نشریه زمین شناسی ژئوتکنیک
سال ۱۰(۱۳۹۳)، شماره۲: ۱۴۹-۱۴۰
WWW.appliedgeology.ir

رابطه بین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و بافتی رخنمون های تراورتنی منطقه تزرج شمال هرمزگان

زهرا عابدپور[1*]، جمال طراح[1]، سید محمد میرحسینی[1]

دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران

abedpour.z@gmail.com

*) عهده دار مکاتبات

دریافت: ۹۳/۲/۲۷؛دریافت اصلاح شده: ۹۱/۶/۲۳؛پذیرش: ۹۱/۶/۳۱؛قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۸/۳۰

چکیده

رخنمون‌های تراورتنی تزرج در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان حاجی‌آباد در استان هرمزگان واقع شده است. این منطقه بخشی از زون زاگرس چین‌خورده می‌باشد. تراورتن‌های مورد مطالعه بر روی نهشته‌های ائوسن قرار گرفته‌اند. این تراورتن‌ها از تأثیر آبهای زیرزمینی و جوی بر روی سنگ‌های آهکی آسماری و انحلال و ته‌نشست دوباره آنها تشکیل شده‌اند. در این پژوهش، ۶ نمونه از تراورتن‌های متخلخل و کمتر متخلخل تزرج مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس مطالعات پتروگرافی، کانی کلسیت بیش از ۹۸ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد، کوارتز و کانی‌های رسی نیز تشکیل دهنده‌های فرعی تراورتن‌های منطقه می‌باشند. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش شامل مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و تعیین چگالی و همچنین تخلخل کل، درصد جذب آب و مقاومت فشاری یک محوره در شرایط خشک و اشباع از آب می‌باشد. آزمایشات فیزیکی و مکانیکی نیز با هدف بررسی عملکرد و دوام این سنگ‌ها به منظور استفاده آنها برای سنگ‌نما انجام شد. در این مطالعه، خواص فیزیکی و مکانیکی با یکدیگر مقایسه شده و همبستگی بین آنها با استفاده از روش‌های آماری تجزیه و تحلیل گردید. بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون‌ها، بین مقاومت فشاری یک محوره و چگالی، رابطه خطی با همبستگی مثبت بسیار پایین وجود دارد، این پارامتر با تخلخل کل، همبستگی منفی مشخصی را نشان می‌دهد. فابریک و مخصوصاً درصد تخلخل تراورتن‌ها، مهمترین عوامل کنترل کننده مقاومت و دوام آنها می‌باشد. نتایج مطالعات نشان داد که تراورتن‌های با تخلخل کم، مقاومت بالاتری نسبت به تراورتن‌های با تخلخل بالا دارند.

واژه های کلیدی: تراورتن، زاگرس چین‌خورده، آهک آسماری، تخلخل، مقاومت فشاری.

۱- مقدمه

تراورتن یکی از سنگ‌های جالب و شگفت‌آور کربنات‌های قاره‌ای می‌باشد که از نظر کیفیت تجاری و زینتی‌شان به خوبی شناخته شده اما از نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروژنتیکی به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته اند (Gandin & Capezzuoli 2014). تراورتن‌ها، رسوبات کربناته حاصل از فعالیت چشمه‌های آب گرم دارای مقادیر

بالای Ca^{+2} و فشار جزیی بالای دی‌اکسیدکربن ($p\ CO_2$) می‌باشند (Ford & Pedley 1992). تراورتن یک سنگ ساختمانی و سنگ‌نمای معمولی است که از زمان‌های قدیم در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گرفته است (Pentecost 2005). تراورتن در طی دوره‌ای (حدود ۶۰۰ هزار سال)، بر اثر ته‌نشینی در چشمه‌های آب گرم معدنی شکل می‌گیرد. این سنگ در مقایسه با مرمر، نرم‌تر ولی بر حسب قدمت و جهت برش، سختی نشان می‌دهد (پارسایی ۱۳۸۲). بنابراین استفاده از این سنگ‌ها به عنوان سنگ‌نما، ضرورت شناخت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها را جهت بهره‌برداری بهینه ایجاب می‌کند. تراورتن یکی از سنگ‌های مورد علاقه امپراطوری روم بوده ولی در بناهای تاریخی و سازه‌های مدرن در سراسر جهان نیز اغلب دیده می‌شود (بسطامی ۱۳۸۳). تراورتن یک سنگ بادوام است؛ اگرچه در اثر آلودگی‌های هوا عموماً هوازده شده و سطح آنها در مناطق شهری پوسته پوسته و سیاه می‌گردد (Sindraba et al. 2004 ; Török 2006 a; 2008) . از نظر فابریک، تراورتن‌ها یک سنگ یکنواخت و همگن نیستند و بر اساس تخلخل و ساخت‌های رسوبی، انواع مختلفی را شامل می‌شوند. بر اساس مطالعات انجام شده، فابریک و کانی‌شناسی، عوامل کنترل کننده مهمی برای خواص مکانیکی انواع تراورتن‌ها می‌باشند. اندازه دانه و شکل (Haney & Shakoor 1994; Wong et al. 1996; Přikryl 2001) تخلخل (Hatzor & Palchik 1997; Torok 2006b ; Sabatakakis et al. 2008) و ترکیبات کانیایی (Tsiambaos & Sabatakakis 2004; Sabatakakis et al. 2008) بر مقاومت و انتشار ترک و درزه‌ها مؤثر می‌باشند. بر روی سنگ‌های مختلف بررسی‌های زیادی انجام گرفته است، اما در مورد تراورتن‌ها داده‌های خیلی کمی موجود می‌باشد. به عنوان مثال؛ برای انواع سنگها چندین مطالعه بر روی تغییر مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌ها (UCS= Uniaxial Compressive Strength) با استفاده از برخی فاکتورهای پتروفیزیکی مانند ترکیب کانیایی ; (Price 1966 ; Sabatakakis et al. 2008) چگالی (Smorodinov et al. 1970 ; Hecht et al. 2005) و تخلخل (Dunn et al. 1973; Hoshino 1974; Onodera et al. 1974; Kelsall et al. 1986; Palchik 1999; Li & Aubertin 2003; Benavente et al. 2004; Van 2004) و فابریک (Onodera & Kumara 1980 ; Přikryl 2001; Torok 2006b) انجام شده است. در یک بررسی دیگر، تأثیر مقدار رطوبت بر مقاومت و تغییر شکل انواع سنگ‌های رسوبی با جزئیات بسیار و بدون اشاره به تراورتن‌ها مطرح شده است (Colback & Wiid 1965). درصد رطوبت در سنگ‌ها به هنگام ساخت سازه‌های مهندسی بسیار مهم بوده و باید مورد توجه قرار گیرد. رطوبت به علت درهم کنشی که با کانی‌های تشکیل دهنده سنگ ایجاد می‌کند، باعث کاهش مقاومت سنگ می‌گردد (قبادی و همکاران ۱۳۸۹). بعلاوه مقدار درصد رطوبت موجود در سنگ بر مقدار یخ‌زدگی و گرم شدن دوره‌ای سنگ‌ها و در نهایت بر خواص مکانیکی سنگ‌ها تأثیر گذار می‌باشد. بنابراین در انتخاب و استفاده از آنها در نمای خارجی ساختمان باید این نکته مورد توجه قرار گیرد (Jamshidi et al. 2014). بطور کلی بر طبق داده‌های پریکریل (Přikryl 2001)، با افزایش تخلخل، مقاومت فشاری تک محوره بصورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. با این حال پلاچیک (Plachik 1999) وابستگی بین تخلخل و مقاومت سنگ را با رابطه (۱) بیان کرده است. در این رابطه؛ m ثابت ماده، E مدول الاستیک و n تخلخل است.

$$UCS = mE/n \qquad \text{رابطه (۱)}$$

برای اولین بار اسمورودینوو و همکارانش (Smorodinov et al. 1970) رابطه بین UCS و چگالی ظاهری را برای انواع دولومیت‌ها و سنگ‌های آهکی مورد بررسی قرار دادند، در این مطالعات تأثیر رطوبت در نظر گرفته نشد. سپس محققین دیگری مانند هاوکینز و مک کونل (Hawkins & McConnell 1992) برای اولین بار با مطالعه ۳۵ نوع ماسه‌سنگ بین عملکرد UCS و مقدار آب، رابطه (۲) را ارائه کردند.

$$UCS = a \exp(-bw) + c \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه w مقدار آب و b,a و c ثابت مواد می‌باشند. در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی در تعیین قدرت و مقاومت سنگ‌ها تحت شرایط خشک و اشباع از آب انجام شد (Romana & Vasarhelyi 2007) .

با استفاده از رگرسیون ضرایب پتروفیزیکی متفاوت (مانند مقاومت کششی و مقاومت فشاری) در برخی از مقالات نشان داده شد که همبستگی بین این پارامترها بدون در نظر گرفتن مقدار آب در نمونه‌ها امکان‌پذیر است (Török & Vásárhelyi 2010).

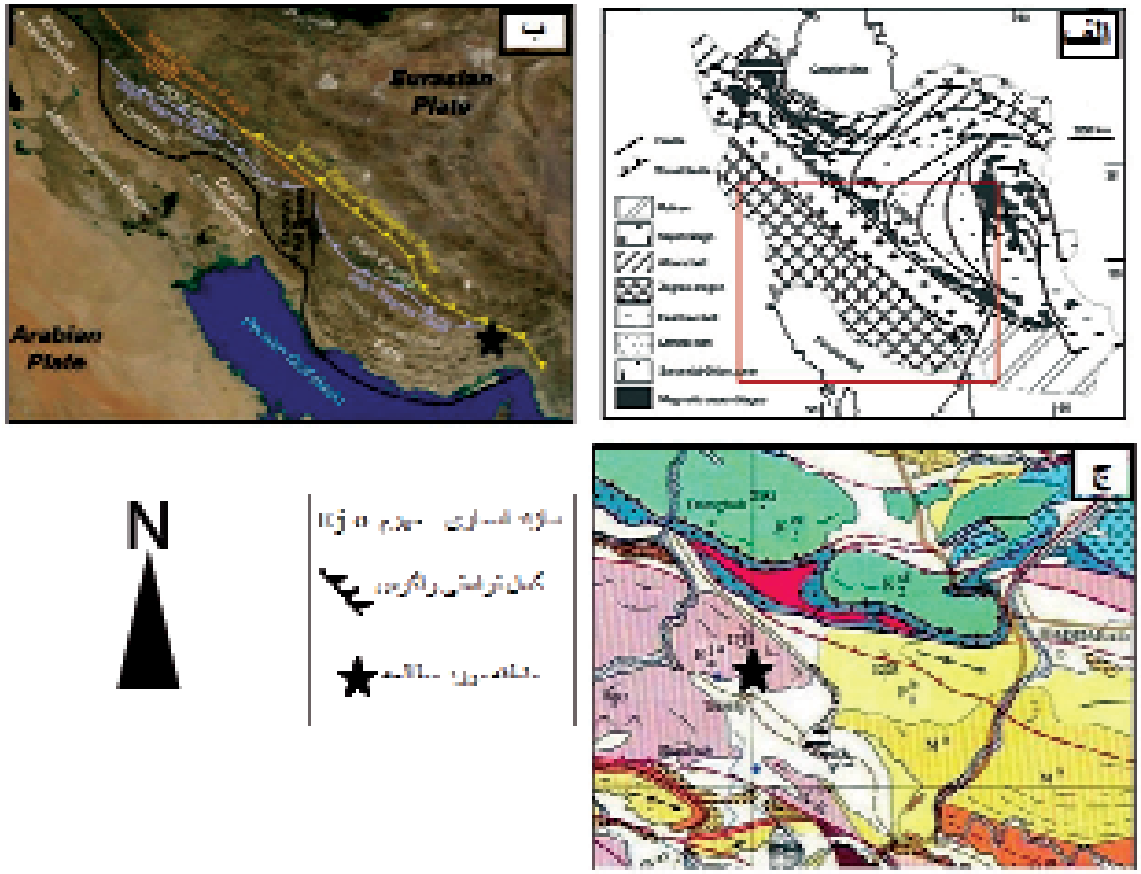
ایران از تولید کننده‌های نسبتاً مهم تراورتن در جهان می‌باشد. البته بخش اعظم تراورتن استخراج شده در داخل کشور مصرف می‌شود. از دیگر تراورتن‌های ایران می‌توان به تراورتن قرمز، گردوئی و لیموئی آذرشهر در آذربایجان شرقی، تراورتن‌های قرمز سردارآباد، اردستان و نطنز، تراورتن‌های انار و سرچشمه کرمان و تراورتن‌های فیروزکوه تهران اشاره نمود (میرحسینی و همکاران ۱۳۹۱). در این مقاله ارتباط خصوصیات کانیایی، بافتی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تراورتن منطقه تزرج هرمزگان مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی تروارتن‌ها در شرایط خشک و اشباع از آب ممکن است منجر به پیدا کردن روابطی در پیش‌بینی رفتار بلند مدت و دوام سنگ تراورتن و انتخاب بلوک با کیفیت مناسب در سطح معدن شود.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی و ارزیابی کیفیت ماده معدنی و انجام آزمایشات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی تراورتن تزرج، تعداد ۶ بلوک نمونه با ابعاد متوسط ۳۵×۲۵×۲۵ انتخاب و به آزمایشگاه ارسال گردید. از این بلوک‌ها، نمونه‌ها و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایشات پیش‌بینی شده تهیه گردید. جهت مطالعات کانی‌شناسی و فابریک سنگ، از نمونه‌ها مقطع نازک میکروسکوپی تهیه گردید. چگالی ظاهری نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع از آب با توجه به استاندارد ASTM C127 با استفاده از حجم توده سنگ محاسبه شد. تخلخل مؤثر نمونه‌ها نیز با استفاده از روش غوطه‌ور شدن نمونه‌ها در آب تعیین گردید. روش اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوره (UCS) بر طبق روش پیشنهادی آی اس آر ام (ISRM 1981) انجام شد. در نهایت، نتایج حاصل از این آزمایشات و همچنین خصوصیات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

۳- زمین‌شناسی منطقه

تراورتن مورد مطالعه، در شمال هرمزگان نزدیک به چشمه معدنویه و در ۵ کیلومتری روستای تزرج در شهرستان حاجی‌آباد واقع شده است. محدوده‌ی مورد مطالعه از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، در زون زاگرس چین خورده قرار گرفته و از نظر تکتونیکی، محدوده‌ای فعال بوده که تحت تأثیر گسل‌های راندگی زاگرس می‌باشد. در این منطقه گسلهای کوچک متعددی وجود دارد (تصویر ۱ الف و ب) که از جنوب به گسل فرعی تراستی و ناودیس یک پلانژ برآفتاب و از شمال و شمال‌شرق به آهک‌های نومولیتی مربوط به زون کالرملانژ و آهک‌های اوربیتولین‌دار کوه رزدار می‌رسد. این محدوده شامل واحدهای آهکی آسماری-جهرم به سن ائوسن تا الیگومیوسن می‌باشد (تصویر ۱ ج). مورفولوژی منطقه مورد مطالعه نسبتاً ملایم بوده و پستی و بلندی‌های خاصی در آن مشاهده نمی‌شود. در سنگ‌های آهکی و تراورتنی منطقه آثار هوازدگی فیزیکی و فرسایش آبی حاصل از بارندگی‌ها و آب‌های زیرزمینی نیز مشاهده می‌شود. از میان سازندها و واحدهای سنگی ذکر شده، سازند آسماری مهمترین و گسترده‌ترین واحد سنگی منطقه بوده و ماده معدنی مورد نظر نیز بر روی این سازند واقع شده است. البته این سازند در نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، بصورت نامتمایز از سازند جهرم و بصورت آسماری - جهرم نشان داده شده است. برای تشکیل تراورتن در هر منطقه، وجود سنگ‌های آهکی الزامی است. آب و گاز کربنیک در شرایطی خاص باعث حل شدن سنگ آهک شده و در نهایت کربنات بصورت تراورتن رسوب می‌کند (اعلایی و همکاران ۱۳۹۱). واحدهای آهکی منطقه مورد مطالعه بصورت لایه‌های مطبق و با شیب بسیار کم به سمت جنوب غربی دیده می‌شوند که در بخش‌های سطحی بسیار هوازده و خرد شده می‌باشند (تصویر ۲ الف). ضخامت این واحد با توجه به رخنمون مشاهده شده در سمت پرتگاهی بیش از ۱۰ متر می‌باشد که قاعده نامشخص بیانگر ضخامت بیشتر آنها می‌باشد. اندازه سوراخ‌ها در تراورتن‌های منطقه از حفره‌های بسیار ریز تا حفره‌های ۲-۳ سانتی متری متغیر است؛ اما بطور متوسط بیشتر حفره‌ها قطری در حدود ۲ تا ۳ میلی‌متر دارند (تصویر ۲ ب). برخی حفره‌های بزرگ نیز با ابعاد چند ده سانتی‌متری در واحد تراورتنی دیده می‌شوند (تصویر۲ ج) که تشکیل آنها احتمالاً مربوط به وجود ناخالصی‌ها و موانع موجود در زمان رسوبگذاری واحد اصلی بوده و یا اینکه حفره‌های انحلالی آبهای زیرزمینی در دوره‌های بعدی می‌باشند. این حفره‌ها در کاربری سنگ به عنوان سنگ‌نما، یک محدودیت و نکته منفی محسوب می‌شوند. در بخشی از این تراورتن‌های آهکی، افقی وجود دارد که آثار فسیل‌های ورم تیوب (worm tube) و موجودات ارگانیک کاملاً مشخص است. این فسیل‌ها آثار تونل‌های کوچکی



تصویر ۱- الف و ب) موقعیت محدوده تراورتن تزرج در نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران، زون زاگرس چین‌خورده و گسل تراستی زاگرس و ج) موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ حاجی‌آباد

تصویر ۲- الف- لایه‌های کم شیب آهکی منطقه مورد مطالعه که در بخش سطحی شدیداً خرد شده‌اند، ب- نمایی از سطح رخنمون تراورتنی و نمونه سنگ بریده شده که در آن دامنه تغییرات اندازه حفره‌ها مشخص می‌باشد، ج و د - آثار کانالهای کوچک موسوم به ورم تیوب و زیستگاههای مواد ارگانیک در تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه

هستند که گونه‌ای خاص از کرم‌های نزدیک چشمه‌های آبگرم در آنها زندگی و زاد و ولد می‌کرده‌اند. این افق در برخی نقاط دیگر ایران (از جمله در فارس) در سازند آسماری تشخیص داده شده است. البته وجود این آثار فسیلی در برخی از رخنمون‌های منطقه، به دلیل ایجاد حفرات نسبتاً بزرگ، از کیفیت ماده معدنی به عنوان سنگ‌نما می‌کاهد (تصویر ۲ د).

۴- ویژگی‌های تراورتن‌های تزرج

در بیشتر ذخایر تراورتن کشور، سنگ معدن استخراجی فاقد رنگ بوده و اغلب به رنگ سفید شیری و کرمی دیده می‌شود (اعلایی و همکاران ۱۳۹۱). رنگ ظاهری تراورتن‌های منطقه تزرج، زرد روشن تا لیمویی می‌باشد که در برخی مناطق به دلیل تأثیر مواد ارگانیک مایل به قهوه‌ای شده است. در مجموع از نظر رنگ، تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه مانند فراوانترین تراورتن‌های موجود در طبیعت بوده و مطلوب به نظر می‌رسند. بافت اغلب نمونه‌ها لایه‌ای و تراکم حفره‌ها از نوع نرمال است. اندازه حفره‌ها از بسیار ریز تا بزرگ (چند سانتیمتری) متغیر است؛ اما اغلب حفره‌ها قطری حدود ۳ میلیمتر دارند. تراکم درزه‌ها و شکستگی‌ها در بخش‌های سطحی ذخیره زیاد (تصویر ۳)، اما در اعماق کم می‌باشد، با این وجود امکان برداشت کوپه‌های بزرگ سنگ از معدن وجود دارد. در تصویر ۴، تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه و تاثیر اکسید آهن و موارد ارگانیک بر روی آنها نمایش داده شده است.

۵- مطالعات سنگ‌نگاری

مطالعات سنگ‌نگاری، نه تنها اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشا سنگ به دست می‌دهند، بلکه در ارزیابی دوام سنگ‌ها در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی نیز ابزاری مهم به شمار می‌آید (Dreesen & Dusar 2004). مقاومت سنگ در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی، سایش و تر و خشک شدن به مقدار زیادی به پارامترهای ذاتی سنگ از جمله ترکیب کانی‌شناسی بستگی

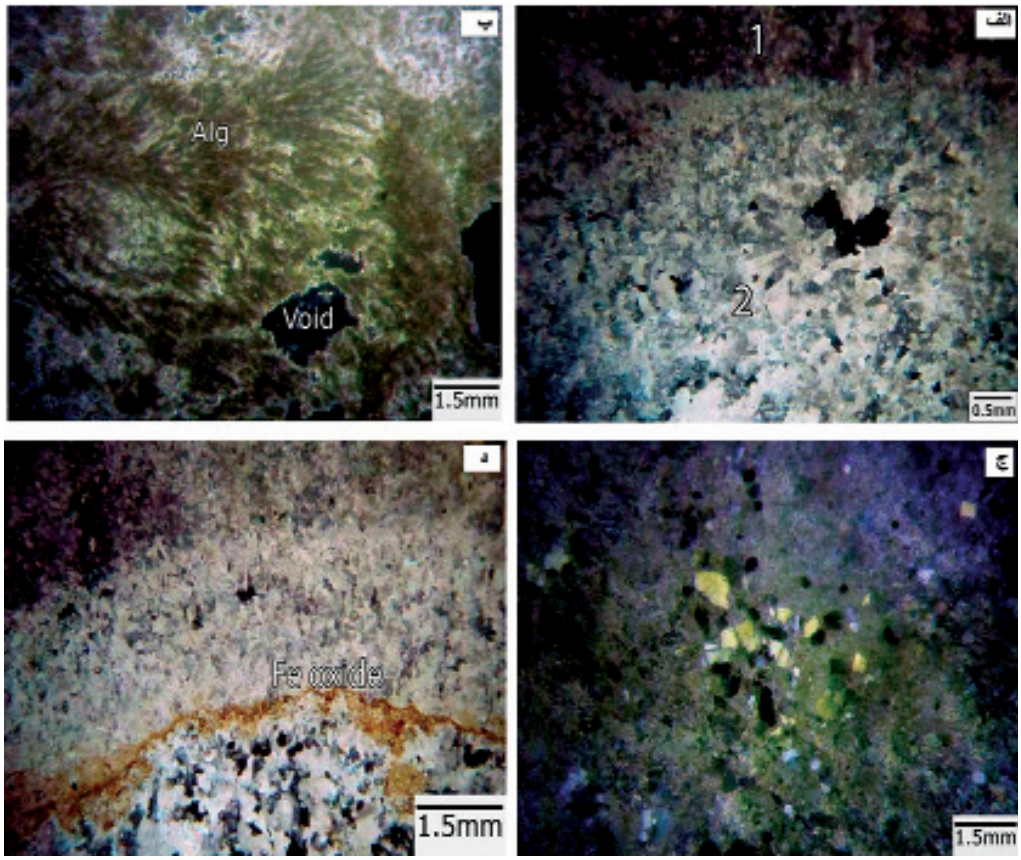
تصویر ۳- تراکم درزه‌ها و شکستگی‌ها در سینه‌کار شماره یک محدوده تراورتن تزرج

تصویر ۴-تاثیر اکسید آهن و مواد ارگانیک در تغییر رنگ و بافت لایه‌ای تراورتن تزرج

دارد. در این تحقیق، مقاطع نازک میکروسکوپی در زیر میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت. در نمونه‌های مطالعه شده، تفاوت مهمی در ترکیب کانیایی نمونه‌ها مشاهده نگردید. کانی اصلی تراورتن منطقه، کلسیت (با بیش از ۹۸ درصد) می‌باشد. کانی کوارتز حدود ۱ درصد، کانی‌های رسی حدود ۰/۵ درصد و اکسید آهن نیز در برخی از مقاطع نازک مشاهده شد. حفرات و تخلخل موجود در زمینه توسط بلورهای درشت کربنات اسپارایتی ثانویه پر شده است (تصویر ۵ الف و ب). بخشی از حجم کربنات کلسیم در نمونه به ساختارهای لامینه‌ای نمود یافته است. بر اساس تقسیم‌بندی سنگ‌های کربناته (Danham 1962)، نام سنگ را می‌توان باندستون نامید که اجزای تشکیل دهنده آن کلسیت و لامینه‌های آلی جلبکی می‌باشند (تصویر ۵ ب). کانی‌های ثانویه مانند کوارتز از ته‌نشست سیالات حاوی سیلیس در حفرات تشکیل شده‌اند (تصویر ۵ ج). سنگ‌های تراورتنی اغلب در اثر فساد مواد جلبکی و خروج گاز دی‌اکسیدکربن از محیط رسوب گذاری تشکیل می‌شوند. حفرات انحلالی در زمینه، اغلب به حالت کشیده دیده می‌شوند که نشان دهنده‌ی پیروی تخلخل از فابریک لایه‌ای در نمونه است. بخش‌های اکسیدی نیز بطور محلی در زمینه مشاهده می‌شوند (تصویر ۵ د).

۶- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

علاوه بر شرایط زمین‌شناسی و نحوه تشکیل ذخایر منطقه، شناخت پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های معادن مختلف، دید مناسبی از کاربردهای ساختمانی و مهندسی آنها فراهم می‌کند. جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، وزن مخصوص، تخلخل و جذب آب، از روش استاندارد آی اس آر ام (ISRM 1981) استفاده شده است. خلاصه‌ای از نتایج آزمایشات فیزیکی در جدول (۱) آورده شده است. بر این اساس، علت تفاوت بین چگالی خشک و اشباع نمونه‌ها، تخلخل موجود در نمونه‌ها می‌باشد (تصویر ۶). بر اساس یک رده‌بندی رایج (Anon 1979) برای چگالی و تخلخل، بیشتر نمونه‌ها در یک رده با چگالی ۲/۷۵ - ۲/۵۵ و تخلخل پایین قرار



تصویر ۵-الف) حفرات انحلالی، ۱- پر شدن توسط بلورهای درشت کربنات اسپاری ثانویه، ۲- آثار بقایای جلبکی و حفرات تخلخل ثانویه در ماتریکس ریز دانه تراورتن. ب) توسعه حفرات انحلالی توسط بقایای جلبکی با ساختار زیستی مشخص، ج) نمای کلی از مرمر کلسیتی با تجمع بلورهای کوارتز در زمینه و د) ساختارهای نواری از بلورهای کلسیت در اندازه‌های متفاوت با لامینه اکسید آهن میان لایه‌ای.

گرفته‌اند. در رابطه با میزان درصد جذب آب، اگرچه برای سنگ‌های غیر تراورتنی مقادیر بیش از ۰/۸ به دلیل تاثیر در یخ زدگی آب در خلل و فرج سنگ نامطلوب محسوب می‌شود، اما در اغلب تراورتن‌ها این مقدار می‌تواند بین ۰/۹ تا ۱/۳ و گاهی نیز بیشتر تغییر کند. در مورد تراورتن‌های مورد مطالعه، این مقدار از ۱ تا ۱/۸ افزایش نشان می‌دهد که این افزایش مقداری معمولی به نظر می‌رسد. برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی، از روش استاندارد (ISRM 1981) استفاده شده است. نتایج حاصل از مقاومت فشاری یک محوره در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM، تنش فشاری حداقل حدود ۵۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. سنگهای منطقه تزرج بین ۲۵ تا ۴۵ درصد مقاومت کمتری نشان می‌دهند (ویژگی منفی این سنگ‌ها) می‌باشد. از جمله عوامل احتمالی مؤثر در این امر می‌توان به وجود درزه‌های میکروسکوپی، آثار ورم تیوبها و ... اشاره نمود. نکته قابل توجه آن است که مقاومت فشاری اغلب تراورتن‌های ایران، از حد استاندارد پایین‌تر می‌باشد، بطوریکه حتی تراورتن‌های استان مرکزی و آذربایجان شرقی که مرغوبترین تراورتن‌های صادراتی ایران می‌باشند نیز مقاومت فشاری کمتر از حد استاندارد دارند (جدول ۲).

۷- تجزیه و تحلیل رگرسیون

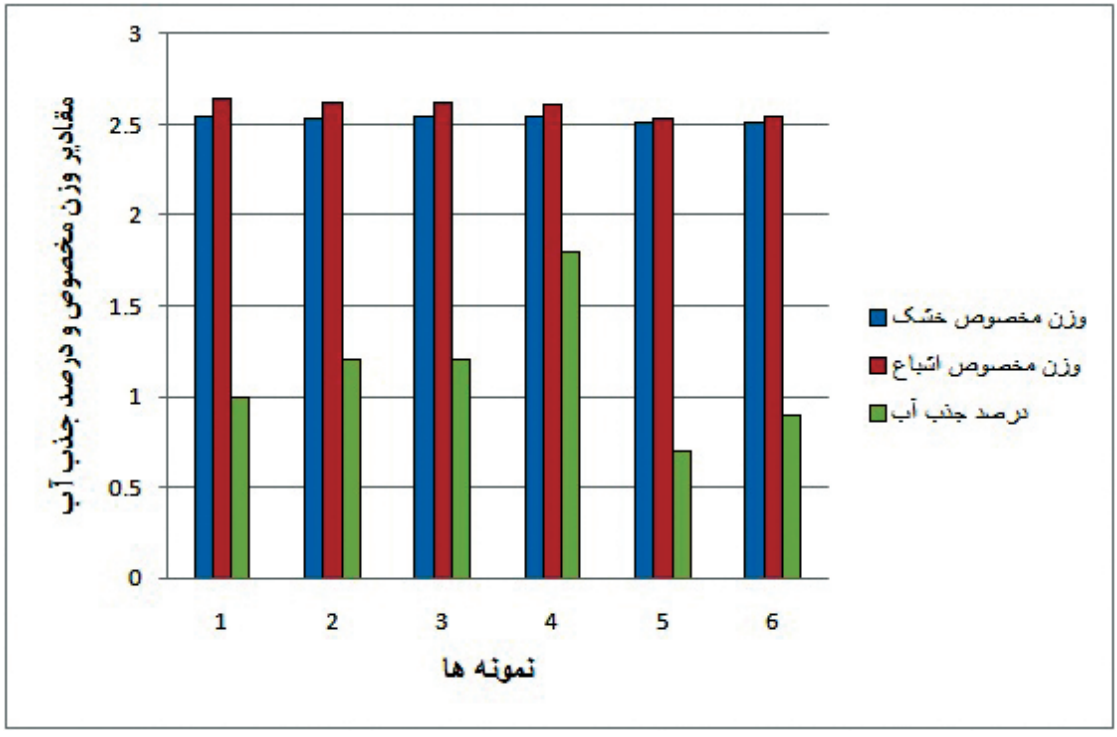
برای روشن شدن رابطه بین پارامترهای اندازه‌گیری شده، از تجزیه و تحلیل آماری استفاده شده است. چگالی خشک به عنوان تابعی از

جدول ۱- نتایج آزمون تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تزرج

شماره نمونه	وزن مخصوص (gr/cm3)		مقاومت فشاری یک محوره (MPa)		درصد تخلخل کل
	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
۱	۲.۵۴۱	۲.۶۴۴	۳۹.۶	۳۴.۳	۴.۴
۲	۲.۵۳	۲.۶۱۲	۳۸	۳۳.۵	۹.۹۸
۳	۲.۵۴	۲.۶۱۷	۲۷.۲	۲۵.۱	۱۶.۲
۴	۲.۵۳۵	۲.۶۱۱	۳۸.۱۹	۳۶.۵۲	۱۰.۲۴
۵	۲.۵۰۲	۲.۵۲۴	۳۰.۲۹	۲۸.۴۵	۱۳.۱۳
۶	۲.۵۰۹	۲.۵۴۲	۳۱.۹۴	۳۱.۱	۱۰.۲۴

جدول ۲- مقایسه مقادیر متوسط برخی ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی تراورتن‌های تزرج با تراورتن‌های استان مرکزی و آذربایجان شرقی

مناطق	وزن مخصوص (gr/cm3)	جذب آب	مقاومت فشاری خشک Kg/cm^2	مقاومت فشاری اشباع Kg/cm^2
مرکزی	۲.۴۶	۱/۷۲	۴۷۴/۴	۳۶۰/۴
مرکزی	۲.۶	-	۶۰۵	۵۰۴
آذربایجان‌شرقی	۲.۶۷	۲/۴۹	۵۰۶	۲۳۸
تزرج	۲.۶۲	۱	۳۷۱/۵	۲۹۷/۶



تصویر ۶- مقایسه وزن مخصوص و درصد جذب آب تراورتن‌های تزرج

چگالی اشباع اندازه‌گیری شده و در تصویر (۷) نشان داده شده است. با توجه به اینکه کلسیت تشکیل دهنده اصلی تراورتن‌ها می‌باشد، چگالی اندازه‌گیری شده باید در زیر خط نظری باشد. (Török & Vásárhelyi 2010)

$$psat = \frac{pcaco3 - pwater}{pcaco3} pdry + pwater$$

چگالی کلسیت ($CaCO_3$) و آب به ترتیب ۲/۷۱ و یک گرم بر سانتیمتر مکعب است، بنابراین مقدار خط نظری برابر است با:

$$p_{sat} = 0.631\, p_{dry} + 1$$

بر اساس نتایج تجربی، تراورتن‌ها اغلب در زیر خط نظری قرار می‌گیرند این مسأله نشان دهنده‌ی آن است که اشباع شدگی کامل صورت نمی‌گیرد. در این پژوهش، درصد نفوذ آب در مقاومت فشاری یک محوره نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری یک محوره در شرایط اشباع از آب اندازه‌گیری شده و به عنوان تابعی از مقاومت در شرایط خشک رسم گردید (تصویر ۸). به نظر می‌رسد که مقاومت سنگ در حالت اشباع نسبت به حالت خشک بصورت خطی تغییر می‌کند.

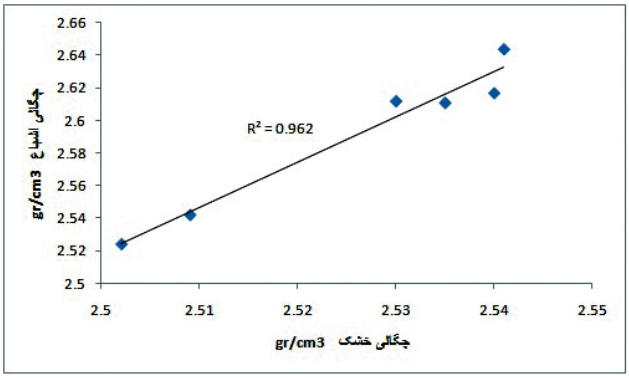
هدف دیگر این مطالعه، بررسی ارتباط بین چگالی و تخلخل تراورتن با مقاومت فشاری یک محوره می‌باشد. مقاومت فشاری یک محوره به عنوان تابعی از چگالی در تصویر (۹) نشان داده شده که همبستگی مثبت ضعیفی را نشان می‌دهند. در تراورتن‌های منطقه، بین مقاومت فشاری یک محوره و تخلخل کل همبستگی منفی واضحی وجود دارد (تصویر ۱۰). علاوه بر آزمایش‌های بیان شده، آزمون‌های غیر مخرب مانند سرعت امواج التراسونیک نیز جهت محاسبه مقاومت تراورتن‌ها کاربرد دارد.

۸- بحث

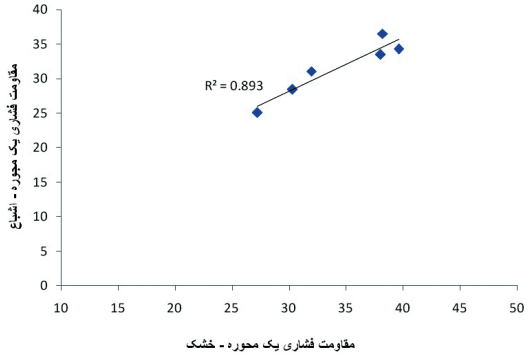
داده‌ها و نتایج حاصل از آزمایشات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تراورتن تزرج نشان داد که بین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های توده‌ای و متخلخل، تفاوت‌هایی وجود دارد. سؤال اصلی آن است که میکروفابریک‌ها، چگونه دوام تراورتن‌ها را کنترل می‌کنند. یکی از پارامترهای مهم مؤثر در فابریک تراورتن‌ها، تخلخل می‌باشد. در مطالعات انجام شده، بین تخلخل کل و وزن مخصوص خشک یک رابطه خطی تعیین گردیده است (Tugral & Zarif 2000 ; Sabatakakis et al. 2008). بر خلاف این تئوری، رابطه بین تخلخل مؤثر و وزن مخصوص خشک با یک رابطه غیر خطی توسط (Tugrul 2004) مشخص شده است.

بدین ترتیب، در دیاگرام‌های متفاوت که رگرسیون پارامترهای مختلف تراورتن‌های منطقه تزرج رسم شده، پارامترها تا حدودی با هم تداخل دارند (تصویر های ۷ تا ۱۰). به نظر می‌رسد که تخلخل عامل اصلی کنترل کننده دوام و استحکام تراورتن‌ها می‌باشد. تأثیر این عامل در شرایط خشک و اشباع به یک اندازه مهم نمی‌باشد (Török & Vásárhelyi 2010). براساس تجزیه و تحلیل رگرسیون، بین تخلخل مؤثر و مقاومت فشاری یک محوره همبستگی منفی وجود دارد (تصویر ۱۰). پارامترهای دیگری مانند چگالی و UCS (تصویر ۹) ارزش R_2 بالاتری داشته، در نتیجه ارتباط بهتری بین این پارامترها وجود خواهد داشت. اگرچه تراورتن‌های مطالعه شده، فابریک های متفاوتی را نشان می‌دهند، اما تجزیه و تحلیل آماری نشان داده است که چگالی اشباع و خشک نمونه‌های تراورتن دارای ضرایب همبستگی بالا می‌باشند (تصویر ۷).

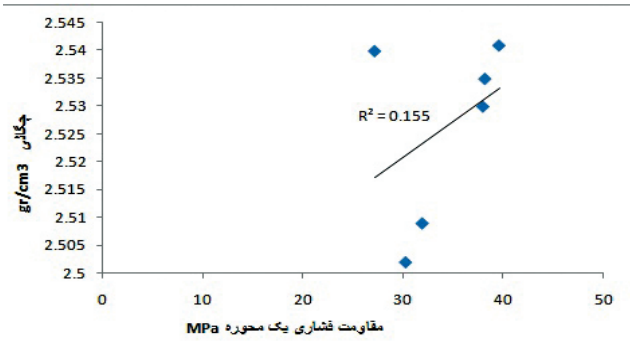
UCS با مقدار تخلخل رابطه عکس دارد که رابطه غیر خطی آنها نیز توسط توگرول (Tugrul 2004) و سبتکاکیز و همکاران-



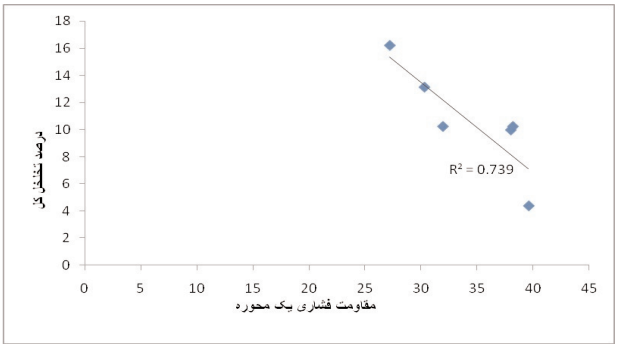
تصویر ۷-رابطه بین چگالی خشک و اشباع در تراورتن‌های تزرج



تصویر ۸- مقاومت فشاری یک محوره اشباع تابعی از مقاومت



تصویر ۹ - رابطه بین مقاومت فشاری یک محوره و چگالی



تصویر ۱۰- تأثیر درصد تخلخل کل بر مقاومت فشاری یک محوره تراورتن تزرج

(Sabatakakis et al. 2008) بیان گردیده است. نتایج این مطالعه نشان داد که در تراورتن ها، تخلخل در شرایط خشک و اشباع از آب رفتار متفاوتی را نشان می دهد. کاهش مقاومت تراورتن ها با افزایش مقدار آب، توسط هاوکینز (Hawkins 1998) و واسرهلی (Vasarhelyi 2003) ثابت شده است. در نهایت، مطالعات انجام شده نشان داد که تراورتن های تزرج دارای درصد جذب پایین آب و همچنین مقاومت فشاری یک محوره متوسط تا بالا می باشند. زیرا بر اساس رده‌بندی آنون (Anon 1979) برای چگالی و تخلخل، بیشتر نمونه ها در رده با چگالی بالا (۲/۷۵ - ۲/۵۵) و تخلخل بالا (بیشتر از ۵ درصد) قرار گرفته اند. با توجه به رده‌بندی سنگ ها بر اساس مقاومت فشاری تک محوره ارائه شده توسط بروچ و فرانکلین (Broch & Fran klin 1972) سنگ‌های مورد مطالعه دارای مقاومت بالا می باشند (۵۰ - ۲۰ مگاپاسکال).

۹- نتیجه‌گیری

-بر اساس نتایج حاصله و با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، بین تراورتن های با فابریک‌های مختلف، تفاوت‌هایی وجود دارد. به عنوان مثال؛ تراورتن های توده‌ای و فشرده، دارای چگالی بالاتر، درصد تخلخل کم و مقاومت فشاری یک محوره بالاتری می باشند. داده‌های موجود جهت تجزیه و تحلیل رگرسیون ها برای تراورتن های تزرج کافی نبوده اما با توجه به ویژگی های مختلف داده ها، می توان به مقایسه آنها پرداخت.

-با وجود تفاوت در فابریک تراورتن های تزرج، رگرسیون های خطی بین چگالی خشک و اشباع و مقاومت فشاری یک محوره خشک و اشباع نیز برقرار است.

-تخلخل لزوماً منعکس کننده مقاومت تراورتن نبوده، بلکه مشخص کننده ارتباط نمایی نسبتاً خوب بین چگالی و مقاومت فشاری یک محوره می باشد.

-جهت محاسبه مقاومت تراورتن ها نیز می توان از آزمون های غیر مخرب مانند سرعت امواج التراسونیک نیز استفاده نمود.

-تراورتن های تزرج دارای درصد جذب پایین آب و همچنین مقاومت فشاری یک محوره متوسط تا بالا می باشند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، سپاسگزار حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس می باشند.

مراجع

اعلایی، م.، باقرپور، ر. و یزدی، م.، ۱۳۹۱.بررسی تأثیر مشخصات فیزیکی و شیمیایی نهشته های تراورتن بر پارامترهای استخراج در معادن طرق. فصلنامه زمین شناسی کاربردی، سال هشتم، شماره ۴، ۳۰۰ - ۲۸۵.

بسطامی، ف.، ۱۳۸۳. راهنمای سنگ ایران. انتشارات روشان روز، ۱۴۵ ص.

پارسایی،م.، ۱۳۸۲. کتاب طلایی معدن. انتشارت ماهرنگ، ۴۴۳ ص.

قبادی، م.، خانلری، غ.، محسنی، ح. و کارگریان، س.، ۱۳۸۹. ارتباط بین خصوصیات سنگ شناسی و ویژگی های تراورتن های درنگه کهریز (شرق همدان). پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط زیست.

میرحسینی، س.م؛ اسدپور، غ.و نوری، م.، ۱۳۹۱. گزارش پایان اکتشاف تراورتن معدنویه حاجی آباد. سازمان صنعت، معدن و تجارت هرمزگان، ۷۸ ص.

Anon, A., 1979. Classification of rocks & soils for engineering geological mapping.part 1: Rock and soil materials. *Bulletin International Association Engineering Geology, Vol. 19 (1): 364-371.*

Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordnez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structur and strength. *Eng. Geol. Vol. 74: 113-127.*

Broch, E. , Franklin, J. A., 1972. The point - load test.

International journal of rock mechanics and mining science & mechanics, abstracts, Vol. 9: 669 - 676.

Colback, P.S.B., Wiid, B.L., 1965. The Influence of Moisture Content on the Compressive Strength of Rock,. Proc. 3rd. Canadian Rock Mech, Symp, 65-83.

Dreesen, R., Dusar, M., 2004. Historical building stones in the province of Limburg NE Belgium. *role of petrography in provenance and durability assessment, Materials Characterization, Vol. 53: 273- 287.*

Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. *In, W.E. Hamm (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, A Symposium. American Association of Petroleum Geologists, 108-121.*

Dunn, D.E., LaFountain, L.J., Jackson, R.E., 1973. Porosity dependence *and* mechanism of brittle fracture in sandstones. *J. Geophys, Res,Vol.78: 2403-2417.*

Ford, T.D., Pedley, H.M., 1992. Tufa deposits of the world. *J. Speleol. Soc. Japan, Vol.17: 46-63.*

Gandin, A., Capezzuoli, E., 2014. Travertine: Distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring system. *Sedimentology, Vol. 61: 264 - 290.*

Haney, M.G., Shakoor, A., 1994. The Relationship Between Tensile & Comprehensive Strengths for Selected Sandstones as Influenced by Index Properties *and* Petrographic Characteristic. *Proc, 7th IAEG Cong. Lisbon, Portugal, Vol. II,. 493-500.*

Hatzor, Y.H., Palchik, V., 1997. The influence of grain size and porosity on crack initiation stress *and* critical flaw length in Dolomites. *Int, J. Rock Mech, Min. Sci. Vol. 34: 805-816.*

Hawkins, A.B., McConnell, B.J., 1992. Sensitivity of sandstone strength *and* deformability to changes in moisture content. *Q. J. Eng, Geol. Vol .25: 115-130.*

Hawkins, A.B., 1998. Aspects of rock strength. *Bull. Eng. Geol. Environ. Vol. 57: 17 - 30.*

Hecht, C.A., Bönsch, C., Bauch, E., 2005. Relations of rock structure *and* composition to petrophysical & geomechanical rock properties: examples from permocarboniferous red-beds. *Rock Mech. Rock Eng. Vol.38: 197-216.*

Hoshino, K., 1974. Effect of Porosity on the Strength of the Clastic Sedimentary Rocks. *Proc, 3rd Int, Cong. ISRM, Denver, USA, Vol. II, part A, 511-516.*

I.S.R.M. 1981. Rock characterization, Testing *and* monitoring. *In: Brown ET, editor., ISRM suggested methods, Oxford: Pergamon Press, 211pp.*

Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamehchiyan, M., Zalooli, A., 2014. Statistical Models for Predicting the Mechanical Properties of Travertine Building Stones After Freeze-Thaw Cycles. *Engineering Geology for Society and Territory - Vol.8 477-481.*

Kelsall, P.C., Watters, R.J., Franzone, J.G., 1986. Engineering Characterization of Fissured, Weathered Dolerite *and* Vesicular Basalt. *Proc. 27th US Rock Mech, Symp, Tuscaloosa, USA, June 23-25, 77-84.*

Li, L., Aubertin, M., 2003. A general relationship between porosity *and* uniaxial strength of engineering materials. *Can. J. Civ. Eng. Vol.30: 644-658.*

Onodera, T.F., Kumara, H.M., 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bull, Assoc. Eng, Geol. Vol.22: 173-177.*

Onodera, T.F., Yoshinaka, R., Oda, M., 1974. Weathering *and* Its Relation to Mechanical Properties of Granite. *Proc, 3rd ISRM Cong. Denver, USA, Vol. II, part A: 71-78.*

Palchik, V., 1999. Influence of porosity *and* elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones. *Rock Mech, Rock Eng,Vol.32: 303-309.*

Pentecost, A., 2005. Travertine. *Springer-Verlag, Berlin, 445 pp.*

Prikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int, J. Rock Mech, Min. Sci. Vol. 38: 671-682.*

Romana, M., Vásárhelyi, B., 2007. A Discussion on the Decrease of Unconfined Compressive Strength Between Saturated *and* Dry Rock Samples. *In: Soussa, L.R., Ollala, C., Grossmann, N.F. (Eds.), Proc. of 11. ISRM Cong. Lisboa, "The Second Half Century of Rock Mechanics". Taylor & Francis, 139-142. I.*

Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., Papanakli, S., 2008. Index properties *and* strength variations controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Eng. Geol. Vol.97: 80-90.*

Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., Papanakli, S., 2008. Index properties *and* strength variations controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Eng. Geol. Vol.97: 80-90.*

Sindraba, I., Normandin, K.C., Cultrone, G., Scheffler, M.J., 2004. Climatological *and* regional weathering of Roman travertine. *In: Prikryl, R., Siegel, P. (Eds.), Architectural and Sculptural Stone in Cultural Landscape, Carolinum Press, Prague, 211-22*

Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A., Volkov, V.A., 1970. Determinations of Correlation Relationships Between Strength *and* Some Physical Characteristics of Rocks. *Proc. 2nd ISRM Cong. Belgrade, Yugoslavia, Vol. II. Theme 3-6.*

Török,Á, 2006a. Hungarian travertine: weathering forms and durability. *In: Fort, R., Alvarez de Buego, M., Gomez-*

Török,Á., 2006b. Influence of fabric on the physical properties of limestones. *In: Kourkoulis, S.K. (Ed.), Fracture and Failure of Natural Building Stones, Springer, Dordrecht, 487-495.*

Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 2004. Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Eng. Geol, Vol.72: 261-273.*

Tugrul, A., Zarif, I.H., 2000. Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. *Bull. Eng, Geol. Environ. Vol. 58: 191-206.*

Tugrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry *and* compressive strength of selected rock types from Turkey. *Eng. Geol. Vol.75: 215-227.*

Vásárhelyi, B., Ván, P., 2006. *Influence of the water content for the strength of the rock. Eng, Geol. 84, 70-74.*

Vásárhelyi, B., 2003. Some observation regarding the strength *and* deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions. *Bull. Eng, Geol. Environ. 62,*

Wong, R.H.C., Chau, K.T., Wang, P., 1996. Microcracking *and* grain size effect in Yeun Long marbles. *Int. J. Rock Mech. Min, Sci. Geomech. Abstr.Vol.33: 479-48.*