

بررسی رفتار مکانیکی و دینامیکی دو نوع سنگ رسوبی آواری در آزمون سه محوره خودکنترل با

توجه به بافت و ساخت آنها

مجتبی حیدری^۱، رسول اجل لوثیان^{۲*}، اکبر قاضی فرد^۳، محمود هاشمی اصفهانیان^۴

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۱۰ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۴/۲۶

چکیده

تعیین پارامترهای مکانیکی و دینامیکی سنگ‌ها در شرایط متفاوت محیط آزمایشگاهی، دستگاهی و نمونه سنگ مورد آزمون صورت می‌گیرد. آزمون سه‌محوری یکی از آزمایش‌های مفید برای بررسی رفتار مکانیکی سنگ‌ها طی بارگذاری می‌باشد که اگر با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته‌ی خودکنترل انجام گیرد، پارامترهای مهمی چون مقاومت مکانیکی، مدول تغییر شکل‌پذیری و تغییرات سرعت عبور موج حین بارگذاری را به طور پیوسته می‌توان تعیین نمود. در این تحقیق ابتدا برخی ویژگی‌های فیزیکی و زمین‌شناسی دو نوع سنگ رسوبی آواری (ماسه‌سنگ و توف) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس پارامترهای مکانیکی و دینامیکی آنها حین انجام آزمون سه محوره خودکنترل در شرایط مختلف فشار جانبی و محوری اعمال شده، بررسی می‌گردد. مقادیر پارامترهایی مانند مدول تغییر شکل‌پذیری، نسبت پواسون و سرعت عبور موج طولی و عرضی که معمولاً ثابت اعلام می‌گردد، با افزایش فشار محوری و جانبی در طول این آزمون تغییر می‌کند، زیرا رفتار نمونه حین آزمون از حالت الاستیک به پلاستیک تغییر پیدا می‌کند. بنابراین ارائه یک مقدار ثابت برای یک پارامتر نمی‌تواند منطقی باشد و باید شرایط تعیین آن را نیز در کنار عدد اعلام شده، مشخص نمود. نتایج آزمون سه محوری این تحقیق که به روش پلکانی ISRM انجام شده است، نشان می‌دهد مقادیر مقاومت، مدول تغییر شکل‌پذیری، نسبت پواسون و سرعت عبور موج طولی و عرضی برای نمونه ماسه سنگی بیشتر از نمونه آذرآواری می‌باشد که دلیل این تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و ساخت و بافت این دو نوع سنگ است. بازه‌ی تغییرات این پارامترها در دو نمونه سنگ مورد آزمون هم با یکدیگر متفاوت است.

کلید واژه‌ها: آزمون سه محوره خودکنترل، سنگ رسوبی آواری، مقاومت مکانیکی، تغییر شکل‌پذیری، سرعت عبور موج.

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲- عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، ajalloian@gmail.com

۳- عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان

۴- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

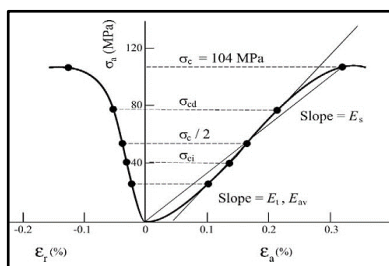
کنترل، بارگذاری به صورت مرحله‌ای، متوقف کردن اعمال بار اضافی در زمان مورد نظر، انجام آزمون‌های جانبی حین بارگذاری (مانند آزمون ارسال و دریافت امواج اولتراسونیک) و ... را دارد.

برای تعیین ثابت‌های الاستیک سنگ، به رفتار تقریباً خطی کرنش نمونه سنگی در برابر تنش دقت می‌شود. مدول یانگ (Young's modulus) طبق تعریف نسبت تنش به کرنش است که در طول زمان بارگذاری متفاوت است و برای مواد به صورت یکسان اندازه‌گیری نمی‌شود (Brady and Brown, 2006 و Maákowski, 2017). می‌توان این ضریب را به روش‌های مختلف اندازه‌گیری کرد که معمول‌ترین آنها موارد زیر می‌باشد (شکل ۱):

الف) مدول یانگ مماسی (E_t) که از شیب منحنی تنش - کرنش در درصد مشخصی از مقاومت نهایی (σ_c) که معمولاً برابر ۵۰ درصد است، بدست می‌آید. برای نمونه‌ی آزمون در شکل ۱، مقدار E_t برابر ۵۱ گیگاپاسکال می‌باشد.

ب) مدول یانگ میانگین (E_{av}) که متوسط شیب تقریباً مستقیم خط در منحنی تنش - کرنش (رفتار الاستیک) است و برای نمونه شکل ۱ برابر ۵۱ گیگاپاسکال می‌باشد. معمولاً محدوده‌ای که رفتار جسم الاستیک است، برای سنگ‌ها و آزمون‌های متفاوت یکسان نیست.

ج) مدول یانگ متقاطع یا وتری (E_s) که از شیب خط متصل‌کننده‌ی مبدأ مختصات نمودار تنش - کرنش به نقطه‌ای مشخص از مقاومت نهایی سنگ (اغلب ۵۰ درصد مقاومت نهایی) در منحنی ترسیم شده بدست می‌آید. در شکل ۱ مدول متقاطع در مقاومت نهایی برابر ۳۲/۱ گیگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۱. حالت‌های مختلف تعیین مدول یانگ (Brady and

(Brown, 2006)

برای بررسی و ارزیابی سنگ‌ها که مبنای تصمیم‌گیری‌ها و طراحی‌های بزرگ عمرانی است، پارامترهای زیادی می‌تواند مورد نظر قرار گیرد. این موارد برخی به صورت کیفی و برخی به صورت کمی ارائه می‌شود. عوامل زیادی در تعیین پارامترهای یک سنگ نقش دارند که می‌تواند شامل جنس، یکنواختی و همسانگردی نمونه سنگ مورد آزمون، نوع، روش و شرایط محیطی انجام آزمون، تجربه و تخصص شخص انجام دهنده آزمون و نیز کیفیت انجام آزمون می‌گردد. آزمایش‌های زیادی برای تعیین خواص مکانیکی سنگ وجود دارد که با وجود دارا بودن مزایای خاص، دارای مشکلات و معایبی نیز هستند. در این خصوص می‌توان آزمایش‌هایی نظیر مقاومت تراکمی تک محوره، بارگذاری نقطه‌ای و کشش غیر مستقیم (آزمایش برزیلی) را نام برد که هرکدام برخی از پارامترهای مقاومتی مانند مقاومت نهایی تک محوره، مقاومت کششی و ... را تعیین می‌کنند. اما به جرأت می‌توان آزمایش سه محوره را از تمامی آزمایش‌های اشاره شده کامل‌تر و متناسب‌تر با شرایط واقعی سنگ در طبیعت دانست که مقاومت فشاری و برشی نمونه سنگ را ارائه می‌کند (Hudson, 1993, Franklin, 1970 و Hashemi, 1999). اگر چه این آزمون برخی پارامترها مانند مقاومت کششی سنگ را تعیین نمی‌کند.

آزمون سه محوره با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته‌ی خود کنترل می‌تواند پارامترهای سنگ را در شرایط مختلف در حین یک آزمون تعیین نماید. هنگامی که نمونه‌ای سنگی تحت شرایط تنش مشخصی در آزمایشگاه قرار می‌گیرد، نمودار تنش - کرنش آن می‌تواند رفتارهای خطی یا غیر خطی را نشان دهد (Arora, 1987 و Zhaolin, 2018). امروزه دقت تمامی این آزمایش‌های به کمک ابزارهای دیجیتال افزایش یافته و علاوه بر این، در صورت کالیبره بودن این ابزارها، امکان خطا در آنان نیز کاهش چشمگیری یافته است (Feng, 2017 و Aydan, 2017). دستگاه سه محوره خودکنترل امکان تغییر در روش بارگذاری به صورت تنش کنترل یا کرنش

نوع و ترکیب کانی‌شناسی سنگ در مقاومت آن تأثیر زیادی دارد، برای مثال با افزایش درصد کوارتز در سنگ، مقاومت آن افزایش می‌یابد (Price, 1958). با افزایش فشار جانبی، مقاومت سنگ نیز افزایش می‌یابد (Jaeger, و Murrel, 1965). نوع رفتار سنگ در مقابل تنش در بسیاری موارد بستگی به مقدار فشار جانبی وارد بر آن دارد. برای بیشتر سنگ‌ها در فشار جانبی کم نوع رفتار معمولاً شکننده و در فشار جانبی بیشتر، رفتار انعطاف‌پذیر می‌شود (Zang, 2005 و Lama, 1978). سرعت انجام آزمایش نیز تأثیر مستقیمی بر پارامترهای مکانیکی سنگ دارد. اگر سرعت بارگذاری کم شود، مدول و مقاومت نهایی سنگ نیز کاهش می‌یابد. با افزایش دما مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته سنگ کاهش و رفتار آن در مرحله‌ی انعطاف‌پذیر طولانی‌تر می‌شود. علاوه بر این، با افزایش ابعاد نمونه معمولاً مقاومت آن کمتر شده (Hoek and Brown, 1980) و با کاهش نسبت طول به قطر آن به کمتر از ۲ برابر، مقاومت آنها افزایش می‌یابد (Wittke, 2014).

جدول ۱ مقادیر مقاومت نهایی، مدول یانگ و نسبت پواسون برخی سنگ‌های رسوبی مشابه با نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق که از آزمایش‌های مکانیکی بدست آمده است، نشان می‌دهد. باید اشاره نمود که معمولاً اعداد ارائه شده در منابع مختلف برای یک جنس سنگ با یکدیگر اختلاف زیادی دارند که دلیل آن متفاوت بودن شرایط زمین‌شناسی آن دو نمونه از نظر ترکیب شیمیایی، محیط تشکیل، کانی‌های تشکیل دهنده، شرایط فشار، دما و هوازدگی بعد از تشکیل آن و نهایتاً روش و جزئیات انجام آزمون بر روی آن دارد. شکل ۲ مقادیر بازه‌ی تغییرات نسبت پواسون برخی سنگ‌ها را نشان می‌دهد. طبق نظر گرسک (Gercek, 2007) بازه‌ی تغییرات نسبت پواسون در رفتار الاستیک برای سنگ‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۴۵ می‌باشد که معمولاً در محدوده‌ی ۰/۲ تا ۰/۳ قرار می‌گیرد.

پارامتر مهم دیگر، نسبت پواسون (ν) (Poisson's ratio) است که از نسبت کرنش جانبی (ϵ_x) به کرنش طولی (ϵ_z) و یا طبق رابطه (۱) بدست می‌آید (Brady and Brown, 2006).

$$\nu = - \frac{(\sigma_a / \epsilon_a)}{(\sigma_a / \epsilon_r)} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق $\Delta\sigma_a$ تغییرات تنش محوری، $\Delta\epsilon_a$ تغییرات کرنش محوری و $\Delta\epsilon_r$ تغییرات کرنش شعاعی نمونه است. نسبت پواسون معمولاً در محدوده‌ای که رفتار سنگ الاستیک است، تعیین می‌شود و اگر مقدار نسبت پواسون در طول یک آزمون به صورت پیوسته محاسبه شود، مقادیر یکسانی را نشان نمی‌دهد. این موضوع گویای تغییر رفتار مکانیکی سنگ در طول آزمون است. برای نمودار نشان داده در شکل ۱ در نقاط اندازه‌گیری شده برای E_t ، E_{av} و E_s ، مقادیر تقریبی نسبت پواسون به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۳۱ و ۰/۴۰ بدست می‌آید. ژیانگ تائو و همکاران (Xiangtao et al., 2014) پیشنهاد می‌کنند که نسبت پواسون سنگ در مرحله الاستیک را می‌توان از قانون هوک (Hooke's law) طبق رابطه (۲) بدست آورد. بر این اساس می‌توان رابطه (۳) را ارائه نمود که نشان می‌دهد اگر مدول الاستیک سنگ (E) مشخص باشد، نسبت پواسون را می‌توان از طریق پارامترهای تنش محوری (σ_1)، تنش جانبی (σ_3) و کرنش محوری (ϵ_1) بدست آورد. این روش به دلیل آن که نیاز به اندازه‌گیری کرنش محاطی نمونه سنگ ندارد، متداول و عملی است.

$$E\epsilon_1 = \sigma_1 - 2\nu\sigma_3 \quad (2)$$

$$\nu = \frac{d\sigma_1 - E d\epsilon_1}{2d\sigma_3} = \frac{d\sigma_1}{2d\sigma_3} - \frac{E}{2} \times \frac{d\epsilon_1}{d\sigma_3} \quad (3)$$

قابل ذکر است که در صورت امکان باید کرنش محاطی نیز اندازه‌گیری شود. طبق نظر آیدان و همکاران (Aydan et al., 2011) اگر نسبت پواسون سنگ مشخص نباشد، معقول است که نسبت پواسون برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شود.

جدول ۱. مقادیر مقاومت نهایی، مدول یانگ و نسبت پواسون برخی سنگ‌ها

Reference	Test type	Poisson's ratio	Young's modulus (GPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Rock type
Kulhawy, 1975	Uniaxial	0.0 – 0.73*	4.6 - 90	22.8 – 116.4	Clastic sedimentary rock
Goodman, R.E., 1989	Uniaxial	0.11 – 0.46	19.1 – 39.2	72.4 – 214	Sandstone
Rahn P. H., 1996	Uniaxial	-	10.52 - 21.37	38.9 – 107	Sandstone
Xu H. et al, 2016	Triaxial (σ ₃ =32Mpa)	0.086 – 0.487	17.7 – 58.5	111 – 273.13	Sandstone
Xu H. et al, 2016	Triaxial (σ ₃ =32Mpa)	0.238 – 0.438	17.41 – 34.86	73.94 – 128.38	Mudstone
Ozsan & Akin, 2002	Uniaxial	0.21	11.6	17 – 33	Tuff
Villaseñor, 2010	Uniaxial and Triaxial	0.11 – 0.23	0.7 – 2	5.7 – 16.3	Tuff
Aydan, 2017	Uniaxial and Triaxial	0.25 0.3	0.9 – 3	5.72 – 24.80	Tuff

* در حالت اتساع نمونه و نه شرایط الاستیک اندازه‌گیری شده است.

اولتراسونیک از درون نمونه‌ی سنگ را حین باربرداری فراهم می‌کنند. امواج اولتراسونیک مورد استفاده معمولاً شامل امواج طولی (P) و عرضی (S) می‌شود که از طریق آنها برخی از پارامترهای دینامیکی سنگ تعیین شده و امکان انطباق این نتایج با ویژگی‌های سنگ از جمله تخلخل، مدول تغییر شکل‌پذیری و مقاومت نیز وجود دارد (Barton, 2007). سرعت عبور موج P (V_P) در سنگ‌های آواری معمولاً در بازه‌ی ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه و سرعت موج S (V_S) در سنگ‌های سخت حدود $\frac{V_P}{\sqrt{3}}$ می‌باشد (Barton, 2007). برای تعیین نسبت پواسون دینامیک (ν_d) از رابطه (۴) استفاده می‌شود (Hudson, 1993):

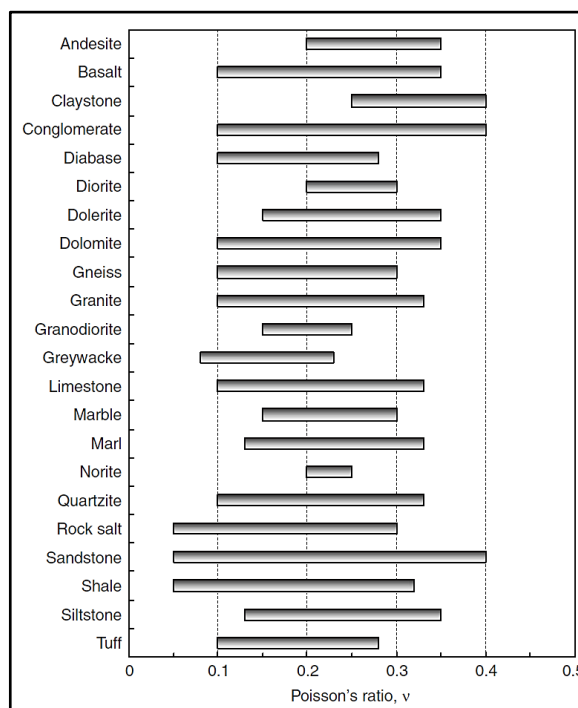
$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4)$$

پس از تعیین نسبت پواسون دینامیک، مدول الاستیسیته دینامیک از رابطه (۵) بدست می‌آید (Barton, 2007):

$$E_d = \rho \cdot V_p^2 \frac{(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}{1-\nu_d} \quad (5)$$

که در رابطه فوق، ρ دانسیته نمونه است.

هنگامی که موج صوتی از محیط متخلخل عبور می‌کند، تغییر شکل ذرات به صورت الاستیک (برگشت‌پذیر) خواهد بود. در آزمایشات ژئوتکنیکی کرنش بیشتر و تغییرشکل از نوع



شکل ۲. بازه‌ی تغییرات نسبت پواسون در برخی سنگ‌ها (Gercek, 2007)

علاوه بر تعیین تغییرشکل‌پذیری و مقاومت سنگ‌ها به روش استاتیکی، تخمین این پارامترها از روش‌های دیگری مانند استفاده از امواج اولتراسونیک (روش دینامیکی) نیز بسیار مهم است، چون این روش غیرمخرب بوده و امکان تجدیدپذیری دارد (جوادیان، ۱۳۹۵، Yasar et al., 2004 و Barton, 2007). بعضی از دستگاه‌های سه محوره‌ی جدید امکان عبور امواج

مدول یانگ در حدود ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند. نویسندگان این تغییر را به افزایش میزان آسیب به نمونه به دلیل ترک خوردن همراه با افزایش تنش در هر چرخه نسبت داده‌اند. آنها همچنین ثابت کردند که چرخه‌ی تنش - کرنش ابزاری مفید برای توصیف رابطه‌ی بین ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی سنگ‌ها است.

در این مقاله ابتدا به بررسی خصوصیات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی دو نمونه سنگ پرداخته می‌شود و سپس ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی آنها در آزمون سه محوره‌ی خودکنترل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که هدف آن بررسی تغییرات این ویژگی‌ها با توجه به جنس و شرایط فشار محوری و جانبی وارد بر نمونه می‌باشد.

۲. روش انجام تحقیق

در این تحقیق ابتدا ویژگی‌های زمین‌شناسی دو نوع سنگ رسوبی آواری (تخریبی) که گسترش زیادی در سطح زمین در کشور ایران دارند و در نتیجه بیشترین ارتباط را با پروژه‌های عمرانی دارند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این رو دو نمونه از این نوع سنگ که یکی ماسه سنگ و دیگری آذرآواری (توف) است، برای این تحقیق انتخاب شده است.

بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی دو نمونه سنگ شامل بررسی نمونه دستی، مقاطع نازک میکروسکوپی و آزمون‌های شناسایی درصد و ترکیب شیمیایی مواد با اشعه ایکس می‌باشد. پس از این بررسی‌ها، خواص مکانیکی و دینامیکی نمونه‌ها تحت آزمون سه محوری مشابه با روش پلکانی نوع دوم استاندارد ISRM یعنی به صورت چند مرحله‌ای با فشارهای جانبی مختلف قرار گرفت و پارامترهای مورد نظر به طور پیوسته اندازه‌گیری گردید که نتایج حاصل نشان می‌داد برخی پارامترهای مهندسی سنگ در حین انجام آزمون تغییر می‌کند. تعیین پارامترهای مورد نظر و یا محدوده‌ی مناسب تغییرات آنها در طراحی سازه‌های بزرگ اهمیت زیادی دارد. مقدار تغییرات علاوه بر جزئیات انجام آزمون، به ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ یعنی ساخت و بافت آن نیز ارتباط دارد که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

غیر الاستیک در نمونه اتفاق می‌افتد (Casper et al., 2004). میزان مدول‌های الاستیسیته استاتیک و دینامیک در یک سنگ متفاوت است که اختلاف بین آنها ناشی از تفاوت شرایط تنش - کرنش مرتبط با حضور شکستگی‌ها، ترک‌ها، حفرات و صفحات ضعف است. ال شیعی (Al-Shayea, 2004) نسبت مدول دینامیک به مدول استاتیک را برای آهک از ۰/۸۵ تا ۱/۸۶ متغیر ذکر کرده است. در عوض، سیکوتی و مولارگیا (Cicotti and Mulargia, 2004) در همان جنس سنگ این میزان را از ۱ تا ۱/۲۳ اعلام کرده‌اند. اختلاف‌های بیشتر بین این دو مدول هم در سنگ‌های نیز دیگر اعلام شده است. روابط زیادی بین مدول استاتیک (E_{st}) و دینامیک (E_{dyn}) در انواع سنگ‌ها ارائه شده است (جدول ۲). روابط ارائه شده بر اساس تغییرات تنش به کرنش برای محاسبه مدول استاتیکی و تعیین مدول دینامیکی از طریق سرعت عبور موج طولی و عرضی و میرایی مخصوص (α_s) می‌باشد.

جدول ۲. روابط ارائه شده برای رابطه‌ی بین مدول یانگ

استاتیک و دینامیک برخی سنگ‌ها

Reference	Formula	Rock Type
King, 1983	$E_{st} = 1.26 E_{dyn} - 29.5$	Igneos - Metamorphic
Eissa and Kazi, 1988	$E_{st} = 0.74 E_{dyn} - 0.82$	All types
Lacy, 1997	$E_{st} = 0.018 E_{dyn}^2 + 0.422 E_{dyn}$	Sedimentary
Horsrud, 2001	$E_{st} = 0.076 V_p^{3.23}$	Shale
Martinez - Martinez et al., 2012	$E_{st} = \frac{E_{dyn}}{3.8 \alpha_s^{-0.68}}$	Limestone - Marble
Brotons et al., 2014	$E_{st} = 0.867 E_{dyn} - 2.085$	Calc Arenite
Najibi et al., 2015	$E_{st} = 0.014 E_{dyn}^{1.96}$	Limestone

با بررسی تأثیر چرخه‌های تنش بر مدول استاتیک و دینامیک، هیپ و فالکنر (Heap and Faulkner, 2008) و هیپ و همکاران (Heap et al., 2009) نشان دادند که مدول یانگ استاتیک حین چرخه‌های کوچک بارگذاری مشابه با مدول یانگ دینامیک اندازه‌گیری شده در راستای تنش است. در تمامی موارد (نمونه‌های خشک و مرطوب) که تنش حداکثر در چرخه‌های متوالی افزایش می‌یافت، مشاهده می‌شد که

۱-۲- روش شناسایی سنگ

برای بررسی سنگ‌شناسی (ساخت و بافت)، علاوه بر تعیین وضعیت زمین‌شناسی محل برداشت نمونه سنگ، شرایط آن در نمونه دستی نیز باید به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. برای شناسایی و بررسی کانی‌های موجود در سنگ و نیز اندازه‌ی ذرات و شرایط رسوبگذاری آنها، معمولاً بررسی مقطع نازک سنگ در دو راستای موازی لایه‌بندی و عمود بر انجام می‌گیرد تا در نهایت بتوان بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته از تصاویر مقاطع زیر میکروسکوپ پلاریزان، نام دقیق سنگ را از دید طبقه‌بندی‌های رایج سنگ‌شناسی و چگونگی تشکیل آن در یک حوضه‌ی رسوبی را تعیین کرد.

هدف از تهیه مقطع نازک سنگ در راستای موازی لایه‌بندی، بررسی توزیع دانه‌ها بر اساس اندازه‌ی ذرات آنها، گردشگری دانه‌ها، کشیدگی و درصد دانه‌ها نسبت به ماده زمینه سنگ (ماتریکس) است. هدف از تهیه مقطع نازک سنگ در راستای عمود بر لایه‌بندی، بررسی توزیع دانه‌ها در یک توالی رسوبگذاری متوالی است.

می‌توان برای شناسایی ترکیب شیمیایی سنگ، از آزمون فلورسانس اشعه ایکس (XRF) استفاده کرد که قابلیت تعیین درصد کمی عناصر موجود در سنگ را دارد. همچنین کانی‌های موجود در سنگ از طریق آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) نیز شناسایی می‌شوند. یکی از مزایای شناسایی کانی‌های سنگ با استفاده از آزمون XRD، تعیین درصد نیمه کمی کانی‌ها است که بر اساس نرم‌افزارهای تخصصی مربوطه مانند Eva انجام می‌گیرد. در روش نیمه کمی تعیین درصد کانی‌ها، بر اساس زاویه و شدت پیک‌های شناسایی شده، نوع کانی تشخیص داده می‌شود و اگر تنها یک کانی در نمونه باشد، مقدار ۱۰۰ درصد برای آن منظور می‌شود و چنانچه بیش از یک کانی در نمونه وجود داشته باشد، با نرم افزارهای مربوطه و با توجه به تغییرات لازم برای نرمالایز کردن (متعادل سازی) پیک کانی، درصد هر کدام از آنها بر اساس نسبت تخصیص داده شده برای نرمالایز کردن، تعیین می‌شود.

۲-۲- روش انجام آزمون سه محوره

ویژگی‌های مقاومتی سنگ در آزمایش تراکمی سه محوره طبق استانداردهای ISRM، ASTM D2664 و D7012 تعیین می‌شود. نمونه مورد آزمون نیز طبق استانداردهای ASTM D4543 و یا ISRM آماده می‌شود. ثبت داده‌های آزمون طبق استانداردهای مربوطه و یا با دقت بر اساس D6026 صورت می‌گیرد.

آزمایش سه محوره طبق نسخه‌ی تجدید نظر شده‌ی ISRM در سال ۱۹۸۳، معمولاً به ۳ روش انجام می‌شود: نوع اول (آزمایش تک‌تی): در این آزمایش تک نقطه‌ای از مقاومت نهایی در لحظه گسیختگی از هر آزمایش بدست می‌آید و با توجه آنها پوش گسیختگی ترسیم می‌شود. در این روش پس از رسیدن به فشار جانبی مد نظر برای هر نمونه، فشار محوری با نرخ ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه افزایش می‌یابد تا نمونه گسیخته شود.

نوع دوم (آزمایش حالت گسیختگی چند مرحله‌ای): در این حالت پوش گسیختگی به وسیله یک آزمایش و در چند مرحله بدست می‌آید. در این روش بارگذاری جانبی مورد نظر بر روی نمونه اعمال شده و سپس فشار محوری تا نزدیک لحظه‌ی گسیختگی سنگ افزایش می‌یابد و در این زمان فشار جانبی افزایش یافته و مجدداً تا نزدیک لحظه‌ی گسیختگی فشار محوری افزایش می‌یابد و پله بعدی فشار جانبی و فشار محوری نیز به همین صورت ادامه می‌یابد.

نوع سوم (آزمایش حالت گسیختگی پیوسته): در این حالت پوش گسیختگی به وسیله یک آزمایش و در یک مرحله بدست می‌آید. در این روش فشار جانبی همزمان با فشار محوری و با نرخ و نسبتی که بتوان مدول الاستیک پیش‌بینی شده را از آزمون بدست آورد، افزایش می‌یابد.

کرنش‌سنج‌های متداول یا استرین گیج (strain gauge) مورد استفاده در این آزمون قسمتی از تغییر شکل نمونه‌ی سنگ را اندازه‌گیری می‌کنند و نمی‌توانند ویژگی‌های کلی تغییر شکل نمونه را نشان دهند. علاوه بر این، کیفیت و جهت نصب آن بر روی نمونه، تغییر شکل غیریکسان کانی‌های متفاوت و

عمود بر لایه‌بندی مغزه‌گیری شده است و در مشاهده چشمی آن، آثار رگه یا درزه مشاهده نمی‌شود. این نمونه ظاهری همگن و همسانگرد دارد. با این شرایط می‌توان محیط ته‌نشینی و تشکیل اولیه‌ی سنگ را تقریباً محیطی آرام و یکنواخت تصور کرد که رسوب‌گذاری در آن محیط به صورت پیوسته انجام شده است.

شکل ۳ مقطع نازک نمونه سنگ را در دو راستای موازی و عمود بر لایه‌بندی در نور پلاریزه نشان می‌دهد. در تصاویر شکل ۳ مشاهده می‌شود که بیشتر ذرات سنگ از کوارتز و با اندازه‌ای در حدود ۰/۱ میلی‌متر بوده که خاموشی موجی شکل دارند. وجود خرده‌سنگ و نیز کلریت و بیوتیت که تجزیه فلدسپات‌ها بوجود آمده‌اند، نشان دهنده‌ی فرآیند تجزیه در سنگ است. بیشتر دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ به صورت تقریباً جورشده و زاویه‌دار (جورشدگی خوب و گردشگی ضعیف) دیده می‌شوند و طول‌شدگی در آنها اندک است. ماتریکس سنگ (زمینه) زیاد است، یعنی پدیده‌ی شسته‌شدگی کانی‌های رسی در آن اندک بوده است. در زیر میکروسکوپ پلاریزان نمونه سنگ دارای ذراتی در حد ماسه متوسط بوده و بافت آن تقریباً همگن به نظر می‌رسد که این شرایط در دو راستای موازی و عمود بر لایه‌بندی مشاهده می‌شود. بنابراین سنگ را می‌توان تا حدود زیادی همسانگرد نیز در نظر گرفت. نمونه سنگ مورد آزمایش طبق طبقه‌بندی پتی‌جان و همکاران (Pettijohn et al., 1972) با ماسه‌سنگ گری‌وکی فلدسپاتی بیشترین تطابق را دارد. نمودار بدست آمده از آزمون XRD این سنگ در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین بررسی کانی‌شناسی این سنگ با آزمون XRD و تفسیر آنها با نرم‌افزار Eva نشان می‌دهد که به ترتیب کانی‌های کوارتز، آلپیت، مسکویت و کلریت بیشترین فراوانی را در سنگ دارند (جدول ۳).

درصد شیمیایی اکسیدهای موجود در این سنگ با استفاده از آزمون XRF نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

کرنش‌سنج‌های متداول یا استرین گیج (strain gauge) مورد استفاده در این آزمون قسمتی از تغییر شکل نمونه‌ی سنگ را اندازه‌گیری می‌کنند و نمی‌توانند ویژگی‌های کلی تغییر شکل نمونه را نشان دهند. علاوه بر این، کیفیت و جهت نصب آن بر روی نمونه، تغییر شکل غیریکسان کانی‌های متفاوت و عوامل دیگری نیز بر روی دقت اندازه‌گیری آن تأثیر می‌گذارند. بنابراین باید از کرنش‌سنج‌هایی که به دور کل نمونه بسته می‌شوند، استفاده نمود و یا با نصب چندین جابجایی‌سنج یا LVDT (Linear Variable Differential Transducer) در محل‌های مختلف، از آنها متوسط‌گیری شود.

حین انجام آزمون سه محوره می‌توان تغییرات سرعت امواج P و S را نیز بررسی کرد که این کار طبق استاندارد ASTM-D2845 و یا ISRM انجام می‌گیرد.

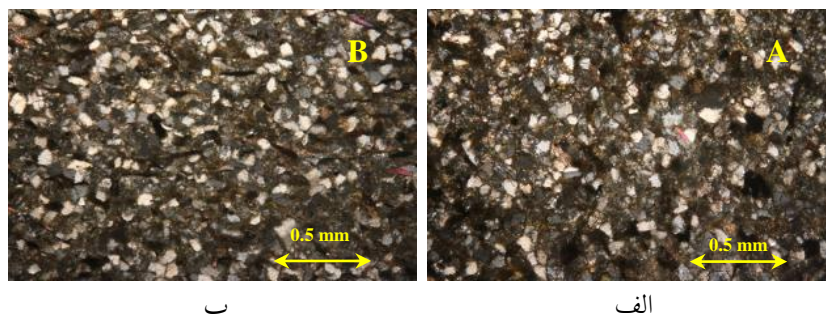
۳. نتایج

۳-۱- بررسی سنگ‌شناسی

در این تحقیق دو نمونه سنگ رسوبی تخریبی مورد بررسی قرار گرفته است که شامل ماسه سنگ و توف می‌باشد. در ادامه نتایج بررسی‌های سنگ‌شناسی این دو نمونه ارائه می‌شود.

۳-۱-۱- نمونه ماسه‌سنگی

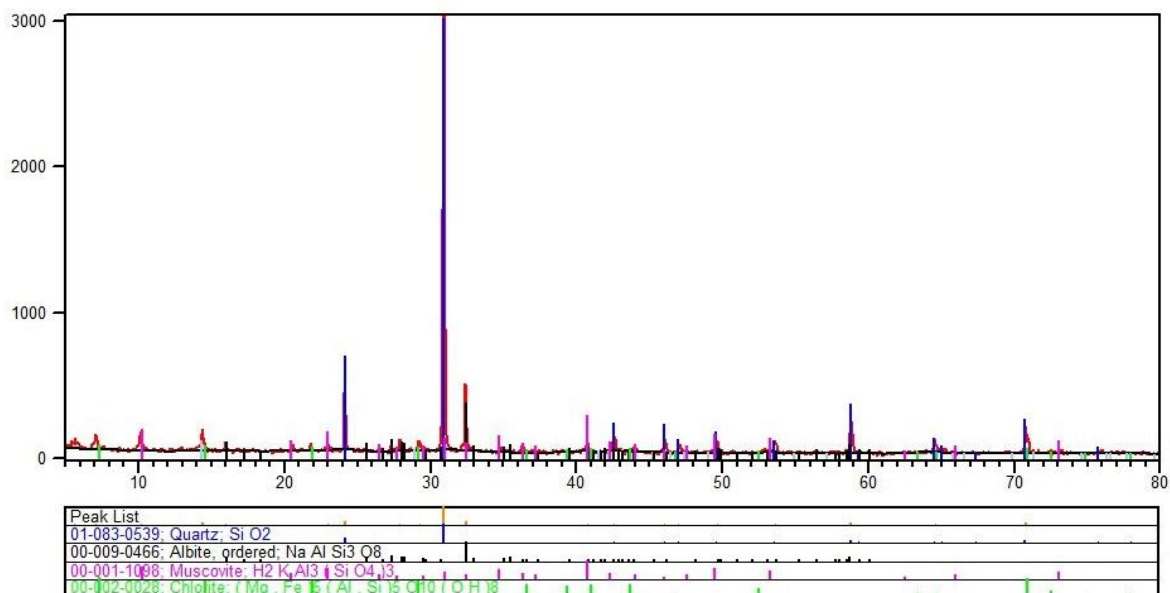
نمونه مورد آزمون از واحدهای شیل و ماسه‌سنگی سبز خاکستری و خاکستری تیره واقع در جنوب شهر اصفهان به سن ژوراسیک (معادل سازند شمشک) برداشت شده است. مختصات برداشت نمونه ماسه سنگ "۴۳° ۴۱' ۵۹" طول شرقی و "۳۴° ۳۵' ۴۱/۵۵" عرض شمالی بوده است و ضخامت لایه‌بندی در محل حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بوده و به دلیل فشارهای تکتونیکی محلی، درزه‌های زیادی در این سنگ‌ها ایجاد شده است. رنگ سنگ در نمونه‌ی هوازده خاکستری رنگ بوده که پس از هوازده‌گی به رنگ قهوه‌ای مشاهده می‌شود. نمونه‌ی استوانه‌ای تهیه شده از این سنگ



شکل ۳. تصویر مقطع نازک نمونه ماسه‌سنگی در نور پلاریزه. (A موازی لایه‌بندی، B عمود بر لایه‌بندی)

که با توجه به مسافت حمل ذرات و سختی دانه‌ها در برابر فرسایش در سنگ‌های رسوبی تخریبی امری عادی می‌باشد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد سنگ مورد آزمون دارای درصد زیادی سیلیس، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن می‌باشد



شکل ۴. نمودار کانی‌های شناسایی شده نمونه ماسه سنگ توسط آزمون XRD

۳-۱-۲- نمونه آذر آواری

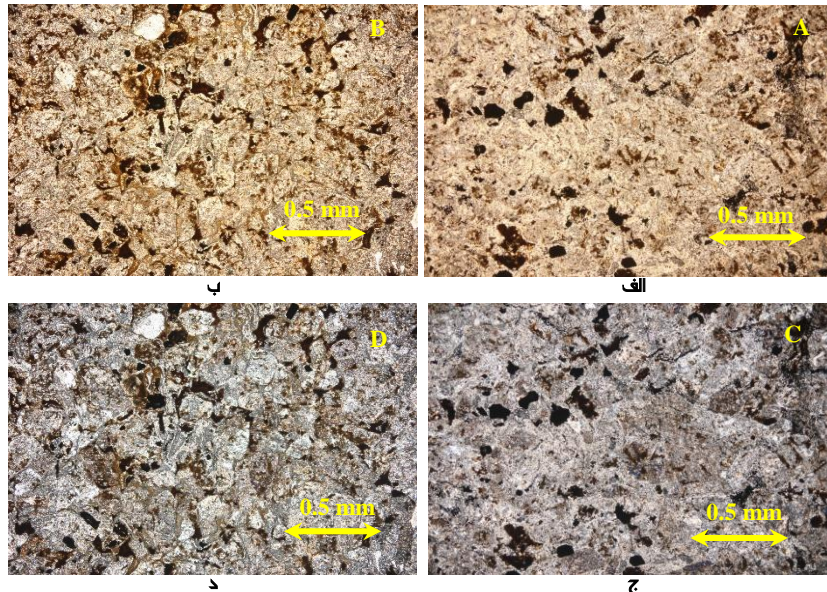
نمونه آذر آواری از ۱ کیلومتری جنوب شرق هستیجان (۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر دلیجان) در استان مرکزی برداشت شده است. سن این واحد سنگی توف ائوسن (ترشیاری) بوده و در این محل انواع مختلف سنگ‌های آذرآواری از نظر رنگ، جنس و اندازه‌ی ذرات مشاهده می‌شوند. نمونه آذرآواری از مختصات "۸/۱۹' ۴۸° طول شرقی و "۳۰/۴۴' ۵۱' ۳۳° عرض شمالی برداشت شده است. نمونه‌ی سنگ مورد بررسی در حالت هوانزده کرم رنگ بوده

جدول ۳. کانی‌های شناسایی شده در نمونه‌ی ماسه‌سنگی توسط آزمون XRD و درصد آنها

Concentration (%)	Formula	Mineral
51.8	SiO ₂	Quartz
27	NaAlSi ₃ O ₈	Albite
14.1	H ₂ KAl ₃ (SiO ₄) ₃	Muscovite
7.1	(Mg,Fe) ₅ (Al,Si) ₅ O ₁₀ (OH) ₈	Chlorite

ذرات مشاهده شده در این سنگ گردشگری متوسطی دارند و اندازه‌ی متوسط ذرات آنها ۰/۱۵ میلی‌متر است (شکل ۵). به دلیل وجود زمینه‌ی رسی ناشی از هوازگی دانه‌ها در این سنگ و جوش‌خوردگی در بین برخی دانه‌ها، بررسی جوشدگی و نیز گردشگری بیشتر دانه‌ها به سختی قابل انجام است.

که سطح هوازده آن متمایل به قهوه‌ای رنگ می‌باشد. نمونه‌ی استوانه‌ای تهیه شده از این سنگ نیز عمود بر لایه‌بندی مغزه‌گیری شده است و در مشاهده چشمی آن، آثار رگه یا درزه مشاهده نمی‌شود. وضعیت لایه‌بندی تا حدودی در نمونه استوانه‌ای شکل هم مشاهده می‌شود.



شکل ۵. تصویر مقطع نازک نمونه آذرآواری. الف) موازی لایه‌بندی (نور عادی)، ب) عمود بر لایه‌بندی (نور عادی) ج) موازی لایه‌بندی (نور پلاریزه)، د) عمود بر لایه‌بندی (نور پلاریزه)

جدول ۴. درصد مواد تشکیل دهنده دو نمونه سنگ با استفاده

از آزمون XRF

Pyroclastic		Sandstone	
Compound	Concentration (%)	Compound	Concentration (%)
SiO ₂	52.2	SiO ₂	56.92
Al ₂ O ₃	19.3	Al ₂ O ₃	17.00
CaO	6.6	Fe ₂ O ₃	14.61
Fe ₂ O ₃	4.02	K ₂ O	3.25
K ₂ O	2.43	MgO	2.20
Na ₂ O	2.32	Na ₂ O	2.14
MgO	1.24	CaO	1.60
TiO ₂	0.727	TiO ₂	1.14
SO ₃	0.214	MnO	0.468
P ₂ O ₅	0.13	P ₂ O ₅	0.130
MnO	0.102	ZrO ₂	0.126
Cl	0.065	CuO	0.063
SrO	0.021	ZnO	0.059
ZrO ₂	0.018	SO ₃	0.040

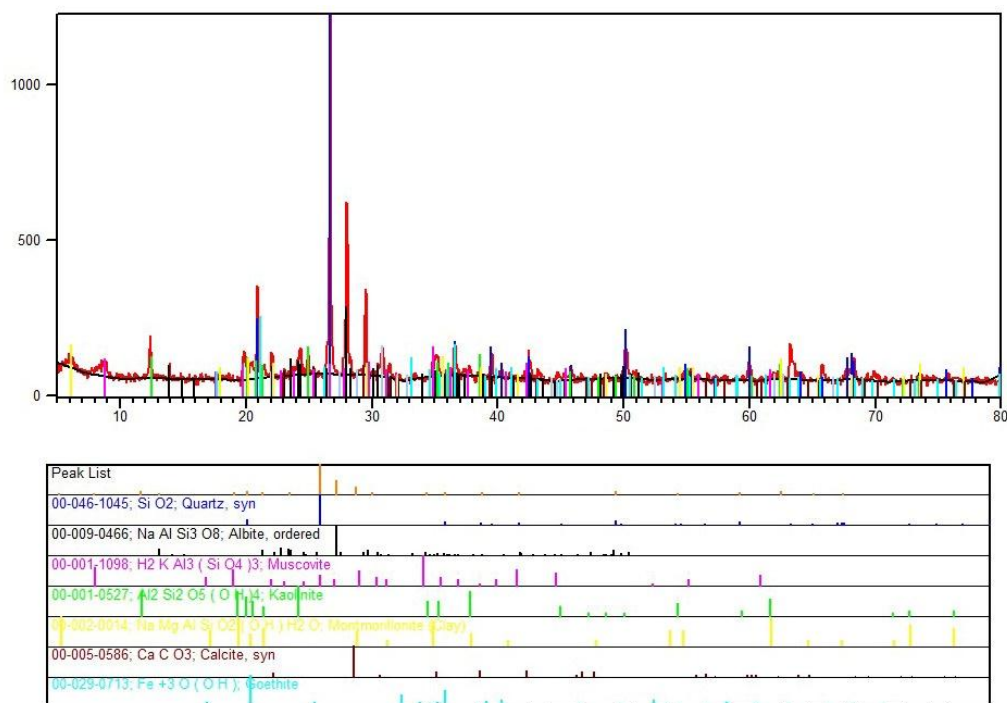
به طور کلی طولی‌شدگی در دانه‌های این سنگ مشاهده نمی‌شود و جوشدگی آنها نیز ضعیف می‌باشد. فرآیند تجزیه شدید فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی قابل رویت است. بلورهای درشت سنگ از جنس کوارتز، پلاژیوکلاز و کلسیت می‌باشد.

درصد شیمیایی اکسیدهای موجود در این سنگ آذرآواری نیز در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی این دو سنگ متفاوت نشان می‌دهد که در سنگ آذرآواری کلسیم بیشتری نسبت به ماسه سنگ وجود دارد، اما مقدار آهن و سیلیس در ماسه‌سنگ بیشتر از نمونه آذرآواری است.

شده‌ی این سنگ نیز توسط آزمون XRD تعیین شده است (جدول ۵) که نشان دهنده‌ی کانی‌های رسی مختلفی مانند کائولینیت، گوتیت و مونت‌موریلونیت در این سنگ است. نام این سنگ را طبق طبقه‌بندی سنگ‌های آذرآواری توسط گیلسپی و استایلز (Gillespie and Styles, 1999) و بر اساس اندازه‌ی ذرات آن می‌توان توف در نظر گرفت.

Pyroclastic		Sandstone	
Compound	Concentration (%)	Compound	Concentration (%)
CuO	0.018	SrO	0.033
ZnO	0.012	Rb ₂ O	0.019
Rb ₂ O	0.005	Y ₂ O ₃	0.009
Y ₂ O ₃	0.004	Nb ₂ O ₅	0.007
*LOI	10.44	LOI	-

شکل ۶ نتایج آزمون XRD برای شناسایی کانی‌های موجود در این سنگ را نشان می‌دهد. درصد کانی‌های شناسایی



شکل ۶. نمودار کانی‌های شناسایی شده نمونه آذر آواری توسط آزمون XRD

۲-۳- نتایج آزمون سه محوره

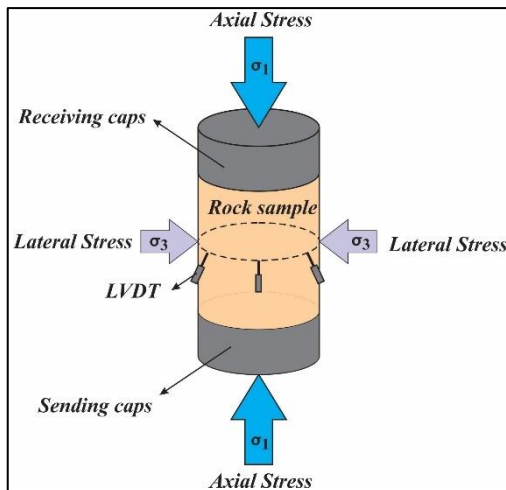
نمونه‌های استوانه‌ای مورد نیاز از بلوک‌های سنگی تهیه شده و آماده‌سازی نمونه‌ها طبق ASTM D 4543 و ISRM انجام شده است. در آزمون سه محوره‌ی انجام شده به روش پلکانی نوع دوم استاندارد ISRM، نمونه‌ها چند مرحله و تحت تنش‌های جانبی (σ_3) مختلف قرار گرفته است و در هر بار، تنش محوری (σ_1) وارده تا مقادیر نزدیک به مقاومت نهایی نمونه افزایش یافته است. سپس قبل از شروع مرحله گسیختگی نمونه، باربرداری محوری شده و با افزایش فشار

جدول ۵. کانی‌های شناسایی شده در نمونه‌ی آذرآواری رسی توسط آزمون XRD و درصد آنها

Concentration (%)	Formula	Mineral
34.8	SiO ₂	Quartz
16.4	CaCO ₃	Calcite
16.9	NaAlSi ₃ O ₈	Albite
9.4	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Kaolinite
9.4	H ₂ KAl ₃ (SiO ₄) ₃	Muscovite
7.9	NaMgAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂ O	Montmorillonite
5.3	FeO(OH)	Goethite

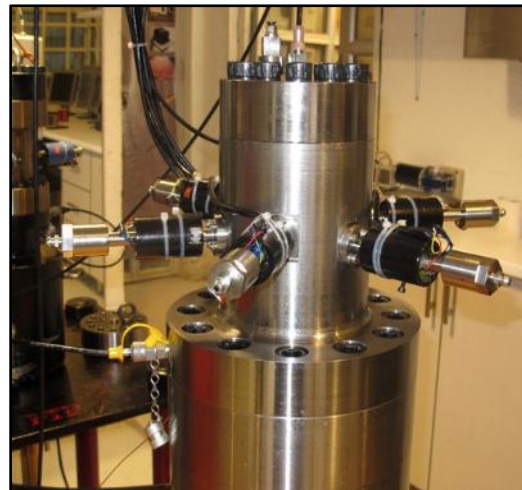
اعمال به نمونه ۷۰۰ بار می‌باشد و قطر نمونه سنگی مناسب این دستگاه برابر ۳۸ میلی‌متر با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ تا ۳ می‌باشد. کرنش‌سنج‌های محاطی شامل ۶ عدد جابجایی‌سنج (LVDT) بوده که به صورت عمودی به وسط نمونه متصل شده و میانگین کرنش‌های ثبت شده‌ی آنها به عنوان کرنش محاطی در نظر گرفته شده است.

شکل ۷ تصویر کلی از محفظه قرارگیری نمونه و نحوه قرارگیری نمونه در آزمایش سه محوره و نیز نحوه اعمال تنش و محل قرارگیری کرنش‌سنج‌های محاطی که در وسط نمونه قرار گرفته‌اند، را نشان می‌دهد.



ب) نحوه اعمال تنش و محل کرنش‌سنج‌ها

جانبی، مجدداً بار محوری افزایش یافته است. قابل ذکر است که پارامترهای دستگاهی حین باربرداری ثبت نشده‌اند. این روش نسبت به روش متداول آزمون سه محوره، داده‌های بیشتری را در شرایط متفاوت از یک نمونه در اختیار قرار می‌دهد که برای کارهای تحقیقاتی مناسب‌تر است. در این روش، مدول یانگ و نسبت پواسون یک سنگ در شرایط مختلف فشار جانبی و محوری قابل بررسی می‌باشد. آزمون‌های سه محوره‌ی این تحقیق در آزمایشگاه شرکت فان (FAN) انجام گرفته است. دقت اندازه‌گیری جابجایی‌سنج‌های مورد استفاده برای این آزمون ۱ میکرون و دقت اندازه‌گیری فشارسنج‌ها ۰/۰۱ بار بوده است. بیشترین فشار جانبی قابل



الف) محفظه قرارگیری نمونه

شکل ۷. الف) تصویر محفظه قرارگیری نمونه در آزمایش سه محوره و ب) نحوه اعمال تنش بر نمونه و محل قرارگیری کرنش‌سنج‌های محاطی

۳۸/۸۷ و ارتفاع ۸۱/۰۹ میلی‌متر بوده (نسبت ارتفاع به قطر برابر ۲/۰۹) و وزن حجمی آن ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است. تخلخل نمونه نیز بر اساس بررسی مقطع نازک آن زیر یک درصد می‌باشد.

این نمونه سه بار تحت تنش‌های جانبی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال قرار گرفته است و در هر بار، تنش محوری وارده تا مقادیر نزدیک به مقاومت نهایی نمونه افزایش یافته است. نتایج نمودارهای تنش محوری نسبت به تغییر شکل طولی

در هر مرحله از افزایش فشار جانبی، آزمون اولتراسونیک با استفاده از امواج P و S طبق استاندارد ASTM D 2845 انجام شده است. فرکانس امواج مورد استفاده ۱/۷ مگاهرتز بوده است و امواج P و S در ابتدا و انتهای هر پله‌ی فشار محوری (۳۰ یا ۵۰ مگاپاسکالی) ارسال و دریافت شده است.

۱-۲-۳- نمونه ماسه‌سنگی

نمونه‌ی ماسه‌سنگی مورد استفاده برای این آزمون دارای قطر

جدول ۶. تغییرات مدول یانگ نمونه‌ی ماسه‌سنگی با توجه به مقادیر بار محوری و فشار جانبی

Parameter	Lateral stress (σ_3)	Axial stress (σ_1)	Average Young modulus (E_{ave})
Unit	MPa	MPa	GPa
Stage 1	5	21-48	9.97
	5	55-103	8.33
	5	106-152	7.52
	5	155-181	6.94
	10	46-52	18.37
Stage 2	10	58-101	8.81
	10	107-147	8.38
	10	157-201	7.90
	10	203-231	5.91
	15	62-102	9.08
Stage 3	15	107-143	8.42
	15	155-202	8.02
	15	205-252	7.01
	15	255-258	3.73

نمونه در فشارهای جانبی مختلف و نیز نمودارهای کرنش جانبی متوسط نمونه نسبت به تنش محوری اعمال شده در شکل ۸ نشان داده شده است. باید اشاره شود که تغییرات طول نمونه حین بارگذاری محوری در ابتدای مراحل بارگذاری‌های بعدی، به دلیل تغییرات اندک آنها با اعمال فشار محوری غیرمنطقی به نظر می‌رسند و در نتیجه حذف شده است.

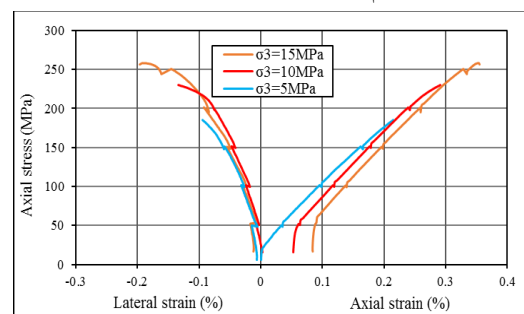
برای بررسی روند تغییرات مدول یانگ نمونه‌ی ماسه-سنگی، متوسط‌گیری از مقادیر مدول در بازه‌های تنش محوری مشخص شده در جدول ۶ ارائه شده است که این بازه‌های تنش محوری برای هر سه فشار جانبی مختلف به صورت جداگانه نشان داده شده است.

برای این نمونه ۱۷ آزمون اولتراسونیک موج P و ۱۷ آزمون با موج S انجام شده است. اولین آزمون در شرایط محیطی (بدون اعمال فشار محوری و جانبی به نمونه) انجام شده است و سایر آزمون‌ها در ابتدا و انتهای هر پله فشار محوری ۵۰ مگاپاسکالی انجام شده است.

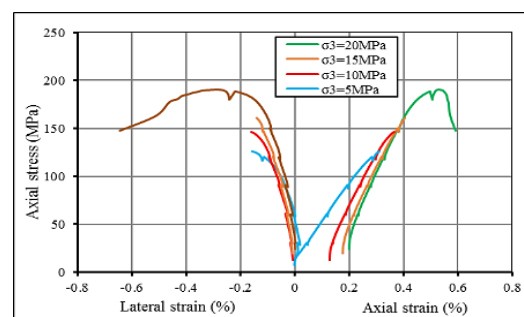
۲-۳- نمونه آذرآواری

نمونه‌ی آذرآواری دارای قطر ۳۸/۹۰ و ارتفاع ۸۰/۰۰ میلی‌متر بوده (نسبت ارتفاع به قطر برابر ۲/۰۶) و وزن حجمی آن ۲/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و تخلخل آن نیز با توجه به مقطع نازک، تقریباً زیر یک درصد می‌باشد. نتایج نمودار تنش محوری نسبت به تغییر شکل طولی این نمونه در فشارهای جانبی مختلف و نیز نمودار کرنش جانبی متوسط نمونه نسبت به تنش محوری اعمال شده به آن در شکل ۹ نشان داده شده است. روند تغییرات مدول یانگ نمونه‌ی آذرآواری، در بازه‌های تنش محوری مشخص شده برای هر چهار مقدار فشار جانبی مختلف به صورت مجزا در جدول ۷ درج شده است.

۲۵ آزمون اولتراسونیک موج P و ۲۵ آزمون با موج S بر روی این نمونه انجام شده است. اولین آزمون در شرایط محیطی و



شکل ۸. نمودار تنش - کرنش محوری و جانبی نمونه ماسه‌سنگی در فشارهای جانبی و محوری مختلف



شکل ۹. نمودار تنش - کرنش محوری و جانبی نمونه آذرآواری در فشارهای جانبی و محوری مختلف

۴- بحث و بررسی نتایج

تفاوت در ترکیب شیمیایی، کانی‌های موجود و وزن حجمی دو نوع سنگ باعث ایجاد اختلاف در پارامترهای بدست آمده از رفتار مکانیکی و دینامیکی این دو نمونه شده است که در ادامه این تفاوت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۴- مقایسه نمودارهای تنش - کرنش

گسیختگی نمونه ماسه‌سنگ در فشار جانبی ۱۵ مگاپاسکال و فشار محوری ۲۵۸/۵ مگاپاسکال اتفاق افتاده است، در حالی‌که نمونه آذرآواری در فشار جانبی ۲۰ و فشار محوری ۱۹۰/۶ مگاپاسکال دچار گسیختگی شده است (به شکل‌های ۶ و ۷ رجوع شود). بنابراین مقاومت ماسه‌سنگ بیشتر از سنگ آذرآواری بوده و حتی این مقاومت در فشار جانبی کمتر بدست آمده است. وزن حجمی معمولاً یکی از عواملی است که رابطه‌ی مستقیم با مقاومت سنگ دارد که در این آزمون نیز مورد تأیید است.

در حین بارگذاری نوع رفتار سنگ‌ها از حالت الاستیک به پلاستیک تغییر یافته و میزان تغییر شکل سنگ تا شکست برای این دو نمونه متفاوت است. در نمونه ماسه-سنگی رفتار شکل پذیر کمتری تا لحظه شکست مشاهده می‌شود. کرنش نمونه ماسه سنگی در لحظه شکست برابر ۰/۳۵ درصد بوده است، در حالی‌که در نمونه آذرآواری ۰/۵۴ درصد بوده است که نشان می‌دهد نمونه‌ی آذر آواری کرنش بیشتری تا لحظه گسیختگی داشته است. همچنین کرنش باقیمانده‌ی آن پس از هر مرحله‌ی بارگذاری محوری تا شروع بارگذاری در پله‌ی بعدی فشار جانبی نسبت به نمونه‌ی آذرآواری کمتر است. با توجه به تخلخل زیر یک درصدی برای دو نمونه مورد بررسی، به نظر می‌رسد تخلخل نقشی در مقاومت و رفتار مکانیکی سنگ‌ها نداشته باشد. با مراجعه مجدد به جدول‌های ۳ و ۵ می‌توان دریافت که وجود کوارتز بیشتر در نمونه ماسه سنگی نسبت به نمونه آذر آواری می‌تواند باعث افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری آن تا لحظه شکست شود (به جدول ۶ و ۷ مراجعه شود). در نمونه آذرآواری که کوارتز

سایر آزمون‌ها در ابتدا و انتهای هر پله فشار محوری ۳۰ مگاپاسکالی انجام شده است.

جدول ۷. تغییرات مدول یانگ نمونه‌ی آذرآواری با توجه به مقادیر بار محوری و فشار جانبی

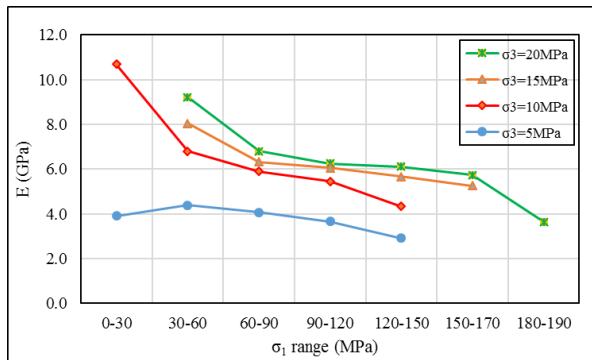
Parameter	Lateral stress (σ_3)	Axial stress (σ_1)	Average Young modulus (E_{ave})
Unit	MPa	MPa	GPa
Stage 1	5	15-32	3.91
	5	31-60	4.40
	5	67-91	4.06
	5	93-120	3.67
	5	122-126	2.92
Stage 2	10	33-61	6.81
	10	62-90	5.90
	10	93-120	5.45
	10	120-146	4.34
Stage 3	15	35-60	8.04
	15	63-91	6.33
	15	92-121	6.06
	15	121-150	5.66
Stage 4	15	150-161	5.27
	20	35-61	9.21
	20	62-91	6.81
	20	92-120	6.26
	20	121-150	6.11
	20	150-188	3.76
	20	184-190	3.64

شکل ۱۰ تصویر نمونه‌های شکسته شده تحت آزمون سه محوری را نشان می‌دهد که شکست این نمونه‌ها به صورت برشی صورت گرفته است.



شکل ۱۰. نمونه‌های شکسته شده تحت آزمون سه محوری

کاهش می‌یابد که دلیل آن رفتار شکل پذیرتر نمونه با افزایش محوری می‌باشد.



شکل ۱۲. مقایسه روند تغییر مدول یانگ با افزایش فشار محوری و فشار جانبی در نمونه آذرآواری

بررسی رفتار تنش - کرنش دو نمونه نشان داد نمونه ماسه-سنگی دارای تغییر شکل پذیری کمتری نسبت به نمونه آذرآواری بوده است و اگر مدول یانگ این دو نمونه در فشار جانبی یکسان در طول آزمون مورد بررسی قرار گیرد، مدول یانگ نمونه ماسه-سنگی بیشتر از نمونه آذر آواری می‌باشد. این نتیجه نیز با اختلاف شرایط زمین‌شناسی دو نمونه همخوانی دارد.

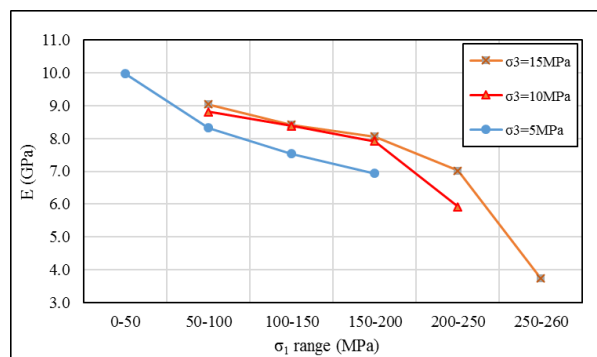
۴-۳- مقایسه نسبت پواسون استاتیک

تغییرات نسبت پواسون استاتیک نمونه ماسه-سنگی با تغییر فشار جانبی و فشار محوری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار محوری مقدار نسبت پواسون به تدریج افزایش می‌یابد. انتظار این بوده است که با افزایش فشار جانبی نسبت پواسون کاهش یابد زیرا افزایش فشار جانبی باعث جلوگیری از تغییر شکل بیشتر نمونه در راستای جانبی شده و در نتیجه نسبت پواسون را کاهش می‌دهد، اما در مرحله اول که فشار جانبی برابر ۵ مگاپاسکال بوده است، مقادیر نسبت پواسون کمتر از فشارهای جانبی ۱۰ مگاپاسکال در فشارهای محوری متناظر با یکدیگر شده است. دلیل این اتفاق می‌تواند متراکم شدن نمونه سنگ در مرحله اول بارگذاری باشد. در فشارهای محوری زیاد، نسبت پواسون به بیش از ۰/۵ نیز می‌رسد که نشان دهنده‌ی حضور

کمتری نسبت به نمونه ماسه سنگی دارد، کلسیت و کانی‌های رسی به جای کوارتز وجود دارند که مقاومت به مراتب کمتر و شکل پذیری بیشتری را باعث می‌شوند.

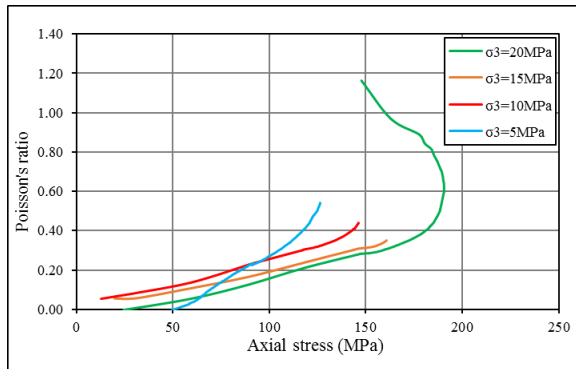
۴-۲- مقایسه مقادیر مدول یانگ استاتیک

مقدار فشار جانبی و فشار محوری در مقادیر بدست آمده‌ی مدول یانگ آزمون‌ها کاملاً تأثیرگذار می‌باشد به طوری که با افزایش فشار جانبی در یک فشار محوری یکسان، می‌توان مقادیر مدول یانگ بالاتری را ثبت نمود. شکل ۱۱ مقایسه‌ی کمی مدول یانگ متوسط نمونه‌ی ماسه سنگی را در فشارهای جانبی و محوری مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار جانبی، مدول یانگ در یک فشار محوری مشخص افزایش می‌یابد. باید اشاره کرد که این افزایش در فشارهای محوری بین ۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال و فشار جانبی ۱۰ نسبت به ۱۵ مگاپاسکال، کمتر است. همچنین با افزایش فشار محوری در یک فشار جانبی ثابت، مدول یانگ متوسط نمونه کاهش یافته است که نشان دهنده‌ی تغییر تدریجی رفتار سنگ از الاستیک به پلاستیک است.



شکل ۱۱. مقایسه روند تغییر مدول یانگ با افزایش فشار محوری و فشار جانبی در نمونه ماسه-سنگی

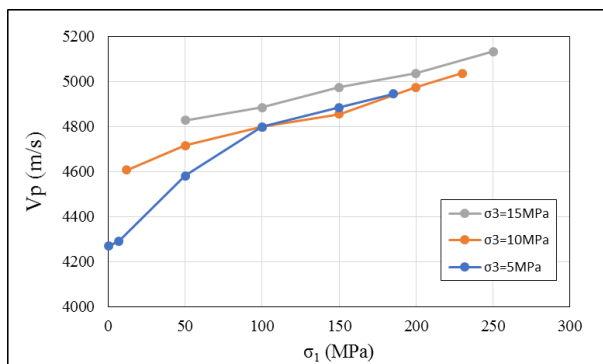
مقادیر مدول یانگ متوسط نمونه‌ی آذرآواری در فشارهای جانبی و فشارهای محوری مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. باز هم مشاهده می‌شود که با افزایش فشار جانبی، مدول یانگ نیز افزایش می‌یابد. باید اشاره شود که مدول یانگ در یک فشار جانبی ثابت، با افزایش فشار محوری



شکل ۱۴. تغییرات نسبت پواسون نمونه آذرآواری در فشارهای جانبی و محوری مختلف

۴-۴- مقایسه سرعت عبور امواج

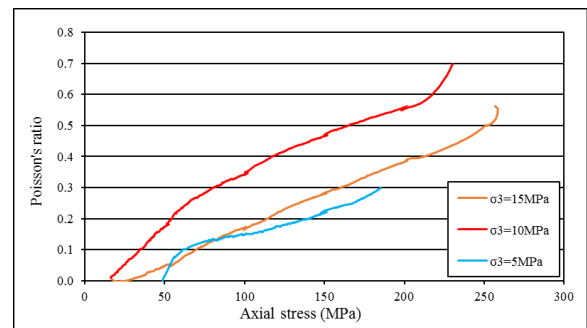
برای ارزیابی تغییرات سرعت عبور موج همزمان با بارگذاری محوری و جانبی، ۱۷ آزمون اولتراسونیک موج طولی (P) و ۱۷ آزمون موج عرضی (S) نیز انجام گردید. نتایج سرعت عبور موج P در فشارهای جانبی و محوری مختلف نمونه ماسه‌سنگی در نمودار شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵. تغییرات سرعت عبور موج p در فشارهای جانبی و محوری مختلف در نمونه ماسه‌سنگی

نمودار فوق نشان می‌دهد که با افزایش فشار محوری و فشار جانبی، سرعت عبور موج نیز افزایش می‌یابد. البته تأثیر افزایش سرعت عبور موج در اثر ازدیاد بارگذاری محوری بهتر قابل مشاهده است. فشارهای محوری و جانبی باعث متراکم شدن نمونه و فرورفتن بیشتر کانی‌های تشکیل دهنده

ترک‌های ریز و سپس ایجاد صفحه گسیختگی اصلی آن است. باید مجدداً یادآوری شود که در اکثر آزمون‌های متداول، نسبت پواسون را در شرایطی که نمونه رفتار الاستیک دارد (تنش‌های کمتر از حد تسلیم نمونه)، اندازه‌گیری می‌کنند و در نتیجه مقدار آن کمتر به دست می‌آید. استفاده از ضریب پواسون‌های متغیر و نیز ضریب پواسون در هنگام اتساع نمونه، در کارهای مدل‌سازی و نیز در ارزیابی پروژه‌های عملی که سنگ متحمل فشارهای بالا و در نتیجه بروز رفتارهای غیر الاستیک می‌شود، کاربرد دارد.

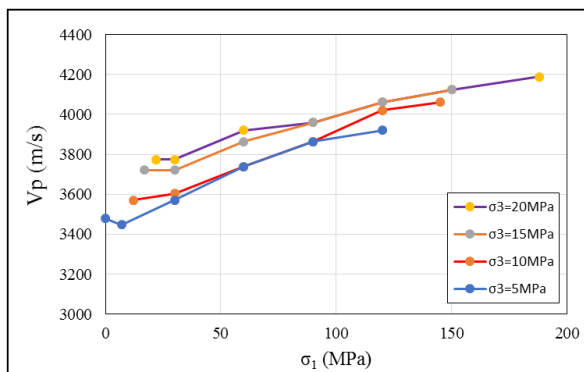


شکل ۱۳. تغییرات نسبت پواسون نمونه ماسه سنگی در فشارهای جانبی و محوری مختلف

نسبت پواسون نمونه آذر آواری تحت آزمون سه محوره در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این سنگ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش فشار محوری مقدار نسبت پواسون به تدریج افزایش می‌یابد، زیرا رفتار نمونه شکل‌پذیرتر شده و امکان تغییر شکل بیشتری تا لحظه‌ی شکست برای آن فراهم می‌شود. با افزایش فشار جانبی، نسبت پواسون نمونه کاهش می‌یابد، زیرا افزایش فشار جانبی باعث کاهش در تغییر شکل جانبی آن می‌شود. باید اشاره کرد که مقادیر نسبت پواسون این سنگ به طور کلی بیش از نمونه‌ی ماسه سنگ است. در زمان نزدیک به شکست نمونه، نسبت پواسون به حدود عدد ۱ نیز می‌رسد که نشان دهنده‌ی اتساع جانبی نمونه و گسترش ترک‌های آن است.

ایجاد شده در محل‌های نزدیک به سطح بیرونی نمونه‌ی استوانه‌ای شکل ایجاد می‌شود و سپس با افزایش تنش و گسترش ریزترک‌ها، ترک‌های جدیدی نیز در محل‌های نزدیک‌تر به خط مرکزی طول استوانه ایجاد می‌شود تا در نهایت با به هم پیوستن ریزترک‌ها، صفحه اصلی گسیختگی شکل می‌گیرد. بنابراین اگر قصد نشان دادن تأثیر ریزترک‌ها بر سرعت امواج P و S باشد، باید در زمان‌های نزدیک به شکست و یا حتی پس از شکست نمونه، سرعت امواج بررسی شوند. در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال و فشارهای محوری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال احتمال دارد افت سرعت موج S ناشی از پیدا شدن ترک‌های ریز در نمونه باشد که در فشارهای جانبی بیشتر بسته شده‌اند.

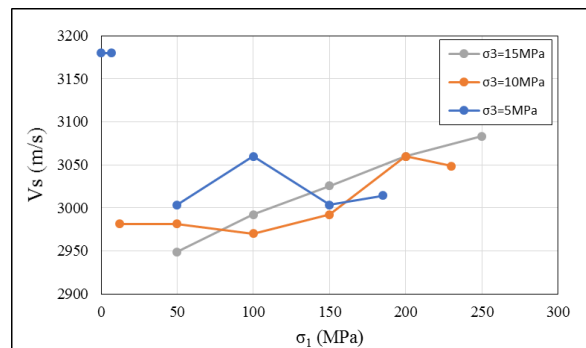
همانطور که اشاره شد، ۲۵ آزمون اولتراسونیک موج P و ۲۵ آزمون با موج S بر روی نمونه آذرآواری انجام شده است که نتایج آن در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. نمودارهای سرعت عبور موج P و S بر روی این نمونه نشان می‌دهد که با افزایش فشار محوری و فشار جانبی، سرعت عبور موج P و S نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷. تغییرات سرعت عبور موج P در فشارهای جانبی و محوری مختلف در نمونه آذرآواری

سنگ در یکدیگر است که نهایتاً منجر به افزایش سرعت عبور موج می‌شود.

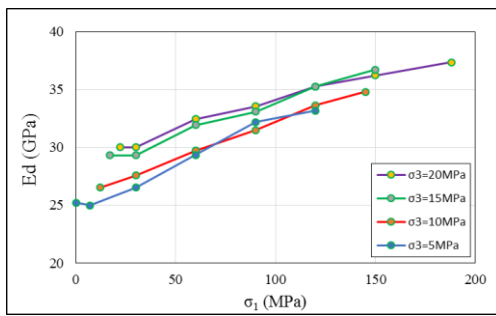
نتایج سرعت عبور موج S در فشارهای جانبی و محوری مختلف نمونه ماسه‌سنگی در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶. تغییرات سرعت عبور موج S در فشارهای جانبی و محوری مختلف در نمونه ماسه‌سنگی

نتایج حاصل از بررسی موج S بر روی نمونه ماسه سنگی نشان می‌دهد که روند کلی افزایش سرعت عبور موج با افزایش فشار محوری در فشارهای جانبی ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال بر روی نمونه محرز است، اما روند تغییرات سرعت عبور موج در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال به خصوص در فشارهای محوری کم، غیر منطقی است و حتی در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال و فشار محوری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال سرعت موج S افت پیدا می‌کند. با افزایش فشار محوری و جانبی، نمونه متراکم‌تر شده و در نتیجه سرعت عبور موج در آن نیز افزایش می‌یابد.

آنچه مسلم است با افزایش تنش محوری و عبور از نقطه تسلیم سنگ، تغییراتی در داخل سنگ ایجاد می‌شود و طبق تئوری گریفیث (Griffith)، ریز ترک‌هایی در داخل سنگ ایجاد می‌شود. این ریزترک‌ها چون با حضور فشار محوری و جانبی همراه هستند، ممکن است ابتدا دارای بازشدگی نباشند و با افزایش تنش بازشدگی پیدا کنند. برای بررسی اثر ریزترک بر سرعت امواج اولتراسونیک، محل ریزترک نسبت به مسیر عبور موج P و S بیشترین اهمیت را دارد. معمولاً مسیر عبور موج اولتراسونیک از مرکز نمونه‌ی استوانه‌ای شکل در آزمون سه محوری است، در حالی که اولین ترک‌های



شکل ۲۰. تغییرات مدول الاستیک دینامیک در فشارهای

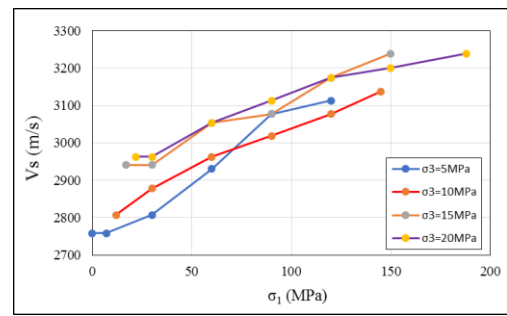
جانبی و محوری مختلف نمونه آذرآواری

به طور کلی مقادیر مدول الاستیک دینامیک نیز برای نمونه ماسه سنگی بیشتر از نمونه آذر آواری است. علاوه بر این، نشان داده شد که مدول الاستیسیته استاتیک با توجه به رفتار سنگ در طول آزمون، کاهش می‌یابد، اما مدول الاستیسیته دینامیک چون با سرعت عبور موج رابطه مستقیم دارد و در طول آزمون با افزایش فشار محوری و جانبی سرعت عبور موج افزایش می‌یابد، مدول الاستیسیته دینامیک نیز افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که از نظر زمین‌شناسی ماسه سنگ مورد بررسی از نوع ماسه‌سنگ گری‌وکی فلدسپاتی بوده است و نمونه آذرآواری از نوع توف می‌باشد. نمونه ماسه سنگ کوارتز بیشتر و نمونه آذرآواری کلسیت و کانی‌های رسی بیشتری داشته است. مقدار وزن حجمی نمونه ماسه سنگی نیز بیشتر از نمونه آذرآواری بوده است.

برای انجام آزمون مکانیکی تعیین خواص مهندسی سنگ، از آزمون سه محوره به روش پلکانی مشابه روش دوم استاندارد ISRM استفاده شده است که در حین بارگذاری، آزمون اولتراسونیک امواج P و S نیز انجام شده است. در آزمون انجام شده، دو نمونه‌ی سنگی تحت فشارهای محوری و جانبی مختلف قرار گرفتند و پارامتر تغییرشکل‌پذیری متوسط آنها در بازه‌های فشار محوری مختلف در هر پله از فشار جانبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه ماسه‌سنگ در فشار جانبی ۱۵ مگاپاسکال و فشار محوری ۲۵۸/۵ مگاپاسکال



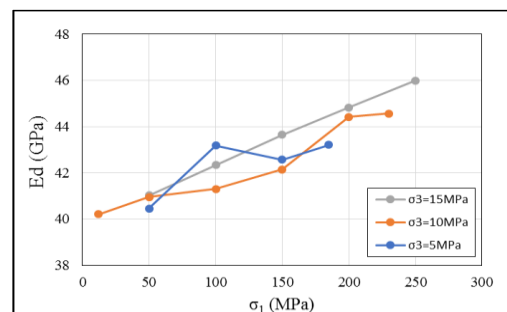
شکل ۱۸. تغییرات سرعت عبور موج S در فشارهای جانبی و

محوری مختلف در نمونه آذرآواری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش فشار محوری و فشار جانبی، سرعت موج P و S نیز در هر دو نمونه افزایش می‌یابد. بازه‌ی تغییرات برای موج P در نمونه ماسه سنگی ۴۲۶۸ تا ۵۱۳۲ و نمونه‌ی آذرآواری ۳۴۷۸ تا ۴۱۸۸ متر بر ثانیه بوده است. بازه‌ی تغییرات برای موج S در نمونه ماسه سنگی ۳۰۸۳ تا ۳۱۸۰ و نمونه‌ی آذرآواری ۲۷۵۹ تا ۳۲۳۹ متر بر ثانیه بوده است. همچنین روند افزایش سرعت موج P و S در طول بارگذاری تا حدودی نشان دهنده‌ی نوع رفتار مکانیکی سنگ است، بدین صورت که شیب خط نشان‌دهنده‌ی تغییرات سرعت موج با افزایش فشار محوری کمتر می‌شود.

۵-۴- مقایسه مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک

تغییرات مدول الاستیک دینامیک در فشارهای جانبی و محوری مختلف نمونه ماسه‌سنگ در شکل ۱۹ و همین تغییرات برای نمونه آذرآواری در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۹. تغییرات مدول الاستیک دینامیک در فشارهای

جانبی و محوری مختلف نمونه ماسه‌سنگ

بازهی این تغییرات در نمونه آذر آواری به دلیل شکل پذیرتر بودن آن بیشتر است. مقدار نسبت پواسون در نمونه ماسه سنگی به $0/7$ و در نمونهی آذرآواری به بیش از ۱ در لحظه شکست رسیده است.

برای بررسی رفتار دینامیکی سنگها در طول آزمون سه محوره، چندین آزمون اولتراسونیک موج P و S بر روی نمونهی ماسه سنگی و آذرآواری انجام شد که افزایش فشار محوری و فشار جانبی باعث افزایش سرعت عبور امواج و در نتیجه مدول دینامیک در نمونهها گردید. باید اشاره نمود که به طور کلی سرعت عبور موج P و S و مدول دینامیک نیز در نمونهی ماسه سنگی بیشتر بوده است.

سرانجام، پیشنهاد می شود که میزان پارامتر مورد نظر باید بر اساس شرایط قابل انتظار از آن سنگ در طبیعت و یا پروژه مورد نظر تعیین شود و ارائه یک مقدار ثابت برای برخی پارامترهای سنگ مانند مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و سرعت عبور موج اولتراسونیک نمی تواند در طول فرآیند اعمال تنش به یک نمونه سنگ منطقی باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند از زحمات شرکت های مهندسی آزمون فولاد و گروه مهندسی فان در خصوص همکاری برای انجام آزمون های این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

گسیخته شد، اما نمونه آذرآواری در فشار جانبی ۲۰ مگاپاسکال و فشار محوری ۱۹۰/۶ مگاپاسکال دچار گسیختگی گردید. کرنش نمونه ماسه سنگی در لحظه شکست برابر $0/35$ درصد و نمونه آذرآواری $0/54$ درصد بوده است که نشان می دهد نمونهی آذر آواری کرنش بیشتری تا لحظه گسیختگی داشته است. وجود کوارتز بیشتر در نمونه ماسه سنگی نسبت به نمونه آذر آواری می تواند باعث افزایش مقاومت و کاهش شکل پذیری آن تا لحظه شکست شود. همچنین نمونه آذرآواری کوارتز کمتری نسبت به نمونه ماسه سنگی داشته و کلسیت و کانی های رسی به جای آن وجود دارند که مقاومت به مراتب کمتر و شکل پذیری بیشتری را باعث می شوند.

با افزایش فشار محوری، مدول یانگ استاتیک نمونهها در یک فشار جانبی ثابت کاهش می یابد زیرا با افزایش محوری، رفتار نمونهها از حالت الاستیک فاصله گرفته و شکل پذیرتر می شود. با افزایش فشار جانبی در یک فشار محوری معین، مدول یانگ نمونهها نیز افزایش می یابد. باید اشاره شود که به طور کلی مقادیر مدول بدست آمده برای نمونه ماسه سنگی بیشتر از نمونهی آذرآواری شده است که با توجه به تفاوت ساخت و بافت این دو نوع سنگ، قابل انتظار بوده است.

نسبت پواسون را معمولاً برای سنگها عدد ثابتی در نظر می گیرند که صحیح نیست، زیرا مقدار آن با توجه به شرایط فشار وارد بر آنها تغییر می کند. نسبت پواسون نمونه های مورد آزمون سه محوری نیز در طول آزمون تغییر کرده است که

منابع

۱. جوادیان، د.، مومیوند، ح.، حمیدزاده مقدم، ر.، ۱۳۹۵، ارائه روشی جدید برای برآورد مقاومت بلوک های سنگی با استفاده از آزمون غیر مخرب امواج اولتراسونیک، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد دهم، ۳۲۸۶-۳۲۷۱.
- Al-Shayea, N., 2004. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock, *Engineering Geology*, 74: 139-156.
- Arora, V. K., 1987, Strength and deformational behavior of jointed rocks. PhD thesis, IIT Delhi, India.
- ASTM, 2004, Standard practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances, D 4543 - 04.
- ASTM, 2004, Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock Core specimens without pore pressure measurements D 2664 - 04.
- ASTM, 2008, Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, D2845 - 08.

- ASTM, 2014, Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, D7012-14.
- ASTM, 2001, Standard practice for using significant digits in geotechnical data, D6026 - 01.
- Aydan, O., Rassouli, F. & Ito, T., 2011, Multi-parameter responses of Oya tuff during experiments on its time-dependent characteristics, In: Proceedings of the 45th US rock mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, ARMA. pp. 11–294.
- Aydan, O., 2017, Time-dependency in rock mechanics and rock engineering, Taylor & Francis Group, London, UK, V.2, 246 p.
- Barton, N., 2007, Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, Taylor & Francis Group, London, UK, 729 p.
- Brady, B. H. G., E. T. Brown, 2006, Rock mechanics for underground mining, Third edition, Springer, Netherlands, 626 p.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., 2014, Relationship between static and dynamic elastic modulus of a calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 791-799.
- Casper O., Fabricius I.L., Krogsboll A., Prasad M., 2004, Static and dynamic Young's Modulus for lower Cretaceous chalk: A low frequency scenario, AAPG International Conference: October 24-27, 2004; Cancun, Mexico.
- Ciccotii, M., Mulargia, F., 2004, Differences between static and dynamic elastic moduli of atypical seismogenic rock, Geophysical Journal International, 157: 474-477.
- Eissa, E.A., Kazi, A., 1988, Relation between static and dynamic Young's Moduli of rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 25:479-482.
- Feng, X. T., 2017, Rock Mechanics and Engineering, V. 2: Laboratory and field testing, Taylor & Francis group, London, UK, 631 p.
- Franklin, J.A., E. Hoek, 1970, Developments in triaxial testing technique, Rock Mechanics, v. 2, pp. 223-228.
- Gerçek, H., 2007, Poisson's ratio values for rocks, International journal of rock mechanics and mining sciences, 44-1: 1–13.
- Gillespie M.R., Styles M.T., 1999, Classification of igneous rocks. British geological survey research report RR 99–06. BGS rock classification scheme, vol 1.
- Goodman, R. E., 1989, Introduction to rock mechanics, John Wiley and sons, Canada, 2nd ed., 562 p.
- Hashemi Esfahanian, M., 1999, Constitutive modelling of a schistose rock in the Himalaya, PhD thesis, Indian Institute of Technology, New Dehli, India, 226 p.
- Heap, M.J., Faulkner, D.R., 2008, Quantifying the evolution of static elastic properties as crystalline rock approaches failure, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 45: 564–573.
- Heap, M.J., Vicinguerra, S., Meredith, P.G., 2009, The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic stressing of basalt from Mt. Etna volcano, Tectonophysics, 471: 153-160.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses, Journal of the geotechnical engineering division, ASCE, 106(GT9): 1013–1035.
- Horsrud, P., 2001, Estimating Mechanical Properties of Shale from Empirical Correlations, Society of Petroleum Engineers, SPE, doi:10.2118/56017-pa.
- Hudson, J.A., 1993, Comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects, v. 3, Rock testing and site characterization, Pergamon Press Ltd, 994 p.
- ISRM: Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression, 1978.
- ISRM: Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression, Revised Version, 1983.
- ISRM: The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006, in: R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.), Commission on testing methods, International Society of Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, 2007, 628 p.
- ISRM, Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique, Aydin, A., 2014, pp. 95-100.
- Jaeger, J. C., N. G. W. Cook, R. W. Zimmerman, 2007, Fundamentals of Rock Mechanics, Fourth Edition, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 476 p.

- King, M.S., 1983, Static and dynamic elastic properties of rocks from the canadian shield, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 20: 237-241.
- Kulhawy, F. L. 1975. Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, *Engineering geology*, 9: 327-350.
- Lacy, L., 1997, Dynamic Rock Mechanics Testing for Optimized Fracture Designs, Paper SPE 38716 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 5-8 October.
- Lama, R.D., Vutukury, V.S., 1978, Handbook on mechanical properties of rocks, v. 2, Testing techniques and results, Trans tech publications, Clausthal, Germany, 481 p.
- Mańkowski, P., Ostrowski, A., 2017, The Methodology for the young modulus derivation for rocks and its value, *Symposium of the international society for rock mechanics*, *Procedia engineering*, 191: 134 - 141.
- Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garcia-del-Cura, M.A., 2012, Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71: 263-268.
- McCann, D.M., Entwisle, D.C., 1992, Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs, From Hurst, A., Griffiths, C. M. & Worthington, P. F. (eds), *Geological applications of wireline logs II*, Geological society special publication, No. 65, pp. 317--325.
- Murrel, S.A.F., 1965, The effect of triaxial stress on the strength of rocks at atmospheric temperatures, *Geophysics J.*, 10: 231-281.
- Najibi, A.R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., 2015, Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones: two main oil reservoirs in Iran, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126: 78-82.
- Ozsan A., Akin M. 2002. Engineering geological assess-ment of the proposed Urus Dam, Turkey, *Engineering Geology*, 66: 271-281.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R., 1972, *Sand and sandstone*, Springer-Verlag, Inc., New York, p. 618.
- Price, N. J., 1958, A Study of rock properties in conditions of triaxial stress, *Conference on mechanical properties of non-metallic brittle materials*, Butterworth, London, Page 106.
- Rahn, P. H., 1996, *Engineering Geology: An Environmental Approach*, 2nd Edition, Prentice hall, Upper saddle river, USA, 657 p.
- Villaseńor, A. P., 2010, Physical and mechanical characterization of altered volcanic rocks for the stability of volcanic edifices, PhD Thesis, Milan university, Italy, 134 p.
- Witke, W., 2014, *Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model*, Wilhelm ernst & sohn, Berlin, Germany, 875 p.
- Xiangtao X., Runqiu H., Hua L., Qiuxiang H., 2014, Determination of poisson's ratio of rock material by changing axial stress and unloading lateral stress test, *Springer Verlag Wien*, 5 p., Doi: 10.1007/s00603-014-0586-9.
- Xu H. et al, 2016, Characterization of rock mechanical mproperties using lab tests and numerical interpretation model of well logs, *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical problems in engineering*, v. 2016, 13 p.
- Yasar E.Y., Erdogan Y., 2004, Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *International journal of rock mechanics & mining sciences*, 41: 871-875.
- Zhang, L., 2005, *Engineering properties of rocks*, v. 4, Elsevier, 290 p.
- Zhaolin, L., Lianguo, W., Yinlong, L., Wenshuai, L., Wang, K., 2018, Experimental investigation on the deformation, Strength, and acoustic emission characteristics of sandstone under true triaxial compression, *Advances in materials science and engineering*, 16 p.