

ارزیابی ویژگی‌های مهندسی تراورتن‌ها و ارتباط بین آنها - مطالعه موردی: معدن سنگ ساختمانی باباحافظ دامغان

داود فریدونی^{۱*}، رضا خواجهوند^۲

^{۱*} - دانشیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، d.fereidooni@du.ac.ir

^۲ - کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران reza.khajevand@yahoo.com

چکیده فارسی

به منظور ارزیابی ویژگی‌های مهندسی تراورتن‌ها، شش نمونه سنگ تراورتن از قسمت‌های مختلف معدن سنگ ساختمانی باباحافظ دامغان انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند. به کمک بررسی‌های آزمایشگاهی ترکیب کانی‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و ویژگی‌های مکانیکی این سنگ‌ها مشخص گردید. تراورتن‌های انتخاب شده با رنگ سفید تا شیری عمدتاً از کانی‌های آراگونیت و کلسیت تشکیل شده‌اند. بر اساس نتایج آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی، تراورتن‌های مورد مطالعه دارای دانسیته متوسط و تخلخل کم تا متوسط می‌باشند. به همین دلیل مقدار سرعت سیر موج طولی در این سنگ‌ها زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. این سنگ‌ها، از نظر ویژگی‌های مکانیکی نظیر مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت برشی پانچ و مقاومت فشاری تک‌محوری به ترتیب در رده سنگ‌های خیلی مقاوم، دارای مقاومت متوسط و نسبتاً مقاوم، طبقه‌بندی می‌شوند. در پایان، با انجام تحلیل‌های رگرسیونی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده، روابط تجربی با ضرایب همبستگی قابل قبولی به دست آمد. این روابط، تعیین پارامترهای مهندسی این سنگ‌ها را با دقت بالایی به کمک یکدیگر امکان‌پذیر می‌سازند.

واژه‌های کلیدی: تراورتن، ویژگی‌های فیزیکی، دوام، ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت

Evaluating the engineering properties of travertines and their correlations - a case study: Baba-Hafez quarry of Damghan

Abstract

To assess engineering characteristics of travertines, six travertine's rock samples were selected from different parts of Cheshmeh-Hafez quarry of Damghan and transferred to the laboratory. Mineralogical, physical and mechanical properties of the rocks were determined in the laboratory. The selected travertines with different colors are dominantly composed of calcite and aragonite. According to the results of physical tests, the studied travertines have moderate density and low to moderate porosity. For this reason, the longitude wave velocity is high and very high in these rocks. According to the mechanical properties such as point load strength, punch shear strength and uniaxial compressive strength, these rocks are classified as very strong, moderately strong, and strong rocks, respectively. Finally, the empirical equations with acceptable correlation coefficients were obtained using regression analysis between evaluated parameters. The engineering parameters of these rocks are possible to evaluate with high accuracy from each other using these equations.

Keywords: Travertine; Physical properties; Durability; Mechanical properties; Strength

مقدمه

امروزه سنگ‌ها به طور گسترده‌ای به عنوان مصالح ساختمانی نظیر سنگ نمای دیوارها، سنگ پله، مالون، سنگ‌فرش و دیگر سنگ‌های ابعادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما عوامل مخرب فیزیکی، شیمیایی و زیستی می‌توانند در دوران استفاده از این سنگ‌ها منجر به تخریب و فروپاشی ساختار آنها شوند. عوامل جوی، آلودگی هوا و میکروارگانیسم‌ها از عوامل مهم تخریب این سنگ‌ها به حساب می‌آیند (Pitzurra et al., 2003). میزان تخریب سنگ‌های ساختمانی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی، بافت و ساختار سنگ و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها می‌باشد (Prikryl et al., 2003). به همین دلیل باید قبل از انتخاب سنگ‌های ساختمانی، آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی به منظور ارزیابی مقاومت و دوام آنها در برابر عوامل تخریب و فرسایش صورت گیرد. لذا بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی برای شناخت میزان مناسب بودن یک سنگ برای استفاده به عنوان سنگ ساختمانی ضروری می‌باشد.

تراورتن یک سنگ رسوبی شیمیایی است که عمدتاً در نواحی تکتونیکی تشکیل می‌شود و به دلیل فراوانی، زیبایی و رنگ، سهولت در بهره‌برداری و بافت شاخص، به عنوان یک سنگ ساختمانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و در بسیاری از کشورها استخراج شده و در فعالیت‌های ساختمانی به کار گرفته می‌شود (Chentout et al., 2015). تراورتن‌ها عمدتاً از کربنات کلسیم (CaCO_3) تشکیل شده‌اند و عموماً نسبت به سایر سنگ‌های کربناته مانند سنگ‌آهک دارای تخلخل بیشتری می‌باشند. علیرغم تخلخل زیاد، برش‌های صیقلی تراورتن‌ها به دلیل زیبایی به عنوان پوشش بیرونی دیوارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما فرآیند تجزیه و تخریب این سنگ‌ها خصوصاً در مناطق پربارش و دارای آلودگی زیاد هوا می‌تواند در مدت زمان نسبتاً کوتاهی در نتیجه انحلال کربنات کلسیم و تشکیل پوسته‌ای غنی از سولفات کلسیم رخ دهد (Schneider et al., 2008). در طی این فرآیند، ابتدا ژپس در حفرات سنگ تشکیل می‌شود و فشار تبلور دوباره، تخریب لایه‌های سطحی را شتاب می‌بخشد. بنابراین، تراورتن‌ها نیز مانند بیشتر سنگ‌های کربناته، تحت شرایط اسیدی افزایش در نرخ انحلال را تجربه می‌کنند (Mahmutoglu et al., 2003). همچنین، این سنگ‌ها به طور گسترده‌ای در بازسازی بناها و مقبره‌های تاریخی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در راستای بررسی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های مختلف و تعیین همبستگی بین پارامترهای مهندسی آنها تاکنون پژوهش‌های زیادی توسط محققین مختلف انجام شده است. در این خصوص، Singh et al. (2001) بیان کردند که رفتار ژئوتکنیکی سنگ‌ها به پارامترهای مختلفی از جمله اندازه دانه‌های سنگ، منشأ سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، درجه هوازدگی، تخلخل و جهت بارگذاری بستگی دارد. Willard and McWilliams (1969) گزارش دادند ریز ساختارها که شامل رخ کانی‌ها، مرز دانه‌ها و ریز ترک‌ها می‌باشند، تأثیر زیادی بر مقاومت و جهت گسیختگی سنگ‌ها دارند. Shalabi et al. (2007) نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌بکر عمدتاً متأثر از نوع سنگ، بافت، فابریک و کانی‌های سازنده آن سنگ است. بر اساس مطالعات Fereidooni (2014) و Khanlari et al. (2014)، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به ترکیب کانی‌شناختی و ساختارهای موجود در آن سنگ بستگی دارد. Yasar and Erdogan (2004) به تعیین همبستگی بین سرعت سیر موج با دانسیته، مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌های کربناته پرداختند. Palchik and Hatzor (2004) تأثیر تخلخل بر مقاومت فشاری و کششی گچ متخلخل را مورد بررسی قرار دادند. Fereidooni (2016) با ایجاد همبستگی میان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی به تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی سنگ‌های هورنفلسی پرداخته است. همه این مطالعات مشخص کرده‌اند که پارامترهای مهندسی سنگ‌های مختلف مرتبط با یکدیگر هستند و به هنگام انتخاب این سنگ‌ها به عنوان مصالح ساختمانی نباید نادیده گرفته شوند.

برخلاف استفاده گسترده از تراورتن‌ها به عنوان سنگ ساختمانی، مطالعات کمی پیرامون ویژگی‌های مهندسی و فرآیند تخریب این سنگ‌ها انجام شده است (Akin and Ozsan 2010). شناخت فرآیند تخریب طولانی مدت نه فقط برای انتخاب تراورتن جهت مصارف ساختمانی، بلکه در آینده برای حفظ و نگهداری سازه‌هایی که از این نوع سنگ در آنها استفاده شده است، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل در پژوهش حاضر با هدف شناخت ویژگی‌های مهندسی تراورتن‌های معدن باباحافظ دامغان، ابتدا بر روی شش نمونه تراورتن انتخاب شده از این معدن، بررسی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی انجام شده و سپس با تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، ارتباط بین این ویژگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

موقعیت زمین شناسی معدن

معدن تراورتن باباحافظ دامغان به عنوان یک معدن سنگ ساختمانی روباز با مساحت نسبتاً کم، در کیلومتر ۲۸ جاده چشمه علی، در نزدیکی روستای آستانه و در بین پیشارکوه و انبهکوه در شمال غرب شهر دامغان قرار گرفته است. از نظر زمین شناسی این معدن در زون ساختاری البرز واقع شده و به وسیله چشمه های موجود در منطقه در امتداد شاخه های فرعی گسل آستانه طی انحلال دولومیت و آهک ستبر لایه و ورمیکوله سازند الیکا نهشته شده است. مختصات جغرافیایی معدن و محل های نمونه برداری $36^{\circ} 26' 60''$ N، $54^{\circ} 11' 42''$ E است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۴۴۵ متر می باشد. تراورتن های این معدن با سن کواترنری عمدتاً حفره دار هستند و در رنگ های سفید، شیری، کرمی و بعضاً قهوه ای روشن دیده می شوند که بعد از استخراج و فرآوری به عنوان سنگ ساختمانی در قسمت های مختلف سازه های عمرانی و در مناطق مختلف ایران مورد استفاده قرار می گیرند.

روش انجام پژوهش

به منظور انجام این پژوهش، با استفاده از نقشه های زمین شناسی، تصاویر هوایی و عکس های ماهواره ای محدوده مورد نظر برای نمونه برداری مشخص گردید. طی بازدیدهای صحرایی سنگ های مورد نظر و محل های نمونه برداری به طور دقیق تعیین شدند و شش بلوک سنگی با وزن حدود ۳۰ کیلوگرم از محل های مختلف سینه کار معدن برداشت شدند و به آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی منتقل شدند. در آزمایشگاه، پس از تهیه مقاطع نازک و مطالعات سنگ شناسی، طبقه بندی و نام گذاری نمونه های مورد مطالعه انجام شد. آزمایش های تعیین ویژگی های فیزیکی، سختی و اجهشی اشمیت و سرعت سیر موج مطابق استانداردهای مربوطه صورت گرفت. جهت بررسی ویژگی های مکانیکی، با تهیه مغزه های استوانه ای و نمونه های دیسکی شکل از بلوک های سنگی انتخاب شده، آزمایش های مقاومت بار نقطه ای، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت پانچ بلوکی و مقاومت فشاری تک محوری، انجام پذیرفت. در مرحله پایانی، ارتباط بین پارامترهای تعیین شده به کمک تحلیل رگرسیونی انجام شد و نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج و بحث

۱- ویژگی های فیزیکی

در پژوهش حاضر، ویژگی های فیزیکی نمونه های مورد مطالعه، شامل وزن مخصوص (G_s)، وزن واحد حجم خشک (γ_{dry})، وزن واحد حجم اشباع (γ_{sat})، تخلخل (n) و جذب آب (W_a) مطابق با روش پیشنهادی (ISRM, 2007)، تعیین شده اند. این آزمایش ها بر روی شش مغزه سنگی تهیه شده از هر بلوک انجام پذیرفت و از مقادیر به دست آمده میانگین گیری به عمل آمده است. بنابراین مجموعاً تعداد ۳۶ عدد مغزه استاندارد برای تعیین ویژگی های فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر میانگین ویژگی های فیزیکی تعیین شده برای سنگ های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. از بین نمونه های مورد مطالعه، نمونه TS_6 دارای کمترین مقدار واحد حجم خشک و بیشترین مقدار تخلخل می باشد. از سوی دیگر، نمونه TS_2 دارای بیشترین مقدار واحد حجم خشک و تخلخل نسبتاً زیاد می باشد که دلیل این موضوع حضور کانی های فرعی دارای چگالی زیاد در ترکیب این نمونه می باشد. این موضوع برای نمونه TS_5 نیز صادق است، زیرا با داشتن واحد حجم خشک زیاد دارای تخلخل نسبتاً زیادی می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقدار تخلخل و حضور کانی های چگال در ترکیب تراورتن های مورد مطالعه، تأثیر مستقیم بر وزن واحد حجم این سنگ ها دارند. بر اساس طبقه بندی آنون (Anon, 1979)، نمونه های مورد مطالعه از نظر وزن واحد حجم خشک، در رده سنگ های دارای واحد حجم متوسط و از نظر تخلخل در رده سنگ های دارای تخلخل کم تا متوسط قرار می گیرند.

۲- سختی و اجهشی اشمیت

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی سختی و اجهشی اشمیت از چکش تیپ L با انرژی موثر ۰/۷۳۵ نیوتن متر و روش پیشنهادی استاندارد (1978) ISRM استفاده شده است. برای سنگ‌های مورد مطالعه، مقادیر عددی میانگین سختی و اجهشی در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که نمونه TS₆ که دارای کمترین مقدار واحد حجم خشک و بیشترین مقدار تخلخل است دارای کمترین مقدار سختی و اجهشی اشمیت می‌باشد. از سوی دیگر نمونه TS₂ که دارای بیشترین مقدار واحد حجم خشک در بین نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد، دارای سختی و اجهشی کمی است که دلیل این موضوع تخلخل بیشتر این نمونه می‌باشد.

۳- سرعت سیر موج طولی

در این پژوهش، آزمایش سرعت سیر موج طولی (P) به روش پالس ماورای صوت فرکانس پایین بر اساس استاندارد ISRM (2007) بر روی مغزه‌های تهیه شده از تراورتن‌های مورد مطالعه انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، TS₁ و TS₂ با مقادیر سرعت سیر موج طولی ۵۹۸۴ و ۴۱۹۸ متر بر ثانیه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار سرعت سیر موج هستند. علت سرعت سیر موج زیاد در نمونه TS₁، واحد حجم خشک زیاد و تخلخل کم این نمونه است. نمونه TS₂ که دارای بیشترین مقدار واحد حجم خشک و تخلخل زیادی در بین نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد، ولی دارای کمترین مقدار سرعت سیر موج می‌باشد. این موضوع بیانگر اهمیت تخلخل در میزان سرعت سیر موج می‌باشد. به عبارت دیگر در سنگ‌های مورد مطالعه، سرعت سیر موج توسط مقدار تخلخل آنها کنترل می‌شود. مطابق با طبقه‌بندی Anon (1979)، تراورتن‌های مورد مطالعه از نظر سرعت سیر موج طولی در رده سنگ‌های دارای سرعت سیر موج بالا و خیلی بالا قرار می‌گیرند. این سنگ‌ها با توجه به نظر (Bell, 2000)، از نظر سرعت سیر موج طولی در رده سنگ‌های تازه و فاقد هوازدگی طبقه‌بندی می‌شوند.

۵- مقاومت بار نقطه‌ای

آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای^۱ مطابق با روش پیشنهادی (2007) ISRM و (1995) ASTM بر روی مغزه‌های استوانه‌ای تهیه شده با نسبت طول به قطر واحد به صورت محوری انجام پذیرفت. شکل ۱، الگوی گسیختگی تراورتن‌های مورد مطالعه بعد از انجام آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای را نشان می‌دهد که در نتایج همه نمونه‌های آزمایش شده صحیح می‌باشد زیرا همه سطوح گسیختگی، نقاط محل قرارگیری فک‌های دستگاه آزمایش را به یکدیگر متصل می‌کنند. نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در جدول ۱ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج حاصل از انجام این آزمایش، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (I_{s(50)})^۲ نمونه‌های TS₁ و TS₆ به ترتیب با مقادیر معادل ۹/۱۵ و ۵/۴۱ مگاپاسگال، دارای بیشترین و کمترین مقاومت می‌باشند و میانگین آن در نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۷/۳۳ مگاپاسگال است. مشابه مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت بار نقطه‌ای در تراورتن‌های مورد مطالعه توسط مقادیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها کنترل می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی Franklin and Broch (1972)، تراورتن‌های مورد مطالعه در رده با مقاومت خیلی بالا قرار می‌گیرند.

۶- مقاومت کششی برزیلی

روش انجام آزمایش برزیلی (BT)^۳ به منظور تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم سنگ‌ها توسط استانداردهای (2007) ISRM و (1996) ASTM ارائه شده است. در این آزمایش مغزه‌های قرصی شکل سنگ توسط دو فک قوسی شکل دستگاه برزیلی

1. Point load test
2. Point load strength index
3. Brazilian test

تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرند تا در جهت عمود بر محور بارگذاری تحت کشش قرار گرفته و گسیخته شوند. برای انجام این آزمایش از مغزه‌های استاندارد تهیه شده، نمونه‌های قرصی شکل با نسبت طول به قطر ۰/۵ تهیه گردید و مطابق با استانداردهای مذکور تحت آزمایش قرار گرفت. الگوی گسیختگی برخی از نمونه‌های آزمایش شده بعد از انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلی، در شکل ۱ نشان داده شده است که بصورت سطوح گسیختگی موازی با جهت بارگذاری فشاری نمونه‌ها می‌باشند. مقادیر مقاومت کششی برزیلی (BTS)^۱ تراورتن‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نمونه‌های TS₁ و TS₆ با مقاومت کششی معادل ۷/۷۴ و ۴/۱۶ مگاپاسکال به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت کششی می‌باشند و میانگین آن در نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۶/۲۰ مگاپاسکال است. مشابه مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی تراورتن‌های مورد مطالعه توسط مقادیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها کنترل می‌شود.

۷- مقاومت پانچ بلوکی

یکی از آزمایش‌های ساده، ارزان و در عین حال شاخص و کاربردی برای تخمین سایر ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها، آزمایش پانچ بلوکی (BPT)^۲ می‌باشد. این آزمایش توسط (ISRM (2007) به صورت استاندارد در آمده است و بر روی نمونه‌های قرصی شکل انجام می‌شود (Karakul et al., 2010). در این پژوهش، مطابق با پیشنهاد (Ulusay et al., 2001)، ضخامت مغزه‌های مورد استفاده برای انجام این آزمایش بین ۵ تا ۱۵ میلیمتر و با قطر استاندارد (NX) انتخاب گردید. الگوی گسیختگی برخی از نمونه‌های آزمایش شده بعد از انجام آزمایش مقاومت پانچ بلوکی، در شکل ۱ نمایش داده شده است که به‌صورت دو سطوح گسیختگی موازی هم می‌باشند. نتایج حاصل از انجام آزمایش پانچ بلوکی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نمونه‌های TS₄ و TS₆ با مقاومت پانچ بلوکی معادل ۶/۴۵ و ۳/۸۹ مگاپاسکال به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقادیر شاخص پانچ بلوکی (BPI)^۳ می‌باشند و مقدار میانگین این شاخص در نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۵/۲۳ مگاپاسکال است. در بین نمونه‌های مورد مطالعه، نمونه TS₆ دارای کمترین مقدار وزن واحد حجم و بیشترین مقدار تخلخل است و به همین دلیل دارای کمترین مقدار شاخص پانچ بلوکی می‌باشد، ولی نمونه TS₄ با توجه به مقادیر وزن واحد حجم و تخلخل خود، رفتار منطقی از خود نشان نمی‌دهد که شاید دلیل این رفتار به دلیل تأثیر سایر عوامل مؤثر بر انجام آزمایش در آزمایشگاه باشد. مطابق با طبقه‌بندی (Ulusay et al., 2001)، تراورتن‌های مورد مطالعه در رده سنگ-های دارای مقاومت متوسط قرار می‌گیرند.

۴- مقاومت فشاری تک‌محوری

در این پژوهش، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)^۴ مطابق با استاندارد (ISRM (2007) بر روی مغزه‌های سنگی با قطر ۵۴ میلی‌متر (NX) و نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۲/۵ در حالت خشک انجام شده است. الگوی گسیختگی برخی از نمونه‌های مورد مطالعه بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، در شکل ۱ نشان داده شده است که به‌صورت سطوح گسیختگی تقریباً مایل نسبت به جهت بارگذاری نمونه‌ها می‌باشند. نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در جدول ۱ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نمونه‌های TS₁ و TS₆ به ترتیب با مقادیر ۳۱/۹۶ و ۱۸/۵۲ مگاپاسکال دارای بیشترین و کمترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشند. دلیل این موضوع مقادیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها می‌باشد. بطوری که در بین نمونه‌های مورد مطالعه، نمونه TS₁ دارای وزن واحد حجم زیاد و کمترین مقدار تخلخل است و نمونه TS₆ دارای کمترین مقدار وزن واحد حجم و بیشترین مقدار تخلخل می‌باشد. میانگین

1. Brazilian tensile strength
2. Block punch test
3. Block punch index
4. Uniaxial Compressive Strength

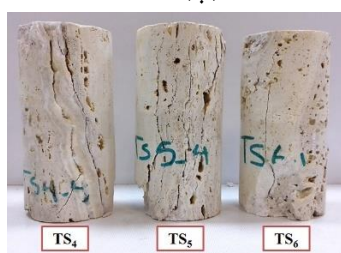
مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۲۴/۹۱ مگاپاسکال است. بر اساس طبقه‌بندی (1981) ISRM، تراورتن‌های آزمایش شده از نظر مقاومت فشاری تک‌محوری در رده سنگ‌های ضعیف تا متوسط و طبق رده‌بندی Anon (1979) در رده سنگ‌هایی با مقاومت فشاری تک‌محوری نسبتاً مقاوم قرار می‌گیرند.



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

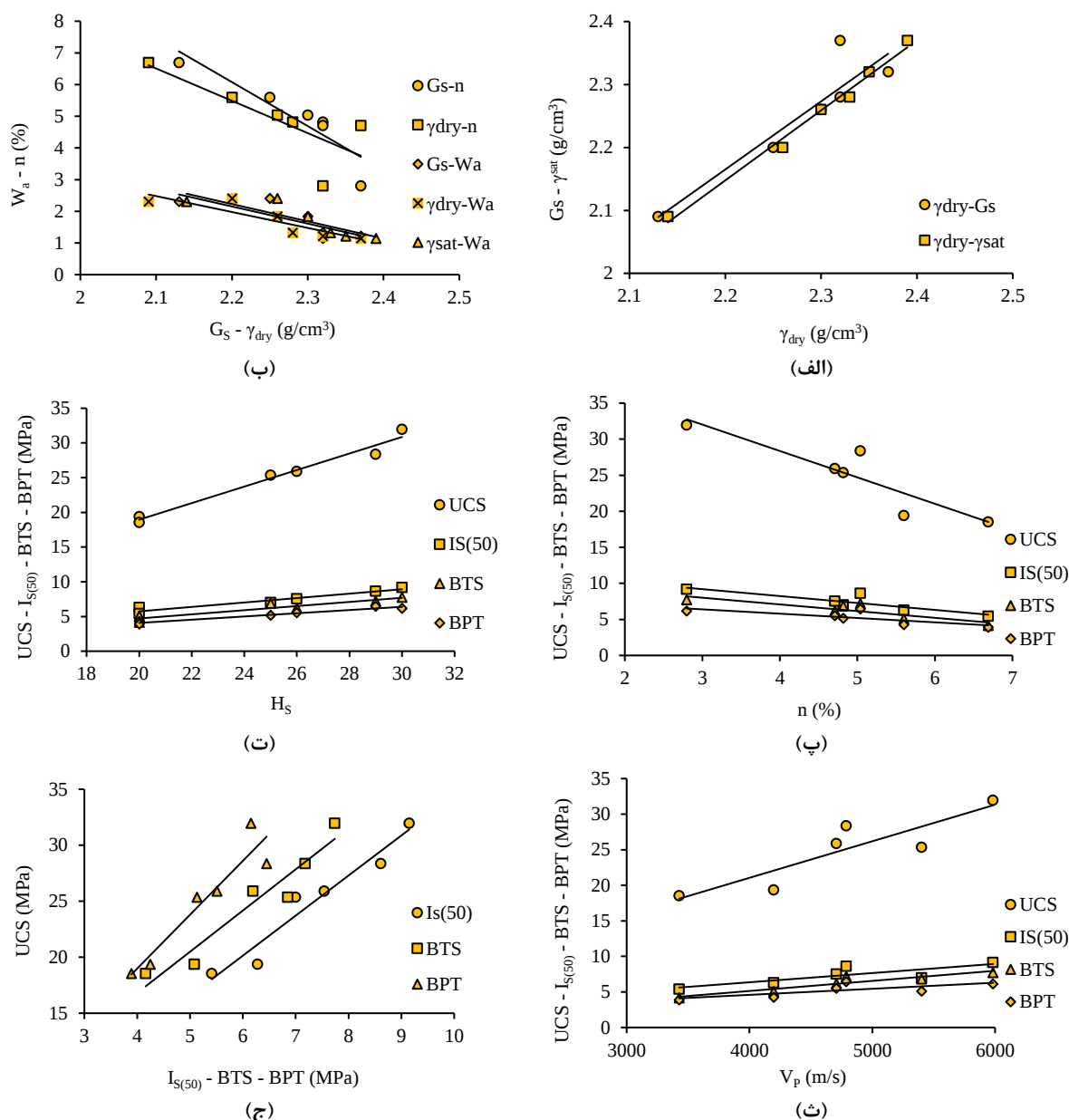
شکل ۱. الگوی گسیختگی تراورتن‌های مورد مطالعه بعد از انجام آزمون‌های (الف) مقاومت بار نقطه‌ای، (ب) مقاومت کششی برزیلی، (پ) مقاومت پانچ بلوکی و (ت) مقاومت فشاری تک‌محوری

جدول ۱. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی، شاخص و مکانیکی تراورتن‌های مورد مطالعه

نمونه	Gs	γ_d (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	W _a (%)	n (%)	سختی بازگشتی اشمیت (H _s)	سرعت سیر موج طولی (m/s)	شاخص بار نقطه‌ای (MPa)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	شاخص پانچ بلوکی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
TS ₁	۲/۳۷	۲/۳۲	۲/۳۵	۱/۲۲	۲/۸۰	۳۰	۵۹۸۴	۹/۱۵	۷/۷۴	۶/۱۵	۳۱/۹۶
TS ₂	۲/۴۵	۲/۴۰	۲/۴۵	۲/۴۱	۵/۶۰	۲۰	۴۱۹۸	۶/۲۸	۵/۰۸	۴/۲۵	۱۹/۳۷
TS ₃	۲/۳۲	۲/۲۸	۲/۳۳	۱/۳۳	۴/۸۲	۲۵	۵۴۰۲	۷/۰۰	۶/۸۵	۵/۱۳	۲۵/۳۴
TS ₄	۲/۳۰	۲/۲۶	۲/۳۰	۱/۸۴	۵/۰۴	۲۹	۵۷۸۹	۸/۶۱	۷/۱۸	۶/۴۵	۲۸/۳۵
TS ₅	۲/۴۲	۲/۳۷	۲/۳۹	۱/۱۵	۴/۷۱	۲۶	۵۷۰۷	۷/۵۴	۶/۱۹	۵/۵۱	۲۵/۸۹
TS ₆	۲/۱۳	۲/۰۹	۲/۱۴	۲/۳۱	۶/۶۹	۲۰	۴۷۲۷	۵/۴۱	۴/۱۶	۳/۸۹	۱۸/۵۲
میانگین	۲/۳۳	۲/۲۹	۲/۳۳	۱/۷۱	۴/۹۴	۲۵	۵۳۰۱	۷/۳۳	۶/۲۰	۵/۲۳	۲۴/۹۱

تحلیل رگرسیونی نتایج

در این پژوهش، به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی از روش آماری دو متغیره تحلیل رگرسیونی ساده استفاده شده و برای هر رابطه ضریب همبستگی پیرسون تعیین گردیده است. زمانی که بین دو متغیر همبستگی وجود داشته باشد، می‌توان یک متغیر را بر حسب متغیر دیگر تعیین کرد. ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تراورتن‌های مورد مطالعه در قالب نمودارهای همبستگی در شکل ۲ نشان داده شده است. حاصل تعیین همبستگی بین ویژگی‌های مذکور روابط تجربی به همراه ضرایب همبستگی آنها می‌باشند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تراورتن‌های مورد مطالعه

الف) ارتباط بین وزن مخصوص و وزن واحد حجم اشباع با وزن واحد حجم خشک، ب) ارتباط بین تخلخل و جذب آب با وزن مخصوص و وزن واحد حجم خشک، پ) ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی و تخلخل، ت) ارتباط ویژگی‌های مکانیکی و سختی بازگشتی اشمیت، ث) ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی و سرعت سیر موج طولی، ج) ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سایر ویژگی‌های مکانیکی

بر اساس تحلیل رگرسیونی انجام شده، بین تمام پارامترهای آزمایش شده، ضریب همبستگی از ۰/۵۶ تا ۰/۹۹ به‌دست آمده است. در شکل ۲-الف ارتباط بین وزن مخصوص و وزن واحد حجم اشباع با وزن واحد حجم خشک در تراورتن‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که به صورت یک رابطه خطی مستقیم می‌باشد. ضریب همبستگی حاصل از این تحلیل که در سطر اول جدول ۲ ارائه شده است حاکی از دقت بالای روابط ارائه شده می‌باشد. شکل ۲-ب، ارتباط بین تخلخل و جذب آب با وزن مخصوص و وزن واحد حجم خشک در تراورتن‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد که همگی به‌صورت رابطه خطی معکوس می‌باشند که ضرایب همبستگی نسبتاً خوب و قابل قبول اعتبار روابط ارائه شده را تأیید می‌کنند. شکل ۲-پ ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی و تخلخل در تراورتن‌های مورد مطالعه را به نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش تخلخل، کاهش در

میزان ویژگی‌های مکانیکی به صورت یک رابطه خطی معکوس قابل مشاهده است. در شکل ۲-ت و ث ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی با سختی بازگشتی اشمیت و سرعت سیر موج طولی نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، ضرایب همبستگی بسیار خوب، اعتبار بالای روابط تجربی به دست آمده بین سختی بازگشتی اشمیت با ویژگی‌های مکانیکی را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ج ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سایر ویژگی‌های مکانیکی مانند شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و شاخص پانچ بلوکی نشان داده شده است که با توجه به ضریب همبستگی بالا، روابط قابل قبولی حاصل شده است.

جدول ۲. روابط تجربی حاصل از تحلیل رگرسیونی بین ویژگی‌های مختلف تراورتن‌های مورد مطالعه به همراه ضرایب همبستگی آنها

R ²	رابطه تجربی به دست آمده	پارامترهای مرتبط
R ² = 0.85	G _S = 1.0822γ _{dry} - 0.2159	γ _{dry} -G _S
R ² = 0.99	γ _{sat} = 1.1128γ _{dry} - 0.3006	γ _{dry} -γ _{sat}
R ² = 0.83	n = -13.879G _S + 36.611	G _S -n
R ² = 0.62	n = -10.201γ _{dry} + 27.93	γ _{dry} -n
R ² = 0.66	W _a = -5.4185G _S + 14.073	G _S -W _a
R ² = 0.79	W _a = -5.0193γ _{dry} + 13.02	γ _{dry} -W _a
R ² = 0.73	W _a = -5.4553γ _{sat} + 14.23	γ _{sat} -W _a
R ² = 0.82	UCS = -3.6614n + 43.005	n-UCS
R ² = 0.76	I _{S(50)} = -0.96n + 12.077	n-I _{S(50)}
R ² = 0.77	BTS = -0.9298n + 10.796	n-BTS
R ² = 0.57	BPT = -0.5998n + 8.1948	n-BPT
R ² = 0.97	UCS = 1.1917H _S - 4.8885	H _S -UCS
R ² = 0.94	I _{S(50)} = 0.3183H _S - 0.6249	H _S -I _{S(50)}
R ² = 0.89	BTS = 0.2979H _S - 1.2484	H _S -BTS
R ² = 0.96	BPT = 0.2322H _S - 0.5743	H _S -BPT
R ² = 0.79	UCS = 0.0051V _P + 0.4935	V _P -UCS
R ² = 0.68	I _{S(50)} = 0.0013V _P + 1.175	V _P -I _{S(50)}
R ² = 0.88	BTS = 0.0014V _P - 0.5361	V _P -BTS
R ² = 0.56	BPT = 0.0009V _P + 1.1748	V _P -BPT
R ² = 0.94	UCS = 3.5768I _{S(50)} - 1.3188	I _{S(50)} -UCS
R ² = 0.92	UCS = 3.679BTS + 2.0954	BTS-UCS
R ² = 0.89	UCS = 4.8089BPT - 0.2453	BPT-UCS

نتیجه گیری

تراورتن‌های مورد مطالعه با رنگ سفید تا شیری و بافت حفره‌دار عمدتاً از کانی‌های آراگونیت و کلسیت تشکیل شده‌اند و دارای وزن واحد حجم متوسط و تخلخل کم تا متوسط می‌باشند. بر اساس نتایج آزمایش تعیین سرعت سیر موج طولی، نمونه‌های مورد مطالعه دارای سرعت سیر موج زیاد تا خیلی زیاد می‌باشند و از این نظر در رده سنگ‌های تازه و فاقد هوازدگی طبق‌بندی می‌شوند. در این سنگ‌ها، سرعت سیر موج توسط مقدار تخلخل آنها کنترل می‌شود. مقاومت بار نقطه‌ای در تراورتن‌های مورد مطالعه توسط مقادیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها کنترل می‌شود. مقدار میانگین مقاومت کششی برزیلی در نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۶/۲۰ مگاپاسگال است. مقاومت کششی برزیلی نیز در تراورتن‌های مورد مطالعه توسط مقادیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها کنترل می‌شود. مقدار میانگین شاخص پانچ بلوکی در سنگ‌های مورد مطالعه برابر ۵/۲۳ مگاپاسگال است. مطابق با طبقه‌بندی (Ulusay et al. (2001، تراورتن‌های مورد مطالعه در رده سنگ‌های دارای مقاومت متوسط قرار می‌گیرند. بر اساس طبقه‌بندی (ISRM (1981، تراورتن‌های آزمایش شده از نظر مقاومت فشاری تک‌محوری در رده سنگ‌های ضعیف تا متوسط و طبق رده‌بندی (Anon (1979 در رده سنگ‌هایی با مقاومت فشاری تک‌محوری نسبتاً مقاوم قرار می‌گیرند. مقاومت فشاری تک‌محوری تراورتن‌های مورد مطالعه تحت تأثیر وزن واحد حجم خشک و تخلخل این نمونه‌ها می‌باشد. بر اساس انجام تحلیل رگرسیونی به منظور تعیین همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه، روابط تجربی خوبی به همراه ضرایب همبستگی قابل قبول حاصل شده است.

منابع

- Aakin, M., Ozsan, A. 2010. Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bull Eng Geol Environ*, 70: 101–114.
- Anon, Y. 1979. The description of rock masses for engineering properties, Working Party Report. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 10: 88–355.
- ASTM. 1995. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock. ASTM Standard on Disk 04.08; Designation: D 5731–95.
- ASTM. 1996. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. ASTM Standard on Disk 04.08; Designation: D 3967–95a.
- ASTM. 2010. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. ASTM D7012–10.
- Bell, F.G. 2000. Engineering properties of soils and rocks. Blackwell Science Ltd., p. 482.
- Broch, E., Franklin, J.A., 1972. The point-load test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 9: 669–676.
- Chentout, M., Alloul, B., Rezouk, A., Belhai, D. 2015. Experimental study to evaluate the effect of travertine structure on the physical and mechanical properties of the material. *Arab J Geosci.*, 8: 8975–8985.
- Fereidooni, D. 2014. The study of engineering geological properties of metamorphic rocks in Hamedan province with emphasis on anisotropy. PhD Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, p. 224 (in Persian).
- Fereidooni, D. 2016. Determination of the Geotechnical Characteristics of Hornfelsic Rocks with a Particular Emphasis on the Correlation between Physical and Mechanical Properties. *Rock Mech. and Rock. Eng.*, 49: 2595–2608.
- GSI, (Geological Society of Iran). 1975. Geological quadrangle map of Iran. No. 6862, Scale 1:100000, Printed by Offset Press Inc. Tehran.
- ISRM. 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15: 89–98.
- ISRM. 1981. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, Part 3. Commission on standardization of laboratory and field tests, 101–112.
- ISRM. 2007. The Blue Book: the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. 1974–2006, In: Ulusay, R., Hudson, J.A., (eds) Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group. Ankara, Turkey. Kazan Offset Press, Ankara.
- Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C. 2003. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. *Int J Rock Mech Min Sci*, 40: 711–723.
- Karakul, H., Ulusay, R., Isik, N.S. 2010. Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(4): 657–65.
- Khanlari, G.R., Heidari, M., Sepahi-Gero, A.A., Fereidooni, D. 2014. Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian test. *Engineering geology*, 69: 80–90.
- Mahmutoglu, Y., Yuzer, E., Suner, F., Eris, I., Eyuboglu, R. 2003. Deterioration and conservation of the Dolmabahçe Palace (Istanbul) building stones. In: Yuzer E, Ergin H, Tugrul A (eds) *Proceedings of industrial minerals and building stones, IMBS*, 343–352.
- Palchik, V., Hatzor, Y.H. 2004. The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37(4): 331–341.
- Pitzurra, L., Moroni, B., Nocentini, A., Sbaraglia, G., Poli, G., Bistoni, F. 2003. Microbial growth and air pollution in carbonate rock weathering. *Int Biodeterior Biodegradation*, 52: 63–68.
- Prikryl, R., Lokajicek, T., Svobodova, J., Weishauptova, Z. 2003. Experimental weathering of marlstone from Prední Kopanina (Czech Republic)-historical building stone of Prague. *Build Environ*, 38: 1163–1171.
- Schneider, C., Ziesch, J., Bauer, J., Torok, A., Siegesmund, S. 2008. Bauwerkskartierung zur Analyse des Verwitterungszustands an den Außenmauern des Schlosses von Buda (Budapest, Ungarn). *Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft (SDGG)*, 59: 219–235.
- Shalabi, F.I., Cording, E.J., Al-Hattamleh, O.H. 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Eng. Geol.*, 90: 138–147.
- Singh, V.K., Singh, D., Singh, T.N. 2001. Prediction of strength properties of some schistose rocks from petrographic properties, using artificial neural networks. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 38: 269–284.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Sulukcu, S. 2001. Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(8): 1113–1119.
- Willard, R.J., McWilliams, J.R. 1969. Microstructural techniques in the study of physical properties of rock. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 6: 1–12.
- Yasar, E., Erdogan, Y. 2004. Correlating sound velocity with density, compressive strength and Young modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41: 871–875.