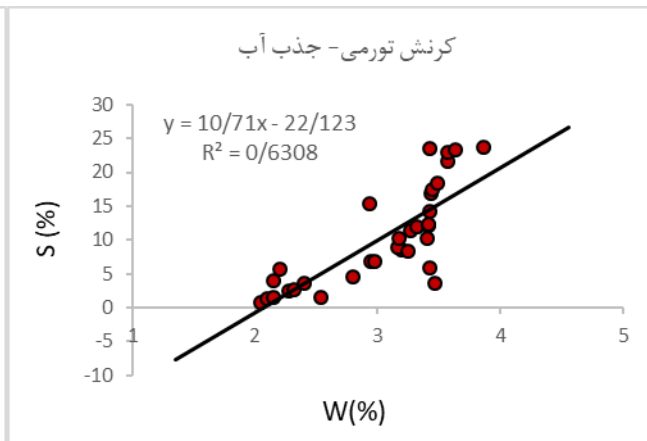
با افزایش فشار تورم میزان تورم آزاد کاهش می‌یابد و این نمودار می‌تواند جهت حفاری اولیه تونل استفاده گردد برای ساخت تونل و سازه روی سنگ‌های متورمی کاربرد دارد که میزان جابه‌جایی مجاز سازه با استفاده از استاندارد موجود تعیین گردد سپس با استفاده از نمودار کرنش تورمی - فشار تورمی حداقل فشار سربار لازم تعیین و با استفاده از آن طراحی اولیه صورت گیرد به گونه‌ای که فشار ناشی از حین حفاری و برداشت آن‌ها، مانع از تورم، آماس پذیری و نهایتاً مانع از تخریب تونل گردد.

## ۲) بررسی رابطه کرنش تورم نسبت به تخلخل - جذب آب

از عوامل دیگر مداخل کننده در ایجاد تورم می‌توان میزان تخلخل و جذب آب را نام برد که با توجه به میانگین چگالی گلسنگ و شیل و ماسه سنگ مورد مطالعه ۲/۱۳ تا ۲/۵۵ و کمی دامنه تغییرات دانسیته آن‌ها تنوع کانی‌شناسی متوسط



شکل ۱۵- رابطه بین تورم پذیری و درصد تخلخل

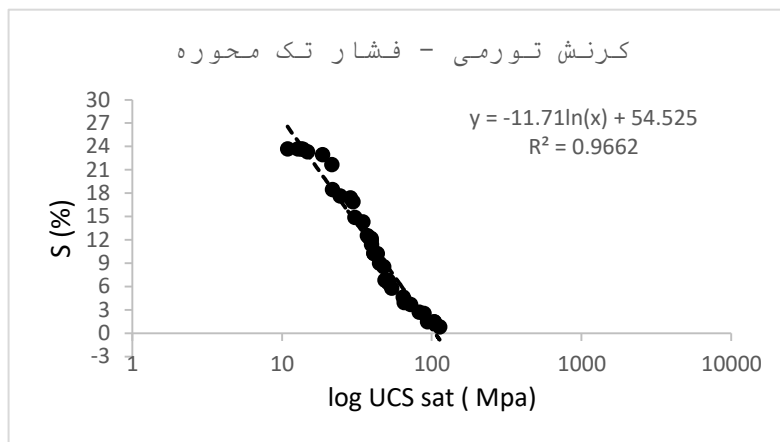


شکل ۱۴- رابطه بین تورم پذیری و میزان جذب آب

تک‌محوری نمونه‌ها که میانگین ماسه سنگ ۸۲/۱۴ و شیل ۳۸/۲۹ و گلسنگ ۲۹/۶۶ است رابطه عکس ایجاد شده است که با افزایش میزان مقاومت نمونه‌ها میزان تورم کاهش می‌یابد (شکل ۱۶).

## ۳) بررسی رابطه کرنش تورم نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری

به دلیل آنکه مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها سهم عمده‌ای در طراحی تجربی و عددی دارد در نتیجه به مقایسه این عامل با تورم پذیری بسیار حائز اهمیت است. با توجه به نمودار به دست آمده از رابطه تورم پذیری با مقاومت



شکل ۱۶- رابطه لگاریتمی بین تورم پذیری و مقاومت فشاری تک محوره

#### ۴) بررسی رابطه سرعت موج نسبت به تورم پذیری

با توجه به بررسی‌های آماری میانگین سرعت موج P و S در ماسه‌سنگ بیشترین میزان نسبت به نمونه‌های دیگر دارد و نسبت  $V_p/V_s$  در ماسه‌سنگ ۱/۸ و در شیل ۱/۹ و در گلسنگ ۱/۷ است. با توجه به بررسی‌های تات هام در سال ۱۹۸۵ که رابطه معینی بین سه نوع سنگ رسوبی (سنگ آهک و دولومیت و ماسه‌سنگ) برای نسبت سرعت امواج تراکمی و برشی به دست آورد که این نسبت  $V_p/V_s$  شامل سنگ آهک (۱/۹) و سنگ دولومیت (۱/۸) و ماسه‌سنگ (۱/۷۵ تا ۱/۶۸) می‌باشد (Tathom, ۱۹۸۵). در نتیجه برای نمونه‌هایی که بیشتر از حد معمول به دست آمده مانند نمونه ماسه‌سنگ مورد مطالعه نشان از عمده‌ترین عامل حضور درصدی از کانی‌های رسی در نمونه‌ها می‌باشد و همین امر باعث شده که این نسبت حتی در شیل‌ها بیشتر از ماسه‌سنگ و گلسنگ باشد. هرچقدر درصد کانی‌های رسی بالاتر، نسبت بین سرعت موج تراکمی و برشی بیشتر می‌شود. حضور

کانی‌های رسی در سنگ، تأثیری زیادی بر روی مدول تغییر شکل می‌گذارد و باعث کاهش آن‌ها می‌شود. با افزایش میزان رس در نمونه‌های مورد مطالعه سرعت انتشار امواج الاستیک و مدولهای الاستیک کاهش پیدا کرده است. با افزایش میزان رس میزان مقاومت کاهش یافته، باعث کاهش سرعت انتشار امواج الاستیک در آن می‌شود. سرعت‌های الاستیک در سنگ‌های ضعیف مانند شیل روند بسیار آرام‌تری با افزایش تخلخل نسبت به ماسه‌سنگ‌ها نشان می‌دهد به علاوه وجود درزه‌ها و شکستگی‌ها ریز و تورق بالای شیل‌ها باعث تغییر زیادی در تخلخل سنگ نمی‌شود اما تأثیر زیادی در کاهش سرعت امواج دارد. با توجه به این نتایج و نسبت رابطه کانی رس با میزان آماس پذیری و تورم می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت موج نشان از کاهش تورم در نمونه سنگ‌های تونل دارد (جدول ۵ و ۶). در شکل ۱۷ نسبت‌های سرعت صوت در سنگ‌های مورد مطالعه و در شکل ۱۸ رابطه مقاومت فشاری تک محوری با تورم پذیری آورده شده است.

جدول ۵- نتایج محاسبات آماری آزمایش تعیین سرعت امواج

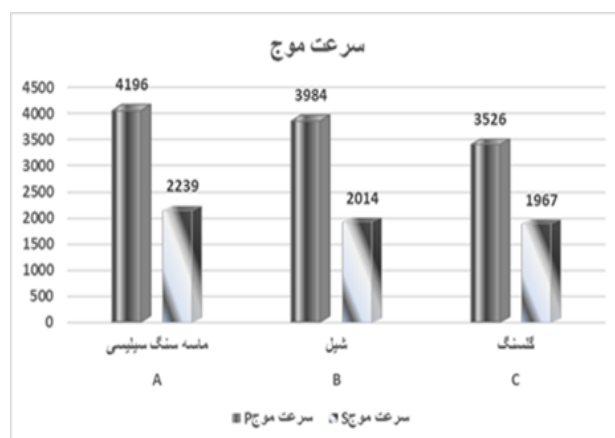
Table 5. The results of statistical calculations of the wave speed determination experiment

$\frac{Vp}{Vs}$	سرعت موج فشاری Vp					سرعت موج برشی Vs					جنس
	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	تعداد	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	تعداد	
۱/۸۸	۳۱۳/۱۴	۲۰۶۳/۷	۲۶۹۸/۷۴	۱۴۲۸/۳۴	۱۵	۳۵۸/۷۳	۴۲۲۴/۰۲	۴۷۴۳/۴۱	۴/۳۶۸۴	۱۵	ماسه سنگ
۱/۹۷	۴۳۱/۲۵	۱۹۷۵/۵	۲۵۳۴/۱۴	۱۴۲۴/۱۴	۸	۳۲۷/۶۶	۴۳۱۵/۳۲	۴۹۳۷/۱۴	۱/۳۷۲۵	۸	شیل
۱/۷۹	۶۲۰/۰۲	۱۸۴۹/۲	۲۵۴۰/۸۶	۱۱۵۹/۳	۵	۵۷۲/۷۶	۳۲۴۵/۶۴	۳۹۶۱/۲۱	۷/۲۵۲۹	۵	گل سنگ

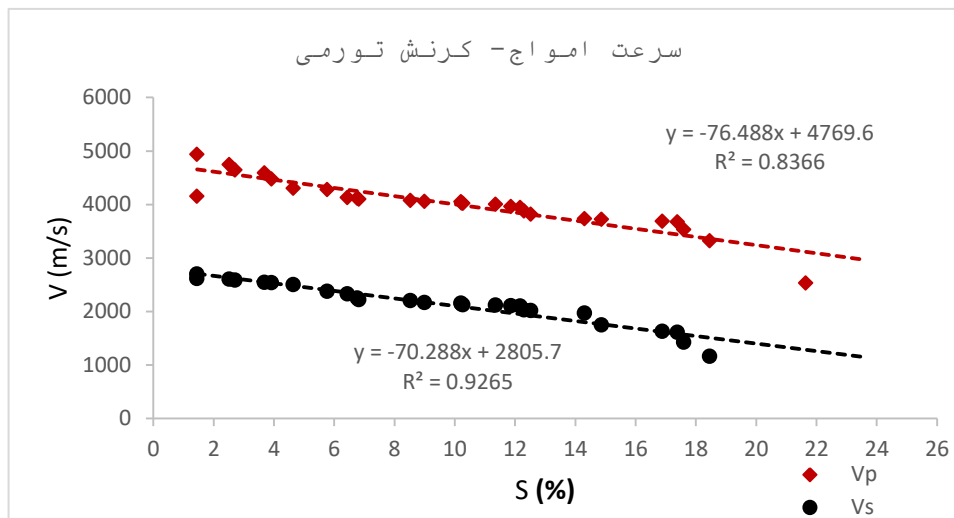
جدول ۶- مقادیر پارامترهای الاستیک نمونه های مورد مطالعه

Table 6. Values of elastic parameters of studied samples

نمونه	نام سنگ	میانگین سرعت موج فشاری خشک (m/s)(Vp)	میانگین سرعت موج برشی خشک (m/s)(Vs)	مدول یانگ (E)(Gpa)	مدول بالک (K)(Gpa)	مدول برشی (G)(Gpa)	نسبت پواسون
A	ماسه سنگ	۴۱۹۶/۷۵	۲۲۲۴/۰۲۵	۴۵/۰۲	۳۱/۳۹	۱۷/۱۵	۰/۳
B	شیل	۳۹۸۴/۵۲	۲۰۱۵/۳۲	۴۰/۲۱	۲۸/۴۴	۱۴/۸	۰/۳۲
C	گل سنگ	۳۵۲۶/۲۸	۱۹۶۷/۶۴	۲۵/۴۴	۱۹/۰۲	۱۰/۸	۰/۲۷



شکل ۱۷- نسبت سرعت صوت



شکل ۱۸- رابطه بین تورم پذیری و سرعت امواج

### نتیجه گیری

تورم فرآیندی است که باعث افزایش حجم مصالح و تغییر ساختار درونی سازه علی الخصوص تونل‌های زیرزمینی می‌شود. پتانسیل تورم در سنگ‌هایی که دارای درصد قابل ملاحظه‌ای کانی رسی باشند وجود دارد. با توجه شواهد صحرایی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد سنگ‌های در برگیرنده تونل متشکل از گلسنگ، شیل و ماسه‌سنگ دانه ریز است و دارای کانی رسی ایلیت و کلریت به صورت فراوان و کانی های رسی مونتموریونیت و کائولینیت به صورت ناچیز هستند که اثبات پتانسیل تورم در این منطقه می‌باشد (با توجه به نتایج آزمایش XRD). این نمونه‌ها با توجه به ترکیب کانی‌شناسی نوع سیمان شدگی آن‌ها دارای تورق متفاوتی می‌باشند در بین

نمونه‌ها سنگ شیل بیشترین پتانسیل تورم یعنی ۲۳/۵ درصد و ماسه‌سنگ دارای ۱۲/۵ درصد کمترین میزان تورم را دارا می‌باشند با توجه به منحنی کرنش تورم - زمان می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین عامل تورم پذیری زمان می‌باشد و از منحنی کرنش تورمی - فشار تورمی می‌توان برای احداث و طراحی سازه‌ها استفاده نمود. با توجه به بررسی‌ها درصد تخلخل و جذب آب و چگالی می‌تواند بر روی میزان تورم پذیری تأثیر بگذارد و با افزایش میزان تورم پذیری مقاومت سنگ‌ها کاهش یافته و میزان سرعت موج در نمونه سنگ‌ها این منطقه هم کاهش می‌یابد.

## منابع

- Ahmadi khounsaraki, V., Uromeihy, A., Madanipour, S., Amiri, M (2023) Evaluation of geomechanical properties of argillite rocks in the region of south Makran (Chabahar-Nikshahr railway). *New Findings in Applied Geology*, 17(33).
- Amiri, M., Lashkaripour, G. R., Hafezi Moghaddas, N., & Ghobadi, M. H. (2023). The relationship between petrographical, physical, and mechanical properties in Ilam formation limestone. *New Findings in Applied Geology*, 17(34), 223-241.
- Azarafza, M., Ghazifard, A., Akgün, H., Asghari-Kaljahi, E (2019) Geotechnical characteristics and empirical geo-engineering relations of the South Pars Zone marls, Iran, *Geomechanics and Engineering, An International Journal*, Techno press, 19(5), 393-405.
- Cicek, S. (2020). *Adaptation of Coal Mine Floor Rating (CMFR) to Eastern US Coal Mines*. West Virginia University.
- Doostmohammadi, R., Mutschler, T., & Osan, C. (2011). Modeling the complex and long-term swelling behavior of argillaceous rocks. *Mining Science and Technology (China)*, 21(5), 655-659.
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., & Aliani, F (2020) The study of relationship weathering, mineralogical and texture of peridotite rocks with engineering geological properties (Case study: peridotite Harsin city, Kermanshah province). *New Findings in Applied Geology*, 14(27), 43-54.
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., & Rasoli Farah, M (2021) The study of geotechnical properties of Qom formation sandstones and their using as borrow material (case study: Latgah village, northern Hamedan). *New Findings in Applied Geology*, 15(29), 55-70.
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., Aliani, F (2020) The study of engineering geological properties of peridotites in Harsin Kermanshah province (A case study). *Journal of Engineering Geology*, 14 (1):105-132.
- Ghobadi, M. H., Ghorbani, A., Mohseni, H., Uromeihy, A (2015) study of engineering geological properties of the Ilam - Sarvak formations in Khorramabad city. *Journal of Engineering Geology*, 8 (4) :2463-2486.
- Gu, H., Tao, M., Cao, W., Zhou, J., & Li, X. (2019). Dynamic fracture behaviour and evolution mechanism of soft coal with different porosities and water contents. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102265.
- Hosking, L. J., Chen, M., & Thomas, H. R. (2020). Numerical analysis of dual porosity coupled thermo-hydro-mechanical behaviour during CO<sub>2</sub> sequestration in coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 135, 104473.
- ISRM, (1981 (b)). "Suggested Methods. Rock characterization testing and monitoring", In: Brown ET, (Eds.) Oxford: Pergamon Press.
- ISRM, (1981). "Basic geotechnical description of rock masses, International Society of rock mechanics Commission on the classification of rock and masses". *Int Rock Mech Min Sci Geomech*, Vol. 18: 85-110.
- Jia, Z., Xie, H., Zhang, R., Li, C., Wang, M., Gao, M., ... & Zhang, Z. (2020). Acoustic emission characteristics and damage evolution of coal at different depths under triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2063-2076.
- Jiang, Y., Zhao, Y., Wang, H., & Zhu, J. (2017). A review of mechanism and prevention technologies of coal bumps in China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(1), 180-194.
- Ju, Y., Zhu, Y., Zhou, H., Ge, S., & Xie, H. (2021). Microwave pyrolysis and its applications to the in situ recovery and conversion of oil from tar-rich coal: An overview on fundamentals, methods, and challenges. *Energy Reports*, 7, 523-536.
- Klemetti, T. M., Van Dyke, M. A., Evaneck, N., Compton, C. C., & Tulu, I. B. (2021). Insights into the relationships among the roof, rib, floor, and pillars of underground coal mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, 531-538.
- lashkaripour G, Aghamolae I, ghafoori M. An investigation on engineering properties of marl rocks of Safa dam foundation. *Journal of Engineering Geology* 2014; 7 (2) :1743-1762.
- Mishra, B., Klemetti, T., Lawson, H., Murphy, M., & Perry, K. (Eds.). (2018). *Proceedings of the 37th International Conference on Ground Control in Mining*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Mo, S. (2019). *Floor heave mechanisms in underground coal mine roadways*.
- Niu, Y. (2018). *Petrophysical analysis of coal samples from Gloucester Basin, New South Wales, Australia (Doctoral dissertation, UNSW Sydney)*.

- Rahimi Shahid, M., Amiri, M., lashkaripour, G., Moradi, S (2022) The estimation of Hamedan limestone brittleness index using point load index and porosity test. *Geopersia*, 12(2), 331-352.
- Sears, M. M., Van Dyke, M., Klemetti, T., Su, W. H., & Tulu, I. B. (2018, June). The effect of floor strength and horizontal stress orientation on floor heave in a deep US longwall mine. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2018). ARMA.
- Sheffield, P., & Corbett, P. (2018). Managing floor heave in an underground longwall coal mine. In *Proceedings of the Fourth Australasian Ground Control in Mining Conference* (pp. 78-94).
- Sherizadeh, T., & Kulatilake, P. H. (2016). Assessment of roof stability in a room and pillar coal mine in the US using three-dimensional distinct element method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 24-37.
- Sun, F., Gao, J., Liu, X., Yang, Y., & Wu, S. (2016). Controllable nitrogen introduction into porous carbon with porosity retaining for investigating nitrogen doping effect on SO<sub>2</sub> adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 290, 116-124.
- Sun, Y., Cao, C., Liu, C., Liu, J., Zhu, Y., Wang, X., & Song, W. (2017). Nitrogen-doped hollow carbon spheres derived from amination reaction of fullerene with alkyl diamines as a carbon catalyst for hydrogenation of aromatic nitro compounds. *Carbon*, 125, 139-145.
- Teng, T., Gao, F., Ju, Y., & Xue, Y. (2017). How moisture loss affects coal porosity and permeability during gas recovery in wet reservoirs? *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(6), 899-906.
- Tiess, G., Majumder, T., & Cameron, P. (Eds.). (2019). *Encyclopedia of mineral and energy policy*. Springer Berlin Heidelberg.
- Torabi-Kaveh, M., Naseri, F., Saneie, S., & Sarshari, B (2015) Application of artificial neural networks and multivariate statistics to predict UCS and E using physical properties of Asmari limestones. *Arabian journal of Geosciences*, 8(5), 2889-2897.
- Wang, L., Sun, F., Gao, J., Pi, X., Pei, T., Qie, Z., ... & Qin, Y. (2018). A novel melt infiltration method promoting porosity development of low-rank coal derived activated carbon as supercapacitor electrode materials. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 588-596.
- Wu, G. S., Yu, W. J., Zuo, J. P., Li, C. Y., Li, J. H., & Du, S. H. (2020). Experimental investigation on rockburst behavior of the rock-coal-bolt specimen under different stress conditions. *Scientific Reports*, 10(1), 7556.
- Xiao, K., Zhang, Z., Zhang, R., Gao, M., Xie, J., Zhang, A., & Liu, Y. (2021). Anisotropy of the effective porosity and stress sensitivity of coal permeability considering natural fractures. *Energy Reports*, 7, 3898-3910.
- Xin, F., Xu, H., Tang, D., & Cao, L. (2020). An improved method to determine accurate porosity of low-rank coals by nuclear magnetic resonance. *Fuel processing technology*, 205, 106435.
- Zhang, K., Li, Y., Wang, Z., Li, Q., Whiddon, R., He, Y., & Cen, K. (2016). Pyrolysis behavior of a typical Chinese sub-bituminous Zhundong coal from moderate to high temperatures. *Fuel*, 185, 701-708.
- Zhang, N. C., Zhang, N., Wang, H. Y., Ma, B. L., Sun, Y. T., & Esterle, J. (2016). Floor failure depth of the roadway in soft rocks of deep coalmine: A case study. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21.
- Zhang, Y., Niu, K., Du, W., Zhang, J., Wang, H., & Zhang, J. (2021). A method to identify coal spontaneous combustion-prone regions based on goaf flow field under dynamic porosity. *Fuel*, 288, 119690.