

## ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی با پارامتر مکانیکی کرنش در سنگ‌های رسوبی

محمد صادق نعمت الهی<sup>۱</sup>، حمیدرضا رمزی<sup>۲</sup>، محمد رضایی شاد<sup>۳</sup>، احمد قربانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
[m.s.nematollahi@aut.ac.ir](mailto:m.s.nematollahi@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
[ramazi@aut.ac.ir](mailto:ramazi@aut.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
[m.rezaeishad@aut.ac.ir](mailto:m.rezaeishad@aut.ac.ir)

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد [aghorbani@yazduni.ac.ir](mailto:aghorbani@yazduni.ac.ir)  
**چکیده**

خواص فیزیکی - مکانیکی سنگ‌ها پارامترهای مهمی در طراحی کارهای مهندسی و طبقه‌بندی توده سنگ‌ها برای اهداف مهندسی است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری قادرند پارامترهای مکانیکی را تخمین زده و تغییرات مکانی آنها را تشخیص دهند. پس از اندازه‌گیری سرعت موج طولی ۶ نمونه در حالت اشباع، الکترودهای مخصوصی روی آنها نصب شد و آزمایش فشاری سه محوری و عبور جریان الکتریکی از نمونه‌ها به‌طور همزمان صورت پذیرفت و تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در حین بارگذاری اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش کرنش همواره مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. رفتار مقاومت ویژه حین بارگذاری به ایجاد درزه‌های القایی (افزایش تخلخل) همزمان با افزایش کرنش، ارتباط داده شد. همچنین نمودار مقاومت فشاری سه‌محوره با سرعت موج طولی رسم گردید. نتایج نشان داد، تغییرات سرعت موج طولی با مقاومت فشاری سه‌محوره رابطه مستقیم دارند.  
**واژه‌های کلیدی:** آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره، سرعت موج طولی، مقاومت ویژه الکتریکی، ژئوفیزیک و مکانیک سنگ.

### Relationship Between Electrical Resistivity And Strain Mechanical Parameter In Sedimentary Rocks

M.Sadegh Nematollahi<sup>1</sup>, Hamidreza Ramazi<sup>2</sup>, Mohamad Rezaeishad<sup>3</sup>, Ahmad Ghorbani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Master student of Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran,  
[m.s.nematollahi@aut.ac.ir](mailto:m.s.nematollahi@aut.ac.ir)

<sup>2</sup>Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, [ramazi@aut.ac.ir](mailto:ramazi@aut.ac.ir)

<sup>3</sup>Master student of Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran,  
[m.rezaeishad@aut.ac.ir](mailto:m.rezaeishad@aut.ac.ir)

<sup>4</sup>Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, [aghorbani@yazduni.ac.ir](mailto:aghorbani@yazduni.ac.ir)

#### Abstract

Physical and mechanical 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, able to estimate mechanical parameters and recognize spatial variations. After measuring the p-wave velocity of 6 saturation samples, special electrodes were installed on the samples and simultaneously triaxial pressure test and electric current flowing through the samples was done and variation of electrical resistivity during loading, was measured. Experiments have been show, the increasing of the strain with the decreasing of resistivity. Resistivity behavior during a triaxial compression load is related to the new induced fractures in higher strain. Also triaxial pressure diagram with p-wave

velocity has been illustrated. Results have shown, that the variations of p-wave velocity are directly related to triaxial compression pressure.

**Key words:** Triaxial pressure test, Compressional wave velocity, Electrical resistivity, Geophysics and Rock Mechanics.

## ۱ مقدمه

خصوصیات مکانیکی از جمله‌ی مهمترین پارامترهای سنگ می‌باشند که به طور گسترده در پروژه‌های عمرانی و معدنی مورد نیاز بوده و تعیین می‌گردند. انجام مستقیم و دقیق این آزمایش‌ها معمولاً زمان‌گیر و پرهزینه می‌باشند، لذا در سالهای اخیر کوشش‌های بسیاری مبنی بر تخمین این پارامترها با استفاده از روش‌های غیر مخرب ژئوفیزیکی و سرعت موج طولی انجام گرفته است. تحقیقات بسیار کمی در ارتباط بین مقاومت‌ویژه الکتریکی و خواص سنگ‌ها وجود دارد (قربانی و همکاران ۲۰۱۱). تحقیقات (براس و همکاران ۱۹۶۵) روشن ساخت که مقاومت‌ویژه سنگ‌های بلورین در تنش‌های کم، افزایش و سپس در تنش‌های زیاد کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات انجام شده نشان داده است که مقاومت‌ویژه با افزایش UCS کاهش می‌یابد (کیت و گخال ۱۹۹۸). (آرا و همکاران ۲۰۰۴) دریافتند که مقاومت‌ویژه نمونه‌های سنگ کربناته با ۲۰ درصد رس و ۷۰ درصد اشباع آب با افزایش تنش محوری افزایش می‌یابد.

## ۲ روش تحقیق

هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی ارتباط بین خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه‌های تقریباً اشباع سنگی مختلف با ساخت‌های متفاوت می‌باشد. نمونه مغزه‌های به قطر ۵۲ میلیمتر و طول ۱۱ سانتی‌متر انتخاب گردید. ۵ نمونه مغزه از سنگ‌های رسوبی مختلف انتخاب شدند و به مدت ۸ تا ۱۶ روز در آب قرار گرفتند. سرعت انتشار امواج طولی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۱). سرعت این امواج بستگی به مقاومت تراکمی و کششی سنگ یا به طور کلی کیفیت سنگ دارد. همچنین به منظور مطالعه کانیه‌های تشکیل‌دهنده سنگ و بافت آن، مقاطع نازک تهیه گردید. مقاومت‌ویژه الکتریکی نمونه‌ها حین آزمایش فشار سه محوری مطابق استاندارد ASTM صورت پذیرفت. الکترودهای جریان دارای قطر ۵۲ میلیمتر می‌باشند. لذا خطوط جریان به طور یکنواخت از همه سطح مقطع نمونه عبور می‌کند. دستگاه، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را در جریان مستقیم اندازه‌گیری کرده، با حاصل ضرب فاکتور هندسی آرایش (که فقط به محل قرار گیری الکترودها وابسته است)، مقاومت‌ویژه از رابطه (۱) بدست می‌آید:

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

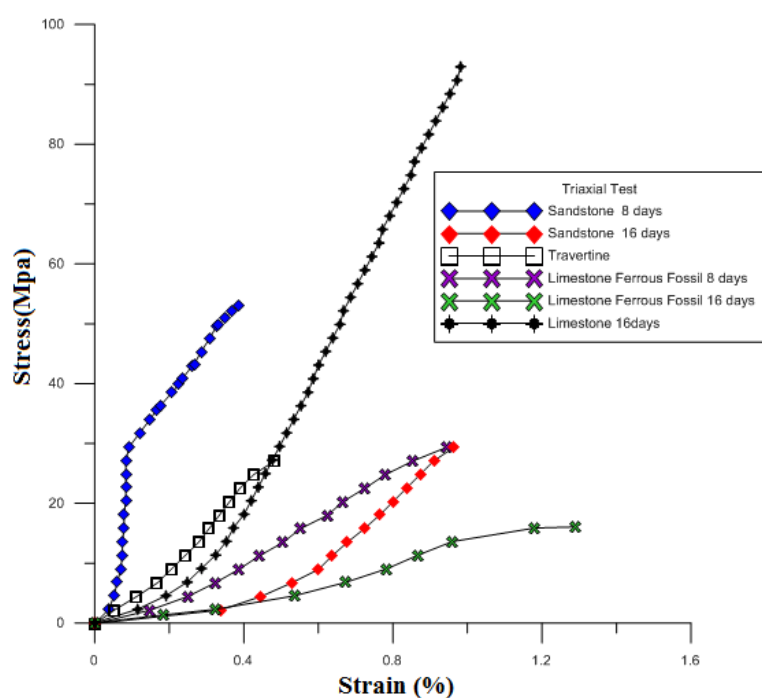
که در آن A سطح مقطع نمونه، L فاصله بین الکترودهای پتانسیل،  $\Delta V$  اختلاف پتانسیل بین دو الکترودها و I جریان عبوری از نمونه می‌باشد.

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده بر روی ۶ مغزه در آزمایشگاه. ستون آخر مدت زمان قرار گیری نمونه‌ها در آب را نشان می‌دهد.

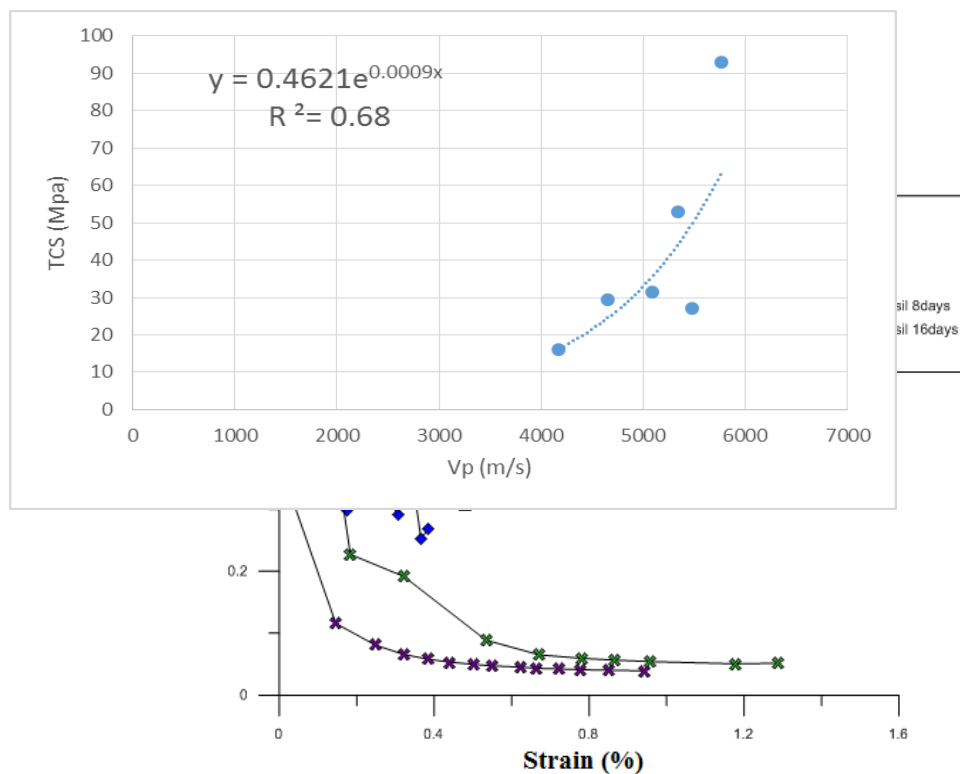
نمونه‌ها	سرعت طولی (Vp) (m/s)	مقاومت فشاری محوری (TCS) (Mpa)	زمان (روز)
سنگ ۱ ماسه	۵۳۴۳	۵۳/۰۴	۸
سنگ ۲ ماسه	۵۰۹۲	۳۱/۵	۱۶
تراورتن آهک	۵۴۸۲	۲۷/۲	۸
فسیلی ۱ آهک	۴۶۵۴	۲۹/۵	۸

۱۶	۱۶/۰۴	۴۱۷۳	فسیلی ۲
۱۶	۹۲/۲	۵۷۶۹	آهک

در آزمایش سه محوری دو نمونه ماسه سنگ، دو نمونه آهک فسیلی با اشباع آب های متفاوت، یک نمونه تراورتن و یک نمونه آهک تحت تنش سه محوری قرار گرفتند. به طور همزمان مقادیر مقاومت ویژه اندازه گیری شد. مقدار فشار جانبی برای هر نمونه مقدار ثابت ۱۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. شکل (۱) منحنی تنش- کرنش را برای این نمونه ها نشان می دهد. شکل (۲) منحنی همزمان مقاومت ویژه نرمالیزه - کرنش برای نمونه های مورد آزمایش را نشان می دهد. نرمالیزه کردن مقاومت ویژه، از نسبت مقاومت ویژه بر ماکزیمم مقدار آن بدست آمده است. برای هر ۶ نمونه با اشباع های مختلف با افزایش تنش مقدار مقاومت ویژه کاهش می یابد. به نظر می رسد اعمال تنش باعث ایجاد درزه های القایی شده که تا نقطه شکست افزایش می یابند. لذا با افزایش کرنش، تخلخل افزایش یافته و مقاومت ویژه سنگ کاهش می یابد.



شکل (۱). منحنی تنش-کرنش بدست آمده برای نمونه های مختلف و با اشباع های مختلف در آزمایش سه محوری.



شکل (۲). منحنی همزمان مقاومت ویژه نرمالیزه- کرنش بدست آمده برای ۶ نمونه.

همچنین نمودار مقاومت فشاری سه محوری - سرعت موج طولی نمونه‌های مورد آزمایش رسم گردید. ضریب همبستگی نسبتاً خوب ۰/۶۸ حاکی از آن است که، با افزایش سرعت موج در سنگ، مقاومت فشاری سه محوره افزایش می‌یابد. افزایش سرعت موج به این معنی است که سنگ متراکم و از استحکام بالایی برخوردار است و این باعث افزایش مقاومت مکانیکی آن نیز می‌شود. شکل (۳) این نکته را تایید می‌کند.

شکل (۳). نمودار مقاومت فشاری سه محوری - سرعت موج طولی نمونه سنگ‌های رسوبی

### ۳ نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری آزمایش سه محوری همزمان با مقاومت ویژه بر روی ۶ نمونه با اشباع آب مختلف انجام شد. قبل از انجام آزمایش، سرعت موج طولی هر نمونه اندازه‌گیری شد. در آزمایش سه‌محوری تمامی نمونه‌ها کاهش مقاومت ویژه را در محدوده افزایش کرنش نشان دادند. رفتار مقاومت ویژه به ایجاد درزه‌های القایی همزمان با افزایش تنش ارتباط داده شده است. همچنین نمودار مقاومت فشاری سه محوری - سرعت موج طولی رسم گردید که ضریب همبستگی ۰/۶۸

گویای پیوند خوبی میان این دو پارامتر است، به طوری که با افزایش سرعت موج طولی، مقاومت فشاری سه محوری نیز افزایش می یابد.

### منابع

قربانی، احمد؛ قاری، حسینعلی؛ نمیرانیان، افشین؛ امامی، عنایت اله، ۱۳۹۰، مونیتورینگ مقاومت ویژه الکتریکی سنگ حین آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه، چهارمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران.

Ara, T., Bjorndalen, N., Talabani, S., and Islam, M. R., 2004, Predicting oil reserve in carbonate reservoirs: EEC Innovation, 2, 20-43.

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.

Kate, J. M., and Rao, K. S., 1989, Effect of large overburden stress on geophysical behaviour of sandstone, in maury, V., and Fourmaintraux, D., eds., Proceeding of the ISRM-SPE International symposium on rock at great depth, vol. 1, Rotterdam: Balkema, 171-178.