

## پایش مقاومت ویژه الکتریکی سنگ حین آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در آزمایشگاه

احمد قربانی<sup>۱\*</sup>، حسینعلی قاری<sup>۱</sup> و افشین نمیرانیان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۳۰)

### چکیده

ارتباط خواص مکانیکی سنگ‌ها با خواص فیزیکی (روش‌های ژئوفیزیکی)، موضوعی است که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این میان روش‌های الکتریکی و لرزه‌ای بیشترین کاربرد را دارند. در این مقاله، عبور جریان الکتریکی در حین اعمال تنش فشاری در آزمایشگاه بررسی شده است.

پس از نصب الکترودهای مخصوص روی ۷ نمونه مغزه تقریباً اشباع، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و عبور جریان الکتریکی از نمونه‌ها به‌طور هم‌زمان صورت پذیرفت و تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در حین بارگذاری اندازه‌گیری شد. ماسه‌سنگ‌ها افزایش مقاومت ویژه و سنگ آهک‌های فسیل‌دار کاهش مقاومت ویژه در سراسر محدوده افزایش کرنش نشان دادند. تراورتن‌ها و سنگ آهک با افزایش کرنش در ابتدا افزایش مقاومت ویژه و سپس کاهش مقاومت ویژه نشان دادند. 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 شد.

**واژه‌های کلیدی:** رسانایی الکتریکی، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول کشسانی، مقاومت ویژه الکتریکی، پتروفیزیک

### Electrical resistivity monitoring of rock samples during uniaxial compression test

Ahmad Ghorbani <sup>1\*</sup>, Hossein Ali Ghari <sup>1</sup> and Afshin Namiranian <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran

(Received: 21 May 2011, accepted: 21 December 2011)

### Summary

The study of the physical properties (geophysical methods) of rocks associated with its mechanical properties has recently received lots of attention. Recent studies show that geophysical methods especially the seismic and geoelectric methods are able to estimate the mechanical parameters and recognize their spatial variations, including anisotropy. Meanwhile, electrical and seismic methods are the most used one .

Electrical measurement is one of the non-invasive geophysical methods commonly used by engineers working in various fields such as mining, geotechnical, civil, underground

\*Corresponding author:

aghorbani@yazduni.ac.ir

\*نگارنده رابط:

engineering as well as oil and gas mineral explorations. This method can be applied both in laboratory and in the field. Numerous scientists have focused on the relation between resistivity and porosity. However, there is a very limited study on the relation between the electrical resistivity and the rock properties apart from porosity .

In this paper, changes in the electrical conductivity of rocks during a uniaxial compression test were investigated in laboratory. The uniaxial compressive strength, elastic modulus, and density values of the samples were determined in laboratory. We installed special electrodes on seven nearly saturated core samples in order to measure the resistivity. Core samples had a 52-mm diameter and a 110-mm length. Two-electrode as well as four-electrode arrays were both used in resistivity monitoring in laboratory. Using a four-electrode array minimized the undesirable electrode polarization effects. In the four-electrode array, we used two non-polarizing Ag/AgCl electrodes mounted on the core sample. Our laboratory observations showed that there was not any electrode polarization effect. When we used a two-electrode array, the resistivity changes were less than 5 percent compared to a four-electrode array. In our laboratory investigation, we used different sedimentary core samples including sandstone, fossiliferous limestone and travertine. Maximum resistivity observed for the travertine core sample was less than 12 kohm. During the uniaxial compressive test, deformation measurements were made and the stress-strain curves were plotted. Tangent Young's modulus values were obtained from stress-strain curves at a stress level equal to 50% of the ultimate uniaxial compressive strength .

Sandstone core samples showed a resistivity increase in the whole strain range. On the contrary, the fossiliferous limestone samples (thin section showed that the sample was composed of tiny calcium fossils in a fine aggregate of micrite cementation) showed a resistivity decrease in the whole strain range. Travertine and limestone showed an intermediate behavior (resistivity increased in the lower strain and it decreased in the higher range). In other words, the onset of new crack formation occurs well inside the quasi-linear part of the stress-strain curve. The quasi-linear portion of the stress-strain curve was the result of a competition between closure of one population of cracks, and the growth of new propagation of the existing cracks.

Resistivity behavior during a uniaxial compression load is closely related to the pores in the lower strain ranges and then to the new induced fractures in higher strains. Our results showed that the electrical resistivity may be a representative measure of the rock properties. Additionally, the effect of certain minerals on the rock's resistivity must be taken into account. The results indicated that the rock structure had an important effect on the resistivity behavior during a mechanical loading.

**Key words:** Electrical conductivity, uniaxial compression test, elasticity modulus, electrical resistivity, petrophysics

روش‌های مستقیم تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها هزینه‌بر هستند. از طرفی این روش‌ها پارامترهای مکانیکی را به‌طور موضعی تعیین می‌کنند. نتایج کارهای تحقیقی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد، از مجموعه روش‌های ژئوفیزیکی، می‌توان پارامترهای مکانیکی را برآورد و تغییرات مکانیکی این پارامترها، نظیر ناهمسانگردی را پیش‌بینی کرد (اسلیتر

## ۱ مقدمه

اندازه‌گیری‌های الکتریکی و لرزه‌نگاری کم‌عمق از روش‌های غیرتخریبی ژئوفیزیکی هستند که در کارهای متفاوت مهندسی مانند ژئوتکنیک، معدن، عمران و مهندسی مخازن نفت و گاز به‌کار می‌روند. این روش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و در صحرا به‌کار رفته است. عموماً

نمونه‌های مغزه بدست آمده از منطقه برشی گسل را اندازه گیری و با UCS، مدول‌های کشسانی، اندیس بار نقطه‌ای، سرعت موج طولی، اندیس چکش اشمیت، چگالی و تخلخل نمونه‌ها ارتباط دادند. تحقیق آنها ارتباط لگاریتمی بین UCS، مدول‌های کشسانی و مقاومت ویژه الکتریکی را نشان داد. روابط ریاضی داده شده میان خصوصیات متفاوت سنگ، کاربردی است و به عوامل گوناگونی مانند نوع سنگ و شرایط و چگونگی اجرای آزمایش بستگی دارد.

اغلب سنگ‌ها و خاک‌ها جریان با یون‌های محلول در آب موجود در منفذهای سنگ انتقال می‌یابد. مقاومت ویژه به خواص تخلخل، شوری سیال منفذها، درصد اشباع آب، محتوی رُس، دما و فشار مرتبط است (آرچی، ۱۹۴۲). معادله تجربی آرچی (۱۹۴۲) انطباق خوبی با سنگ‌های بدون رُس مانند ماسه‌سنگ‌های تمیز برای دارد. در این معادله پارامترهای تخلخل و اشباع آب با مقاومت ویژه ارتباط داده شده‌اند:

$$\rho = \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \quad (1)$$

۲۰۰۷؛ گلور و همکاران، ۲۰۰۰).

محققان گوناگون رفتار مهندسی سنگ‌ها را در آزمایشگاه بررسی کرده‌اند و روابط تجربی متفاوتی بین مقاومت ویژه سنگ و مقاومت مکانیکی آن (UCS)، مدول یانگ و اندیس بار نقطه‌ای، سرعت امواج کشسان و چگالی، توسعه داده‌اند که لزوماً نتایج آنان مؤید یکدیگر نبوده است (جدول ۱).

تحقیقات بسیار کمی در ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی و خواص سنگ‌ها وجود دارد. کیت و استاپاک (۱۹۹۵) رفتار مهندسی سنگ‌های هیمالیا را بررسی کردند و روابط تجربی گوناگونی بین مقاومت ویژه الکتریکی سنگ و مقاومت مکانیکی آن توسعه دادند. از جمله ارتباط لگاریتمی بین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت ویژه الکتریکی. در مطالعه آنها، UCS با افزایش مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یافت. بیلیم و همکاران (۲۰۰۲) مقاومت ویژه نمونه‌های مصنوعی سنگ تحت فشار را اندازه گیری کردند. مطالعات آنها نشان داد که افت ولتاژ با افزایش مقاومت سنگ و چگالی کاهش می‌یابد. قهرمان و آلبرت (۲۰۰۶) امپدانس الکتریکی

جدول ۱. روابط داده شده بین سرعت موج طولی، مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ، چگالی و مقاومت ویژه الکتریکی.

محقق	رابطه
اینو و اهمی (۱۹۸۹)	$UCS = k \cdot (Density) \cdot V_p + A$
قهرمان (۲۰۰۱)	$UCS = 9.9 V_p^{1.21}$
مک نالی (۱۹۸۷)	$UCS = \exp(-11.2 / V_p)$
شارما و سینگ (۲۰۰۸)	$UCS = 0.0642 V_p - 117.99$
سوزا و همکاران (۲۰۰۵)	$UCS = 22.03 V_p^{1.247}$
ترگرول و ظریف (۱۹۹۹)	$UCS = 35.54 V_p - 55$
باشار و اردوغان (۲۰۰۴)	$V_p = 0.0317 UCS + 2.0195$ $V_p = 0.0937 E + 1.7528$
قهرمان و آلبرت (۲۰۰۶)	$E = 14.15 \ln(Res) - 29.07$ $UCS = 61.7 \ln(Res) - 138.25$

UCS = مقاومت فشاری تک محوری، E = مدول کشسانی، V<sub>p</sub> = سرعت موج طولی، Res = مقاومت ویژه الکتریکی است.

در این تحقیق، مقاومت ویژه الکتریکی ۷ نمونه حین آزمایش تنش تک محوری اندازه گیری شده و نتایج مورد بحث قرار گرفته است.

## ۲ نمونه‌ها و روش کار آزمایشگاهی

### ۲-۱ نمونه‌ها

هدف از عملی ساختن آزمایش‌ها، بررسی ارتباط بین خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه‌های سنگی با ساخت و بافت‌های متفاوت تقریباً اشباع است. لذا هفت نمونه مغزه به قطر ۵۲ میلی‌متر و طول ۱۱ سانتی‌متر انتخاب شد. مغزه نمونه‌های مورد نظر به مدت ۱ تا ۱۳ شبانه‌روز در آب شرب قرار داده شدند. چگالی، مقاومت ویژه الکتریکی، مدول کشسانی و UCS آنها اندازه‌گیری شد (جدول ۲). پایش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها حین آزمایش فشار تک محوری مطابق استاندارد ASTM صورت پذیرفت.

دو نمونه ماسه‌سنگ ۸-۰۴۱۱ و ۴-۰۹۱۱، به صورت تکراری از یک بلوک مغزه‌گیری شد. نمونه‌های آهک فسیلی ۴-۰۴۱۱ و ۱-۰۹۱۱ دارای بافت بسیار ریزدانه هستند (فسیل‌های ریز از جنس کلسیت در زمینه آهک میکریتی). مقطع نازک حکایت از وجود فسیل‌های ریز از جنس کلسیت دارد (شکل ۱). این دو نمونه در مدت زمان‌های متفاوت ۷ و ۱۰ روز در آب شرب قرار داده شدند تا اثر آب بر مقاومت مکانیکی و مقاومت الکتریکی آنها بررسی شود.

نمونه آهک ۳-۰۹۱۱، شبیه ترورتن دارای تخلخل و منفذها زیادی است که بعضی از منفذها آن با سیمانی از جنس کلسیت پر شده و دارای مقاومت مکانیکی کمتری شد. حدس زده می‌شود که رفتار آن شبیه سنگ‌های بُرشی در مناطق گسلی باشد.

S اشباع آب و m و n ضرایب ثابتی هستند. رابطه بین تخلخل و اشباع با مقاومت ویژه در نمودار لگاریتمی خط‌هایی به ترتیب با شیب‌های  $m$  و  $-n$  هستند. این رابطه برای ماسه‌سنگ‌های شیلی قابل قبول نیست (پاتنود و ویله، ۱۹۵۰). ذرات رُسی دارای فعالیت الکتریکی سطحی هستند (وجود رسانایی سطحی). این فعالیت باعث می‌شود که مقاومت الکتریکی سنگ و خاک کاهش یابد؛ به خصوص در حالتی که درصد اشباع آب کم است. به هر حال وقتی اشباع آب زیاد است، مقاومت ویژه سنگ بیشتر تحت تاثیر شوری آب در منفذها است. مقاومت ویژه سنگ‌های رُسی به بسامد نیز وابسته است (قربانی و همکاران، ۲۰۰۹).

تحقیقات براس و همکاران (۱۹۶۵) روشن ساخت که مقاومت ویژه سنگ‌های بلورین در تنش‌های کم، افزایش و سپس در تنش‌های زیاد کاهش می‌یابد. تحقیقات کیت و گخال (۱۹۹۸) نشان داد که مقاومت ویژه با افزایش UCS کاهش می‌یابد. آرا و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که مقاومت ویژه نمونه‌های سنگ کربناته با ۲۰ درصد رُس و ۷۰ درصد اشباع آب با افزایش تنش محوری افزایش می‌یابد.

شن (۱۹۹۸) روشن ساخت که فشار جانبی، مقاومت ویژه را کاهش می‌دهد؛ این امر می‌تواند ناشی از بسته شدن درزه‌ها و میکرودرزه‌ها در سنگ‌های خشک باشد. کیت و راثو (۱۹۸۹) نشان دادند که فشار جانبی، مقاومت ویژه سنگ‌های اشباع را افزایش می‌دهد که دلیل آن بسته شدن درزه‌ها و کاهش اندازه منفذها است. آنها حدس زدند که با اعمال فشار جانبی بیشتر از فشار آب منفذی، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در این حال فشار آب منفذی اثر تخلخل را افزایش می‌دهد و در نتیجه مقاومت ویژه سنگ کاهش می‌یابد (گلوور و همکاران، ۱۹۹۷، ۲۰۰۰).

جدول ۲. پارامترهای فیزیک و مکانیکی اندازه گیری شده روی ۸ مغزه در آزمایشگاه. ستون آخر مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در آب را نشان می‌دهد.

نمونه	شماره نمونه	UCS(MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت ویژه (Ωm)	زمان (روز)
تراورتن	1	۲۰/۴	۸/۴	۲/۶۷	۱۸۴۴	۵
تراورتن	2	۲۴/۳۴	۶/۹	۲/۶۸	۱۱۶۰۰	۱
تراورتن	1509-6	۲۳/۱	۹/۸	۲/۶۸	۷۶۱۰	۳
سنگ آهک فسیلی	0411-4	۴۳/۷۹	۸/۹	۲/۱۷	۲۱۲	۷
آهک فسیلی	0911-1	۱۶/۹۵	۴/۳	۲/۱	۸۳	۱۰
ماسه سنگ	0411-8	۳۱/۰۷۷۶	۵/۹	۲/۷۱	۱۶۳۰	۳
ماسه سنگ	0911-4	۳۶/۷۲۸	۵/۹	۲/۶۸	۹۴۰	۱۳
سنگ آهک	0911-3	۱۵/۵۳۸	۴/۵	۲/۶۹	۲۱۰۶	۱۳

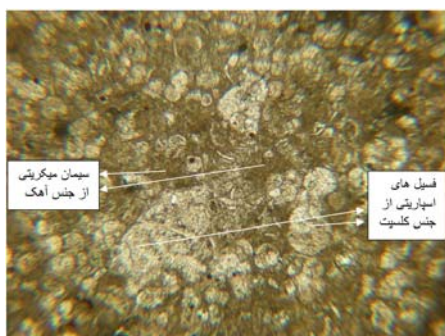
صرف نظر کرد. لذا اندازه گیری‌ها با اعمال روش دو الکترود صورت پذیرفت. الکترودهای جریان دارای قطر ۵۲ میلی متر هستند، لذا خطوط جریان به طور یکنواخت از همه سطح مقطع نمونه عبور می‌کند. دستگاه، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را در جریان مستقیم اندازه گیری می‌کند، با حاصل ضرب فاکتور هندسی آرایش (که فقط به محل قرارگیری الکترودها وابسته است)، مقاومت ویژه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho = k \cdot R = k \cdot \frac{\Delta V}{I} = \frac{A}{L} \cdot \frac{\Delta V}{I}, \quad (2)$$

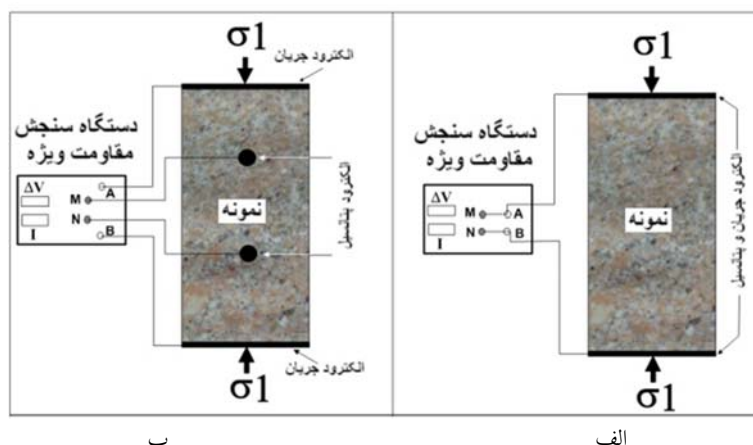
که  $k$  ضریب هندسی آرایش الکترودی،  $A$  سطح مقطع نمونه،  $L$  فاصله بین الکترودهای پتانسیل،  $\Delta V$  اختلاف پتانسیل بین دو الکترود پتانسیل و  $I$  جریان عبوری از نمونه است.

## ۲-۲ اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها حین بارگذاری

به منظور بررسی وجود اثر قطبیدگی الکترودی به علت استفاده از جریان الکتریکی مستقیم، مقاومت ویژه در هر دو روش دو الکترود و چهار الکترود اندازه گیری و مقایسه شد (قربانی و همکاران، ۲۰۰۹). در روش دو الکترود، الکترودهای جریان و پتانسیل به هم و به هر طرف از دو سر نمونه متصل می‌شوند (شکل ۲). در صورتی که در روش چهار الکترود، الکترودهای جریان به دو سر نمونه و الکترودهای غیر قطبی (Non-) Ag/AgCl (polarizing electrodes) به دو نقطه دیگر از نمونه متصل می‌شوند. مقایسه نتایج اندازه گیری مقاومت ویژه نمونه تراورتن ۱ نشان داد که اثر قطبش الکترودی در هر دو حالت بسیار کمتر از ۵ درصد بوده است و می‌توان از آن



شکل ۱. فسیل‌های اسپاریتی از جنس کلسیت با سیمان میکریتی در مقطع نازکی از نمونه سنگ آهک فسیل دار، ۰۴۱۱

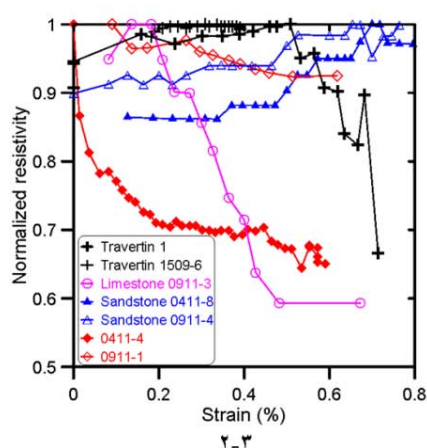


شکل ۲. نمایی از آزمایش هم‌زمان مقاومت ویژه و آزمایش تنش تک‌محوری. اندازه‌گیری مقاومت ویژه با هر دو آرایه الف) دو‌الکترودی و ب) چهارالکترودی. A و B محل اتصال الکترودهای جریان، M و N محل اتصال الکترودهای پتانسیل.

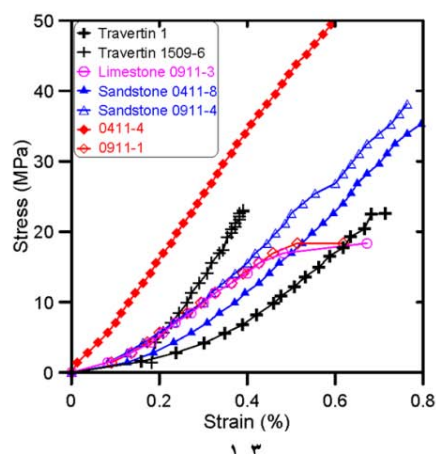
### ۳ بحث

به شدت کاهش می‌یابد. باید در نظر داشت که سیمان اتصال‌دهنده ذرات سنگ‌دانه ریز (سیمان میکریتی) است. نتیجه‌گیری بیشتر نیاز به آزمایش تکمیلی تعیین کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ دارد. هر دو نمونه تراورتن نیز منحنی‌های آزمون تک‌محوری متفاوتی به دست می‌دهند. این مسئله به ساختار آنها یا نحوه کنار هم قرارگیری منفذها وابسته است. کمترین خواص مکانیکی مربوط به آهک ۰۹۱۱-۳ است.

شکل ۳-الف منحنی آزمایش مقاومت تک‌محوری ۷ نمونه مغزه را نشان می‌دهد. نمونه‌های تکراری ماسه‌سنگ، منحنی یکسانی را نشان می‌دهند. نمونه‌های آهک فسیلی ۰۴۱۱-۴ و ۰۹۱۱-۱ منحنی‌های کاملاً متفاوتی را به دست می‌دهند. این اختلاف، به دلیل تفاوت در اشباع آب آنها است. مقطع نازک (شکل ۱) نشان می‌دهد که این سنگ از کنار هم قرار گرفتن مجموعه فسیل‌های ریز تشکیل شده‌اند. خواص مکانیکی این نمونه در اثر جذب آب



۲-۳



۱-۳

شکل ۳. الف) نتایج آزمایش‌های هم‌زمان تنش-کرنش تک‌محوری و ب) مقاومت ویژه الکتریکی-کرنش روی ۷ نمونه مغزه.

به دست آمده در اینجا همخوانی قابل ملاحظه‌ای با نتایج براس و همکاران (۱۹۶۵) دارد.

#### ۴ نتیجه گیری

آزمون تک محوری هم زمان با اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی روی ۷ نمونه مغزه آهک، ماسه سنگ و تراورتن با ساخت و بافت های متفاوت صورت گرفت.

نمونه های متفاوت رفتارهای الکتریکی متفاوتی را حین آزمایش تک محوری نمایش دادند. ماسه سنگ ها افزایش و نمونه های آهک فسیل دار کاهش مقاومت ویژه الکتریکی را در سراسر محدوده افزایش گرنش نشان دادند. تراورتن ها و آهک ۳-۰۹۱۱ رفتار بینابین داشتند، به طوری که با افزایش گرنش در ابتدا افزایش مقاومت ویژه و سپس کاهش مقاومت نشان دادند. رفتار مقاومت ویژه به بسته شدن منفذها در ابتدا و ایجاد درزه های القایی در تنش های بیشتر ارتباط داده شده است. نتایج نشان می دهند که ساختار سنگ نیز اثر مهمی در رفتار مقاومت ویژه در حین اعمال تنش دارد. در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری وقتی تنش ها به مقاومت فشاری تک محوری نهایی نزدیک می شود، چگالی درزه های القایی به بیشترین مقدار خود می رسد و هرچه مقاومت نهایی سنگ بیشتر باشد این چگالی درزه نیز بیشتر می شود.

#### منابع

فهمی فر، ا.، و سروش، ح.، ۱۳۸۰، آزمایش های مکانیک سنگ (جلد اول: مبانی نظری و استانداردها)، مرکز نشر پرفسور حسابی، تهران.

ولی، ج.، کاظم زاده، ع.، آلوکی بختیاری، ح. و اصفهانی، م.ر.، ۱۳۸۹؛ تاثیر شکل هندسی منافذ بر سرعت امواج لرزه ای در سنگ های کربناته مخازن هیدروکربوری، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵ (۳)، ۳۵-۴۹.

شکل ۳-ب منحنی های مقاومت ویژه الکتریکی بهنجار-گرنش به دست آمده حین آزمون تک محوری را نشان می دهد. مقاومت ویژه الکتریکی بهنجار از نسبت مقاومت ویژه بر پیشینه مقدار آن به دست آمده است. سنگ های متفاوت، رفتارهای متفاوتی نشان می دهند. در نمونه های ماسه سنگ، با افزایش گرنش، مقاومت ویژه افزایش می یابد. در صورتی که در نمونه های آهک فسیلی ۴-۰۴۱۱ و ۱-۰۹۱۱ در سراسر محدوده افزایش گرنش، کاهش مقاومت ویژه را نشان می دهند. نمونه های آهک ۳-۰۹۱۱ و تراورتن افزایش مقاومت ویژه در گرنش های کم و سپس کاهش مقاومت ویژه در گرنش های زیاد را نشان می دهند.

اگر مدل ساده ای از یک سنگ دانه ای همگن با تخلخل به نسبت زیاد مانند ماسه سنگ را در نظر بگیریم، به عبارت دیگر ذرات به صورت همگن کنار یکدیگر قرار گرفته باشند، افزایش گرنش با کاهش تخلخل همراه خواهد بود و مطابق معادله آرچی (معادله ۱)، افزایش مقاومت ویژه را نتیجه خواهد داد. حدس زده می شود که نمونه های ماسه سنگ، حالتی نزدیک به مدل فوق نشان دهند (به نظر می رسد که در این نوع سنگ درزه های القایی کمتر نمو پیدا می کنند).

مطابق شکل ۱ با توجه به اینکه نمونه های آهک فسیلی ۴-۰۴۱۱ و ۱-۰۹۱۱ از ذرات بسیار ریز و یکنواخت تشکیل شده اند (مقطع نازک، شکل ۱). به نظر می رسد که اعمال تنش، باعث ایجاد درزه های القایی می شود و این درزه ها تا نقطه شکست افزایش می یابند. لذا با افزایش گرنش، تخلخل افزایش و مقاومت ویژه سنگ کاهش می یابد.

نمونه های تراورتن و آهک ۳-۰۹۱۱ رفتاری بین دو حالت ذکر شده نشان می دهند. به عبارت دیگر در گرنش های کم، بسته شدن منفذها و درزه های موجود و در گرنش های زیاد، ایجاد درزه های القایی جدید و کاهش مقاومت ویژه الکتریکی مشاهده می شود. نتایج

- 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.
- Kate, J. M., and 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, vol. 1. Rotterdam: Balkema, 171–178.
- Kate, J. M., and 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.
- McNally, G. H., 1987, Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs: *Geoexploration*, **24**, 381–395.
- Patnode, W. H., and Wyllie, M. R. J., 1950, The presence of conductive solids in reservoir rocks as factor in electric log interpretation: *Petrol. Trans. AIME*, **189**, 47–52.
- Sharma, P. K.; and Singh, T. N., 2008, A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **67**, 17–22.
- Schon, J. H., 1998, Physical properties of rocks, fundamentals and principles of petrophysics: 2nd. ed., Pergamon, Oxford, 583p.
- Slater, L., 2007, Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries-A Review: *Surveys in Geophysics*, **28**, 169–197.
- Sousa, L. M. O.; dei Rio, L. M. S.; Calleja, L.; de Argandona; V. G. R.; and Rey, A. R., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites: *Eng. Geol.*, **77**, 153–168.
- Turgrul, A.; and 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.; and 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.
- Ara, T., Bjrndalen, N., Talabani, S., and Islam, M. R., 2004, Predicting oil reserve in carbonate reservoirs: *EEC Innovation*, **2**, 20–43.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, **146**, 54–62.
- Bilim, N., Ozkan, I., and Gokay, M. K., 2002, Determination of discontinuities at rock materials by electrical resistance method, in Sensogut, C., and Ozkan, I., eds., Proceedings of the seventh regional rock mechanical symposium Ankara: Kozan Ofset, 121–127.
- Brace, W. F., Orange, A. S., and Madden, T. R., 1965, The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks: *J. Geophys. Res.*, **70**, 5669–5678.
- Ghorbani, A., Cosenza, Ph., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., and 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.
- Glover, P. W. J., Gomez, J. B., and 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.
- Glover, P. J., Gomez, J., Meredith, P., Hayashi, K., Sammonds, P. R., and Murrell, S. A. F., 1997, Damage of Saturated Rocks Undergoing Triaxial Deformation Using Complex Electrical Conductivity Measurements: Experimental Results: *Phys. Chem. Earth*, **22** (1-2), 57–61.
- Inoue, M.; and 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., and Albert, M., 2006, Predicting the physico-mechanical properties of rocks from electrical impedance spectroscopy measurements: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **43**, 543–553.
- Kate, J. M., and Gokhale, C. S., 1998, Electrical