

A. Azadmehr

Department of Mining
Engineering, Birjand
University of Technology,
Birjand, Iran.

e-mail: zadmehr@birjandut.ac.ir

M. Saffarian*

Department of Industrial
Engineering, Birjand
University of Technology,
Birjand, Iran.

e-mail: saffarian@birjandut.ac.ir

S. M. Kazemi

Department of Industrial
Engineering, Birjand
University of Technology,
Birjand, Iran.

e-mail:
Kazemi_m_s@birjandut.ac.ir

Proposing Regression Models to Estimate Uniaxial Compressive Strength and Elastic Modulus of the Sandstones Based on Physical Properties and Compressional Wave Velocity

Many engineering structures have been built on the sandstones. The main purpose of this study is to estimate the uniaxial compressive strength (UCS) and modulus of elasticity (Es) of sandstones using regression models. For this purpose, petrographic studies, compressional wave velocity (Vp), porosity, density and uniaxial compressive strength tests were performed on dry and saturated samples of sandstones prepared from Mosha village in the northwest of Damavand city. The studied sandstones were classified as feldspathic litharenite and litharenite. Due to the effect of moisture on the physical and mechanical properties of these sandstones, the density and Vp of the samples in the saturated state compared to the dry state have increased by 4 and 20%, respectively. In contrast, UCS and Es have increased by 18% and 25%, respectively. The results of simple regression showed that the most accurate relationship (the highest correlation coefficient and the lowest error) of porosity, Vp and density with UCS and Es are logarithmic, linear and quadratic polynomials, respectively. Based on the determination coefficient ($R^2=0.5-0.77$) and the errors ($RMSE=10.29-18.26$; $MAPE=1.70-2.80$), the relationships presented by simple regression method for estimating UCS and Es showed high accuracy. The Vp and porosity also have the greatest impact on UCS and Es. Evaluation of empirical relationships of other researchers showed that some of these relationships have a determination coefficient of more than 50%. Examination of residual variance homogeneity graphs at the predicted value levels, determination coefficient and error of the methods showed that multivariate regression ($R^2=0.73-0.74$, $RMSE=13.36-13.56$, $MAPE=1.06-1.22$, $Durbin-Watson=1.56-1.70$) has a high accuracy for estimating UCS and Es as compared to the simple regression

Keywords: Sandstone, Moisture effect, Simple and multivariate regression, Correlation coefficient, Geotechnical properties.

* Corresponding author

Received 07 May 2021, Revised 18 June 2021, Accepted 19 June 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6923.1247

پیشنهاد مدل‌های رگرسیونی جهت تخمین مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته ماسه سنگ‌ها براساس خصوصیات فیزیکی و سرعت موج تراکمی

پی بسیاری از سازه‌های مهندسی بر روی ماسه سنگ‌ها بنا شده است. هدف اصلی این مقاله تخمین مقاومت تراکم تک محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (Es) ماسه سنگ‌ها با استفاده از مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. بدین منظور، مطالعات پتروگرافی، آزمون‌های سرعت موج تراکمی، تخلخل، چگالی و مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های خشک و اشباع ماسه سنگ‌های تهیه شده از روستای مشا در شمال غرب شهر دماوند انجام شد. ماسه سنگ‌های مورد مطالعه از نوع فلدسپاتیک لیت‌آرنایت و لیت‌آرنایت می‌باشند. به دلیل تأثیر رطوبت بر خواص فیزیکی و مکانیکی این ماسه سنگ‌ها، چگالی و سرعت موج تراکمی نمونه‌ها در حالت اشباع نسبت به حالت خشک به ترتیب ۴ و ۲۰ درصد افزایش یافته است. برعکس، UCS و Es به ترتیب ۱۸ و ۲۵ درصد کاهش یافته است. نتایج رگرسیون ساده نشان داد که دقیق‌ترین (بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا) رابطه تخلخل، سرعت موج تراکمی و چگالی با UCS و Es به ترتیب لگاریتمی، خطی و چند جمله‌ای درجه دو می‌باشد. براساس مقادیر ضریب تعیین و میزان خطا، روابط ارائه شده به روش رگرسیون ساده جهت تخمین UCS و Es از دقت بالایی برخوردار می‌باشند. همچنین سرعت موج تراکمی و تخلخل بیشترین تأثیر را بر UCS و Es دارند. ارزیابی روابط تجربی سایر محققان نشان داد که برخی از این روابط دارای ضریب تعیین بیشتر از ۵۰ درصد می‌باشند. بررسی نمودارهای همگنی واریانس باقی مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش بینی شده، ضریب تعیین و خطای روش‌ها نشان داد که رگرسیون چندمتغیره نسبت به رگرسیون ساده از دقت بالایی جهت تخمین UCS و Es ماسه سنگ‌ها برخوردار است.

واژگان کلیدی: ماسه سنگ، تأثیر رطوبت، رگرسیون ساده و چندمتغیره، ضریب همبستگی، خصوصیات ژئوتکنیکی.

امیر آزادمهر

گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
پست الکترونیک:
azadmehr@birjandut.ac.ir

محسن صفاریان*

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
پست الکترونیک:
saffarian@birjandut.ac.ir

سید محمود کاظمی

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
پست الکترونیک:
Kazemi_m_s@birjandut.ac.ir

۱- مقدمه

معیارهای شکست و تحلیل‌های عددی، تحلیل پایداری فضاها، زیرزمینی و دامنه‌های سنگی دارند. تهیه نمونه‌های مناسب و فاقد ناپیوستگی جهت اندازه‌گیری مقاومت تراکمی تک محوری باعث شده است که محققین با استفاده از روابط و مدل‌های تجربی به تخمین این خصوصیات بپردازند [۱-۹]. برخی از این روابط در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، روابط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در شرایط خشک و اشباع در برخی از تحقیقات در این جدول ارائه شده است.

مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها به عنوان مهمترین پارامترها در مهندسی سنگ کاربرد گسترده‌ای در طبقه بندی‌های رایج توده سنگ،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۱۷، بازنگری ۱۴۰۰/۰۳/۲۸، پذیرش ۱۴۰۰/۰۳/۲۹.
(DOI): 10.22091/cer.2021.6923.1247 شناسه دیجیتال

جدول ۱- برخی از روابط محققین قبلی جهت تخمین خصوصیات استاتیک

رابطه ارائه شده	واحدها و متغیرها	نویسنده	نوع سنگ
$UCS=287.7\rho-615.9$	ρ (g/cm ³) و UCS (MPa)	Mishra and Basu [۱۰]	ماسه سنگ‌ها
$UCS=0.05Vp-126.4$	Vp (m/s) و UCS (MPa)	Mishra and Basu [۱۰]	ماسه سنگ‌ها
$UCS=17.783Vp^{1.099}$	Vp (km/s) و UCS (MPa)	Armaghani et al. [۱۱]	ماسه سنگ‌ها
$UCS=0.041Vp-15.40$	Vp (m/s) و UCS (MPa)	عبدی و خانلری [۱۲]	ماسه سنگ‌ها
$Es=0.005Vp+0.621$	Vp (m/s) و Es (GPa)	عبدی و خانلری [۱۲]	ماسه سنگ‌ها
$Es=11.237Vp-6.894$	Vp (km/s) و Es (GPa)	Bejarbaneh et al. [۱۳]	ماسه سنگ‌ها
$Es=2.06Vp^{2.78}$	Vp (m/s) و Es (GPa)	Moradian and Behnia [۱۴]	سنگ‌های مختلف از جمله ماسه سنگ
$UCS=2.304Vp^{2.4315}$	Vp (km/s) و UCS (MPa)	Kılıç and Teyman [۱۵]	سنگ‌های مختلف از جمله ماسه سنگ
$UCS_{sat.} = 204.8 * n^{(-1.121)}$	n (%) و UCS _{sat.} (MPa)	Erguler and Ulusay [۱۶]	سنگ‌های رسوبی
$UCS_{sat.} = 0.659UCS_{dry}$	UCS _{dry.} و UCS _{sat.} (MPa)	Vasarhelyi [۱۷]	سنگ‌های آهکی
$E_{s-sat.} = 0.657 E_{s-dry}$	Es _{dry} و Es _{sat.} (GPa)	Vasarhelyi [۱۷]	سنگ‌های آهکی
$UCS_{sat.} = 0.879UCS_{dry} + 0.818$	UCS _{dry.} و UCS _{sat.} (MPa)	Török and Vásárhelyi [۱۸]	تراورتن
$UCS_{sat.} = 0.759UCS_{dry}$	UCS _{dry} و UCS _{sat.} (MPa)	Vasarhelyi [۱۹]	ماسه سنگ
$UCS_{sat.} = 0.729UCS_{dry}$	UCS _{dry} و UCS _{sat.} (MPa)	Vasarhelyi [۱۹]	توف آتشفشانی
$E_{s-sat.} = 0.807 E_{s-dry}$	Es _{dry} و Es _{sat.} (GPa)	Vasarhelyi [۱۹]	توف آتشفشانی
$Es=0.008Vp-5.619$	Vp (m/s) و Es (GPa)	Azimian and Ajalloeian [۲۰]	مارن
$UCS=101.1Ln(Vp)-802.8$	Vp (m/s) و UCS (MPa)	Jamshidi et al. [۵]	تراورتن
$Es=10.67Vp-18.71$	Vp (km/s) و Es (GPa)	Yasar and Erdogan [۲۱]	سنگ‌های کربناته
$UCS=0.033Vp-34.83$	UCS (MPa) و Vp (m/s)	Khandelwal [۲۲]	انواع سنگ‌ها
$Es=0.919Vp^{1.9122}$	Vp (km/s) و Es (GPa)	Altindag [۲۳]	تراورتن، آهک و شیست
$UCS=0.025Vp-8.619$	Vp (m/s) و UCS (MPa)	Azimian [۲]	سنگ‌های آهکی
$UCS=-5.10n+110.79$	n (%) و UCS(MPa)	Edet [۲۴]	ماسه سنگ
$UCS=22.18Vp-30.32$	Vp (km/s) و UCS (MPa)	Selçuk and Nar [۶]	سنگ‌های رسوبی و آذرین
$Es=-12.22ln(n)+27.649$	n (%) و Es(GPa)	حیدری و همکاران [۲۵]	کنگلوмера
$Es=5E-06exp^{5.7943p}$	ρ (g/cm ³) و Es(GPa)	حیدری و همکاران [۲۵]	کنگلوмера
$Es=159.97\rho-385.55$	ρ (g/cm ³) و Es(GPa)	قبادی و همکاران [۳]	پریدوتیت‌ها
$Es=0.0015Vp-2.516$	Vp (m/s) و Es (GPa)	Kurtulus et al. [۲۶]	تراورتن

p: چگالی، n: تخلخل، UCS: مقاومت تراکم تک محوری، UCS_{sat}: مقاومت تراکم تک محوری در حالت اشباع، UCS_{dry}: مقاومت تراکم تک محوری در حالت خشک، Es: مدول الاستیسیته، Es_{sat}: مدول الاستیسیته در حالت اشباع، Es_{dry}: مدول الاستیسیته در حالت خشک، Vp: سرعت موج تراکمی

فشاری سنگ آهک‌های متخلخل در شرایط خشک و اشباع توسط واسانلی^۲ و همکاران بررسی شد و مشخص شد که اشباع شدن نمونه‌ها تأثیر بسیار زیادی در کاهش مقاومت دارد [۲۹]. ترک و وآسارهیلی^۳ بیان کردند که تخلخل، همبستگی پایینی با مقاومت تراورتن‌ها دارد اما

شاکور و بارفیلد^۱ بیان کردند که کاهش UCS روند معنی داری با افزایش درجه اشباع دارد و این پارامتر تا ۷۱/۶ درصد کاهش نشان داد [۲۷]. عبدی و همکاران بیان کردند که با افزایش درجه اشباع مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته ماسه سنگ‌ها به ترتیب ۶۱ درصد و ۵۸ درصد کاهش پیدا می‌کند [۲۸]. مقاومت

^۲- Vasaneli

^۳- Török and Vásárhelyi

^۱- Shakoore and Barefield

رابطه نمایی نسبتاً قوی بین چگالی با UCS و سرعت موج تراکمی برای شرایط خشک و اشباع مشاهده وجود دارد [۱۸]. کاراکول و الوسای^۴ بیان کردند که ویژگی مقاومتی و تغییرشکل پذیری سنگ با افزایش درجه اشباع کاهش می‌یابد، در حالی که سرعت موج تراکمی روندی کاهشی و افزایشی نسبت به درجه اشباع نشان می‌دهد [۳۰]. کاراکول نشان داد که رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری با عدد چکش اشمیت وابسته به درجه اشباع سنگ بکر می‌باشد [۳۱]. به دلیل اهمیت خصوصیات استاتیک (UCS و Es)، در چند دهه گذشته روابط تجربی متعددی برای برآورد مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت تراکم تک محوری، با استفاده از سرعت موج فشاری، تخلخل، چگالی، جذب آب و رطوبت در سنگ‌های رسوبی مختلف ارائه شده است [۲۶، ۳۲ و ۳۳]. تأثیر رطوبت بر خصوصیات مصالح توسط محققین مختلف بررسی شده است [۳۴ و ۳۵]. رطوبت باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ شده و اثرات مخربی را ایجاد می‌کند که باعث ناپایداری سازه‌های مهندسی می‌شود [۱۷ و ۳۶]. حساسیت ویژگی‌های مقاومتی تکیه-گاه‌های سد نسبت به نوسانات سطح آب، موجب ناپایداری تکیه‌گاه‌های سد می‌شود. به عنوان مثال، سطح آب سد تری گرجز^۵، در کشور چین حداکثر ۴۰ متر در فواصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ نوسان داشت. با تجمع آب در سد، تکیه‌گاه‌های سد تحت تغییراتی قرار می‌گیرند. وقتی سطح آب دریاچه سد افزایش یابد، تنش مؤثر سنگ کاهش یافته و به علت واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین سنگ و آب، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد [۳۷].

خواص فیزیکی، مکانیکی و کانی‌شناسی ماسه سنگ‌ها توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفت است [۱۰، ۱۲-۱۴، ۱۹، ۲۴ و ۳۸]. ماسه سنگ یکی از فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی است که حدود ۲۵ درصد از

سنگ‌های رسوبی را تشکیل می‌دهند [۳۹]. این سنگ‌ها با بلایای زمین‌شناسی (از جمله لغزش و رانش زمین)، سازه‌های عمرانی، فعالیت‌های معدن‌کاری و عملیات استخراج نفت در سراسر جهان درگیر می‌باشند [۴۰ و ۴۱]. ماسه سنگ‌ها به دلیل تنوع در ترکیب سنگ‌شناسی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بسیار متغیری برخوردار هستند [۴۲ و ۴۳]. میزان تخلخل، مقدار و نوع سیمان و نیز ترکیب و بافت ذرات تشکیل دهنده، مقاومت این سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به طوری که ماسه سنگ‌های با سیمان شدگی بیشتر و تخلخل کمتر، مقاومت بالاتری دارند [۴۴]. به همین دلیل، آگاهی از خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری آنها به هنگام احداث سازه‌های عمرانی به پیش بینی رفتار مهندسی این سنگ‌ها کمک خواهد کرد [۴۵]. چانگ^۶ و همکاران با مرور تحقیقات سایر پژوهشگران یازده رابطه تجربی بین مقاومت تراکمی تک محوری ماسه سنگ‌ها و خصوصیات فیزیکی آنها ارائه نمودند [۴۶]. حیدری و همکاران، رابطه بین ویژگی پتروگرافی و خواص مهندسی ماسه سنگ‌های ژوراسیک همدان را بررسی و روابط چندمتغیره برای برآورد خواص فیزیکی و مکانیکی از ویژگی‌های پتروگرافی ارائه کردند [۴۷]. وانگ^۷ و همکاران به تجزیه و تحلیل تجربی عوامل مؤثر در سرعت موج تراکمی در ماسه سنگ پرداختند [۴۸]. ونگ و لی^۸، ارتباط بین خواص مکانیکی و تخلخل در ماسه سنگ‌ها را بررسی کرده اند [۴۹]. نتایج تحقیقات ناش^۹ و همکاران بر روی ماسه سنگ‌های هیمالیا در نپال نشان داد که درصد تخلخل و خصوصیات پتروگرافی همبستگی بالایی با ویژگی‌های مکانیکی نشان می‌دهند [۵۰]. محققان خصوصیات ماسه سنگ‌های سازند آغاچاری را بررسی و روابطی با دقت بالا جهت تخمین مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته ارائه

⁶- Chang

⁷- Wang

⁸- Weng and Li

⁹- Naresh

⁴- Karakul and Ulusay

⁵- Three Gorges

انجام گردیده است. سازند لالون از سازندهای زمین‌شناسی ایران در البرز با سن کامبرین پیشین است. این سازند در تمامی البرز، آذربایجان، ایران مرکزی و زاگرس رخنمون دارد. روستای مشا در ۶ کیلومتری شمال غربی شهر دماوند و در کنار جاده هراز قرار دارد. ماسه سنگ‌های سازند لالون پی سنگ بسیاری از سازه‌های مهندسی شمال استان تهران را در بر می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد استفاده شده در تحقیق

به منظور انجام این مطالعه، ۱۴ بلوک سنگی از شمال غرب شهر دماوند تهیه شد و به آزمایشگاه منتقل و برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی آماده گردیدند. شکل ۱ تصاویری از بلوک‌ها و کاربرد آنها در سازه‌های محلی را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از تأثیر هرگونه ناهمسانی بر روی نتایج آزمون‌ها، بلوک‌های جمع‌آوری شده باید فاقد هرگونه درزه، ترک و آثار هوازدگی باشند [۵۵-۵۷].



(ب) کاربرد ماسه سنگ‌ها در سازه‌های محلی

شکل ۱- تصاویری از بلوک‌ها و کاربرد آنها در سازه‌های محلی

تهیه شده ۵۴ میلیمتر و نسبت طول به قطر آنها حدود ۲ می‌باشد.

۲-۲- روش‌های استفاده شده

آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی بر روی ۴۳ نمونه در شرایط خشک و ۱۸ نمونه در شرایط اشباع

کردند [۵۱]. حیدری و همکاران خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه سنگ‌های منطقه قم واقع در روستای تجرک (شهرستان فامنین) را بررسی کردند [۵۲].

پژوهشگران مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته سنگ‌های مشکل‌دار در فعالیت‌های عمرانی را پیش‌بینی کردند [۵۳]. قبادی و آریافر بیان کردند که رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی سنگ و سرعت عبور موج تراکمی همبستگی مناسبی وجود دارد به طوری که ویژگی‌های فیزیکی ماسه سنگ‌های مورد آزمایش را می‌توان از روی سرعت موج آنها محاسبه کرد [۵۴].

هدف اصلی این مقاله، تخمین مقاومت تراکمی تک محوری و مدول الاستیسیته با استفاده از آزمون ساده و غیرمخرب سرعت موج طولی، تخلخل و چگالی با کمک مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. برای انجام این کار، مطالعات پتروگرافی، آزمون‌های سرعت موج تراکمی، تخلخل، چگالی و مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های خشک (۴۳ نمونه) و اشباع (۱۸ نمونه) ماسه سنگ‌های تهیه شده از سازند لالون در شمال غرب شهر دماوند



(الف) نمایی از بلوک‌ها در صحرا

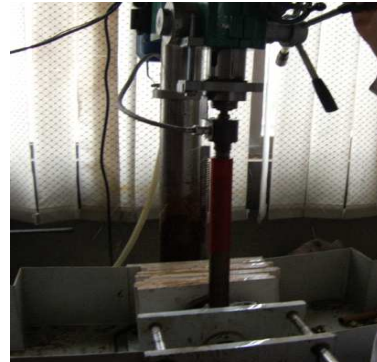
نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر (شکل ۲-الف) تهیه و برای برش و ساب دو سر نمونه‌ها از دستگاه برش اره‌ای و ماشین‌ساب آزمایشگاه استفاده گردید. در تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز این تحقیق، از روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استفاده شده است [۵۸]. قطر نمونه‌های استوانه‌ای

عمدتاً افزایش چگالی باعث افزایش سرعت می‌شود و با افزایش تخلخل سرعت انتشار کاهش می‌یابد [۴۳]. قبل از انجام آزمایش سر و ته نمونه‌ها با استفاده از گریس صیقلی شد. فرکانس مورد استفاده در این آزمایش‌ها 0.5 MHz می‌باشد. شکل ۲-ب، دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج را نشان می‌دهد.



(ب) دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج

انجام شد. آزمایش سرعت موج تراکمی (Vp) مطابق استاندارد ASTM D2845 انجام شد [۵۹]. سرعت امواج بستگی به مقاومت سنگ یا به‌طور کلی، کیفیت سنگ دارد. سرعت امواج فشاری با توجه به زمان گذر از فرستنده به گیرنده در طول نمونه محاسبه می‌گردد. سرعت عبور موج در سنگ همچنین به اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد و با ریز شدن بافت سنگ کاهش می‌یابد.



(الف) دستگاه مغزه گیر



(پ) دسیکاتور حاوی نمونه‌ها جهت اشباع سازی
شکل ۲- عملیات آزمایشگاهی بر روی مغزه‌ها

منحنی تنش- کرنش جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (Es) ترسیم گردید. مقدار Es با استفاده از شیب منحنی تنش- کرنش و با توجه به مفهوم مدول متقاطع تعیین شد. شکل ۳ تصویری از نمونه‌ها در آزمایش مقاومت تراکم تک محوری را نشان می‌دهد.

آزمایشات فیزیکی مانند چگالی (ρ) و تخلخل (n) نمونه‌ها نیز براساس روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شد [۵۸].

آزمایش مقاومت تراکم تک محوری براساس روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ($ISRM^{10}$) و با نرخ ثابت بارگذاری 0/7 مگاپاسکال بر ثانیه بر روی نمونه‌ها انجام شد [۵۸]. نرخ بارگذاری پیشنهاد شده توسط ISRM بین 0/5 تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه می‌باشد که نرخ تعیین شده در مقاله در این محدوده قرار دارد [۵۸]. میزان تغییرشکل با استفاده از گیج‌های مربوطه در آزمایش تراکم تک محوری ثبت شد. سپس

¹⁰- International Society for Rock Mechanics



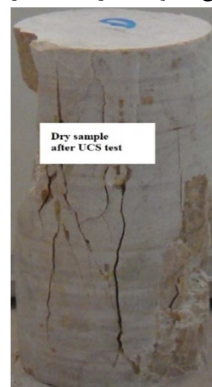
(ب) نمونه اشباع (نمونه شماره ۱) قبل از آزمایش UCS



(الف) نمونه اشباع (نمونه شماره ۱) بعد از آزمایش UCS



(ت) نمونه خشک (نمونه شماره ۱۴) قبل از آزمایش UCS



(پ) نمونه خشک (نمونه شماره ۱۴) بعد از آزمایش UCS

شکل ۳- نمونه‌های خشک و اشباع قبل و بعد از آزمایش مقاومت تراکم تک محوری

سطوح اشباع و وزن نمونه خشک تعیین شد. چگالی نمونه‌ها نیز از نسبت جرم به حجم نمونه‌ها تعیین شد. برای تعیین نوع ماسه سنگ‌ها و بررسی خصوصیات سنگ‌شناسی آن‌ها از ماسه سنگ‌های مورد مطالعه، مقاطع نازک تهیه شد. نامگذاری نمونه‌ها نیز به روش فولک^{۱۱} انجام گردید [۶۰].

۳- نتایج

۳-۱- نتایج مطالعات میکروسکوپی

بررسی‌های میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک از نمونه‌ها نشان داد که بافت نمونه‌های مورد مطالعه آواری یا دانه‌ای می‌باشد و از لحاظ بلوغ بافتی ای‌مچور^{۱۲} تا ساب-مچور^{۱۳} می‌باشند. نام نمونه‌های ماسه سنگ مورد مطالعه براساس طبقه‌بندی فولک فلدسپاتیک لیت‌آرنایت

تخلخل نمونه‌ها به روش اشباع و غوطه‌وری تعیین گردید. نمونه در داخل آب و در خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال (۶ تور) به مدت دست کم یک ساعت قرار داده شد تا اشباع گردد (شکل ۲- پ). در این مدت باید نمونه را به طور متناوب حرکت داد تا حباب‌های هوای آن خارج شود. نمونه را به داخل سبد گذاشته و آنها را وارد وان آب کرده، در این حالت سبد با سیم به ترازو آویزان می‌شود. جرم اشباع غوطه‌ور سبد و نمونه با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. نمونه از داخل وان آب خارج شده، سطح آن با دستمال مرطوب خشک شده سپس وزن اشباع با سطح خشک آنها در خارج از آب اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌ها از اختلاف وزن بین وزن اشباع با سطح خشک و وزن اشباع غوطه‌ور تعیین شد. وزن خشک نمونه‌ها بعد از خشک کردن در اون در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. تخلخل حجمی از اختلاف وزن بین وزن اشباع با سطح خشک

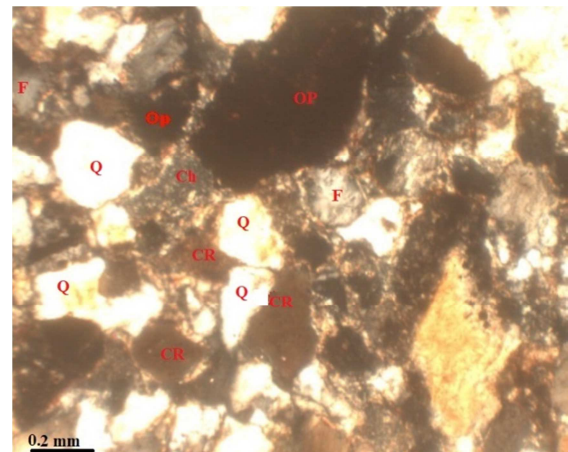
¹¹- Folk

¹²- immature

¹³- sub-mature

می‌باشد. به این صورت که مقدار مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت اشباع، $0/82$ برابر این مقدار در حالت خشک ($UCS_{sat.}/UCS_{dry}=0.82$) می‌باشند. همچنین مقدار مدول الاستیسیته در حالت اشباع 75 درصد حالت خشک ($ES_{sat.}/ES_{dry}=0.75$) می‌باشد. سرعت موج تراکمی در حالت اشباع $1/2$ برابر سرعت موج تراکمی در شرایط خشک ($Vp_{sat.}/Vp_{dry}=1.2$) می‌باشد. چگالی نمونه‌ها در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک می‌باشد. بدین صورت که چگالی در حالت اشباع $1/04$ برابر چگالی در حالت خشک ($\rho_{sat.}/\rho_{dry}=1.04$) می‌باشد. نمودار متوسط مقادیر در حالت خشک و اشباع در شکل ۵ ارائه شده است. کاهش مقاومت فشاری در حالت اشباع توسط دیگر محققین نیز تایید شده است [۱۶، ۱۹ و ۳۹]. لیتولوژی، تخلخل، جذب آب نمونه‌ها، نوع و مقدار کانی‌ها، نوع سیمان و مقدار آن از عواملی می‌باشند که باعث تغییر در مقاومت نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع می‌شود. کانی‌های رسی با جذب آب، باعث کاهش شدید مقاومت می‌شوند. برخی از روابط بین خصوصیات در حالت خشک و اشباع در جدول ۱ ارائه شده است. سنگ‌هایی با تخلخل زیاد هنگامی که اشباع هستند می‌توانند دامنه زیادی از سرعت امواج را نشان دهند [۱۸]. افزایش چگالی به طور عمده، باعث افزایش سرعت امواج می‌شود. وآسارهیلی^{۱۴} بیان کرد که UCS ماسه سنگ‌های مناطق مختلف کشور انگلستان در شرایط اشباع حدود $75/6$ درصد آن در شرایط خشک می‌باشد، در حالی که مدول مماسی و متقاطع در حالت اشباع به ترتیب $76/1$ و 79 درصد آنها در شرایط خشک می‌باشد [۱۹]. در این مطالعه UCS در شرایط اشباع حدود 82 درصد UCS در شرایط خشک می‌باشد که نتایج با تحقیق وآسارهیلی کمی متفاوت می‌باشد.

و لیت‌آرنایت می‌باشد [۶۰]. کوارتز دگرگون شده فراوان‌ترین سازنده نمونه‌ها بوده، بیشتر در اندازه ماسه متوسط تا کمی ریز با گردشگی و جورشدگی ضعیف تا متوسط است. قطعات سنگی شامل کانی چرت، آهک فسفاته و خرده سنگ‌های نهان بلور می‌باشند. کانی دیگر از جمله میکا (نوع مسکویت) به صورت تیغه‌های ظریف پراکنده، فلدسپار (پلاژیوکلاز و ارتوز به صورت بلورهای بی‌شکل با ماکل و آثار خوردشدگی، نیز تجزیه به کانی رسی) و کانی‌های کدر- اکسید آهن که از دیگر مجزاینده در نمونه‌ها وجود دارد. کانی‌های فرعی شامل اکسید آهن می‌باشند. ماتریکس نمونه‌ها غالباً از نوع سیلت بوده و سیمان نمونه از جنس کلسیت و اکسید آهن است. در شکل ۴ تصاویری از مقاطع نازک نمونه شماره ۶ ارائه شده است. در این شکل، Q: کوارتز، Op: کانی‌های تیره، CR: خرده‌های کربناته و F: فلدسپات می‌باشند.



شکل ۴- مقطع نازک از نمونه شماره ۶ (نمونه‌های خشک)

۳-۲- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ

نتایج آزمایشات مکانیک سنگ بر روی ۱۸ مغزه اشباع و ۴۳ مغزه خشک در جدول ۲ آمده است. با مقایسه میانگین مقادیر خصوصیات بررسی شده در این جدول و نمودار شکل ۵، مشاهده می‌شود که اشباع شدن نمونه‌ها باعث افزایش سرعت موج تراکمی شده است. برعکس، مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در حالت اشباع کمتر از مقادیر این پارامترها در حالت خشک

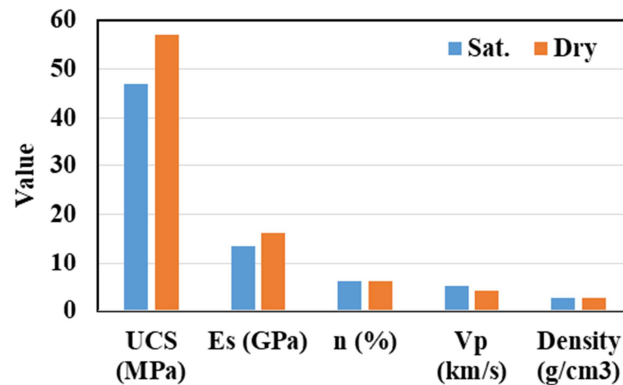
¹⁴- Vászárheli

جدول ۲- نتایج آزمایشات مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های خشک (۴۳ مغزه) و اشباع (۱۸ مغزه)

تخلخل (درصد)	Vp (km/s)		Es (GPa)		UCS (Mpa)		چگالی (g/cm ³)		شماره نمونه
	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	
۱/۰۱	۵/۸۲	۴/۲۷	۱۸/۲۷	۲۵/۶۹	۳۸/۸۵	۴۶/۱۶	۲/۶۸	۲/۶	۱
۱	۴/۳۹	۴/۳۳	۲۱/۱۸	۲۶/۹۱	۴۶/۳۶	۴۷/۲۷	۲/۷۲	۲/۶۳	۲
۰/۷	۵/۸۱	۴/۲۹	۱۷/۰۵	۲۲	۶۵/۳۴	۷۲	۲/۷۸	۲/۷	۳
۱	۵/۱۹	۴/۶۶	۱۸/۴۳	۲۴/۹۷	۴۳/۶۶	۵۳/۲۵	۲/۷۴	۲/۶۲	۴
۲/۴۷	۵/۲۳	۴/۰۷	۱۱/۶۳	۱۵/۵	۴۰/۲۶	۴۲/۷	۲/۶۶	۲/۵۵	۵
۱	۴/۴۵	۳/۹۴	۹/۳۲	۱۲	۴۰/۶۹	۴۰/۳۶	۲/۶۶	۲/۵۱	۶
۰/۸	۸۵/۵	۴/۷۱	۲۲/۰۶	۳۰/۴۸	۴۶/۴۸	۵۴/۱۴	۲/۷۵	۲/۶۶	۷
۱/۰۱	۴/۰۹	۴/۰۹	۱۶/۷۲	۲۳/۸۹	۳۷/۲۹	۴۲/۹۷	۲/۷۱	۲/۶	۸
۲	۴/۸۷	۰/۴	۱۴/۹۵	۱۹	۳۷/۲۵	۴۱/۳۳	۲/۶۸	۲/۶۱	۹
۱۰	۴/۰۹	۳/۳۳	۷/۶۸	۱۰/۱	۲۶/۳۲	۲۹/۳	۲/۶۱	۲/۴۸	۱۰
۱۵	۳/۴۸	۲/۹	۶/۷۵	۹	۱۷/۷۸	۲۱/۶۹	۲/۶۱	۲/۵	۱۱
۱۵	۴/۵۶	۳/۵۱	۶/۱	۸/۱۲	۲۹/۶۵	۳۲/۶۸	۲/۶۱	۲/۵۲	۱۲
۱۴	۴/۶۸	۳/۳۵	۶/۷۷	۹/۰۲	۲۵/۱۲	۲۹/۶۵	۲/۶۴	۲/۵۸	۱۳
۹	۵/۱	۳/۷۸	۱۱/۳۱	۱۳/۸	۳۴/۹۸	۳۷/۴۲	۲/۷۲	۲/۵۸	۱۴
۱۷	۴/۹۸	۳/۶۷	۳/۸۵	۵/۱۳	۲۷/۸۷	۲۹/۳۳	۲/۵۷	۲/۴۷	۱۵
۰/۰۶	۶/۸۵	۵/۷۴	۲۳/۱	۳۰	۹۷/۹۸	۱۱۸	۲/۸۴	۲/۷۴	۱۶
۰/۲۲	۷/۱۴	۵/۹۵	۱۷/۰۵	۲۴	۹۸/۴	۱۲۰	۲/۷۸	۲/۷۸	۱۷
۳/۶۶	۵/۷۱	۴/۸۱	۱۱/۱۴	۱۴	۸۹/۵۶	۶۰	۲/۴۵	۲/۵	۱۸
۱/۳۴	-	۵/۱۹	-	۲۰/۴	-	۱۰۰/۷	-	۲/۶۸	۱۹
۸/۷۳	-	۳/۶۹	-	۱۱/۴	-	۳۱/۹	-	۲/۶	۲۰
۳	-	۴/۸۹	-	۲۸/۸	-	۶۸	-	۲/۶۵	۲۱
۹	-	۴/۱۷	-	۱۳/۹	-	۵۰/۲	-	۲/۴	۲۲
۰/۱۶	-	۵/۸۳	-	۳۲	-	۱۱۳	-	۲/۷۸	۲۳
۱/۲۲	-	۴/۴۴	-	۲۱	-	۱۰۵/۳	-	۲/۶۹	۲۴
۹	-	۳/۸۳	-	۱۰/۹	-	۴۱/۵	-	۲/۴۳	۲۵
۶	-	۳/۹۲	-	۱۲/۲	-	۷۴	-	۲/۵۴	۲۶
۸/۲۸	-	۳/۶۹	-	۱۳/۳	-	۳۴/۱	-	۲/۳۵	۲۷
۶	-	۴/۶	-	۱۷/۱	-	۶۳/۸	-	۲/۶۱	۲۸
۸	-	۴/۲۳	-	۱۲/۷	-	۵۶/۵	-	۲/۵	۲۹
۷	-	۴/۲۹	-	۱۶/۷	-	۵۸/۲	-	۲/۵۳	۳۰
۸	-	۴/۱۷	-	۱۵/۳	-	۵۳/۵	-	۲/۴۱	۳۱
۸	-	۳/۴۵	-	۸	-	۵۰/۸	-	۲/۳۹	۳۲
۷	-	۴/۴۵	-	۱۴/۳	-	۵۹/۴	-	۲/۶۱	۳۳
۸	-	۳/۶۶	-	۱۲/۲	-	۴۰/۹	-	۲/۴۴	۳۴
۸/۳۸	-	۳/۶	-	۷/۹	-	۳۳/۶	-	۲/۳۵	۳۵
۷	-	۳/۷۵	-	۱۰	-	۴۸	-	۲/۵۹	۳۶
۶	-	۳/۸۵	-	۱۲/۸	-	۷۴/۵	-	۲/۶۳	۳۷
۷	-	۴/۲۲	-	۱۰	-	۷۰/۸	-	۲/۶	۳۸
۴/۰۳	-	۴/۳۵	-	۱۳/۴	-	۷۵/۹	-	۲/۶۵	۳۹

جدول ۲- ادامه

۹	-	۳/۹۸	-	۹	-	۳۳/۸	-	۲/۴۷	۴۰
۷/۵	-	۳/۹۷	-	۱۳/۴	-	۴۷/۵	-	۲/۶۳	۴۱
۳/۳۹	-	۳/۹۹	-	۱۴/۵	-	۷۸/۶	-	۲/۶۹	۴۲
۲/۳۶	-	۴/۰۶	-	۱۶/۸	-	۷۲/۶	-	۲/۷۴	۴۳
۰/۰۶	۳/۴۸	۲/۹	۳/۸۵	۵/۱۳	۱۷/۷۸	۲۱/۶۹	۲/۴۵	۲/۳۵	حداقل
۱۷	۷/۱۴	۵/۹۵	۲۴	۳۲	۹۸/۴	۱۲۰	۲/۷۸	۲/۷۸	حداکثر
۵/۷۷	۵/۱۳	۴/۱۸	۱۳/۵۲	۱۶/۰۸	۴۶/۸۸	۵۷/۱	۲/۶۸	۲/۵۷	میانگین



شکل ۵- مقایسه خصوصیات ماسه سنگ‌ها در شرایط خشک و اشباع

می‌شود [۲۹]. در تحقیق دیگر نیز مشاهده کرد که رابطه خطی با همبستگی بالا بین مدول استاتیک در شرایط خشک و اشباع وجود دارد و از لحاظ آماری مدول الاستیسیته در شرایط اشباع حدود ۶۷ درصد مدول استاتیک در شرایط خشک می‌باشد که با نتایج تحقیق حاضر متفاوت می‌باشد [۱۷].

۳-۳- رگرسیون ساده جهت تخمین خصوصیات استاتیک

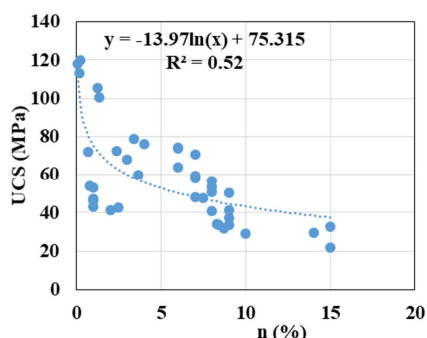
رابطه خصوصیات استاتیک ماسه سنگ‌های مورد مطالعه (نمونه‌ها در شرایط خشک) با سرعت موج تراکمی، تخلخل و چگالی در شکل ۶ (الف تا ج) ارائه شده است. معیارهای مختلفی برای تفسیر ضریب تعیین وجود دارد به‌عنوان مثال براساس معیار تیلر^{۱۵} ضریب تعیین بیشتر از ۵۰ درصد، به‌عنوان همبستگی قوی در نظر گرفته می‌شود [۶۱]. چنانچه مشاهده می‌شود با توجه به

عبدی و همکاران نیز بیان کردند که با افزایش درجه اشباع مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته ماسه سنگ‌های جنوب شهر قم به ترتیب ۶۱ درصد و ۵۸ درصد کاهش پیدا می‌کند. این میزان کاهش نسبت به مطالعه حاضر بیشتر می‌باشد که دلایلی از جمله لیتولوژی، نوع و مقدار سیمان، ترکیب کانی شناسی و جذب آب نمونه‌ها باعث تفاوت در کاهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در اثر اشباع شدن نمونه‌ها می‌شود. همچنین ایشان بیان کردند که با افزایش درجه اشباع سرعت موج تراکمی (Vp) ۳۳ درصد افزایش یافته است [۲۸]. مقاومت فشاری سنگ آهک‌های متخلخل در شرایط خشک و اشباع توسط وآسانی و همکاران بررسی شد و مشخص گردید که اشباع شدن نمونه‌ها تأثیر بسیار زیادی در کاهش مقاومت دارد. همچنین مشاهده شد کاهش UCS کمتر از ۲۰ درصد است که به دلیل نوع لیتولوژی و درصد و ترکیب کانی‌های سازنده نمونه‌ها می‌باشد. با افزایش کانی‌های رسی جذب آب نمونه‌ها افزایش می‌یابد و باعث کاهش بیشتر مقاومت نمونه

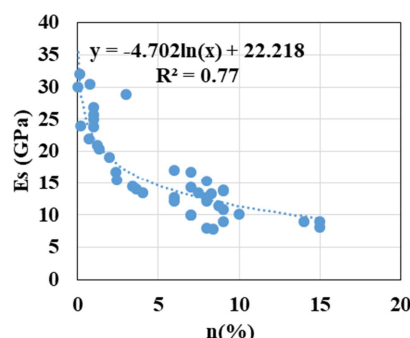
15- Taylor

چگالی با مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب لگاریتمی، خطی و چندجمله‌ای درجه دو می‌باشد.

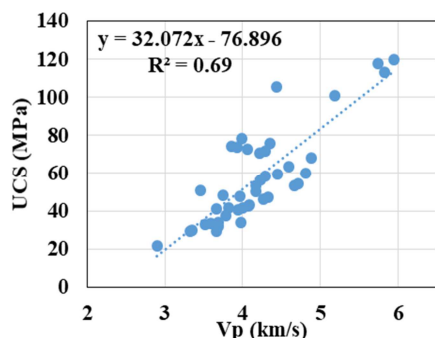
بهترین نوع معادله برازش شده (در این مطالعه معادلاتی که ضریب تعیین (R^2) بیشتر از ۵۰ درصد دارند) در سطح خطای ۵ درصد، رابطه تخلخل، سرعت موج تراکمی و



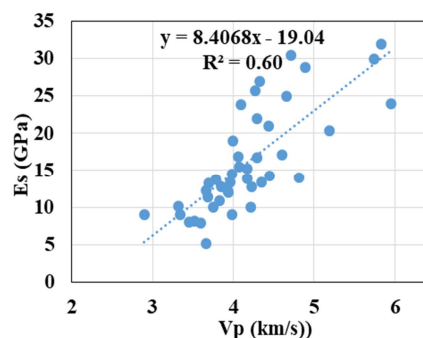
(ب) رابطه تخلخل با مقاومت فشاری تک محوری



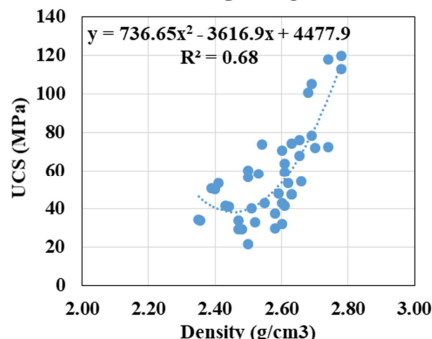
(الف) رابطه تخلخل با مدول الاستیسیته



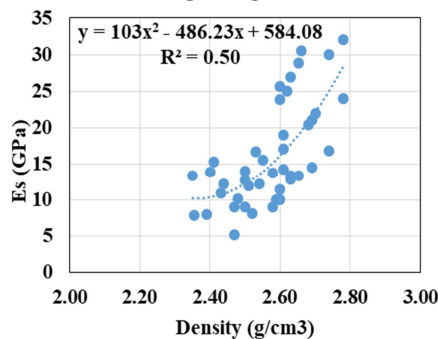
(ت) رابطه سرعت موج تراکمی با مقاومت فشاری تک محوری



(پ) رابطه سرعت موج تراکمی با مدول الاستیسیته



(ج) رابطه چگالی با مقاومت فشاری تک محوری



(ث) رابطه چگالی با مدول الاستیسیته

شکل ۶- رابطه خصوصیات شاخص با خصوصیات استاتیکی نمونه‌ها

توزیع نرمال باشند، احتمال اینکه مقداری خارج از فاصله سه برابر انحراف معیار از میانگین قرار گیرد، بسیار کوچک خواهد بود. دیگر معادلات (توانی و تابع نمایی) ضریب تعیین کمتر از ۵۰٪ داشتند. سرعت موج تراکمی بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته دارد (شکل ۶- پ و ت). عبدی و خانلری اثر سرعت موج تراکمی و سختی را بر روی مقاومت تراکم تک محوری بررسی و بیان کردند که سرعت موج تأثیر

قابل ذکر است که داده‌های پرت^{۱۶} با استفاده از نمودار جعبه‌ای شناسایی و از تجزیه و تحلیل آماری حذف شدند. داده پرت به داده‌ای گفته می‌شود که نسبت به میانگین فاصله زیادی برحسب یک شاخص پراکندگی (مانند انحراف معیار) داشته باشد. این ایده از خصوصیات توزیع نرمال گرفته شده است. در صورتی که داده‌ها دارای

16- Outlier

۳-۴- مقایسه نتایج روابط با تحقیقات پیشین

روابط متعددی بین خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ‌ها با سرعت امواج تراکمی، چگالی و تخلخل توسط محققین مختلف ارائه شده است، اما اینکه نتایج آنها برای سازندهای ایران چقدر معتبر است، مشخص نیست. تعدادی از این روابط در جدول ۱ آمده است. به همین دلیل در این پژوهش، اعتبار نتایج روابط تجربی موجود براساس داده‌های سرعت موج تراکمی، چگالی و تخلخل و خصوصیات مکانیکی ۴۳ نمونه ماسه سنگ در شرایط خشک مورد ارزیابی و واسنجی قرار گرفت و روابطی که بیشترین دقت را دارند، معرفی گردید. مقادیر متوسط UCS تخمین زده شده براساس برخی از این روابط در شکل ۷ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در تمام روابط بررسی شده به جز رابطه جمشیدی و همکاران [۵]، بقیه روابط مقادیری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده ارائه می‌کنند. این مطالعه بر روی ۱۵ نوع سنگ تراورتن از معادن مختلف ایران که حداکثر مقاومت آن‌ها ۶۵/۷ مگاپاسکال بوده است، انجام شده است.

با توجه به شکل ۷، تحقیق عبدی و خانلری بر روی ماسه سنگ‌های سازند قرمز بالایی در غرب شهر قم انجام شده است. میانگین UCS در این تحقیق ۸۴/۲۷ مگاپاسکال با حداکثر ۱۳۱ و حداقل ۱۹/۴ مگاپاسکال می‌باشد. نوع سنگ، مقدار مقاومت، روش انجام آزمایش‌ها، شرایط حوضه رسوب‌گذاری و پتروگرافی نمونه‌های مربوط به هر مطالعه تعیین‌کننده قابل کاربرد بودن روابط تجربی پیشین جهت تخمین مقاومت سنگ‌ها در سایر مناطق می‌باشد.

شکل ۸ رابطه UCS اندازه‌گیری و محاسبه شده براساس روابط محققین مختلف را نشان می‌دهد. دقیق‌ترین همبستگی بین این مقادیر براساس روابط مذکور مربوط به رابطه خطی می‌باشد.

بیشتری بر مقاومت دارد [۱۲]. همچنین محققین متعددی گزارش کردند که تخلخل، پارامتر مناسبی جهت تخمین مقاومت سنگ‌های رسوبی می‌باشد [۴ و ۱۵]. در این پژوهش نیز روابط موجود در شکل ۶ می‌توانند جهت تخمین UCS و Es استفاده شوند. بررسی پژوهشگران مختلف نیز نشانگر رابطه خطی سرعت موج تراکمی و رابطه لگاریتمی تخلخل با مقاومت فشاری تک محوری با دقت بالا بوده است [۶، ۱۵ و ۴۴]. از طرفی، نتایج متناقض نیز توسط قبادی و همکاران بر روی ماسه سنگ‌های سازند آغاچاری شهر اهواز مبنی بر رابطه لگاریتمی سرعت موج و چگالی با مقاومت تراکم تک محوری و رابطه خطی تخلخل با مقاومت فشاری گزارش شده است. تفاوت در ژنز و محیط رسوبی ماسه سنگ‌ها می‌تواند دلیلی جهت این نتایج متفاوت باشد [۵۱]. روابط ارائه شده در شکل ۶، براساس معیارهای ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^{17}$) و درصد میانگین مطلق خطا ($MAPE^{18}$) ارزیابی شد (روابط ۱ و ۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y - y'}{y} \right|}{n} * 100 \quad (2)$$

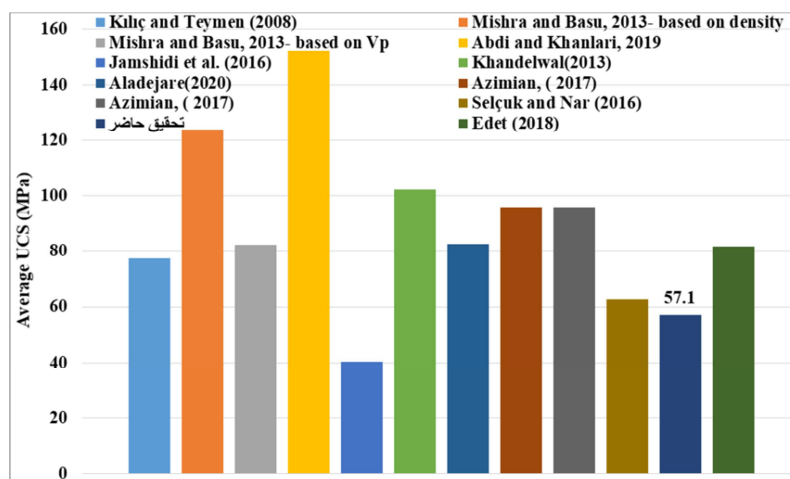
در این روابط، y مقدار UCS یا Es واقعی است، y' مقدار UCS یا Es پیش‌بینی شده با استفاده از روابط است و n تعداد کل داده است. هر چقدر میزان $RMSE$ و $MAPE$ کمتر و ضریب همبستگی بیشتر باشد، رابطه ارائه شده دارای دقت بالاتری است. مشاهده می‌شود که تخلخل و سرعت موج تراکمی بیشترین تأثیر را به ترتیب بر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوری دارند (جدول ۳).

17- Root Mean Square Error

18- Mean Absolute Percentage Error

جدول ۳- میزان دقت روابط ارائه شده

MAPE	RMSE	R ²	رابطه	
۲/۷	۱۸/۲۶	۰/۵۴	UCS= -13.98ln(n) + 75.314	(۳)
۱/۷	۲۹/۱۰	۰/۷۷	Es= -4.708ln(n) + 22.216	(۴)
۰/۲	۱۵/۲	۰/۶۹	UCS= 32.072(Vp) - 76.896	(۵)
۲/۳	۱۰/۵	۰/۶	Es= 8.4068(Vp) - 19.04	(۶)
۲/۴	۱۴/۰۴	۰/۶۸	UCS= 736.65(ρ) ² - 3616.9(ρ) + 4477.9	(۷)
۲/۸	۱۶/۲۳	۰/۵	Es= 103(ρ) ² - 486.23(ρ) + 584.08	(۸)



شکل ۷- مقادیر متوسط UCS تخمین زده شده براساس برخی از روابط

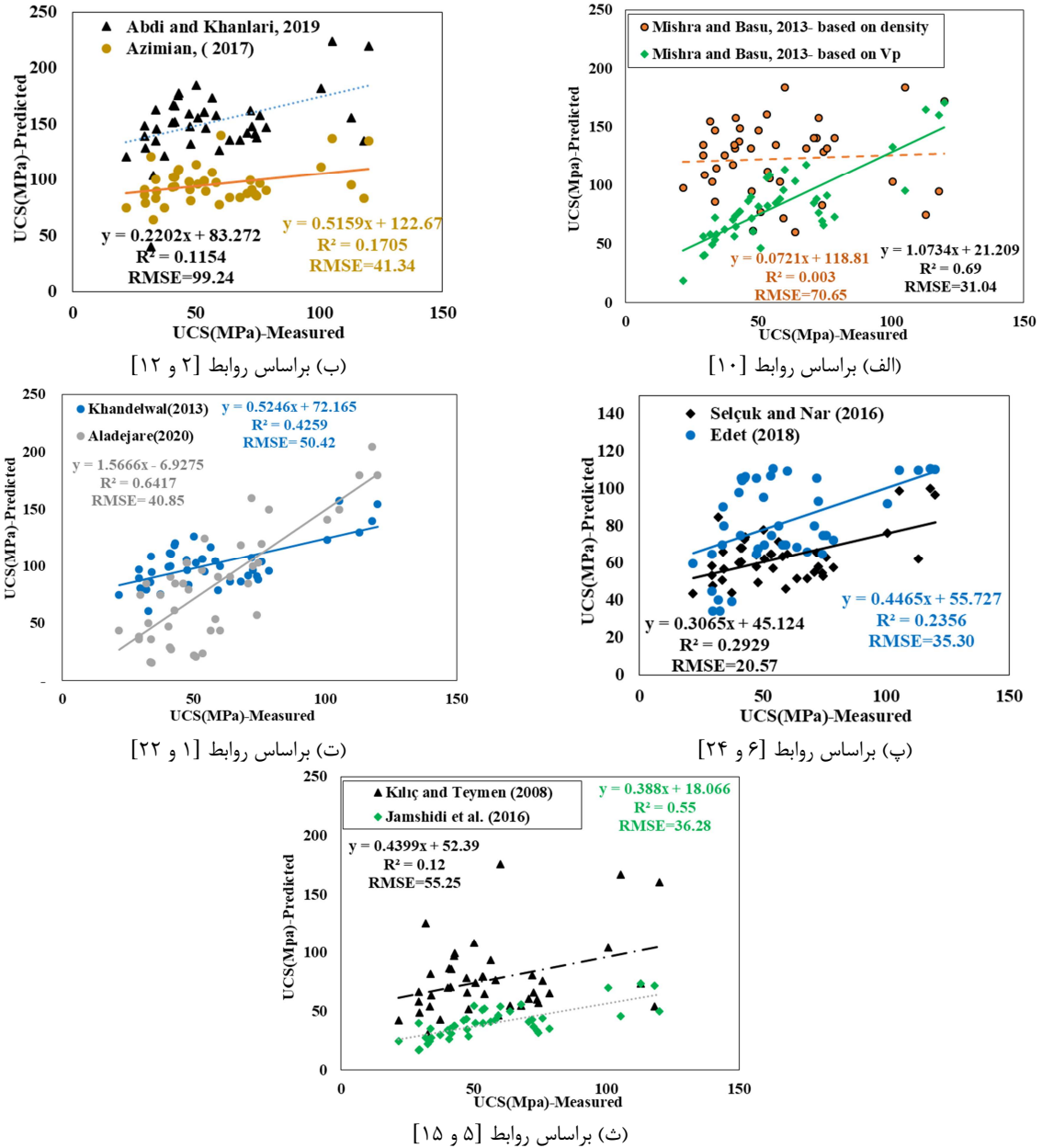
خصوص کاربرد دارد. بنابراین، در صورت به کارگیری هریک از این روابط، باید به این نکات توجه داشت. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، محققین پیشین تعدادی روابط تجربی برای محاسبه Es ارائه کرده‌اند. این پارامتر براساس این روابط تجربی، محاسبه و همبستگی آن‌ها با Es اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر بررسی شد. مقادیر متوسط Es تخمین زده شده براساس برخی از روابط تجربی در شکل ۹ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود اکثر روابط بررسی شده مقادیر Es بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده ارائه می‌کنند. تأثیر نوع لیتولوژی، شرایط انجام آزمایش (مانند سرعت بارگذاری) باعث تغییر در خصوصیات اندازه‌گیری شده می‌شود. با افزایش سرعت بارگذاری، نمونه سریع‌تر می‌شکند و مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد. نرخ بارگذاری پیشنهاد شده توسط ISRM بین ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه می‌باشد [۵۸].

شکل ۸ نشان می‌دهد که رابطه میشرای و باسو^{۱۹}، ال‌ادجاری^{۲۰} و همکاران و جمشیدی و همکاران، دارای ضریب تعیین بیش از ۵۰ درصد بوده و قابل کاربرد جهت تخمین خصوصیات مکانیکی ماسه سنگ‌های سازند لالون می‌باشند [۱، ۵ و ۱۰]. دقت رابطه میشرای و باسو نسبت به روابط دیگر بیشتر می‌باشد. این روابط تجربی نشانگر همبستگی بالای بین V_p و UCS می‌باشد.

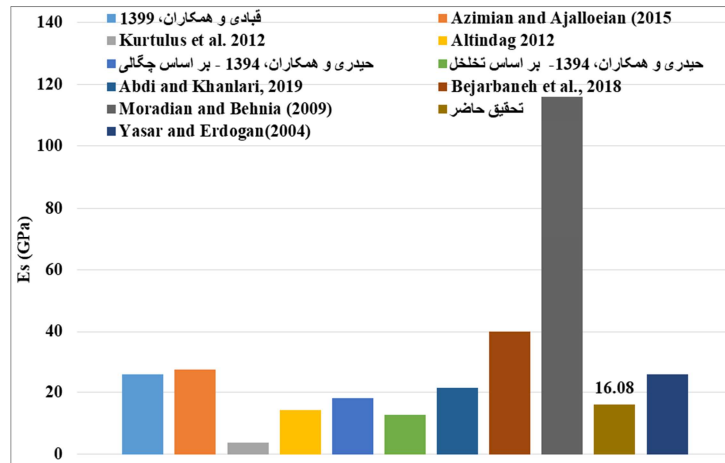
در مورد استفاده از این روابط لازم به توضیح است که روابط گوناگون ارائه شده توسط محققین مختلف به نوع سنگ، محدود مقادیر (هر رابطه برای یک محدوده مشخصی از مقادیر ارائه شده است)، خصوصیات میکروسکوپی نمونه‌ها، شرایط و چگونگی انجام آزمایش بستگی دارد و همانگونه که واسنجی روابط محققین مختلف نشان می‌دهد، هر رابطه برای یک منطقه به

¹⁹ - Mishra and Basu

²⁰ - Aladejare



شکل ۸- ارزیابی روابط تجربی جهت تخمین مقاومت فشاری با داده‌های آزمایشگاهی

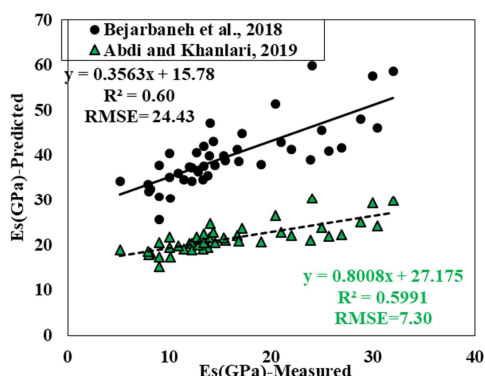


شکل ۹- مقادیر متوسط Es تخمین زده شده براساس برخی از روابط تجربی پیشین

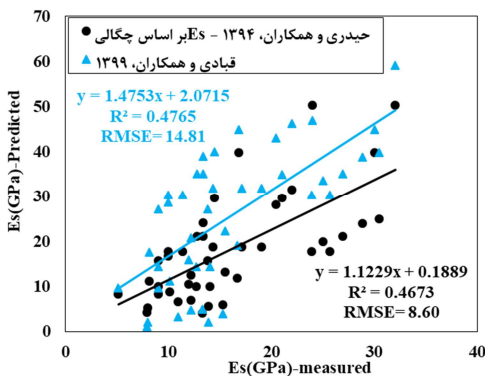
تحقیق حاضر ارائه می‌کند. به همین دلیل توجه به محدوده کاربرد هر رابطه ضروری می‌باشد. هر رابطه برای یک محدوده مشخصی از متغیرهای ورودی و خروجی ارائه شده است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که اکثر روابط ارزیابی شده دارای ضریب تعیین بیش از ۵۰ درصد می‌باشند. براساس ضریب تعیین، تخمین Es براساس رابطه حیدری و همکاران [۲۵] و براساس تخلخل، دارای بیشترین دقت نسبت به سایر روابط می‌باشد.

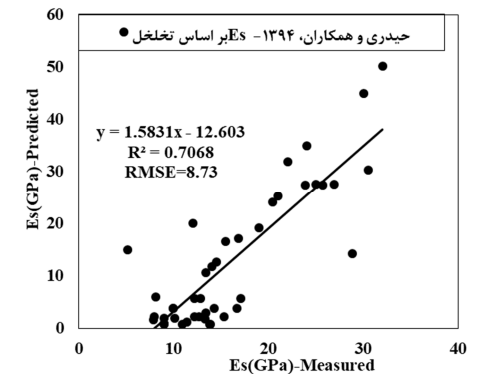
به عنوان مثال نرخ بارگذاری ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه در این تحقیق استفاده شد. انتخاب این نرخ وابسته به مقاومت نمونه‌ها می‌باشد و برای نمونه‌های سست مانند سنگ شیل معمولاً ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هر مطالعه‌ای وابسته به لیتولوژی نمونه‌ها می‌تواند مقدار نرخ بارگذاری را بین ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه انتخاب کند. ارزیابی روابط تجربی مطالعاتی که بر روی نمونه‌هایی با مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های تحقیق حاضر انجام شده است، مقادیر خصوصیات استاتیک بیشتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده



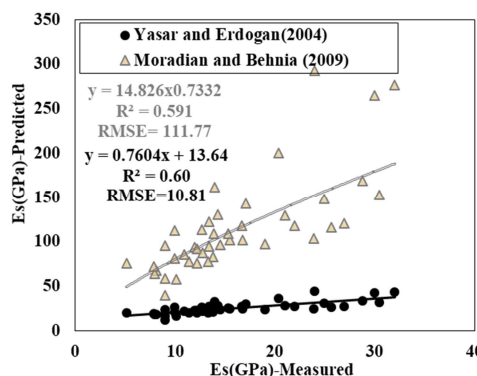
(ب) براساس روابط [۱۲ و ۱۳]



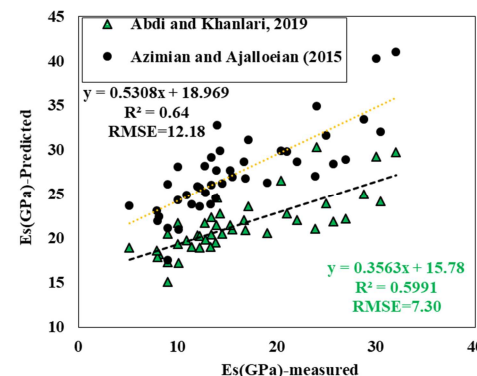
(ت) براساس روابط [۳ و ۲۵]



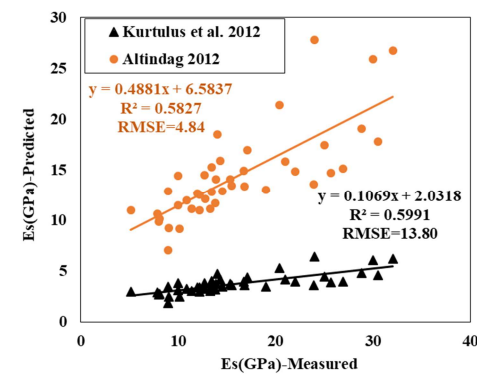
(ج) براساس رابطه [۲۵]



(الف) براساس روابط [۱۴ و ۲۱]



(پ) براساس روابط [۱۲ و ۲۰]



(ث) براساس روابط [۲۳ و ۲۶]

شکل ۱۰- ارزیابی روابط تجربی جهت تخمین مدول الاستیسیته براساس داده‌های آزمایشگاهی

۳-۵- تخمین مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته

تخمین خصوصیات استاتیک نمونه‌های خشک ماسه سنگ به روش رگرسیون خطی چندگانه براساس چگالی، تخلخل و سرعت موج تراکمی در منطقه مورد مطالعه و با توجه به جدول ضرایب و آزمون T مطابق روابط (۹) و (۱۰) می‌باشد. مشخصات متغیرهای استفاده شده در این روابط در جدول ۲ آمده است.

$$UCS = 62.914\rho - 0.242n + 23.855V_p - 202.879 \quad (9)$$

$$E_s = 8.386\rho - 0.671n + 4.044V_p - 18.238 \quad (10)$$

مقدار قدر مطلق بتا در جدول ۴ نشانگر تأثیر هرکدام از پارامترها در برآورد متغیر وابسته می‌باشد و

هرچه این مقدار بیشتر باشد اثر آن متغیر مستقل بر متغیر وابسته بیشتر می‌باشد. جدول ۴ نشان می‌دهد که تخمین UCS براساس چگالی و سرعت موج تراکمی بهتر از تخلخل می‌باشد. همچنین با توجه به این ضریب (ضریب بتا در جدول ۴) مشاهده می‌شود که چگالی نسبت به سرعت موج و تخلخل تأثیر کمتری بر مدول الاستیسیته دارد. سطح معنی‌داری در آزمون T موجه بودن هریک از پارامترهای برآورد شده در معادله مدل رگرسیون را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر، برای تعیین اینکه آیا ضریب همبستگی نمونه از نظر آماری اختلاف معنی داری با صفر دارد یا خیر از آزمون T استفاده می‌شود.

جدول ۴- ضرایب و اهمیت آن‌ها در معادله مدل‌ها

p-value	T-test	ضرایب استاندارد نشده		مدل	
		Beta	Std. Error	B	
۰/۰۰۳	-۳/۲۲	-	۶۲/۹۳	-۲۰۲/۸۸	Constant
۰/۷۰	-۳/۳۹	-۰/۰۴۶	۰/۶۳	-۰/۲۴۲	n
صفر	۵/۰۹	۰/۶۲	۴/۶۹	۲۳/۸۵۵	Vp
۰/۰۲	۲/۴۸	۰/۲۸	۲۵/۳۳	۶۲/۹۱۴	ρ
۰/۳۱	-۱/۰۳	-	۱۷/۶۷	-۱۸/۲۴	Constant
صفر	-۳/۸۱	-۰/۴۶	۰/۱۸	-۰/۶۷	n
۰/۰۰۴	۳/۰۷	۰/۳۷	۱/۳۲	۴/۰۴	Vp
۰/۲۵	۱/۱۸	۰/۱۳	۷/۱۱	۸/۳۹	ρ
صفر	-۴/۲۲	-	۵۱/۳۷	-۲۱۶/۵۸	Constant
صفر	۶/۰۸	۰/۶۴	۴/۰۷	۲۴/۷۲	Vp
۰/۰۱	۲/۸۱	۰/۳۰	۲۳/۵۵	۶۶/۲۵	ρ
۰/۸۱	۰/۲۴	-	۵/۹۳	۱/۴	Constant
۰/۰۰۱	۳/۷۵	۰/۴۲	۱/۲۳	۴/۶۱	Vp
صفر	-۴/۴۶	-۰/۵۱	۰/۱۷	-۰/۷۴	n

۱۲ از مدل ۱۲ نیز مقدار ثابت (p-value=0.308) و از مدل ۱۱ نیز مقدار ثابت (p-value=0.814) باید حذف شوند. بنابراین و با توجه به تأثیر جزئی تخلخل بر معادله مدل ۹، این پارامتر یعنی تخلخل از معادله رگرسیون حذف شد و مدل جدیدی

این آماره اهمیت نسبی حضور هر متغیر مستقل در مدل را نشان می‌دهد. بر این اساس، تخلخل (p-value=0.702) باید از مدل ۹ حذف شود. همچنین از مدل ۱۰ نیز چگالی (p-value=0.246) و مقدار ثابت (p-

تعیین با فرض تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. در صورتی که درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین تعدیل شده فقط حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین حتی با وجود مقدار بالا قابل تشخیص نیست در صورتی که می‌توان به مقدار برآورد شده ضریب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد. بنابراین مقدار تعدیل شده ضریب تعیین، میزان R^2 را با توجه به متغیرهای مستقل اضافه شده به خط رگرسیون و با توجه به عرض از مبدهای جدید، تعدیل و اصلاح می‌کند. هرچه تفاوت بین R^2 و R^2 تعدیل شده کمتر باشد نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل که به مدل اضافه شده‌اند به درستی انتخاب شده‌اند.

(مدل شماره ۱۱) با استفاده از نرم افزار و براساس چگالی و سرعت موج تراکمی جهت تخمین مقاومت تراکم تک محوری ارائه شد. چگالی نیز از معادله مدل ۱۰ حذف و مدل جدیدی (مدل ۱۲) جهت تخمین مدول الاستیسیته ارائه شد.

$$UCS = 66.251\rho + 24.723V_p - 216.582 \quad (11)$$

$$E_s = -0.742n + 4.61V_p \quad (12)$$

جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تعیین مدل‌ها بالا و خطای برآورد کم می‌باشد. تفاوت مهم ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده این است که ضریب تعیین فرض می‌کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند. بنابراین درصد نشان داده شده توسط ضریب

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل‌ها

Durbin-Watson	Std. Error of the Estimate	RMSE	MAPE	Adjusted R Square	R Square	R	Models
۱/۶۶	۱۳/۱۴	۱۴/۲۳	۱/۲	۰/۷۲۱	۰/۷۴۱	۰/۸۶۱	UCS=f(ρ , n, Vp)(۹)
۱/۵۱	۳/۶۹	۱۳/۲۵	۱/۰۲	۰/۷۲۱	۰/۷۴۱	۰/۸۶۱	Es= f(ρ , n, Vp)(۱۰)
۱/۶۹۵	۰/۱۳	۱۳/۵۶	۱/۲۲	۰/۷۲۷	۰/۷۴	۰/۸۶	UCS =f(ρ , Vp)(۱۱)
۱/۵۶	۳/۷۱	۱۳/۳۶	۱/۰۶	۰/۷۱۹	۰/۷۳۲	۰/۸۵۶	Es =f(n, Vp)(۱۲)

آزمونی به نام آزمون دوربین واتسون^{۲۲} استفاده می‌شود. مقدار این آماره به عنوان یک قانون باید بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد. در اینجا مقدار دوربین واتسون نشان می‌دهد که استقلال خطاها از یکدیگر و امکان استفاده از مدل‌ها وجود دارد (جدول ۵).

سطح معنی‌داری (Sig.<0.05) حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA^{۲۳}) نشان می‌دهد که مدل‌های برازش شده مناسب می‌باشند (جدول ۶). به بیان دیگر، جدول تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در برآورد ضرایب رگرسیونی و میزان باقیمانده، اعتبار قابل‌قبولی برای

خطای استاندارد برآورد^{۲۱} نشان دهنده میزان قدرت پیش‌بینی معادله رگرسیون می‌باشد. این شاخص، تغییرپذیری اندازه‌های پیش‌بینی شده را در اطراف خط رگرسیون نشان می‌دهد. هرچه این شاخص، کمتر باشد، پیش‌بینی دقیق‌تر می‌باشد.

از دیگر معیارهای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی، مستقل بودن خطاها از یکدیگر است (خطاها همان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله رگرسیون هستند). در صورتی که خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد. به منظور بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از

²²- Durbin- Watson

²³- Analysis of variance

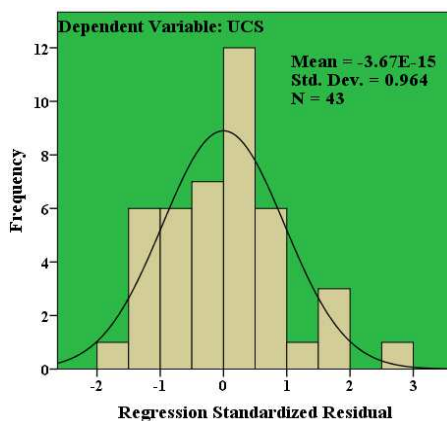
²¹- Std. Error of the Estimate

مدل‌های رگرسیونی وجود دارد؛ زیرا که مقدار سطح معنی‌داری آنها زیر ۰/۰۵ است.

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس مدل‌ها

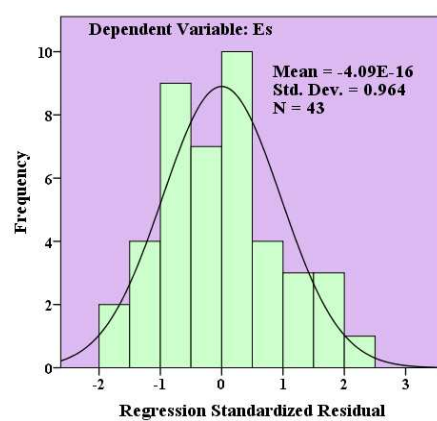
Sig.	F	Mean Square	df	Sum of Squares	Model	
صفر	۳۷/۱۹	۶۴۲۱/۲۸	۳	۱۹۲۶۳/۸۳	Regression	۹
-	-	۱۷۲/۶۸	۳۹	۶۷۳۴/۴۸	Residual	
-	-	-	۴۲	۲۵۹۹۸/۳۱	Total	
صفر	۳۷/۲۶	۵۰۷/۳۳	۳	۱۵۲۱/۹۹	Regression	۱۰
-	-	۱۳/۶۲	۳۹	۵۳۱/۰۷	Residual	
-	-	-	۴۲	۲۰۵۳/۰۶	Total	
صفر	۵۶/۹۲	۹۶۱۹/۰۹	۲	۱۹۲۳۸/۱۷	Regression	۱۱
-	-	۱۶۹/۰۰	۴۰	۶۷۶۰/۱۴	Residual	
-	-	-	۴۲	۲۵۹۹۸/۳۱	Total	
صفر	۵۴/۶۶	۷۵۱/۵۳	۲	۱۵۰۳/۰۶	Regression	۱۲
-	-	۱۳/۷۵	۴۰	۵۴۹/۹۹	Residual	
-	-	-	۴۲	۲۰۵۳/۰۶	Total	

استفاده کرد. بدین منظور باید مقادیر استاندارد خطاها محاسبه شود و نمودار توزیع داده‌ها و نمودار نرمال آنها رسم شود. با توجه به مقدار میانگین نزدیک به صفر و انحراف معیار نزدیک به یک، خطاها تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشند و مدل‌ها قابل استفاده جهت تخمین خواص استاتیک می‌باشند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- هیستوگرام توزیع باقیمانده‌های مربوط به مدل‌های ۵ و ۶

نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها یا خطاها یکی دیگر از معیارهای ارزیابی مدل‌ها می‌باشد. تفاوت بین مقادیر خصوصیات استاتیک (مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته) اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله مدل خطا نامیده می‌شود. در صورت عدم برقراری این پیش‌فرض، نمی‌توان از رگرسیون

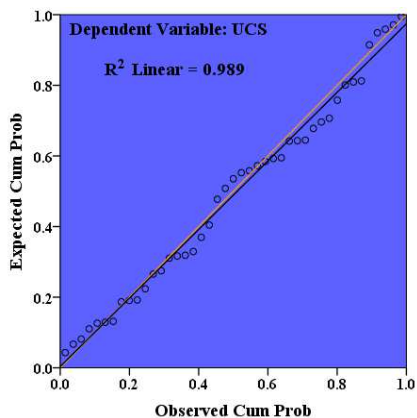


شکل ۱۱- هیستوگرام توزیع باقیمانده‌های مربوط به مدل‌های ۵ و ۶

به منظور دقت روابط در پیش‌بینی متغیرهای وابسته، ضریب تعیین (R^2) مربوط به روابط خصوصیات استاتیک اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در شکل

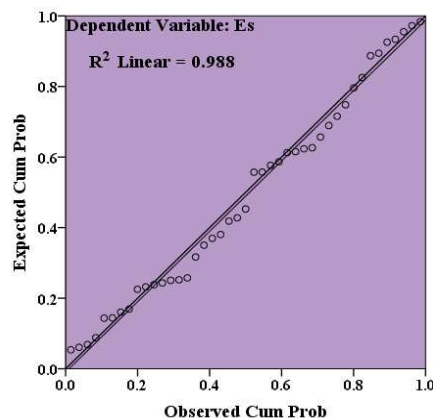
۱۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که دقت روابط مربوط به مقادیر مقاومت تک محوری مشاهداتی و اندازه‌گیری شده بیشتر از مدول الاستیسیته می‌باشد. همانطور

افزایش دقت رابطه مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته اندازه گیری و پیش‌بینی شده، شده است.



(ب) مقاومت فشاری تک محوری

که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود پراکندگی داده‌ها بسیار به خط قطری یا خط یک به یک نزدیک می‌باشد و باعث

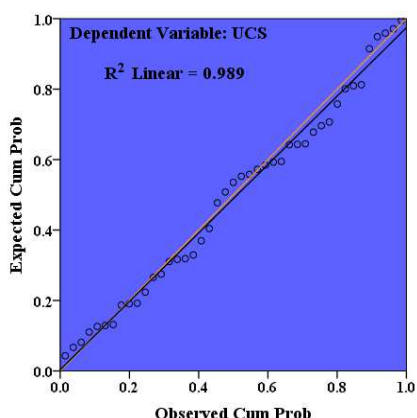


(الف) مدول الاستیسیته

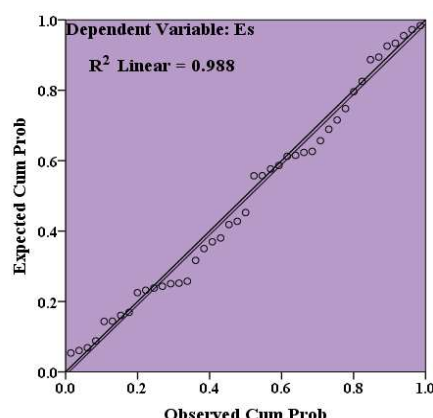
شکل ۱۲- رابطه خصوصیات استاتیک اندازه گیری شده و تخمین زده شده به روش رگرسیون چند متغیره

نمودار پیش‌بینی شده استفاده می‌کند تا باقیمانده‌ها را در برابر مقادیر پیش‌بینی شده نشان دهد. مشاهده می‌شود که الگوی نقاط داده‌ها مربوط به مقاومت تراکم تک محوری در شرایط اشباع در حال تنگ‌تر شدن به سمت چپ می‌باشد، که این نشانه‌ای برای ناهمسانی خفیف می‌باشد (شکل ۱۳). به عبارتی دیگر، نمودار زیر نشان می‌دهد که خطا در حال گسترش است. با افزایش واریانس، خطا افزایش نمی‌یابد. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که هیچ تفاوت معنی‌داری در خطای واریانس وجود ندارد.

یکی از فرضیات مدل‌ها حداقل مربعات آن است که واریانس باقی‌مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده همگن باشد، که با عنوان ناهمسانی شناخته می‌شود. اگر مدل به خوبی ساخته شده باشد، هنگامی که نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده رسم می‌شود، هیچ الگوی مشخصی نباید وجود داشته باشد. اگر واریانس باقیمانده‌ها غیرثابت باشد، در این صورت واریانس باقیمانده‌ها را ناهمسان می‌خوانند. در شکل ۱۳ با استفاده از روش‌های نموداری، ناهمسانی مدل‌ها شماتیک وار ارائه شده است. این روش نموداری متداول از باقیمانده در برابر



(ب) مقاومت فشاری تک محوری



(الف) مدول الاستیسیته

شکل ۱۳- وضعیت ناهمسانی مدل‌های ارائه شده

تخمین خصوصیات استاتیک (مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته) سنگ بکر براساس

۴- نتیجه‌گیری

تخلخل، سرعت موج تراکمی و چگالی با مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب لگاریتمی، خطی و چند جمله‌ای درجه دو می‌باشد. همچنین سرعت موج تراکمی و تخلخل بیشترین تأثیر را بر خصوصیات استاتیک دارد. واسنجی روابط تجربی سایر محققان نشان داد که برخی از این روابط دارای دقت کافی (دارای ضریب تعیین بیش از ۵۰ درصد) جهت تخمین خصوصیات ماسه سنگ‌های سازند لالون می‌باشند. دقت خصوصیات استاتیک پیش‌بینی شده براساس معیارهای ضریب تعیین، RMSE و MAPE نشان داد که مدول الاستیسیته و مقاومت تراکم تک محوری پیش‌بینی شده براساس متغیرهای مستقل از دقت قابل توجهی برخوردار می‌باشند. بررسی نمودارهای همگنی واریانس باقی‌مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده، ضریب تعیین و خطاها (RMSE و MAPE) نشان داد که رگرسیون چندمتغیره از دقت بالایی جهت تخمین خصوصیات استاتیک ماسه سنگ براساس چگالی (g/cm^3)، تخلخل (%) و سرعت موج تراکمی (km/s) به شکل دو رابطه زیر برخوردار است:

$$UCS = 66.251\rho + 24.723V_p - 216.582 \quad (13)$$

$$E_s = -0.742n + 4.61V_p \quad (14)$$

خصوصیات فیزیکی و سرعت موج تراکمی و بررسی تأثیر آب بر این خصوصیات از جمله مواردی است که به طور گسترده در پروژه‌های عمرانی و معدنی برای مطالعات مکانیک سنگ مورد نیاز می‌باشند. از طرفی آزمایش سرعت موج تراکمی جزو آزمایش‌های غیرمخرب و آسان است و امکان انجام آن در صحرا وجود دارد. در این پژوهش خصوصیات پتروگرافی، فیزیکی، مکانیکی و سرعت موج تراکمی نمونه‌های خشک و اشباع ماسه سنگ‌های تهیه شده از سازند لالون بررسی شد. نتایج پتروگرافی نمونه‌های ماسه سنگ مطابق طبقه بندی فولک نشان داد که این ماسه سنگ‌ها از نوع فلدسپاتیک لیت‌آرنایت و لیت‌آرنایت می‌باشند. به دلیل تأثیر رطوبت بر خواص فیزیکی و مکانیکی این نوع ماسه سنگ‌ها، چگالی نمونه‌ها در حالت اشباع $1/04$ برابر چگالی در حالت خشک می‌باشد. مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته در حالت اشباع به ترتیب $0/82$ و $0/75$ برابر حالت خشک می‌باشند. تأثیر رطوبت باعث افزایش سرعت موج تراکمی می‌شود به این صورت که مقدار آن در حالت اشباع $1/2$ برابر سرعت موج تراکمی در شرایط خشک می‌باشد. نوع لیتولوژی، جذب آب نمونه‌ها، نوع و مقدار کانی‌ها، نوع سیمان و مقدار آن از عواملی می‌باشند که باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع می‌شود.

نتایج آنالیز آماری نشان داد که براساس دقیق‌ترین (بیشترین ضریب تعیین و کمترین خطا) برازش رابطه

مراجع

- [1] Aladejare, A. E. (2020). "Evaluation of empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock using measurements from index and physical tests", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 256-268.
- [2] Azimian, A. (2017). "Application of statistical methods for predicting uniaxial compressive strength of limestone rocks using nondestructive tests", *Acta Geotechnica*, 12(2), 321-333.
- [3] Ghobadi, M. H., Amiri, M., & Aliani, F. (2020). "Investigation of engineering geology characteristics of peridotites (Case Study: Harsin County, Kermanshah Province)", *Journal of Engineering Geology*, 14(1), 105-132.
- [4] Ghafoori, M., Rastegarnia, A., & Lashkaripour, G. R. (2018). "Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks", *Journal of African Earth Sciences*, 137, 22-31.

- [5] Jamshidi, A., Nikudel, M., Khamehchiyan, M., Zarei Sahamieh, R., & Abdi, Y. (2016). "A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones", *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 568-580
- [6] Selçuk, L., & Nar, A. (2016). "Prediction of uniaxial compressive strength of intact rocks using ultrasonic pulse velocity and rebound-hammer number", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(1), 67-75.
- [7] Barham, W. S., Rabab'ah, S. R., Aldeeky, H. H., & Al Hattamleh, O. H. (2020). "Mechanical and physical based artificial neural network models for the prediction of the unconfined compressive strength of rock", *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 4779-4792.
- [8] Abdi, Y. (2020). "Application of multivariate regression analysis to predict uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of sandstones using petrographic properties", *New findings of applied geology*, 14(27), 147-157.
- [9] Ebrahimi Fard, H., & Jabbari, M. M. (2017). "The Effect of Magnesium Oxide Nano Particles on the Mechanical and Practical Properties of Self-Compacting Concrete", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(2), 77-87.
- [10] Mishra, D. A. & Basu, A. (2013). "Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system", *Engineering Geology*, 160(1), 54-68.
- [11] Armaghani, D. J., Amin, M. F. M., Yagiz, S., Faradonbeh, R. S., & Abdullah, R. A. (2016). "Prediction of the uniaxial compressive strength of sandstone using various modeling techniques", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 174-186.
- [12] Abdi, Y., & Khanlari, G. H. (2019). "Estimation of mechanical properties of sandstones using wave velocity and Schmidt hammer experiments", *Journal of New Applied Geological Findings*, 24(13), 33-47.
- [13] Bejarbaneh, B. Y., Bejarbaneh, E. Y., Fahimifar, A., Armaghani, D. J., & Abd Majid, M. Z. (2018). "Intelligent modelling of sandstone deformation behavior using fuzzy logic and neural network systems", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(1), 345-361.
- [14] Moradian, Z. A., & Behnia, M. (2009). "Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test", *International Journal of Geomechanics*, 9(1), 14-19.
- [15] Kılıç, A. & Teymen, A. (2008). "Determination of mechanical properties of rocks using simple methods", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 237-244.
- [16] Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2009). "Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 355-370.
- [17] Vásárhelyi, B. (2005). "Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(1), 69-76.
- [18] Török, Á. & Vásárhelyi, B. (2010). "The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary", *Engineering Geology*, 115(3), 237-245.
- [19] Vásárhelyi, B. (2003). "Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in dry and saturated conditions", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3), 245-249.
- [20] Azimian, A., & Ajalloeian, R. (2015). "Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity", *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4), 2069-2079.
- [21] Yasar, E., & Erdogan, Y. (2004). "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 871-875.
- [22] Khandelwal, M. (2013). "Correlating P-wave velocity with the physic-mechanical properties of different rocks", *Pure Applied Geophysics*, 170, 507-514.
- [23] Altindag, R. (2012). "Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 229-237.
- [24] Edet, A. (2018). "Correlation between Physico-mechanical Parameters and Geotechnical Evaluations of Some Sandstones along the Calabar/Odukpani-Ikom-Ogoja Highway Transect, Southeastern Nigeria", *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 135-149.
- [25] Heidari, M., Rafiei, B., Nouri, M., Khanlari, G. R., & Momeni, A. A. (2015). "Estimation of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of conglomerate specimens using regression and artificial neural network", *geotechnical geology (applied geology)*, 10(1), 35-46.
- [26] Kurtulus, C., Bozkurt, A., & Endes, H. (2012). "Physical and Mechanical Properties of Serpentinized Ultrabasic Rocks in NW Turkey", *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1205-1215.
- [27] Shakoor, A., & Barefield, E. H. (2009). "Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones", *Environmental & Engineering Geoscience*, 15(1), 29-40.
- [28] Abdi, Y., Khanlari, G. R. & Jamshidi, A. (2018). "Correlation between mechanical properties of sandstones and P-wave velocity in different degrees of saturation", *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-10, <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0721-6>.

- [29] Vasaneli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M. & Aiello, M. A. (2015). "Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone", *Ultrasonics*, 60: 33-40.
- [30] Karakul, H., & Ulusay, R. (2013). "Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation", *Rock mechanics and rock engineering*, 46(5): 981-999.
- [31] Karakul, H. (2016). "Investigation of saturation effect on the relationship between compressive strength and Schmidt hammer rebound", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(3), 1143-52.
- [32] Ansari, Y., & Hashemi, A. (2017). "Neural Network Approach in Assessment of Fiber Concrete Impact Strength", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(3), 88-97.
- [33] Sekhavati, P., & Jafarkazemi, M. (2019). "Investigating durability behavior and compressive strength of lightweight concrete containing the nano silica and nano lime additives in the acid environment", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(2), 103-117.
- [34] Esparham, A., Moradikhoh, A. B., & Avanaki, M. J. (2020). "Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(2), 115-123.
- [35] Shirmohammadi, H., & Hoseiny Khanshan, H. (2018). "Effect of Mineral pitch and Zycosil Nano-Material on Mechanical Properties and Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2(2), 97-102.
- [36] Taheri, S., & Ziad, H. (2021). "Analysis and Comparison of Moisture Sensitivity and Mechanical Strength of Asphalt Mixtures Containing Additives and Carbon Reinforcement", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 5(1), 1- 8.
- [37] Zhang, Z., Jiang, Q., Zhou, C., & Liu, X. (2014). "Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting–drying conditions", *Geophysical Journal International*, 198(2), 1034-1044.
- [38] McSkimming, E. (2014). "Weathering Effects on the Engineering Properties of Sydney (Yellow Block) Sandstone when used as a Building Material", *International Journal of Architectural Heritage*, 9, 497-509.
- [39] Andriani, G. F. & Walsh, N. (2010). "Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy)", *Geological Society, London, Special Publications*, 333(1), 129-141.
- [40] Yasar, E., Ranjith, P. G., & Perera, M. S. A. (2010). "Physico-mechanical behavior of southeastern Melbourne sedimentary rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 47, 481-487.
- [41] Hosseini, M., & Nalbandan, M. (2019). "The effect of wet-drying cycles on the physical, mechanical and rupture properties of sandstone", *Journal of Mineral Resources Engineering*, 4(1), 79-95.
- [42] Ghobadi, M. H. & Mousavi, S. (2014). "The effect of pH and salty solutions on durability of sandstones of the Aghajari Formation in Khuzestan province, southwest of Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 641-653.
- [43] Ulusay, R., Tureli, K., & Ider, M. H. (1994). "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariable statistical techniques", *Engineering Geology*, 37, 135–157.
- [44] Bell, F. G. (1978). "The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones, Northumberland, England", *Engineering Geology*, 12, 11-29.
- [45] Mikaeil, R., Jalili Kashtiban, Y., Shahriar, K., & Jafarpour, A. (2020). "Evaluation and Management of Geotechnical Risk in Tunneling Projects Using Fault Tree Analysis", *Civil Infrastructure Research*, 6(1), 41-53.
- [46] Chang, C., Zoback, M. D., & Khaksar, A. (2006). "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks", *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 51(3), 223-237.
- [47] Heidari, M., Momeni, A., Rafiei, B., Khodabakhsh, S., & Torabi-Kaveh, M. (2013). "Relationship between Petrographic Characteristics and the Engineering Properties of Jurassic Sandstones, Hamedan, Iran", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 1091-1101.
- [48] Wang, S., Hagan, P., Hu, B., Gamage, K., Yan, C. & Xu, D. (2014). "Rock-arch instability characteristics of the sandstone plate under different loading conditions", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- [49] Weng, M. C. & Li, H. H. (2012). "Relationship between the deformation characteristics and microscopic properties of sandstone explored by the bonded-particle model", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 34-43
- [50] Naresh, K. T., Shuichiro, Y., & Suresh, D. (2007). "Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal Sub-Himalayas", *Engineering Geology*, 90, 105-123.
- [51] Ghobadi, M. H., Rafiei, B., Mousavi, S., & Aria Far, N. (2013). "Study of geotechnical properties of sandstones of Aghajari Formation in the east and southeast of Ahvaz", *Journal of Advanced Applied Geology*, 1, 21-33.

- [52] Heidari, M., Rafiei, B., & Taba, H. (2013). "Study of geotechnical characteristics of sandstones of Qom Formation located in Tajrak village (Famenin city)", *8th Conference of Iranian Geological Society of Engineering and Environment*, Ferdowsi University of Mashhad.
- [53] Gokceoglu, C., & Zorlu, K. (2004). "A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17, 61-72.
- [54] Ghobadi, M. H., & Aria Far, N. (2011). "Possibility of assessing the physical properties of sandstones in Aghajari Formation in Ahvaz using non-destructive P-wave velocity test", *15th Conference of Iranian Geological Society*, Tarbiat Moallem University, Tehran.
- [55] Oshnavieh, D., & Bagherzadeh Khalkhali, A. (2019). "Use of shear wave velocity in evaluation of soil layer's condition after liquefaction", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 3, 113-130.
- [56] Naseri, F., Lotfollahi, S., & Bagherzadeh Khalkhali, A. (2017). "Dynamic Mechanical Behavior of Rock Materials", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 1(2), 39-44.
- [57] Lotfollahi, S., Ghorji, M., & Hoseini Toodashki, V. (2018). "An Investigation into the Effect of Foliation Orientation on Displacement of Tunnels Excavated in Metamorphic Rocks", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2(3), 138-145.
- [58] ISRM. (1981). *Rock characterization testing and monitoring*. In: Brown, E.T. (Ed.), ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford.
- [59] ASTM. (1983). *Test methods for ultrasonic velocities determination*. Designation D2845.
- [60] Folk, R. L. (1974), *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill, Austin, 600p.
- [61] Taylor, R. (1990). "Interpretation of the correlation coefficient: a basic review", *Journal of diagnostic medical sonography*, 6(1), 35-39.