

بررسی رفتار نمونه‌های بتن درزه‌دار با استفاده از روش‌های سرعت موج تراکمی و مقاومت ویژه الکتریکی

اصغر سیاه‌منصوری^۱ و احمد قربانی^{۱*}

^۱دانشگاه یزد، یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱)

چکیده

بررسی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها بر خواص فیزیکی سنگ، برای درک بسیاری از مشکلات کلیدی در زلزله‌شناسی، آتشفشان‌شناسی و ژئوتکنیک ضروری است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، به دلیل مزایای آن گسترش یافته است. در تحقیقات گذشته، میزان تخلخل سنگ را با استفاده از سرعت موج تراکمی با روابط تجربی برآورد کرده‌اند. همچنین روابط بسیاری برای ارتباط میان مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل عرضه شده است. در این تحقیقات، اثر درزه و ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته نشده است. در این مقاله به منظور اثردهی ناپیوستگی‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی، از مدل‌سازی فیزیکی سنگ (ریزدانه و درشت‌دانه) با نمونه‌های بتنی و ناپیوستگی‌های مصنوعی استفاده شده است. بدین منظور تعداد ۲۰ نمونه بتنی استوانه‌ای، طبق استاندارد NQ ISRM در آزمایشگاه تهیه شد. درزه‌های مصنوعی با ابعاد متفاوت در هنگام ساخت نمونه در آن قرار داده شد. نمونه‌ها به مدت ۶ روز در آب قرار داده شدند و پس از خارج شدن از آب، به مدت ۲۴ ساعت تا خشک شدن کامل در گرمکن گذاشته شدند، و سپس در حالت خشک و اشباع، سرعت موج کشسان تراکمی و مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی روشن ساخت که با توجه به رابطه ریمر و همکاران، رفتار درزه (ناپیوستگی) با ضریب اصطکاک کم (وجود یونولیت، طلق نازک و کاغذ برای ایجاد درزه) در نمونه‌ها، شبیه وجود آب در منافذ نمونه بدون درزه است. آهنگ کاهش سرعت موج تراکمی با افزایش چگالی درزه‌داری در نمونه‌های خشک بیشتر از نمونه‌های اشباع است. افزایش چگالی درزه‌داری (درزه‌های ترنشو: درزه‌های پرشده با یونولیت، طلق نازک و کاغذ) در نمونه‌های اشباع باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی با رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سرعت موج تراکمی، مقاومت ویژه الکتریکی، تخلخل، چگالی درزه‌داری

Investigation of jointed concrete specimens using compressional wave velocity and resistivity

Asghar Siahmansouri¹ and Ahmad Ghorbani^{1*}

¹Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 1 May 2012, accepted: 21 April 2013)

*Corresponding author:

aghorbani@yazd.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

Recent developments in making new devices for geophysical surveys and the low costs of these surveys have made the geophysical methods such as compression sound waves velocity (P) and electrical resistivity (ρ) very common in the estimation of physical and mechanical properties of rocks. Raymer and colleagues proposed two new relationships between porosity and compression waves for low porosities and very high porosities. They used an interpolation method to estimate an average porosity between two limits. Studies have shown a good correlation (usually between 0.7 and 0.8) between the physical properties of rocks and the compression sound wave velocity.

Compression sound wave velocity is a measure of intact rock wave velocity. Therefore, ignoring the crack effects adumbrates the results and generalizes it to rock mass.

In this study, we made some artificial fractures in concrete samples in order to study the effect of discontinuities on the physical properties (P wave and electrical resistivity) in laboratory.

In order to provide concrete samples, both B and C mix designs for modeling the fine and coarse grain were prepared. To simulate the various discontinuities in the samples, materials with different cohesion and negligible density of viscosity were used. Paper and talc were used to simulate high and very low cohesions, respectively and foam (unolit) was used for distant discontinuities. To prepare the standard samples, templates were constructed according to the NQ ISRM Standard. 20 templates (the number of samples, including 10 for each mix design) were considered. After preparing the concrete mix design based on both B and C mix designs, and lubricating the templates, the concrete was poured along with placement of discontinuities and artificial porosity. The natural porosities of the samples were determined according to ISRM (1981).

The Pundit Device was used to test the compression wave velocity according to the standard ASTM D2845 (1978). To measure the electrical resistivity of the samples, the standard ASTM D5334-08 (2001) was used. This test is done in the full saturation. Since the porosity between individual samples for each type (fine or coarse grain) is constant, an increase in the total porosity is the result of an increase in the number of artificial joints and pores. In other words, increasing the joints (discontinuities) and artificial pores, causes an increase in the total porosity in the samples and a reduction in the wave velocity.

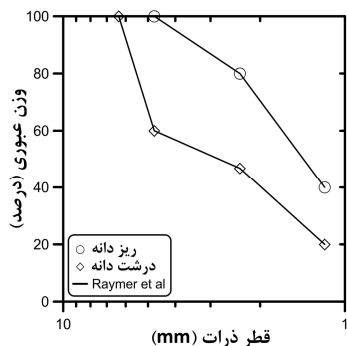
Saturated samples followed the empirical model of Raymer and colleagues very well. In case of the specimens with equal artificial pores and joints, the wave velocity in the saturated state was larger than that in the dry state. Changes in the compression wave velocity with an increase in the number of joints are greater in dry samples than in saturated samples. In other words, by increasing the number of the joints, the saturation effect of the fluid filling the pores becomes more obvious. The best fit of the data on the electrical resistivity and total porosity (or an increase in the ratio of the joint volume to the pore volume) is a logarithmic relationship that has a correlation coefficient at least equal to 0.97. Considering that water does not replace with the artificial discontinuities, electrical resistivity increases with an increase in discontinuities.

Keywords: Compressional wave velocity, electrical resistivity, porosity, physical modeling, nonlinear regression, joint density

۱ مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در نظریه‌های علمی، ساخت ابزارهای پیشرفته برای برداشت‌های ژئوفیزیکی و هزینه بسیار کم این برداشت‌ها سبب شده است تا میزان گرایش به استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی تراکمی (P) و مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، روزبه‌روز بیشتر شود. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که بین ویژگی‌های فیزیکی سنگ و سرعت عبور موج تراکمی همبستگی مناسبی وجود دارد. در ۱۹۵۶ وایلی و همکاران رابطه‌ای خطی بین تخلخل و زمان عبور موج صوتی تراکمی عرضه کرده‌اند. مقادیر حاصل از رابطه وایلی با اطلاعات به‌دست آمده از آزمایشگاه اختلاف دارد و این اختلاف در مناطقی که تخلخل بالایی دارد، بیشتر مشاهده می‌شود (وایلی و همکاران، ۱۹۵۶؛ کریف و همکاران، ۱۹۹۰). ریمر و همکاران (۱۹۸۰) دو رابطه جدید بین تخلخل و موج تراکمی برای تخلخل‌های کم و تخلخل‌های خیلی زیاد عرضه کردند و برای مناطق با تخلخل متوسط از روش درونیابی بین دو رابطه پیش‌گفته بهره گرفتند. توسایا و نور (۱۹۸۲)، کاستاگنا و همکاران (۱۹۸۵) و هان و همکاران (۱۹۸۶) روابطی خطی برای برآورد سرعت موج تراکمی برحسب تخلخل و درصد شیل برای سنگ‌های رُسی پیشنهاد دادند. با اینکه نتایج حاصل از این تحقیقات، ضریب همبستگی به‌نسبت خوبی را نشان می‌دهد، داده‌های حاصل دارای پراکندگی نسبی هستند. نظیر همین پراکندگی‌ها در نمودار سرعت‌تخلخل عرضه شده ورنیک و نور (۱۹۹۲) در سلیسی کلاست‌ها و در مخلوط‌های ماسه و رُس را ماریون و جیزبا (۱۹۹۶) مشاهده کرده‌اند. ضریب همبستگی روابط خطی عرضه شده معمولاً بین ۰/۷ تا ۰/۸ به‌دست آمده است. در ۱۹۴۲ آرچی رابطه تجربی مشهوری بین مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل را مطرح

ساخت. گریفیث در ۱۹۷۶ به بررسی تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی روی ماسه‌سنگ‌ها پرداخت. یانگ و چیانگ (۲۰۰۵) تخلخل بتن را برحسب مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از روابط تجربی برآورد کردند. همچنین تورسون (۲۰۰۶) و دونگ و همکاران (۲۰۱۱) روابطی تجربی را در این زمینه عرضه کردند. سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده روی نمونه‌های طبیعی سنگ، معمولاً درحکم برآوردی از سرعت موج تراکمی سنگ بکر و بدون ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به‌دلیل در نظر نگرفتن تأثیر درزه‌ها، اعتماد به نتایج سرعت موج تراکمی در نمونه و تعمیم آن به توده‌سنگ با ابهاماتی همراه است. همچنین بررسی ناپیوستگی‌های سنگ با استفاده از روش اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های طبیعی با وجود تخلخل اشباع شده از آب، دقیق نیست؛ چرا که در این نمونه‌ها تشخیص اینکه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در اثر وجود درزه‌ها بوده یا در اثر تخلخل ذاتی سنگ، امکان‌پذیر نیست. بنا به دلایل اشاره شده، در این مقاله سعی شد تا سنگ درزه‌دار با نمونه‌های بتنی استوانه‌ای مدل‌سازی شود و سپس با تعیین تخلخل طبیعی و مصنوعی، نمونه و چگالی درزه‌داری و سپس اجرای آزمایش سرعت موج تراکمی و اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، رفتار نمونه‌های بتن مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح به کار رفته برای تهیه نمونه‌های بتن ریز (B) و درشت‌دانه (C).

۲ آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور تهیه نمونه‌های بتنی، دو طرح اختلاط B و C برای مدل‌سازی به‌ترتیب انواع سنگ‌های ریزدانه و درشت‌دانه تهیه و سعی شد تا برای نزدیک‌تر شدن شرایط تهیه نمونه‌ها به شرایط ایجاد سنگ‌ها، نسبت آب به سیمان تا حد امکان کم در نظر گرفته شود (تاکر، ۲۰۰۱). طرح‌های اختلاط بتن در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. منحنی دانه‌بندی دو طرح اختلاط در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای شبیه‌سازی ناپیوستگی‌های متفاوت در نمونه‌ها، از مواد با قابلیت شکل‌دهی زیاد، میزان چسبندگی متفاوت و جرم حجمی ناچیز استفاده شد. از کاغذ و پلاستیک برای شبیه‌سازی درزه‌های به‌ترتیب با چسبندگی زیاد و چسبندگی خیلی کم و یونولیت در مورد ناپیوستگی‌های فاصله‌دار، استفاده شد. جدول ۳ مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های مصنوعی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن گروه B (ریز دانه).

جرم (کیلوگرم)	نوع مواد
۳	سیمان
۱/۱	آب
۱	ماسه با دانه‌بندی زیر ۱۶ مش
۱	ماسه با دانه‌بندی بین ۸ و ۱۶ مش
۰/۵	ماسه با دانه‌بندی بین ۴ و ۸ مش
۰	ماسه با دانه‌بندی بین ۲ و ۴ مش
۶/۶	جرم کل بتن

* نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۷ است.

شد. مشخصات هندسی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای در جدول ۴ آمده است.

در شکل ۲-ب نمونه‌ای از قالب مورد استفاده، نمونه تهیه شده و سطح مقطع آن و درزه بزرگ یونولیتی مورد استفاده نشان داده شده است.

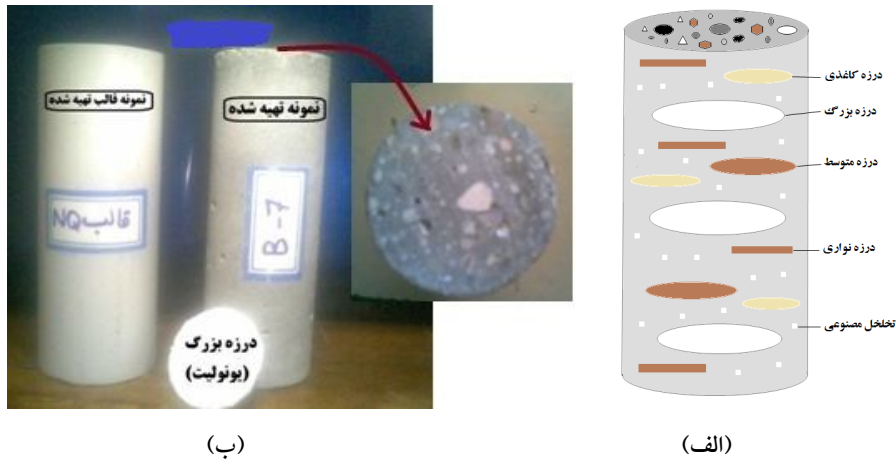
جدول ۲. طرح اختلاط بتن گروه C (درشت‌دانه).

جرم (کیلوگرم)	نوع مواد
۳	سیمان
۱/۱	آب
۰/۵	ماسه با دانه‌بندی زیر ۱۶ مش
۰/۶۷	ماسه با دانه‌بندی بین ۸ و ۱۶ مش
۰/۳۳	ماسه با دانه‌بندی بین ۴ و ۸ مش
۱	ماسه با دانه‌بندی بین ۲ و ۴ مش
۶/۶	جرم کل بتن

* نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۷ است.

تهیه ملات بتن برای همه نمونه‌ها، از یک نوع ماسه، سیمان و آب و در یک زمان مشخص صورت گرفت تا بدین‌ترتیب بتن در شرایط کاملاً یکسان تهیه شود. سپس بتن‌ریزی به‌طور هم‌زمان در قالب‌ها صورت پذیرفت؛ بنابراین تعداد ۲۰ قالب (به تعداد نمونه‌ها شامل ۱۰ عدد برای هر طرح اختلاط) در نظر گرفته شد. پس از تهیه بتن براساس دو طرح اختلاط B و C، با روغن کاری قالب‌ها، بتن‌ریزی به همراه جای‌گذاری ناپیوستگی‌ها و تخلخل‌های مصنوعی در آن به انجام رسید. برای این کار نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه با اندیس‌های ۱ تا ۱۰ مشخص شد، به‌طوری‌که نمونه با اندیس ۱ بدون هیچ‌گونه ناپیوستگی و تخلخل مصنوعی و به‌صورت بکر تهیه شد. به‌ترتیب با افزایش عدد اندیس نمونه‌ها، میزان ناپیوستگی‌های مصنوعی در نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه به‌صورت یکسان افزایش یافت. برای مثال، نمونه‌های با اندیس ۱۰ که دارای بیشترین میزان درزه‌داری است، حاوی ۴ درزه بزرگ، ۵ درزه متوسط، ۳ درزه نواری، ۳ درزه کاغذی و

شکل ۲-الف تصویری از انواع ناپیوستگی‌های استفاده شده و جای‌گیری هندسی آنها در یکی از نمونه‌ها را به‌صورت طرحوار نشان می‌دهد. برای تهیه نمونه‌های استاندارد، قالب‌هایی مطابق استاندارد NQ ISRM ساخته



شکل ۲. (الف) موقعیت ناپیوستگی‌های مصنوعی ایجاد شده در یکی از نمونه‌ها. (ب) نمایی از قالب مورد استفاده، نمونه تهیه شده و سطح مقطع آن. درزه بزرگ یونولیتی در مقطع به‌خوبی نمایش داده شده است.

۳ اندازه‌گیری تخلخل و سرعت موج تراکمی

۱-۳ تعیین تخلخل نمونه‌ها

میزان تخلخل طبیعی نمونه‌ها براساس استاندارد ISRM (۱۹۸۱) تعیین شد. برای این کار پس از اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار داده شدند و سپس با استفاده از دستگاه تعیین نفوذپذیری سنگ، تحت فشار ثابت ۳۰ بار، از آب اشباع شدند. با اندازه‌گیری وزن اشباع، تفاوت وزن خشک و اشباع محاسبه شده و از این راه میزان تخلخل طبیعی به‌دست

تخلخل مصنوعی است. برای تهیه نمونه‌ها، در هر مرحله از بتن‌ریزی، درزه‌ها جای‌گذاری شده و بتن‌ریزی ادامه یافت به‌طوری‌که درزه‌ها در حجم نمونه‌ها به‌صورت یکنواخت توزیع شود. همچنین با استفاده از کوبه، تراکم مناسب در بتن ایجاد شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شد و به مدت ۶ روز در حوضچه آب قرار گرفت. با گذشت ۷ روز از زمان بتن‌ریزی، نمونه‌ها از حوضچه خارج و به مدت ۲۴ ساعت تا خشک شدن کامل در گرمکن قرار داده شد. سپس نمونه‌ها برای اجرای آزمایش تعیین میزان تخلخل طبیعی، سرعت موج تراکمی و اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به آزمایشگاه ژئوفیزیک منتقل شد.

جدول ۳. مشخصات هندسی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی.

مشخصات	ناپیوستگی	بزرگ	متوسط	نواری	کاغذی	تخلخل مصنوعی
جنس	یونولیت	طلق	طلق	طلق	کاغذ	یونولیت
سطح (Cm ²)	۱۱	۶	۶	۱	۴	-
فاصله‌داری (mm)	۱	۰	۰	۰	۰	-
حجم (mm ³)	۱۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۰
چسبندگی	۰	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	متوسط	-

ثانیه است. سرعت موج تراکمی در نمونه‌های ریزدانه، درشت‌دانه و همه نمونه‌ها در دو حالت خشک و اشباع برحسب میزان تخلخل کل نمونه‌ها محاسبه و نمودار تغییرات سرعت نسبت به درصد تخلخل رسم شد (شکل ۴).



شکل ۳. دستگاه Pundit و حسگرهای فرستنده و گیرنده، برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای (دستگاه از نوع تک‌بسامدی و با بسامد ۵۲ کیلوهرتز و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میکروثانیه است).

میزان ناپیوستگی و تخلخل در نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه، به ترتیب از B1 تا B10 و C1 تا C10 افزایش پیدا می‌کند. نمونه B1 (C1) بدون درزه و شامل تخلخل طبیعی و نمونه C10 (B10) دارای حداکثر درزه و تخلخل مصنوعی است.

مطابق شکل ۴، نمونه‌های اشباع ریز و درشت‌دانه، انطباق مناسبی با رابطه تجربی ریمر و همکاران (۱۹۸۰) نشان می‌دهند:

$$V_P = (1 - \phi)^2 V_M + \phi V_F \quad (2)$$

که ϕ تخلخل نمونه ($\phi < 0.37$)، V_M و V_F به ترتیب سرعت موج تراکمی ماتریکس و شاره است. ریشه مربعات خطای محاسبه شده (RMS) برای هر دو حالت ریز و درشت‌دانه کمتر از ۷ درصد است. ریمر و همکاران (۱۹۸۰) این رابطه را برای برآورد سرعت موج تراکمی در ماسه‌سنگ‌ها و ماسه‌سنگ شیلی اشباع (با محتوی رُس

آمد. در هر نمونه با محاسبه حجم کل ناپیوستگی‌های جای‌گذاری شده در آن، تخلخل مصنوعی تعیین شد. حاصل جمع تخلخل طبیعی و تخلخل حاصل از درزه‌های مصنوعی، درحکم تخلخل کل (به‌صورت درصدی از حجم کل نمونه) ثبت می‌شود.

جدول ۴. مشخصات هندسی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی.

نوع نمونه	استاندارد NQ ISRM
قطر نمونه	۴۷/۶ میلی‌متر
طول نمونه	۲/۵ تا ۳ برابر قطر نمونه (تقریباً ۱۳۵ میلی‌متر)
تعداد نمونه	۲۰ عدد

۲-۳ اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی

به‌منظور اجرای آزمایش سرعت موج تراکمی از دستگاه Pundit برطبق استاندارد ASTM D2845 (۱۹۷۸) استفاده شد. مطابق استاندارد پیش‌گفته حداقل بُعد جانبی نباید کمتر از ۵ برابر طول موج باشد. دستگاه مورد استفاده از نوع تک‌بسامدی و با بسامد ۵۲ کیلوهرتز و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میکروثانیه است. این بسامد برابر طول موج ۴/۶ میلی‌متر است (شکل ۳). آزمایش تعیین سرعت موج تراکمی برای دو حالت خشک و اشباع کامل روی نمونه‌ها صورت گرفت.

قبل از اجرای این آزمایش، دو سر انتهایی نمونه‌ها با استفاده از پودر ساینده کاملاً صیقلی شد. برای هر نمونه ابتدا طول آن با دقت اندازه‌گیری شده و پس از واسنجی (کالیبره) کردن دستگاه، مدت زمان عبور موج تراکمی در نمونه با دقت اندازه‌گیری شد. پس از ثبت طول نمونه‌ها و مدت زمان عبور موج، با جای‌گذاری در رابطه (۱) سرعت عبور موج در هر نمونه محاسبه می‌شود.

$$V_P = \frac{L}{1000t} \quad (1)$$

که V_P سرعت موج تراکمی با واحد کیلومتر بر ثانیه، L طول نمونه با واحد متر و t مدت زمان عبور موج با واحد

به همه سطح مقطع نمونه انتقال می‌یابد. برای هر نمونه مقاومت الکتریکی (R) با آرایش دو الکترودی با استفاده از معادله (۳) اندازه‌گیری شد. با داشتن ابعاد نمونه، مقاومت ویژه الکتریکی از معادله (۴) به دست می‌آید (قربانی و همکاران، ۱۳۹۱):

$$R = \frac{\Delta V}{I}, \quad (3)$$

$$\rho = \frac{R \times A}{L}, \quad (4)$$

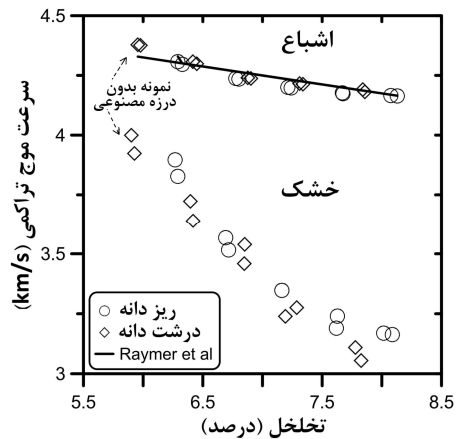
در روابط بالا، ΔV اختلاف پتانسیل الکتریکی با واحد ولت، I جریان الکتریکی با واحد آمپر، R مقاومت الکتریکی با واحد اهم، A سطح مقطع نمونه با واحد متر مربع و ρ مقاومت ویژه الکتریکی با واحد اهم متر است.

برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، از دستگاه ساخته شده در دانشگاه یزد استفاده شد (شکل ۵). برای تغذیه این دستگاه از دو باتری خشک ۱۲ ولت، ۷ آمپر ساعت استفاده می‌شود. بیشینه ولتاژ خروجی دستگاه در حالت بدون بار ۴۰۰ ولت است. اندازه‌گیری پتانسیل با پتانسیومتر با مقاومت داخلی ۱۰۰ مگا اهم صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری جریان الکتریکی با دقت ۰/۱ میلی آمپر صورت می‌پذیرد. برای کسب اطمینان از کار دستگاه، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی المان‌های مقاومت با توان زیاد قابل استفاده در آزمایشگاه الکترونیک، در محدوده ۱ اهم تا ۵۰ کیلو اهم صورت گرفت که خطای کمتر از ۵ درصد را نشان داد.



شکل ۵. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در آزمایشگاه (ساخته شده در دانشگاه یزد).

کمتر از ۱۵ درصد) به کار بردند. سرعت موج در ماتریکس ۴۸۰۰ و در آب ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (وانگ و نور، ۱۹۸۹).



شکل ۴. سرعت موج تراکمی بر حسب تخلخل کل در حالت خشک و اشباع برای نمونه‌های بتن ریز و درشت‌دانه. انطباق با رابطه تجربی ریمر و همکاران (۱۹۸۰) برای نمونه‌های اشباع نشان داده شده است.

نمونه‌های غیر اشباع از آب (خشک) انطباق مناسبی با رابطه ریمر و همکاران (۱۹۸۰) آشکار نداشت. تغییرات سرعت موج تراکمی در مقابل تخلخل کل در حالت غیر اشباع ۲۹ درصد است، در صورتی که در حالت اشباع به کمتر از ۶ درصد می‌رسد (شکل ۴).

۴ اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی

برای اجرای آزمایش اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها از استاندارد ASTM D5334-08 (۲۰۰۱) استفاده شد. این آزمایش برای نمونه‌ها در حالت اشباع کامل صورت می‌گیرد. برای اجرای این آزمایش باید دو سر نمونه‌ها کاملاً صاف و صیقلی باشد و اتصال الکترودها به آنها به خوبی صورت گیرد. برای این کار از الکترودهای کربنی انعطاف‌پذیر با چسب رسانا استفاده شد (قربانی و همکاران، ۲۰۰۹). با این الکترودها اتصال در سراسر سطح مقطع نمونه حاصل می‌شود و لذا جریان به‌طور یکنواخت

نمونه‌های ماسه‌سنگ شیلی با محتوی رُس کمتر از ۱۵ درصد به کار بردند. این نتایج نشان می‌دهد که ایجاد درزه (ناپیوستگی) با ضریب اصطکاک بسیار کوچک (وجود یونولیت، طلق نازک و کاغذ برای ایجاد درزه) در نمونه‌ها، شبیه وجود آب در منافذ سنگ بدون درزه عمل می‌کند.

در مورد نمونه‌های با میزان منافذ مصنوعی و درزه‌داری برابر، سرعت موج در حالت اشباع، نسبت به حالت خشک بزرگ‌تر است. تغییرات سرعت موج تراکمی با افزایش درزه‌داری در نمونه‌های خشک بیشتر از نمونه‌های اشباع است. به عبارت دیگر با افزایش درزه‌داری، تاثیر اشباع شاره پُرکننده منافذ زیادتر می‌شود. به هر حال لازم است تا بررسی‌های بیشتری با اندازه‌گیری سرعت موج کشسان بُرشی که انتشار موج کشسان در اسکلت جامد نمونه را نشان می‌دهد، صورت گیرد.

تغییرات سرعت موج تراکمی در دو حالت ریزدانه و درشت‌دانه، در حالتی که تخلخل حاصل از منافذ مصنوعی و درزه‌ها ثابت بماند، تقریباً شبیه یکدیگر است (شکل ۴). جرم و حجم نمونه‌های ریز و درشت‌دانه برابر (جدول‌های ۱، ۲ و ۴)، و در نتیجه چگالی آنها نیز برابر است.

شکل ۶-الف، رابطه لگاریتمی مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل و شکل ۶-ب، رابطه خطی برازش شده بر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و نسبت حجم درزه به حجم منافذ را نشان می‌دهد. در هر دو حالت، ضریب همبستگی بهتر از ۰/۹۵ درصد است. با قرار گرفتن ناپیوستگی‌هایی که از نظر الکتریکی مقاومت زیادی دارند، در مسیر جریان الکتریکی، مقاومت ویژه الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه آب در ناپیوستگی‌های مصنوعی جایگزین نمی‌شود، افزایش مقاومت ویژه الکتریکی با افزایش ناپیوستگی‌ها اتفاق می‌افتد.

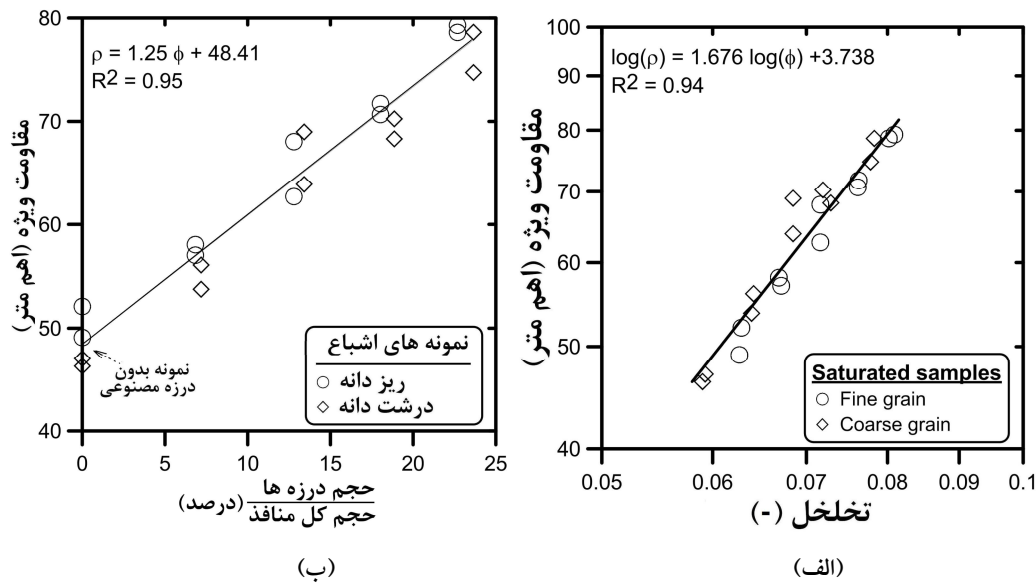
در صورتی که هر نمونه بتن را از نظر فضاهای خالی شامل دو فاز بدانیم:

با توجه به نوع ناپیوستگی‌های مصنوعی استفاده شده در نمونه‌های اشباع، آب در ناپیوستگی‌های مصنوعی جایگزین نمی‌شود. در این حالت اگر نمودار مقاومت ویژه الکتریکی را برحسب تخلخل رسم کنیم، نمودار، روندی صعودی دارد؛ یعنی با افزایش میزان ناپیوستگی‌ها و تخلخل، مقاومت ویژه الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. درحالی‌که براساس قانون آرچی، در حالت اشباع با افزایش تخلخل، مقاومت ویژه الکتریکی کاهش می‌یابد (آرچی، ۱۹۴۲). شکل ۶-الف رابطه مقاومت ویژه الکتریکی را برحسب تخلخل کل و شکل ۶-ب مقاومت ویژه الکتریکی را برحسب نسبت حجم درزه‌ها (منافذ مصنوعی) به حجم کل منافذ (منافذ مصنوعی و طبیعی) برای نمونه‌های ریز و درشت‌دانه نشان می‌دهد. تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به درصد تخلخل و نیز نسبت به حجم درزه‌ها به حجم کل منافذ، رابطه خطی با ضریب همبستگی بالایی را نشان می‌دهد. (شکل ۶-الف و ۶-ب).

۵ بحث

در این مقاله از نمونه‌های استوانه‌ای بتنی به منظور بررسی خواص فیزیکی سنگ‌های درزه‌دار استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش میزان تخلخل کل (تخلخل حاصل از درزه‌ها، منافذ مصنوعی و منافذ طبیعی بین‌دانه‌ای)، سرعت موج کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تخلخل بین دانه‌ای برای هر نوع از نمونه‌ها (ریز و یا درشت‌دانه) ثابت است، افزایش تخلخل کل نتیجه افزایش تعداد درزه‌ها و منافذ مصنوعی است. به عبارت دیگر با افزایش درزه‌ها (ناپیوستگی) و منافذ مصنوعی، تخلخل کل در نمونه‌ها افزایش، و سرعت موج کاهش می‌یابد.

نمونه‌های اشباع به‌خوبی از مدل تجربی ریمر و همکاران (۱۹۸۰) تبعیت می‌کنند. ریمر و همکاران این مدل را برای



شکل ۶. الف) مقاومت ویژه الکتریکی برحسب تخلخل کل (حاصل از درزه‌ها و منافذ بین دانه‌ای) و ب) مقاومت ویژه الکتریکی برحسب نسبت حجم درزه‌ها به حجم کل منافذ نمونه‌های استوانه‌ای بتن ریز و درشت‌دانه در حالت اشباع.

که ρ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه بتن، ρ_w مقاومت ویژه الکتریکی آب پُرکننده منافذ، ϕ تخلخل، m ضریب سیمان‌شدگی (وابسته به شکل منافذ و تراکم ذرات) و بین $1/3$ برای ماسه تحکیم نیافته و $2/2$ برای سنگ آهک سیمانی شده تغییر می‌کند. S اشباع نمونه و n توان اشباع است که حدود ۲ برای اکثریت سنگ‌ها با تخلخل بین $0/2$ تا ۱ است. معمولاً تغییرات توان اشباع برابر $n=2 \pm 0/5$ است (تیاب و دونالدسون، ۲۰۱۱). معمولاً ضریب سیمان‌شدگی با کاهش ارتباط شبکه منافذ افزایش می‌یابد (گلوور و همکاران، ۱۹۹۷).

اگر ρ_2 مقاومت ویژه الکتریکی نمونه با درزه‌های بیشتر نسبت به ρ_1 باشد. در این حالت می‌توان نوشت:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\rho_w \phi_2^{-m_2} S_2^{-n_2}}{\rho_w \phi_1^{-m_1} S_1^{-n_1}} \quad (6)$$

مقاومت ویژه الکتریکی آب منفذی در دو حالت برابر است؛ همچنین حجم فضاهای پُر شده با آب و حجم کل نمونه در هر دو حالت ثابت می‌ماند. اگر فرض کنیم که

- فاز ۱ شامل محیط دانه‌ای با فضاهای خالی پُر شده از آب و
 - فاز ۲ شامل درزه‌های ترنشو،
 تخلخل فاز ۱ برای همه نمونه‌های از یک نوع (ریز و یا درشت‌دانه) برابر، و در نتیجه مقاومت ویژه الکتریکی همه نمونه‌های از یک نوع نیز برابر است (برای مثال مطابق شکل ۶-ب، مقاومت ویژه الکتریکی تقریباً برابر $48/5$ اهم‌متر). درزه‌های ترنشو و یا تخلخل فاز ۲، عامل اصلی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی است. نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی نشان می‌دهد که افزایش چگالی درزه‌داری درزه‌های ترنشو باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی شده است و رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی زیاد (۰/۹۷ درصد) نیز نشان می‌دهد.

معادله آرچی (۱۹۴۲) را برای نمونه‌های بتن (محیط دانه‌ای) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho = \rho_w \phi^{-m} S^{-n}, \quad (5)$$

منابع

قربانی، ا.، قاری، ح. ع. و نمیرانیان، ا.، ۱۳۹۱، پایش مقاومت ویژه الکتریکی سنگ حین آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در آزمایشگاه: مجله ژئوفیزیک ایران، ۶(۱)، ۳۴-۴۱.

Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers/Petroleum Division, 146, 54-62.

ASTM, 1978, Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks: Annual Book of ASTM Standards, Part 19, D 2845-69, 356-363.

ASTM, 2001, Standard test method for determination of electrical conductivity of soil and rock: Annual Book of ASTM Standards, Part 23, D 5334-08, 253-267.

Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985, Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks: Geophysics, 50, 571-581.

Dong, X. Q., Bai, X. H., Lv, Y. K., 2011, The relationship between porosity and electrical resistivity in cemented soil polluted by vitriol: International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), 874 - 876.

Ghorbani, A., Cosenza, P., 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. Applied Clay Science, 43(3e4), 493-502.

Glover, P. W. J., Gomez, J. B., Meredith, P. G., 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.

Griffiths, D. H., 1976, Application of electrical resistivity measurements for the determination of porosity and permeability in sand-stones: Geoprospection, 14, 207-213.

Han, D., Nur, A., and Miran, D., 1986, Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: Geophysics, 51, 2093-2107.

ضریب سیمان‌شدگی و توان اشباع آب در هر دو حالت ثابت بماند ($m_2=m_1=m$ و $n_2=n_1=n$)، پس از جایگزینی تخلخل (ϕ) با نسبت حجم فضاهای خالی (V_v) به حجم کل نمونه (V_t) و اشباع آب منافذ (S) با نسبت حجم فضاهای پُر شده با آب (V_w) به حجم فضاهای خالی (V_v)، معادله (۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{V_{V2}}{V_{V1}} \right)^{-m+n} = \left(\frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^{-m+n} \quad (7)$$

از رابطه لگاریتمی، بهترین انطباق در شکل ۵-الف، و معادله (۷) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که $-m+n = 1/676$. این رابطه نشان می‌دهد که ضریب سیمان‌شدگی آرچی برای نمونه‌های بتن، کوچک است.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله از نمونه‌های استوانه‌ای بتنی که درزه‌های مصنوعی با ضریب اصطکاک کم در آنها ایجاد شده بود، به منظور بررسی خواص فیزیکی سنگ‌های درزه‌دار استفاده شد. اندازه‌گیری موج کشسان تراکمی و مقاومت ویژه الکتریکی روی همه نمونه‌ها صورت پذیرفت.

اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی نشان داد که با توجه به رابطه ریمر و همکاران، رفتار درزه (ناپیوستگی) با ضریب اصطکاک کم (وجود یونولیت، طلق نازک و کاغذ برای ایجاد درزه) در نمونه‌ها، شبیه وجود آب در منافذ نمونه بدون درزه است. آهنگ کاهش سرعت موج تراکمی با افزایش چگالی درزه‌داری در نمونه‌های خشک بیشتر از نمونه‌های اشباع است.

افزایش چگالی درزه‌داری (درزه‌های ترنشو: درزه‌های پُر شده با یونولیت، طلق نازک و کاغذ) در نمونه‌های اشباع باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی با رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ درصد می‌شود.

- Tucker, M. E., 2001, Sedimentary petrology an introduction, 3rd edition: Blackwell Science Publications.
- Tureson, A., 2006, Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity: *Journal of Applied Geophysics*, **58**, 99-111.
- Vernik, L., and Nur, A., 1992, Petro physical classification of siliclastics for lithology and porosity prediction from seismic velocities: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, **76**, 1295-1309.
- Wang, Z., and Nur, A., 1989, Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks, volume 2: theoretical and model studies. Edited by Levin, F. K., Society of Exploration Geophysists.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: *Geophysics*, **21**, (1), 41-70.
- Yang, C. C., and Chiang, C. T., 2005, On the relationship between pore structure and charge passed from RCPT in mineral-free cement-based materials: *Materials Chemistry and Physics*, **93**, 202-207.
- ISRM, 1981, Rock characterization testing and monitoring, In: Brown E. T. (ed) Pergamon press, Oxford, 211pp.
- Krief, M., Garta, J., Stellingwerf, J., and Venture, J., 1990, A petro physical interpretation using the velocities of P and S waves: *The Log Analysis*, **31**, 355-369.
- Marion, D., and Jizba, D., 1996, Sonic velocity in carbonate sediments and rocks, *Carbonate Seismology: SEG Geophysical Developments Series*, **6**, 75-92.
- Raymer, L. I., Hunt, E. R., and Gardner, J. S., 1980, An improved sonic transit time to porosity transform: paper p, in 21st Annual logging symposium transactions, Society of Professional Well log Analysis, 12.
- Tiab, D., and Donaldson, E. C., 2011, *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, 3rd Edition, Gulf Professional Publishing, 976 p.
- Tosaya, C., and Nur, A., 1982, Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks: *Geophysical Research Letters*, **9**(1), 5-8.