

پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ حین پایش مقاومت‌ویژه الکتریکی با رگرسیون چندمتغیره

بهنام تقوی^{۱*}، فرنوش حاجی‌زاده^۲ و حسن مومیوند^۳

۱- دانشجوی دکترا مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استاد گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: b.taghavi@urmia.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱

دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۴

چکیده

مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها است که در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ، پیش‌بینی آن امری ضروری است. اخیراً پژوهش‌های متعددی در خصوص بررسی ارتباط خواص پتروفیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌ها با پارامترهای ژئوفیزیکی انجام شده است، که در این میان؛ روش‌های ژئوالکتریک و لرزه‌ای بیش‌ترین کاربرد و بهره‌وری را داشته‌اند. در این پژوهش، پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از روش ژئوالکتریک بررسی شده است. در پژوهش حاضر؛ پس از نمونه‌برداری از محدوده مورد مطالعه، در محیط آزمایشگاهی، نمونه مغزه‌ها اشباع و با نصب الکترودهای مخصوص، تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی حین بارگذاری تنش فشاری اندازه‌گیری و پایش گردید. نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس ساخت و بافت متفاوت؛ رفتارهای الکتریکی متفاوتی حین اعمال تنش فشاری نشان دادند، که نتایج بیانگر تاثیر قابل توجه، نسبت حجمی سنگ‌دانه‌ها بر روی خصوصیات پتروفیزیکی و ژئومکانیکی است. در نمونه مغزه‌های تهیه شده از برش‌های گسلی و مصالح آبرفتی با نسبت حجمی بلوکی ۲۵-۷۵ درصد، همبستگی معناداری بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده، مشاهده گردید. مدل ارائه شده با ضریب تعیین (R^2) ۸۹/۱۳ درصد، خطای جذر مجموع مربعات (RMSE) ۸/۶۸۳ و میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) ۰/۹۱۱؛ می‌تواند مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) سنگ را بر اساس پارامترهای مقاومت ظاهری الکتریکی و VBP پیش‌بینی نماید. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص شد که آزمایش‌های غیرمخرب، روش مناسبی برای تخمین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره بوده و می‌توان با استفاده از آن‌ها، از انجام آزمایش‌های پرهزینه، وقت‌گیر و مخرب جهت برآورد این پارامتر اجتناب کرد.

واژه‌های کلیدی: پتروفیزیک، ژئومکانیک، مقاومت‌ویژه، نسبت حجمی بلوکی، میانگین هندسی نسبت خطا

۱- پیشگفتار

و مدل‌های متفاوتی بین مقاومت‌ویژه و پارامترهای ژئومکانیکی و پتروفیزیکی ارائه شده است (جدول ۱).
که در آن:
UCS و V_p به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری (مگا پاسکال) و سرعت موج طولی (متر بر ثانیه).
K و E به ترتیب نفوذپذیری (دارسی) و مدول کشسانی (مگا پاسکال).
Res و RMR به ترتیب مقاومت‌ویژه الکتریکی (اهم‌متر) و طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ.
Q و GSI به ترتیب سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ و شاخص مقاومتی زمین‌شناسی.
p: مقاومت‌ویژه ظاهری (اهم‌متر).

مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری از روش‌های غیرمخرب ژئوفیزیکی است که در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صحرایی به کار برده می‌شود. روش‌های مستقیم تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها علاوه بر زمان بر و هزینه‌بر بودن، پارامترهای ژئومکانیکی را به طور موضعی تعیین می‌کنند. در سال‌های اخیر نتایج مطالعات نشان می‌دهد که می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی و پتروفیزیکی را بر اساس روش‌های ژئوفیزیکی رایج برآورد و تغییرات فضایی آن‌ها را نیز پیش‌بینی کرد (قربانی و همکاران، ۲۰۱۲). پژوهش‌های متعددی در جهت بررسی رفتار مهندسی سنگ‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده

جدول ۱. روابط و مدل‌های تجربی ارائه شده بین پارامترهای پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و مقاومت‌ویژه الکتریکی

Table 1. Relationships and Experimental models between Petrophysical, Geomechanical and Electrical Resistivity parameters

مدل/رابطه تجربی	محقق
$UCS = \exp(-11.2/V_p)$	(مک نالی، ۱۹۸۷)
$UCS = k \cdot (Density) \cdot V_p + A$	(اینو و واهمی، ۱۹۸۹)
$UCS = 35.54V_p - 55$	(ترگول و ظریف، ۱۹۹۹)
$UCS = 9.9V_p^{1.21}$	(قهرمان، ۲۰۰۱)
$V_p = 0.0317 UCS + 2.0195$ $V_p = 0.0937 E + 1.7528$	(باشار و اردوغان، ۲۰۰۴)
$UCS = 22.03V_p^{1.247}$	(سوزا و همکاران، ۲۰۰۵)
$E = 14.15 \ln(Res) - 29.07$ $UCS = 61.7 \ln(Res) - 138.25$	(قهرمان و آلبرت، ۲۰۰۶)
$UCS = 0.0642V_p - 117.99$	(شارما و سینگ، ۲۰۰۸)
$UCS = 0.0048 Res + 11.89$	(قهرمان و آلبر، ۲۰۱۴)
$\log(\rho) = 0.018 RMR - 0.058 Q + 0.01 GSI + 1.492$	(محمدیان و همکاران، ۲۰۱۸)

مقاومت‌ویژه کاهش می‌یابد (کیت و گخال، ۱۹۹۸). در سنگ‌های خشک و غیراشباع با اعمال فشار جانبی، درزه‌ها و میکرو درزه‌ها بسته شده و مقاومت‌ویژه کاهش می‌یابد (شن، ۱۹۹۸). در این حالت فشار آب منفذی، اثر تخلخل را افزایش می‌دهد و در نتیجه مقاومت ویژه سنگ کاهش می‌یابد (گلوور و همکاران، ۲۰۰۰). اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی نمونه‌های مصنوعی تحت فشار نشان داد که افت ولتاژ با افزایش مقاومت سنگ و چگالی، کاهش می‌یابد. مقاومت‌ویژه نمونه‌های سنگ کربناته با ۲۰ درصد رس و ۷۰ درصد اشباع با اعمال تنش محوری، افزایش می‌یابد (آرا و همکاران، ۲۰۰۴). امپدانس الکتریکی نمونه مغزه‌های به دست آمده از منطقه برش گسلی اندازه‌گیری و ارتباط آن با سایر پارامترهای ژئومکانیکی و پتروفیزیکی؛ UCS، مدول‌های کشسانی، اندیس بار نقطه‌ای، سرعت موج طولی، اندیس چکش‌اشمیت، چگالی و تخلخل نمونه‌ها بررسی و در نتیجه ارتباط لگاریتمی بین UCS، مدول‌های کشسانی و مقاومت ویژه الکتریکی نشان داده شده است. مدل‌های ارائه شده، کاربردی بوده و به عواملی مانند نوع سنگ و شرایط انجام آزمایش بستگی دارند (قهرمان و آلبرت، ۲۰۰۶). ذرات رسی دارای فعالیت الکتریکی سطحی هستند (رسانایی سطحی) و اگر درصد اشباع آب کم باشد، این فعالیت باعث کاهش مقاومت الکتریکی سنگ و خاک

مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها است که در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ، پیش‌بینی آن امری ضروری است. این ویژگی مکانیکی سنگ علاوه بر این که بعنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها است، کاربردهای متعددی همچون؛ تعیین امتیاز توده‌سنگ (RMR)، تخمین مقاومت فشاری سه‌محوری با استفاده از معیارهای شکست سنگ سالم و توده‌سنگ، تعیین قابلیت انفجار سنگ و تعیین شاخص خردایش سنگ در انجام عملیات آتشباری، برآورد نرخ نفوذ ماشین حفر تونل TBM، قابلیت حفاری دستگاه چالزنی، تعیین ظرفیت مجاز باربری و مقاومت برشی جانبی پی‌های سنگی دارد (مومیوند، ۲۰۱۶). در تنش‌های کم، مقاومت ویژه سنگ‌های بلورین افزایش و سپس در تنش‌های زیاد، کاهش می‌یابد. فشار جانبی، مقاومت‌ویژه سنگ‌های اشباع را افزایش می‌دهد که دلیل آن بسته شدن درزه‌ها و کاهش اندازه منفذها است. در نتیجه با اعمال فشار جانبی بیشتر از فشار آب منفذی، نفوذپذیری کاهش می‌یابد (کیت و راثو، ۱۹۸۹). پس از بررسی روابط تجربی گوناگون بین مقاومت‌ویژه الکتریکی و مقاومت مکانیکی سنگ‌های هیمالیا، رابطه لگاریتمی بین مقاومت فشاری تک‌محوری^۱ (UCS) و مقاومت‌ویژه الکتریکی ارائه شد که نشان می‌دهد مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش مقاومت‌ویژه الکتریکی، افزایش می‌یابد (کیت و استاپاک، ۱۹۹۵). در ماسه‌سنگ‌ها؛ با افزایش UCS،

¹ Uniaxial Compressive Strength

دارند. بنابراین شاخص کیفیت سنگ، نمی‌تواند یک شاخص کلی برای مشخص نمودن میزان نفوذپذیری، سیمان‌خوری، وضعیت درزه‌ها از نظر بازشدگی، پرشدگی و زبری آن باشد. در حالی که طبقه‌بندی ژئومکانیکی سنگ^۵ (RMR) با توجه به این که بر اساس پارامترهای متعددی از جمله شاخص کیفیت سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری، سطح درزه‌ها، مواد پرکننده، آب موجود در درزه‌ها محاسبه می‌گردد، می‌تواند خصوصیات هیدرولیکی سنگ را دقیق‌تر منعکس نماید. لذا رابطه معنادارتری نسبت به شاخص کیفیت سنگ با نفوذپذیری و سیمان‌خوری دارد (تقوی و همکاران، ۲۰۱۷).

در منطقه تونل انتقال آب سبزکوه به دریاچه سد چغاخور؛ رابطه بین داده‌های ژئومکانیکی و نتایج حاصل از روش کاوش‌های صحرایی مقاومت‌ویژه منطقه با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی استخراج و دقت مدل با استفاده از فاکتورهای نظیر ضریب تعیین^۶ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۷ (RMSE) و میانگین هندسی نسبت خطا^۸ (GMER) ارزیابی شده است. نتایج پژوهش نشان داد که مدل چندمتغیره خطی ارائه شده با ضریب تعیین ۸۱/۷ درصد، RMSE و GMER برابر با ۰/۱۲۷ و ۰/۹۹ دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی ویژگی‌های پتروفیزیکی و ژئومکانیکی بر اساس نتایج مطالعات ژئوالکتریکی در محدوده مورد مطالعه است (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۶). پایش تغییرات مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی حین آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه مغزه‌هایی تهیه شده از سنگ‌های گرانیتی نشان داد که با افزایش تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی؛ همبستگی لگاریتمی معناداری بین داده‌های تجربی وجود دارد (رنجبر و کریمی‌نسب، ۲۰۱۹). استفاده از تجزیه و تحلیل آماری پیدا شد. تحلیل آماری داده‌های تجربی ۲۴ نمونه سنگ آذرآواری، نشان داد که همبستگی معناداری بین مقاومت ویژه الکتریکی و خواص سنگ از جمله؛ مقاومت فشاری تک‌محوری، استحکام کششی برزلی، چگالی و تخلخل وجود دارد (قهرمان، ۲۰۲۲). جهت ارزیابی اثر قطبیدگی الکترونی و درصد رطوبت اشباع بر مقاومت‌ویژه الکتریکی سنگ‌ها؛ نمونه‌هایی از گرانیت و ماسه‌سنگ با بسامدهای

می‌شود ولی در صورتی که اشباع آب زیاد باشد، مقاومت ویژه سنگ بیشتر تحت تاثیر شوری آب موجود در منافذ خواهد بود، همچنین مقاومت ویژه سنگ‌های رسی به بسامد نیز وابسته است (قربانی و همکاران، ۲۰۰۹).

اندازه‌گیری تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی در حین اعمال تنش فشاری بر روی ۷ نمونه مغزه در آزمایشگاه نشان دهنده افزایش مقاومت‌ویژه در ماسه‌سنگ‌ها و کاهش مقاومت‌ویژه در سنگ‌آهک‌های فسیل‌دار، در سراسر محدوده افزایش کرنش است. در حالی که افزایش کرنش در نمونه مغزه‌هایی از جنس تراورتن و سنگ‌آهک، ابتدا افزایش مقاومت‌ویژه و سپس کاهش مقاومت‌ویژه را نشان می‌دهد. در این تحقیق، رفتار مقاومت ویژه حین بارگذاری به بسته شدن منافذها (کاهش تخلخل) در کرنش‌های کم و ایجاد درزه‌های القایی (افزایش تخلخل) در کرنش‌های بیشتر ارتباط داده شده است (قربانی و همکاران، ۲۰۱۲).

برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) بر مبنای داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری، اندازه‌گیری‌های اسپکتروسکوپی در محیط آزمایشگاهی بر روی ۲۴ نمونه بررسی و ثبت شد. مقادیر UCS با مقادیر مقاومت ظاهری الکتریکی مربوطه همبستگی داشته ولی ارتباط معناداری بین آن‌ها یافت نشد. با این حال، برای نمونه‌هایی با نسبت حجمی بلوکی^۲ (VBP) ۷۵-۲۵ درصد، یک همبستگی معناداری وجود دارد. نتایج نشان داد که VBP با مقاومت ظاهری الکتریکی بسیار متقابل است. بر اساس مدل پیش‌بینی ارائه شده می‌توان UCS را از مقاومت ظاهری الکتریکی نمونه‌هایی که دارای VBP بین ۲۵ تا ۷۵ درصد دارند، پیش‌بینی کرد (قهرمان و آلبرت، ۲۰۱۴). تفسیر داده‌های ژئومکانیکی در مقیاس صحرایی نشان داد که مقاومت‌ویژه با شاخص کیفیت سنگ^۳ (RQD) و عدد نفوذ استاندارد^۴ (N-SPT) رابطه‌ای مستقیم و با نفوذپذیری رابطه‌ای معکوس دارد. بنابراین کاهش مقاومت‌ویژه در اطراف شکستگی‌ها و درزه‌ها؛ RQD پایین در توده‌سنگ، N-SPT پایین در خاک و نفوذپذیری بالا را نشان می‌دهد. همچنین بررسی‌های آماری نشان داد که RQD و مقادیر لوژان در منطقه؛ همبستگی ضعیف و معکوسی با یکدیگر

⁶ R-Squared

⁷ Root Mean Square Error

⁸ Geometric Mean Error Ratio

² Volumetric Block Proportion

³ Rock Quality Designation

⁴ Standard Penetration Test

⁵ Rock Mass Rating

جهت افزایش سطح اطمینان به نتایج حاصل از مطالعات ژئوالکتریکی و ارائه مدلی بهینه جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ با استفاده از برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی است.

۲- داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش برای پیش‌بینی پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ با استفاده از رگرسیون چندمتغیره بر مبنای داده‌های پایش مقاومت‌ویژه الکتریکی حین اعمال تنش فشاری؛ در محل تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور، بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی و بازدید زمینی، یک شبکه نمونه‌برداری طراحی و ۳۰ نمونه سنگی برداشت گردید. بخش گسترده‌ای از مسیر تونل را در سطح، دولومیت‌های برشی شده مزوزوئیک در بر می‌گیرد. بنابراین ۲۴ نمونه از برش‌های گسلی تهیه و اندازه‌گیری‌های مقاومت ظاهری الکتریکی برای پیش‌بینی UCS انجام شد. برش^{۱۰}، سنگی است که در آن قطعات زاویه‌دار توسط زمینه‌ای دانه ریزتر احاطه شده که ممکن است در اثر تغییر شکل‌های ساختاری (برش گسلی)، فوران‌های انفجاری، تزریق ماگما (اتصال خرده‌سنگ‌های دیواره بر اثر نفوذ ماگما) یا تحت تاثیر فرایندهای هیدروترمالی (احاطه شدن خرده‌سنگ‌های دیواره با رگه‌های هیدروترمال) از هر نوع سنگی به وجود آمده باشند. در این پژوهش، همچنین ۶ نمونه مغزه از ^{۱۰}Bimrocks‌های بخش آبرفتی تونل سبزکوه تهیه شد. از ۱۰/۶ کیلومتر تونل؛ از ۲۰۰+۰ کیلومتر تا ۱۰۵۰+۱ در برگیرنده مصالح آبرفتی است. در سنگ‌های این بخش آبرفتی، قطعات سنگ در خمیره‌ای از سیمان ریزدانه‌تر قرار دارند که برای درک بهتر و تخمین رفتار مقاومتی، این مصالح آبرفتی به لحاظ ژئومکانیکی در گروه مصالح Bimrocks قرار می‌گیرند. Bimrocks متشکل از بلوک‌ها یا سنگدانه‌هایی است که در یک زمینه با بافت ریزدانه‌تر قرار گرفته‌اند و در سازندهای مختلف از جمله؛ آمیزه‌های رنگی، سنگ‌های هوازده، سنگ‌های گسله، انواع کنگومرا، برش‌ها، آبرفت‌های درشت دانه و... می‌باشند. اگر نسبت حجمی بلوک‌ها (سنگ‌دانه‌ها) بین ۲۵ درصد تا ۷۵ درصد باشد، این توده‌سنگ را می‌توان از نظر لیتولوژی در گروه Bimrocks طبقه‌بندی کرد. این نوع مصالح به دو نوع؛ Bimrocks جوش خورده (چسبندگی بالا بین سنگ‌دانه‌ها

مختلف ۰/۱ تا ۲۰۰ کیلوهرتز با درصد طوبت اشباع صفر الی صد درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در شرایط اشباع کم؛ به دلیل اثر قطبیدگی الکتروودی، مقاومت‌ویژه با افزایش درصد رطوبت اشباع، افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به نقطه اشباع مربوط به اوج مقاومت‌ویژه، تاثیر آب منفذی جایگزین اثر قطبیدگی الکتروودی شده و با افزایش درصد رطوبت اشباع، مقاومت‌ویژه کاهش می‌یابد (گوگانگ و همکاران، ۲۰۲۲). امکان‌سنجی استفاده از ثابت دی‌الکتریک برای ارزیابی استحکام ماسه‌سنگ نشان داد که بین ثابت دی‌الکتریک، تخلخل و استحکام کششی در محدوده‌های دمایی ۲۵ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، ارتباط معناداری وجود دارد. رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و استحکام کششی به صورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین، ثابت دی‌الکتریک را می‌توان به عنوان یک روش جدید غیرمخرب برای ارزیابی استحکام ماسه‌سنگ پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا مورد استفاده قرار داد (دونگ و همکاران، ۲۰۲۲). جهت تعیین خواص پتروفیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌های آذرین با استفاده از روش ژئوالکتریکی؛ مقاومت‌ویژه الکتریکی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ (سرعت موج P، چگالی خشک و تخلخل) و مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری ۴۸ نمونه سنگ آذرین مختلف (پلوتونیک، آتشفشانی و آذرآواری) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج تحلیل‌های آماری؛ مقاومت‌ویژه الکتریکی با مقادیر تخلخل نمونه‌های سنگ آذرین، همبستگی نمایی معنادار و با سایر خواص مکانیکی، همبستگی لگاریتمی معناداری نشان داد. بنابراین می‌توان از ژئوالکتریک، بعنوان یک روش غیرمخرب برای ارزیابی خواص مهندسی سنگ‌ها به خصوص در شرایطی که امکان تهیه نمونه‌سنگی به شکل منظم از یک رخمون یا یک بنا باستانی به دلیل عدم امکان تخریب نباشد، استفاده کرد (اینس، ۲۰۲۲). در رابطه با تعیین خواص پتروفیزیکی و ژئومکانیکی سنگ‌ها، مطالعات مختلفی بر اساس روش‌های مرسوم صورت گرفته که به دلیل پیچیدگی پارامترهای موثر و زمان بر و پرهزینه بودن روش‌های مستقیم (حفاری، مغزه‌گیری و آنالیزهای آزمایشگاهی)؛ عدم قطعیت در مطالعات اکتشافی بسیار بالا بوده و تعیین دقیق این ویژگی‌ها الزامی است. هدف از پژوهش حاضر؛ تلفیق داده‌های ژئوالکتریکی و ژئومکانیکی

¹⁰ Block in matrix rocks

⁹ Breccia

و زمینه) و Bimrocks فاقد جوش خوردگی تقسیم می‌شوند (مدلی، ۲۰۰۴).

۲-۱- نمونه‌برداری و مطالعات آزمایشگاهی

به منظور پایش مقاومت ویژه الکتریکی در حین آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس استاندارد انجمن

آمریکایی آزمون و مواد (ASTM D 2938-95, 1997)، مغزه‌ها با قطر و طولی مشخص از نمونه سنگ‌ها تهیه و جهت آماده‌سازی و آنالیز به آزمایشگاه منتقل گردید (شکل ۱). پس از قرارگیری مغزه نمونه‌های موردنظر به مدت معینی در آب شرب، مقاومت ویژه الکتریکی و UCS آن‌ها بطور هم‌زمان پایش و اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱. مغزه‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌ها

Fig. 1. Core extraction and rock samples preparation

۲-۲- اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی

نمونه‌ها حین بارگذاری

مقاومت ویژه با استفاده از روش‌های دو الکتروودی و چهار الکتروودی جهت بررسی وجود اثر قطبیدگی الکتروودی به دلیل استفاده از جریان الکتریکی مستقیم، اندازه‌گیری و مقایسه شد. در روش دو الکتروودی، الکترودهای جریان و پتانسیل به هم و به هر طرف از دو سر نمونه متصل می‌شوند (شکل ۲). در صورتی که در روش چهار الکتروودی، الکترودهای جریان به دو سر نمونه و الکترودهای غیر قطبی^۱ Ag/AgCl به دو نقطه دیگر از نمونه متصل می‌شوند. مقایسه نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه نمونه‌ها نشان داد که اثر قطبش الکتروودی در هر دو حالت بسیار کمتر از ۵ درصد بوده است و می‌توان از آن صرف نظر کرد، بنابراین برای اندازه‌گیری‌ها از روش دو الکتروودی استفاده گردید. خطوط جریان به طور یکنواخت از همه سطح مقطع

نمونه عبور کرده و دستگاه مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها را در جریان مستقیم تحت اعمال بار، اندازه‌گیری می‌کند. با حاصل ضرب فاکتور هندسی آرایش (وابسته به محل قرارگیری الکترودها)، مقاومت ویژه (ρ) از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$\rho = K \cdot R = K \cdot \frac{\Delta V}{I} = \frac{A}{L} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

که در آن:

K: ضریب هندسی آرایش الکتروودی

R: مقاومت الکتریکی (کیلو اهم متر)

A و L به ترتیب سطح مقطع نمونه (میلی متر مربع) و

فاصله بین الکترودهای پتانسیل (میلی متر)

ΔV و I به ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود

پتانسیل (ولت) و جریان عبوری از نمونه (آمپر)

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه، با تقسیم

حداکثر بار قابل تحمل به وسیله نمونه بر سطح مقطع اولیه

¹ Non Polarizing Electrodes

شکست از این ناحیه شروع و باعث ایجاد فرم‌های شکست مخروطی یا گوه‌ای می‌گردد (شکل ۳). بنابر استاندارد UCS ASTM D 2938-95 (۱۹۹۷) لازم است که مقادیر UCS به دست آمده برای نسبت ارتفاع به قطر برابر ۲ تصحیح گردد. برای این تصحیح از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$UCS = \frac{UCS_a}{0.88 + (0.24 d/h)} \quad (2)$$

که در آن:

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری استاندارد شده (مگاپاسکال)

UCS_a: مقاومت فشاری تک‌محوری اندازه‌گیری شده (مگاپاسکال)

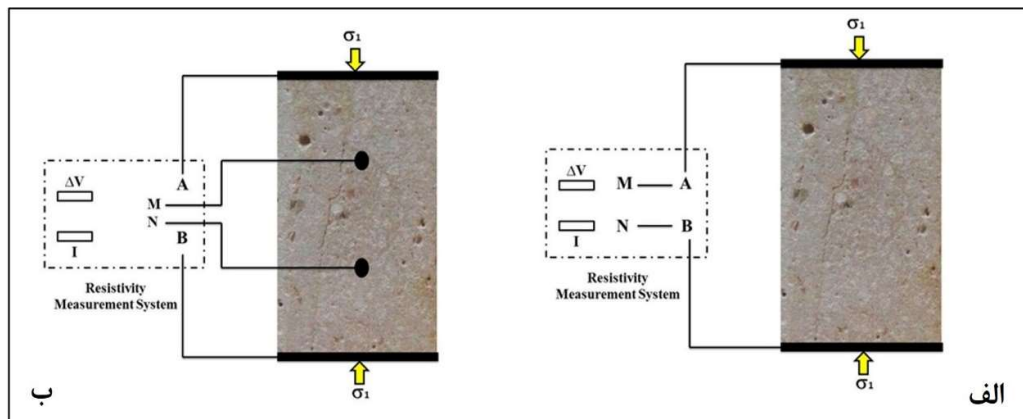
d و h به ترتیب قطر مغزه نمونه‌ها و ارتفاع مغزه نمونه‌ها (میلی‌متر).

نمونه محاسبه می‌شود. عوامل موثر بر نتایج این اندازه‌گیری عبارتند از:

۱- عوامل داخلی: ترکیب کانی‌شناسی، روزنه‌داری، اندازه دانه‌ها، شاخص پوکی و ناهمسانگردی.

۲- عوامل خارجی: هندسه نمونه (نسبت ارتفاع به قطر نمونه و اندازه آن)، اصطکاک بین صفحات ماشین و سطوح نمونه (تاثیر سطوح انتهایی)، نرخ بارگذاری و شرایط محیطی.

یکی از مهم‌ترین این عوامل، اثر سطوح انتهایی است. وقتی نمونه‌ای در بین صفحات فولادی ماشین آزمایش تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد؛ هم‌زمان با کوتاه شدن در جهت محوری، انبساط عرضی نیز در آن به وقوع می‌پیوندد (اثر پواسون). از طرف دیگر اصطکاک بین صفحات و سطوح انتهایی نمونه در جهت جلوگیری از انبساط عمل می‌کند. با توجه به اینکه در این ناحیه تمرکز تنش شدید بوده،



شکل ۲. چینش الکترودها برای پایش مقاومت ویژه الکتریکی حین آزمایش مقاومت فشاری (الف- دو الکترودی ب- چهار الکترودی)، A و B محل اتصال الکترودهای جریان و M و N محل اتصال الکترودهای پتانسیل.

Fig. 2. Electrical resistivity estimation of core samples using perimeter electrodes (a-two electrodes, b-four electrodes); Current electrodes A & B and potential electrodes M & N

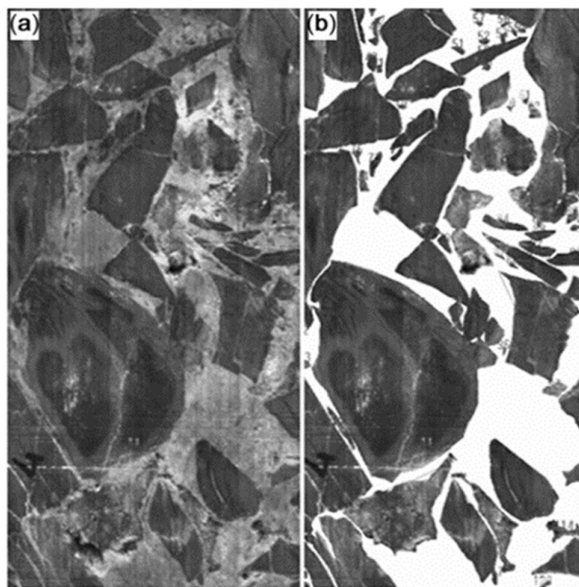


شکل ۳. شکست نمونه مغزه با قطر ۵۴/۸۸ و طول ۱۵۰ میلی‌متر حین بارگذاری تنش فشاری
Fig. 3. Rock failure modes under uniaxial compression (d=54.88 mm, h=150 mm)

توده سنگ است که در آن، سنگ‌دانه‌ها از زمینه تفکیک می‌گردند. روش سه‌بعدی (آنالیز سرندی^۲)، که با جدا کردن اجزای تشکیل دهنده توده سنگ از یکدیگر انجام و نمودار توزیع دانه‌بندی آن‌ها رسم می‌گردد. در این پژوهش برای تعیین VBP نمونه مغزه‌های گرفته شده از توده سنگ‌های محور تونل سبزکوه، روش آنالیز تصویری برای کاهش خطا و اندازه‌گیری سریع استفاده شد (شکل ۴). در این روش پس از گرفتن عکس‌های دارای مقیاس مناسب از رخنمون یا دیواره‌های سنگی و یا نمونه مغزه‌ها؛ با استفاده از نرم‌افزارهای آنالیز تصویری، عکس‌ها را از فیلتر عبور داده و پیکسل‌بندی کرده و سپس درصد هر کدام از اجزا، از جمله بلوک‌ها و زمینه را می‌توان محاسبه کرد. در پژوهش حاضر؛ نرم‌افزار ImageJ جهت بدست آوردن نسبت حجمی بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲- تخمین نسبت حجمی بلوک‌ها

منظور از نسبت حجمی بلوک‌ها، مقدار حجمی از توده سنگ یا نمونه Bimrock که از سنگ‌دانه تشکیل شده است. نسبت حجمی سنگ‌دانه‌ها تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات پتروفیزیکی و ژئومکانیکی برش‌های گسلی و Bimrocks دارد. بطور کلی سه روش برای تخمین نسبت حجمی بلوک‌ها وجود دارد که عبارتند از؛ روش یک بعدی (حفاری)، در صورتی که بلوک‌هایی با اندازه بزرگ در حد بولدر یا به عبارت دیگر بزرگ‌تر از قطر مغزه‌گیر دستگاه حفاری وجود داشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه برای محاسبه نسبت حجمی از این طریق میزان زیادی حفاری برای کاهش عدم قطعیت مورد نیاز است، این روش کاربرد کمتری دارد. روش دو بعدی (آنالیز تصویری^۱)؛ بر اساس تفاوت رنگ بین اجزای تشکیل دهنده



شکل ۴. (a) تصویر اصلی و (b) تصویر پردازش شده از یک نمونه که مقدار VBP برابر است با ۷۰/۶ درصد

Fig. 3. a) Original and, b) processed images of a sample having a VBP of 70.6%.

۲۰۱۹) و با توجه به این که اعداد مندرج در جدول از مقدار ۰/۰۵ (سطح اطمینان ۰/۹۵٪) بیش تر است، بنابراین داده‌ها دارای توزیع نرمال هستند و برای تجزیه و تحلیل داده‌ها نیازی به انجام عملیات تبدیل نبوده و همه آنالیزها بر روی داده‌های اصلی انجام گرفت (جدول ۲).

۳- پیش پردازش‌های آماری

۳-۱- آزمون نرمال بودن

خلاصه آماره‌های توصیفی برای داده‌های آموزش و اعتبارسنجی در نقاط نمونه برداری محاسبه می‌گردد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از تحلیل استنباطی کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد (خالقی و همکاران،

² Sieve Analysis

¹ Image Analysis

۲-۳- آزمون همبستگی

ماتریس همبستگی میان متغیر وابسته و متغیر مستقل در سری داده‌های آزمایشی محاسبه می‌گردد (جدول ۳) و در تحلیل‌های آماری اگر قدرمطلق آماره t متغیری بزرگ‌تر از ۱ باشد و افزودن متغیر باعث افزایش ضریب تعیین تعدیل شده (R^2) گردد، بنابراین می‌توان متغیر را هر چند با همبستگی پایین، در مدل وارد نمود (مدلی، ۲۰۰۴).

۳-۳- آزمون هم خطی داده‌ها

پس از وارد کردن عوامل ورودی (متغیرهای مستقل) و

خروجی (متغیر وابسته)، همه آن‌ها از نظر هم‌راستایی بررسی می‌شوند. در این پژوهش، از رابط همبستگی بین متغیرهای مستقل برای کنترل کردن هم‌راستایی استفاده شده است. جهت کاهش هم‌راستایی و افزایش ضریب همبستگی، می‌توان متغیرهای مستقل به صورت نسبی از یکدیگر (براساس بررسی و تحلیل روابط رگرسیون دوتایی بین پارامترها) در مدل وارد کردند. اگر مقادیر پارامتر تحمل در دامنه‌ی ۰/۴ قرار بگیرند، مشاهده می‌شود که هم خطی متغیرها از بین رفته است (جدول ۴).

جدول ۲. نتایج بررسی توزیع نرمال داده‌ها

Table 2. the result of normality tests for data

		UCS	VBP	RES
N		30	30	30
Normal Parameters ^a	Mean	48.362	48.826	4374.343
	Std. Deviation	29.862	46.112	6428.260
Kolmogorov-Smirnov Z		0.819	0.600	1.377
Asymp. Sig. (2-tailed)		0.513	0.864	0.045
a. Test distribution is Normal.				

جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی پیرسون در SPSS

Table 3. Pearson correlation coefficient and interpretation in SPSS

		UCS	VBP	RES
Pearson Correlation	UCS	1.000	-0.695	0.966
	VBP	-0.695	1.000	-0.795
	RES	0.966	-0.795	1.000
Sig. (1-tailed)	UCS	.	0.019	0.000
	VBP	0.019	.	0.005
	RES	0.000	0.005	.
N	UCS	24	24	24
	VBP	24	24	24
	RES	24	24	24

جدول ۴. نتایج آزمون هم خطی داده‌ها

Table 4. the result of collinearity diagnostics in SPSS

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	0.025	9.518	-	0.003	0.998
	VBP	0.168	0.133	0.196	1.263	0.254
	RES	0.006	0.001	1.122	7.220	0.000

a. Dependent Variable: UCS

۴-۳- معیارهای ارزیابی مدل

برای مقایسه عملکرد مدل از پارامترهای RMSE و GMER که از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه‌اند و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{j}} \quad (3)$$

$$GMER = \exp\left[\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \ln\left(\frac{P_i}{O_i}\right)\right] \quad (4)$$

که در آن: j : تعداد کل مشاهدات؛ O_i و P_i به ترتیب مقدار مشاهده‌ای هر داده و مقدار پیش‌بینی شده برای داده موردنظر است. مقادیر مربوط به RMSE منفی نبوده و از صفر تا بی‌نهایت متغیر است، مقادیر کم RMSE نشان‌دهنده دقت بالای مدل می‌باشد. پارامتر GMER

شده است. به جهت تعیین ارتباط میان پارامترها با استفاده از روش رگرسیون، معادله مربوط به بهترین خط عبوری از داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد تعیین و ضریب تعیین مربوط به آن برای هر رابطه تعیین و در نهایت رابطه با بالاترین ضریب تعیین، ارائه گردید.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده، روابط همبستگی بین پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر UCS با مقادیر مقاومت ظاهری الکتریکی مربوطه همبستگی داشته ولی ارتباط معناداری بین آن‌ها یافت نشد. با این حال، برای نمونه‌هایی با نسبت حجمی بلوکی (VBP) ۷۵-۲۵ درصد، یک همبستگی معنادار وجود دارد. بنابراین می‌توان UCS را بر اساس مقادیر مقاومت ظاهری الکتریکی در شرایطی که میزان VBP بین ۷۵-۲۵ درصد متغیر است، با استفاده از رابطه ۵ محاسبه کرد.

$$UCS = 0.0048 \rho + 11.888 \quad (5)$$

برای ارزیابی مدل پیشنهادی، رابطه استخراج شده بر روی مجموعه داده‌های آزمون (نمونه‌های شماره ۳، ۴، ۷، ۱۶، ۱۹ و ۲۱) اعمال شد. در نتایج مقایسه مقادیر UCS اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده در مجموعه داده‌های آزمون در شرایطی که میزان VBP بین ۷۵-۲۵ درصد متغیر است، بر اساس مقادیر مقاومت ظاهری الکتریکی نشان داده شده است که ضریب تعیین برابر با ۸۸/۸۴ درصد بیانگر کارایی مدل ارائه شده است.

مطابق شکل ۸ و شکل ۹ بین VBP با پارامترهای UCS و مقاومت ظاهری الکتریکی همبستگی معناداری در ۲۴ نمونه آموزشی مشاهده شد. به منظور بررسی تاثیر همزمان پارامترهای VBP و مقاومت ظاهری الکتریکی در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره و با توجه به شکل‌های ۵ و ۸ رابطه رگرسیونی چندگانه میان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت (رابطه ۶).

$$UCS = 0.025 + 0.006\rho + 0.168VBP \quad (6)$$

ضرایب تعیین مدل UCS براساس داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و آنالیز تصویر در جدول ۶ آورده شده است. بنابر نتایج این پژوهش؛ مدل ارائه شده با ضریب تعیین ۹۴/۷ درصد، ضریب تعیین تعدیل شده ۹۲/۹ درصد و ضریب دوربین- واتسون ۲/۲۵ دارای کارایی می‌باشد و رگرسیون در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و بنابراین مدل می‌تواند به خوبی UCS را پیش‌بینی کند.

بیان‌کننده وجود هماهنگی و تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد. چنانچه مقدار ضریب GMER برابر با یک باشد، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مطابقت کامل وجود دارد. از طرفی، بیشتر و کمتر بودن این پارامتر نسبت به مقدار یک، به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل می‌باشد (گوجاراتی، ۲۰۰۴).

۴- بحث

در این پژوهش؛ پس از جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی مربوط به دو گروه نمونه‌های سنگی برداشت شده (، داده-ها به دو سری آموزشی (۸۰ درصد داده‌ها) و ارزیابی (۲۰ درصد داده‌ها) تقسیم شد. به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بر اساس مقاومت‌ویژه الکتریکی، رابطه بین داده‌ها و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با روش رگرسیون چندمتغیره خطی با استفاده از نرم‌افزار اکسل استخراج و دقت مدل با استفاده از فاکتورهای نظیر R^2 ، RMSE و GMER ارزیابی شد.

۴-۱- مدل‌سازی و روابط آماری برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری

بررسی روابط بین پارامترهای مختلف سنگ‌ها با داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی گامی مؤثر در پیش‌بینی خواص ژئومکانیکی و پتروفیزیکی است. در این پژوهش با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره، روابط بین مقاومت‌ویژه الکتریکی با UCS یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ژئومکانیکی و فیزیکی سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۲- پیش‌بینی UCS با رگرسیون چندمتغیره خطی

یکی از اهداف بیشتر بررسی‌های آماری، یافتن رابطه‌هایی است که به کمک آن بتوان اثر تغییرات یک یا چند متغیر را بر روی متغیرهای دیگر پیش‌بینی کرد. رگرسیون روشی برای استخراج رابطه‌های موجود بین متغیرها می‌باشد، که با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده، صورت می‌گیرد. روش کمترین توان- هایدوم برای استخراج نتایج معنادار برای وابستگی احتمالی بین متغیرها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اغلب این روش به نام تجزیه و تحلیل رگرسیونی شناخته می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی‌های آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده

جدول ۵. مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای پتروفیزیکی و ژئومکانیکی روی نمونه مغزه‌ها در آزمایشگاه

Table 5. Resistivity, VBP and UCS values

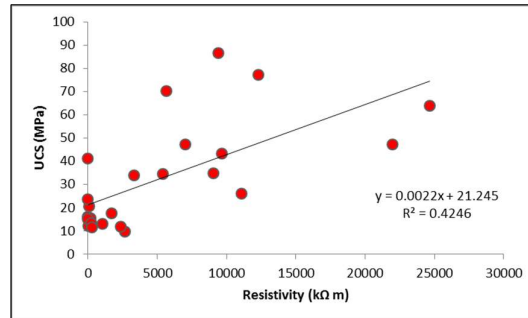
Sample (No.)	X	Y	Sample diameter (mm)	Compressive strength (MPa)	Volumetric block proportion (%)	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Resistivity (kΩ m)	Rock type
1	488854	3529352	14.5	43.4	23.8	2.78	0.07	9657.2	Fault Breccia
2	488852	3529249	14.5	70.1	18.2	2.73	0.12	5646.1	
3	488845	3529141	73	20.6	76.7	2.39	4.21	113.6	
4	488846	3529049	73	15.5	77	2.43	2.56	196.5	
5	488843	3528949	24.4	34.8	22.8	2.77	0.08	9059.2	
6	488841	3528847	24.4	34.6	28.5	2.73	0.12	5424.8	
7	488837	3528746	76	77.2	7.8	2.80	0.06	12317.3	
8	488834	3528645	76	63.8	7.2	2.86	0.03	24677.4	
9	488834	3528549	76	47.1	10.6	2.85	0.03	21992.5	
10	488831	3528447	76	86.6	8.5	2.78	0.08	9399.2	
11	488826	3528345	40.5	15.1	94.4	2.17	38.10	10.1	
12	488825	3528246	30.1	11.5	74.6	2.47	1.82	285	
13	488820	3528147	30.1	47.2	50.4	2.75	0.10	7033.6	
14	488819	3528047	30.1	41.2	77.6	2.17	40.29	9.5	
15	488813	3527945	30.1	9.8	76.3	2.66	0.24	2652.5	
16	488813	3527847	24.4	33.8	56	2.68	0.20	3312.7	
17	488808	3527747	24.4	26	23.1	2.79	0.07	11091.3	
18	488807	3527667	24.4	11.9	88.2	2.65	0.26	2388.9	
19	488806	3527586	24.4	23.5	96.6	2.07	108.44	3.2	
20	488806	3527485	37.8	13.5	68.3	2.46	2.00	257.3	
21	488804	3527385	101.3	12.1	70	2.25	17.60	23.6	
22	488827	3529918	101.3	16.1	75	2.17	40.68	9.4	
23	488817	3529899	62.6	13.1	54.5	2.58	0.55	1067.4	
24	488798	3529877	43.6	17.7	70.7	2.62	0.36	1699	
25	488782	3529862	54.36	192.9	12.4	2.60	0.47	1250.8	
26	488766	3529850	54.7	63.5	25.35	2.31	9.14	48.5	
27	488751	3529835	54.8	79.5	9.25	2.37	4.97	94.7	
28	488739	3529815	54.74	57.3	48.5	2.36	5.64	82.5	
29	488735	3529788	54.42	187.58	69.27	2.56	0.69	828.4	
30	488870	3529508	54.88	97.8	29.3	2.53	0.93	598.1	

در شکل ۱۰، ارتباط میان مقادیر حاصل از این رابطه با مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوره در سری داده‌های آزمون نشان داده شده است. مقایسه ضرایب همبستگی میان مقادیر حاصل از روابط رگرسیونی بین UCS و مقاومت ظاهری الکتریکی و VBP، نشان دهنده کاهش خطا و در نتیجه افزایش میزان دقت در رابطه چندگانه (۶) می‌باشد. روابط ساده ارائه شده نیز با توجه به تبعیت توزیع فراوانی خطاها از منحنی نرمال با میانگین نزدیک به صفر و انحراف معیار نزدیک به یک مشخص

بررسی هم‌زمان این پارامترها سبب افزایش ضریب تعیین به دست آمده از رابطه ۶ نسبت به روابط ساده می‌باشند. رابطه استخراج شده بر روی مجموعه داده‌های آزمون از داده‌های آزمایشگاهی جدید اعمال شد. نتایج ارزیابی مدل در جدول ۷ آورده شده است. نتایج مقایسه مقادیر UCS اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده را در این داده‌ها نشان می‌دهد. مقدار GMER در مدل کمتر از یک به دست آمده که نشان‌دهنده کم برآوردی مدل می‌باشد و ضریب تعیین برابر ۸۹/۱۳ درصد می‌باشد.

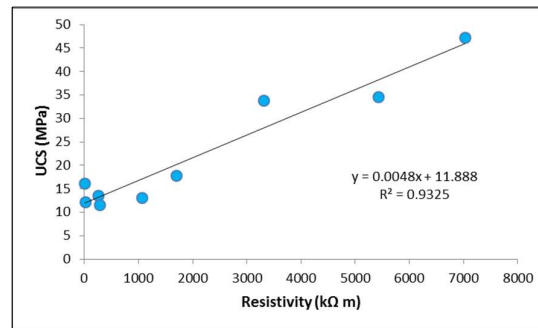
مقاومت فشاری تک‌محوره بوده و می‌توان با استفاده از آن‌ها؛ از انجام آزمایش‌های پرهزینه، وقت‌گیر و مخرب جهت برآورد این پارامتر اجتناب کرد.

می‌شود که روابط ارائه شده قابل قبول می‌باشند. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص شد که آزمایش‌های غیرمخرب، روش مناسبی برای تخمین مقادیر



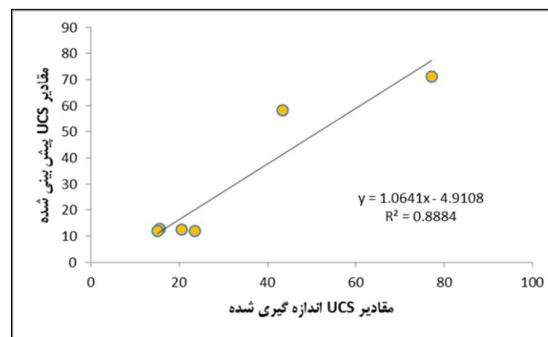
شکل ۵. رابطه بین مقاومت ظاهری الکتریکی و UCS در مجموعه داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 4. the relation between UCS and resistivity in the laboratory datasets



شکل ۶. رابطه بین مقاومت ظاهری الکتریکی و UCS برای نمونه‌هایی با VBP بین ۲۵-۷۵ درصد در مجموعه داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 5. the relation between UCS and resistivity for the core samples having VBP of 25-75% in the laboratory datasets



شکل ۷. مقایسه مقادیر UCS اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از روش رگرسیون در مجموعه داده‌های سری آزمون

Fig. 6. Comparison of measured and predicted UCS values by using the simple regression analysis in the validation data set

جدول ۶. خلاصه مدل پیش‌بینی UCS

Table 6. Model Summary of UCS

R	R ²	Adjusted R Square	Durbin-Watson
0.973 ^a	0.947	0.929	2.250

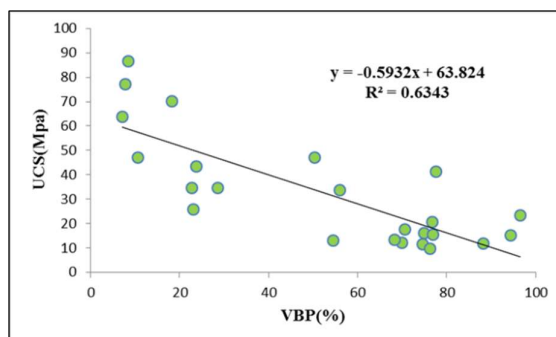
a. Predictors: (Constant), RES, VBP

b. Dependent Variable: UCS

جدول ۷. ارزیابی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی جهت تخمین UCS

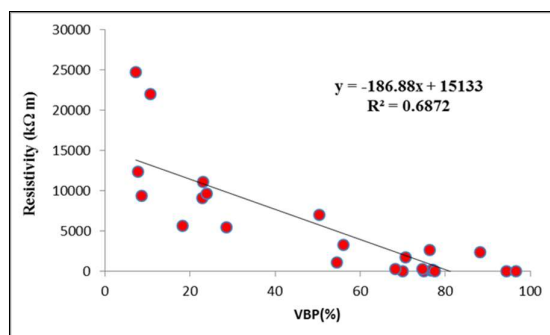
Table 7. Evaluation and validation of the proposed model in the testing step for prediction of UCS

Model	RMSE	R Square	GMER
1	8.683	0.8913	0.911



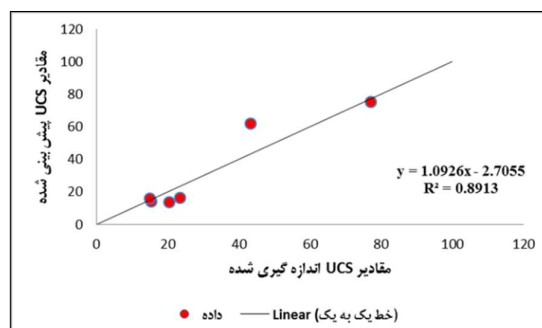
شکل ۸. رابطه بین VBP و UCS در مجموعه داده‌های سری آموزش

Fig. 7. the relation between VBP and UCS in the training data set



شکل ۹. رابطه بین VBP و مقاومت ظاهری الکتریکی در مجموعه داده‌های سری آموزش

Fig. 8. the relation between VBP and resistivity in the training data set

شکل ۱۰. مقایسه مقادیر UCS اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره در مجموعه داده‌های سری آزمون
Fig. 9. Comparison of measured and predicted UCS values by using multivariate regression method in the validation data set

۵- نتیجه‌گیری

روی خصوصیات پتروفیزیکی و ژئومکانیکی برش‌های گسلی و Bimrocks است.

بر اساس نتایج آنالیز و پیش پردازش داده‌ها، بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نشان داد در نمونه‌هایی با نسبت حجمی بلوکی ۲۵-۷۵٪، همبستگی معناداری وجود دارد. بنابراین می‌توان مقاومت

پایش مقاومت ویژه الکتریکی حین آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی ۳۰ نمونه مغزه تهیه شده منطقه مورد مطالعه؛ نشان داد که نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس ساخت و بافت متفاوت، رفتارهای الکتریکی متفاوتی نشان می‌دهند، که بیان‌گر تاثیر نسبت حجمی سنگ‌دانه‌ها بر

- Glover, P. W. J., Gomez, J. B., Meredith, P. G (2000) Fracturing in saturated rocks undergoing triaxial deformation using complex electrical conductivity measurements; experimental study. *Earth and Planetary Science Letters*, 5621: 201-213.
- Gujarati, D. N (2004) Multiple regression analysis: The problem of inference. *Basic Econometrics*, Chapter 8: 26p.
- Ince, I (2022) Predicting Index-Mechanical Properties of Igneous Rock Using Electrical Resistivity Method. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(5).
- Inoue, M., Ohomi, M (1989) Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock. *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, Tokyo, 9-13.
- Kahraman, S (2001) Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38: 981-994.
- Kahraman, S., Albert, M (2006) Predicting the physico-mechanical properties of rocks from electrical impedance spectroscopy measurement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43: 543-553.
- Kahraman, S., Alber, M (2014) Electrical impedance spectroscopy measurements to estimate the uniaxial compressive strength of a fault breccia. *Bull. Mater. Sci.*, 37(6): 1543-1550.
- Kahraman, S (2022) Estimating the Physico-Mechanical Properties of Pyroclastic Rocks from Electrical Resistivity. *Pure and Applied Geophysics*, 179: 1-9.
- Kate, J. M., Rao, K. S (1989) Effect of large overburden stress on geophysical behaviour of sandstones, in Maury, V., and Fourmaintraux, D., eds., *Proceedings of the ISRM-SPE International symposium on rock at great depth*, Rotterdam, Balkema, 171-178.
- Kate, J. M., Sthapak, A. K (1995) Engineering behaviour of certain Himalayan rocks, in Daemen, J. J. K., and Schultz, R. A., eds. *Proceedings of the 35th US symposium on rock mechanics*, Rotterdam: Balkema, 783-788.
- Kate, J. M., Gokhale, C. S (1998) Electrical resistivity behaviour of sandstone during compression, in Moore, D. P., and Hungr, O., eds. *Proceedings of the eighth International Congress IAEG*, vol. 1. Rotterdam: Balkema, 543-550.
- Khaleghi, R., Behmanesh, J., Azad, N (2019) Prediction of soil salinity using multivariable regression on the basis of extracted indices from Landsat 8 satellite (Case study: Urmia). *Applied Soil Research*, 7(1): 108-121.
- Medley, E.W (2004) Observations on Tortuous Failure Surfaces in Bimrocks. *J. of Engineering*

فشاری تک‌محوری سنگ را با مدل رگرسیون چندمتغیره خطی بر اساس پارامترهای مقاومت ظاهری الکتریکی و VBP پیش‌بینی نمود. باتوجه به هدف تحقیق و در نظر گرفتن ۸۰ درصد داده‌ها (۲۴ نمونه) برای مجموعه آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۶ نمونه) برای مجموعه آزمون به‌طور تصادفی؛ برای مجموعه داده‌های آزمون مدل MLR مقادیر R^2 ، RMSE و GMER به ترتیب ۰/۸۹۱۳، ۰/۶۸۳ و ۰/۹۱۱ حاصل گردید. با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این مدل؛ مشخص شد که مقاومت فشاری تک‌محوری تخمین زده شده در محدوده مورد مطالعه از دقت بسیار خوب و همبستگی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برخوردار بوده است. در نتیجه آزمایش‌های غیرمخرب؛ روش مناسبی برای تخمین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره بوده و می‌توان با استفاده از آن‌ها، از انجام آزمایش‌های پرهزینه، وقت‌گیر و مخرب جهت برآورد این پارامتر اجتناب کرد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران محترم، سردبیر و هیات تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

- Ara, T., Bjorndalen, N., Talabani, S., Islam, R (2004) Predicting oil reserve in carbonate reservoirs. *EEC Innovation*, 2: 20-43.
- ASTM (1997) Standard test method for uniaxial compressive strength of intact core specimens, *ASTM Annual Book of Standards*, D2938-95: 279-281.
- Bai, G., Sun, Q., Geng, J., Wang, S., Jing, X (2022) Resistivity of granite and sandstone varies with frequency and water saturation. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(6).
- Dong, Z., Sun, Q., Zhang, W (2022) Prediction of strength of rock after thermal treatment through dielectric property. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 55(4).
- Ghorbani, A., Cosenza, Ph., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., Jougnot, D (2009) Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization: A laboratory investigation. *Appl. Clay Sci.*, 43: 493-502.
- Ghorbani, A., Ali Ghari, H., Namiranian, A (2012) Electrical resistivity monitoring of rock samples during uniaxial compression test. *Iranian Journal of Geophysics*, 6(1): 34-41.

- Geology, Geomechanics and Tunneling, 22: 35-43.
- McNally, G. H (1987) Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs. *Geo-exploration*, 24: 381-395.
- Mohammadian, R., Hajizadeh, F., Moomivand, H. (2018) The Incorporation of Geoelectrical and Geomechanical data to explore water conveyance tunnel route (case study), Master of Science Thesis, Urmia University, 128 p.
- Moomivand, H (2016) Rock Mechanics; Second Volume: Additional and Professional Topics, Urmia University, 430 p.
- Ranjbar, Shima & Karimi Nasab, Saeed (2019) Determination of Uniaxial Compressive Strength of Granite Rock Samples using Electrical Resistivity Measurement: NDT. 10.
- Schon, J. H (1998) Physical properties of rocks, fundamentals and principles of petrophysics. Pergamon, Oxford, 583p.
- Sharma, P. K. Singh, T. N (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strengt. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.*, 67: 17-22.
- Sousa, L. M. O., dei Rio, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R., Rey, A. R (2005) Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granite. *Eng. Geol.*, 77: 153-168.
- Taghavi, B., Hajizadeh, F., Abbasi, M (2017) Geoelectrical Imaging Surveys Used for Pre-investigation and Subsurface layers modeling at a Water Transfer Tunnel (Case study). *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(8): 8409–8416.
- Turgrul, A., Zarif, I (1999) Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from turkey. *Eng. Geol.*, 51: 303-317.
- Yasar, E., Erdogan, Y (2004) Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41: 871-875.

Predicting uniaxial compressive strength of rock during Electrical Resistivity monitoring by multivariate regression method

B. Taghavi^{1*}, F. Hajizadeh² and H. Moomivand³

1- Ph. D. student, of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 2- Assoc. Prof., Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 3- Prof., Dept. of Mining Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

* b.taghavi@urmia.ac.ir

Received: 2022.12.5 Accepted: 2023.2.20

Abstract

Petrophysical and Geomechanical properties of rocks are important parameters in the design of engineering works and classification of rocks for engineering purposes. Recent studies indicate that geophysical methods, especially seismic and electrical, are able to estimate mechanical parameters and recognize spatial variations. In this research, to develop a predictive model for the uniaxial compressive strength (UCS), special electrodes were installed on the saturated core samples and simultaneously, the uniaxial compressive strength test and electric current flowing through the samples was done and variation of electrical resistivity during loading was measured in the laboratory. The results indicated that the structure and texture of rock had an important effect on the resistivity behavior during a mechanical loading. In this study, thirty core samples from the Fault breccias and Bimrocks (Block-in-matrix-rocks), were collected from different locations of Sabzkouh tunnel route in Chahar Mahal and Bakhtiari Provence. Regression analysis showed that there were generally strong correlations between the UCS and Resistivity in the samples having volumetric block proportion (VBP) of 25–75%. Multiple regression equations were derived for the prediction of UCS based on the resistivity and VBP values. The coefficient of determination (R²) and the root mean square error (RMSE) and the geometric mean error ratio (GMER) indices were calculated as 89.13%, 8.683 and 0.911, respectively, to characterize the prediction performance of the MLR model. The statistical test showed that the MLR model was valid and acceptable for predicting UCS.

Keywords: Petrophysics, Geomechanics, Resistivity, Block Volume Ratio, GMER

Introduction

Direct methods of determining the geomechanical properties of rocks, in addition to being time-consuming and expensive, determine geomechanical parameters locally. Apparent electrical resistivity is one of the non-destructive geophysical methods utilized in laboratory and field scales. In recent years, the results of studies indicate that geomechanical and petrophysical parameters can be estimated based on common geophysical methods and their spatial changes can also be predicted.

Monitoring the changes of specific electrical resistance values during UCS tests in core samples prepared from granite stones showed that with the increase in the number of laboratory samples, there is a significant logarithmic correlation between the experimental data. The statistical analysis of the experimental data of 24 pyroclastic rock samples indicated a significant correlation between the specific resistivity and

the rock properties including, UCS, Brazilian tensile strength, density, and porosity. To determine the petrophysical and geomechanical properties of igneous rocks using the geoelectric method; electrical resistivity, rock mechanical properties (P-wave velocity, dry density, and porosity), and UCS values of 48 different igneous rock samples (plutonic, volcanic, and pyroclastic) were measured in the laboratory. Based on the results of statistical analysis, electrical resistivity showed a significant exponential correlation with porosity values of igneous rock samples and a significant logarithmic correlation with other mechanical properties. Therefore, geoelectricity can be utilized as a non-destructive method to evaluate the engineering properties of rocks, especially in situations where it is not possible to regularly obtain rock samples from an outcrop or an ancient building due to the impossibility of destruction.

Materials & Methods

The purpose of the present research is the integration of geoelectrical and geomechanical data to increase the level of confidence in the results of geoelectrical studies and to provide an optimal model for predicting the UCS of rock utilizing electrical resistivity measurements. In this study, thirty core samples from the Fault breccias and Bimrocks (Block-in-matrix-rocks), were collected from different locations of Sabzkouh tunnel route in Chahar Mahal and Bakhtiari Provence. In this research, to develop a predictive model for the uniaxial compressive strength (UCS), special electrodes were installed on the saturated core samples and simultaneously, the uniaxial compressive strength test and electric current flowing through the samples was done and variation of electrical resistivity during loading was measured in the laboratory.

Discussion

In this research, after collecting data related to two groups of results the data was divided into two series of training (80% of data) and testing (20% of data). To model and predict the UCS of the stone based on the specific resistivity, the relationship between the data, and the results of the experiments with linear multivariate regression methods and artificial intelligence methods utilizing Excel and MATLAB software was extracted and model accuracy was evaluated using factors such as R2, RMSE, GMER, and RI. In this research, SPSS software was employed for statistical analysis. Using the laboratory data: the correlation between the parameters was investigated. The UCS values were correlated with the corresponding apparent electrical resistance values, but no strong correlation was found between them. However, for samples with a VBP of 25-75%, there is a strong correlation. There is a relatively good relationship between

VBP and UCS parameters and apparent resistivity in the training data set. To investigate the simultaneous effect of VBP parameters and apparent resistivity in the estimation of UCS, the multiple regression relationship between them was investigated (Eq. 1).

$$UCS = 0.025 + 0.006\rho + 0.168VBP$$

The correlation coefficients of the UCS model are given in Table 2. According to the results of this research, the presented model with the coefficient of determination of 94.7%, the adjusted coefficient of determination of 92.9%, and the Durbin-Watson coefficient of 2.25 has efficiency and the regression is significant at the 1% level therefore, the model can properly predict UCS. The extracted relationship was applied to the test data set obtained from the new laboratory data, the model evaluation results are given indicates the comparison results of the measured UCS values with the predicted values in these data. The value of GMER in the model is less than one, which indicates the underestimation of the model, and the correlation coefficient is 89.13%.

Conclusion

Multiple regression equations were derived for the prediction of UCS based on the resistivity and VBP values. The coefficient of determination (R2) and the root mean square error (RMSE) and the geometric mean error ratio (GMER) indices were calculated as 89.13%, 8.683 and 0.911, respectively, to characterize the prediction performance of the MLR model. The statistical test showed that the MLR model was valid and acceptable for predicting UCS. It was also found that non-destructive tests are a suitable method for estimating UCS values, and by utilizing them, it is possible to avoid expensive, time-consuming, and destructive tests to estimate this parameter.