

تعیین پارامترهای مقاومتی سازندهای ماسه‌سنگی با استفاده از تخلخل

سعید بداغ‌آبادی^۱، سروش فولادچی^۲، سید جلال موسوی^۳

^۱ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، آزمایشگاه مکانیک سنگ، دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، s_bodagh@yahoo.com

^۲ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، قطب علمی معدن، دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۳ کارشناس ارشد مکانیک سنگ، شرکت مهندسی و توسعه نفت

چکیده

در بسیاری از مسائل ژئومکانیک مخازن از جمله بررسی پایداری چاه، بررسی میزان تولید ماسه، مسائل مربوط به اندرکنش سرمته و سنگ و ... پارامترهای مقاومتی سازند از مهمترین اطلاعاتی می‌باشد که مورد نیاز می‌باشد. راههای متعددی برای تعیین پارامترهای مقاومتی سازند وجود دارد که متداول‌ترین آنها استفاده از امواج صوتی بدست آمده از لاگ صوتی می‌باشد اما در مواردی که این لاگ در اختیار نباشد، می‌توان از تخلخل به عنوان شاخصه‌ای برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مخزن استفاده کرد. در این مقاله ارتباط بین پارامترهای مقاومتی ماسه سنگها و میزان تخلخل آنها بر اساس نتایج تستهای آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و در صورت وجود ارتباط مشخص، روابط مربوطه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تخلخل، پارامترهای مقاومتی مخزن، ثوابت الاستیک استاتیک و دینامیک، ماسه‌سنگ

Estimating Mechanical Parameters of Sandstone Reservoir Using Their Porosity

Saeed Bodaghabadi, Soroush Fooladchi, Seyyed Jalal Moosavi

Abstract

One of the most important aspects in geomechanical analyses of reservoirs including sand production prediction, wellbore stability, hydraulic fracturing, *etc.* is determination of mechanical parameters of reservoir rock. Usually, these parameters are estimated from sonic log but in some wells, this log is not available. In this situation, for sandstone reservoir, porosity can be employed to estimate the mechanical parameters of reservoir owing to the fact that porosity had a considerable effect on mechanical properties of rock. In this paper, the mechanical properties of sandstone reservoir including uniaxial compressive strength (UCS), Young's, shear and bulk moduli, velocity of shear and compressive waves, *etc.* were estimated as a function of rock porosity by gathering laboratory test results. Proper equations were proposed where the reasonable relationships were observed.

Keywords: Porosity, Geomechanical Parameters of Reservoir, Elastic Moduli (Static and Dynamic), Sandstone

۱- مقدمه

با افزایش جهانی تقاضای نفت و گاز، شرکت‌های تولید کننده نفت و گاز تلاش مضاعف در جهت افزایش تولید داشته‌اند. این افزایش تولید همراه با مشکلات ژئومکانیکی بسیاری در مخازن خواهد بود که از جمله می‌توان به پدیده تولید ماسه^۱ اشاره نمود که در مخازن ماسه‌سنگی به عنوان بزرگترین مشکل مطرح می‌باشد. جهت بررسی پایداری چاه، پیش‌بینی تولید ماسه، بررسی میزان فرسایش سر مته در تقابل با سنگ مخزن، بررسی پدیده شکست هیدرولیکی و بسیاری از مسائل مکانیک‌سنگی مخازن نفتی و گازی، ضروری است که پارامترهای مقاومتی مخزن شناخته شوند. پارامترهای مقاومتی مخزن عموماً با استفاده از لاکهای صوتی^۲ محاسبه می‌شوند اما در مواردی این لاکها ممکن است برای چاه مشخصی برداشت نشده باشند. در این موارد می‌توان از ارتباط دیگر پارامترها با پارامترهای مقاومتی سنگ استفاده کرد. در ماسه‌سنگها یکی از عواملی که بر مقاومت آنها تاثیر به سزایی دارد تخلخل می‌باشد و این اثر بیش از دیگر سنگها می‌باشد چرا که ماسه‌سنگها عموماً دارای تخلخلهای بالا می‌باشند.

۲- کارهای انجام شده

محققین بسیاری بین پارامترهای مقاومتی مواد و برخی خواص دیگر آنها ارتباطی برقرار نموده‌اند که مهمترین آنها تخلخل می‌باشد. ارتباط بین تخلخل و خواص مقاومتی مواد به این صورت می‌باشد که با افزایش تخلخل، نسبت حجم حفرات به حجم مواد جامد زیاد شده و این امر باعث کاهش مقاومت مواد می‌شود. این پدیده را می‌توان به صورت دیگر نیز با استفاده از تئوری گذر امواج از محیط بیان نمود بدین ترتیب که با افزایش تخلخل، چگالی ماده کمتر می‌شود و با توجه به اینکه سرعت گذر امواج صوتی از دورن ماده چگالتز بیشتر می‌باشد، کاهش چگالی در حکم کاهش سرعت عبور امواج صوتی از درون جسم بوده و با توجه به ارتباط بین سرعت گذر موج و خواص مقاومتی اجسام که نسبتی مستقیم است، افزایش تخلخل باعث کاهش مقدار پارامترهای مقاومتی جسم می‌شود.

قسمت اعظم تحقیقات در زمینه ایجاد ارتباط بین تخلخل و مقاومت فشاری تک محوره ماسه‌سنگها بوده است. اولین تحقیقات در این زمینه توسط Knudsen انجام شد. این تحقیقات بر روی سرامیک به عنوان یک ماده متخلخل ایده‌آل که تخلخل آن همگن است انجام گردید. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری تک محوره سرامیک با نسبت تخلخل آنها رابطه‌ای به صورت زیر دارد.

$$\sigma_{UCS} = \alpha e^{-\beta\phi} \quad (1)$$

Knudsen تحقیقات جداگانه در مورد نحوه قرارگیری دانه‌ها در کنار یکدیگر که منجر به تغییر تخلخل می‌شود انجام داد. در این تحقیق نحوه قرارگیری دانه‌ها و چگونگی تماس آنها بررسی شد که در حالت رومبوئدریک^۳ بیشترین تخلخل با مقدار ۳۹/۵۵ درصد و تماس نقطه‌ای بین دانه‌های حاصل گردید. شکل دانه‌ها در این حالت کروی است. در حالت چند وجهی^۴ تماس دانه‌ها به صورت صفحه‌ای و شکل آنها مکعب مانند شده و تخلخل کاهش می‌یابد. نتیجه تحقیقات به این صورت بود که در مقادیر تخلخل پایین تا متوسط، مقدار مقاومت ماده را می‌توان به خوبی با استفاده از تخلخل پیش‌بینی نمود.

یکی از پارامترهای مهمی که در مقاومت مواد اثر داشته و به میزان تخلخل برمی‌گردد، ابعاد دانه‌های تشکیل دهنده مواد می‌باشد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داد که σ_{UCS} با نسبت $d^{-1/5}$ تغییر می‌کند که d قطر دانه‌ها می‌باشد. به این ترتیب، رابطه ۱ برای سرامیک به صورت زیر اصلاح شد.

$$\sigma = \alpha d^{-0.5} e^{-\beta\phi} \quad (2)$$

در مورد سنگ های با دانه‌بندی مختلف Houpert نشان داد که σ_{UCS} با نسبت $(d_{max})^{-1/5}$ تغییر می‌کند که d_{max} ابعاد بزرگترین دانه می‌باشد. در زمینه ارتباط بین تخلخل و مقاومت سنگها Sarda و همکارانش تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند و

¹ Sand Production

² Sonic Log

³ Rhomboedric

⁴ Polyhedron

در مورد سنگ‌های با تخلخل ۷-۰ درصد که تخریب نشده باشند (یعنی اثرات تنش در ایجاد شکستگی و ترک بر روی آنها دیده نشود) رابطه‌ای به صورت زیر ارائه نمودند.

$$\sigma_{UCS} = 357e^{-10.8\phi} \quad (3)$$

ایشان همچنان با جمع‌آوری آزمایشات انجام شده بر روی سنگهای مختلف با حداکثر تخلخل ۳۰ درصد رابطه زیر را به صورت کلی برای $(\sigma_{UCS})_{max}$ ارائه نمودند.

$$(\sigma_{UCS})_{max} = 258e^{-9\phi} \quad (4)$$

با نگرش محافظه‌کارانه برای تخمین حداقل مقاومت فشاری تک محوره $(\sigma_{UCS})_{min}$ رابطه زیر توسط Sarda از نتایج تستهای آزمایشگاهی بدست آمد.

$$(\sigma_{UCS})_{min} = 111.5e^{-11.6\phi} \quad (5)$$

در تخلخل مشخصی نرخ تغییرات σ_{UCS} با تخلخل قابل توجه می‌شود. برای این منظور ϕ_{tarans} به عنوان محدوده اعتبار رابطه (۴) معرفی می‌شود. مقدار ϕ_{tarans} در حدود ۲۵-۳۰ درصد می‌باشد. برای تخلخلهای بالاتر از این مقدار (Lama و Vutukuri) رابطه‌ای به صورت زیر برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از تخلخل ارائه شده است.

$$\sigma_{UCS} = \sigma(\phi - \phi_{max})^2 \quad (6)$$

مقدار ϕ_{max} بسیار نزدیک به مقداری است که Knudsen در مورد تخلخل مدل رومبوئدریک ارائه نمود. چنانچه دانه‌بندی سنگی مانند ماسه‌سنگ در اختیار باشد می‌توان مقدار ϕ_{max} را با دقت خوبی تخمین زد. در این حالت تماس دانه‌ها نقطه‌ای بود و چسبندگی بسیار اندک بین آنها برقرار است که قابل صرف‌نظر می‌باشد.

در زمینه ارتباط بین تخلخل و مدول یانگ، Farquhar و همکارانش تحقیقاتی جامعی انجام دادند. ایشان نه تنها ثابت نمود که رابطه ارائه شده توسط Knudsen در مورد ارتباط ϕ_{UCS} و ϕ به صورت رابطه (۳) می‌باشد، بلکه روابطی جهت محاسبه مدول یانگ در حالت استاتیکی و دینامیکی (E_d و E_s) با استفاده از تخلخل ارائه نمودند. ایشان ضرائب α و β رابطه (۳) را برای σ_{UCS} ، E_d ، E_s بدست آوردند. Farquhar و همکارانش تحقیقاتشان را بر روش مخازن کرناته و ماسه‌سنگی توامان انجام دادند. ایشان در این زمینه پا را فراتر نهاده و میان تخلخل و برخی پارامترهای معیارهای شکست متداول مانند هوک-براون و موهر-کولمب ارتباطاتی برقرار نموده و ثابت نمود که در حین تست سه محوره به ازای تنش همه جانبه ثابت (σ_3) ، با افزایش تخلخل، نیاز به تنش محوری (σ_1) کمتری برای شکست نمونه می‌باشد. این امر در هر دو معیار موهر-کولمب و هوک-براون صادق می‌باشد. Palachik در زمینه ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره، تخلخل و مدول یانگ آزمایشهایی انجام داد و این سه پارامتر را به صورت تابعی به صورت زیر به یکدیگر مرتبط نمود.

$$\sigma_c = a \frac{E}{\phi} \quad (7)$$

وی مقدار a را برای ماسه سنگ Donetsk برابر ۰/۲۵ بدست آورد. در زمینه ارتباط میان تخلخل با مقاومت فشاری تک محوره، اندیس بار نقطه ای و مقاومت کششی حاصله از آزمایش برزیلی نیز تحقیقاتی توسط Palchik و Hatzor انجام شد. در حقیقت این دو محقق نشان دادند که نسبت σ_c/I_s که توسط ISRM برابر ۲۵-۲۰ پیشنهاد شده است، در مورد سنگ های متخلخل کمتر بوده و بین ۸ الی ۱۸ متغیر است.

۳- تاثیر تخلخل بر مقاومت اجسام متخلخل

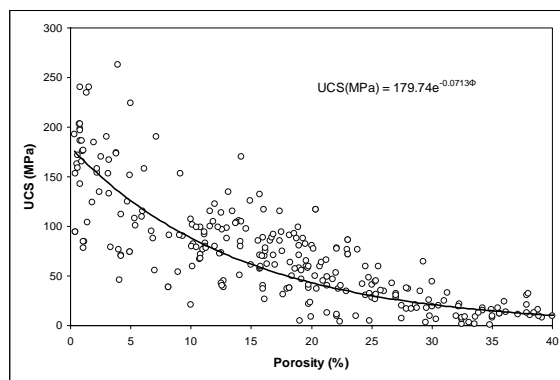
همانطور که در قسمت قبل اشاره شد. قسمت اعظم کارهای انجام شده بر محوریت ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره سنگها با تخلخل آنها بوده است و در زمینه آنها بوده است و در زمینه ارتباط بین تخلخل دیگر پارامترهای مقاومتی سنگ مانند مدولها (یانگ، برشی، حجمی)، نسبت پواسون و ... یا تحقیقاتی انجام نشده و یا در حد بسیار جزئی تنها به برخی روابط پرداخته است. از اینرو بررسی ارتباط بین تخلخل و پارامترهای مقاومتی ماسه‌سنگها در سطح جهانی و بدون توجه به نوع ماسه‌سنگ و به منظور ارائه روابطی معقول در این زمینه اقدام به جمع‌آوری نتایج تستهای آزمایشگاهی گردید. با انجام مکاتبات و همکاری محققین در این زمینه و انجام تعداد زیادی تست، مجموعه داده‌های نسبتاً قابل قبولی جمع‌آوری شد که

هر دسته با توجه به نوع آزمایش، میزان تخلخل را با برخی پارامترها ارتباط می‌داد. داده‌ها پس از جمع‌آوری، غربال شده و آزمایشهایی که نتایج خاص و ویژه‌ای داشتند از گردونه اطلاعات خارج شدند. در نهایت نتایج زیر در این زمینه بدست آمدند.

۱-۳- ارتباط بین تخلخل و مقاومت فشاری تک محوره

بررسی داده‌های جمع‌آوری شده حکایت از برقراری ارتباط بین ایندو پارامتر همانند آنچه که در Knudson ارائه نمود، می‌باشد. رابطه ۸ برای این منظور از برازش داده‌ها به دست آمد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$\sigma_c = 179.7e^{-0.0713\phi} \quad (8)$$



شکل ۱۱- اثر تخلخل بر مقاومت فشاری تک محوره ماسه‌سنگها

۲-۳- ارتباط بین تخلخل و نسبت پواسون استاتیکی و دینامیکی

با توجه به اینکه با افزایش تخلخل میزان تغییر طول در راستای شعاعی و محوری به نسبت تقریباً مساوی تغییر می‌کند لذا تغییر تخلخل نمی‌بایست منجر به تغییر فاحش در نسبت پواسون شود. شکل ۲ این فرضیه را به خوبی ثابت می‌کند. همانطور که دیده می‌شود ارتباط مشخصی بین ایندو پارامتر چه در حالت استاتیکی و چه در حالت دینامیکی بدست نیامد.

۳-۳- ارتباط بین تخلخل و مدول یانگ، برشی و حجمی در حالت استاتیکی و دینامیکی

داده‌های جمع‌آوری شده نشان دادند که بین این مدولها و تخلخل نیز رابطه‌ای نمایی برقرار است. اشکال ۳، ۴ و ۵ این ارتباط را نشان می‌دهند. روابط مربوطه به قرار زیر بدست آمدند.

$$E_s (GPa) = 76.785e^{-0.0787\phi} \quad (9)$$

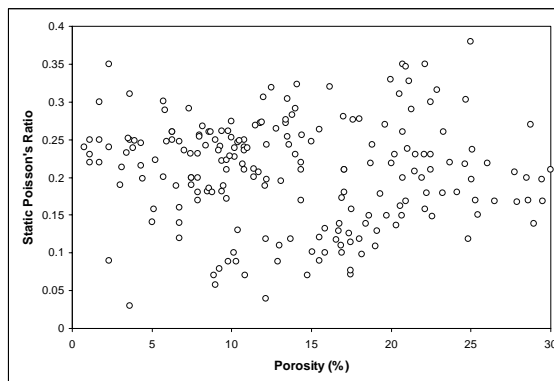
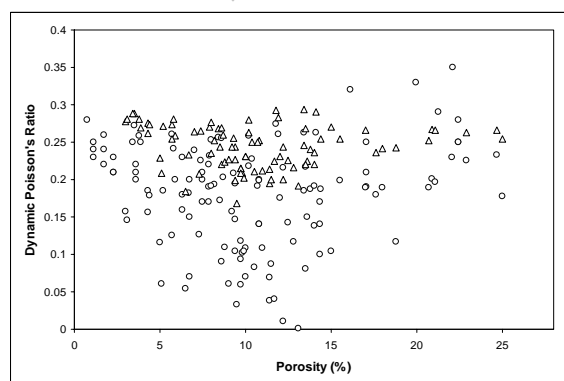
$$E_d (GPa) = 70.744e^{-0.0609\phi} \quad (10)$$

$$G_s (GPa) = 25.23e^{-0.0648\phi} \quad (11)$$

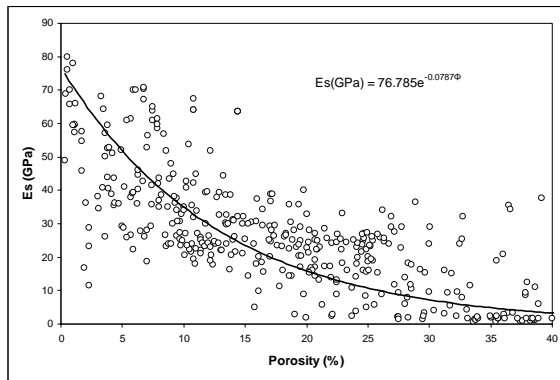
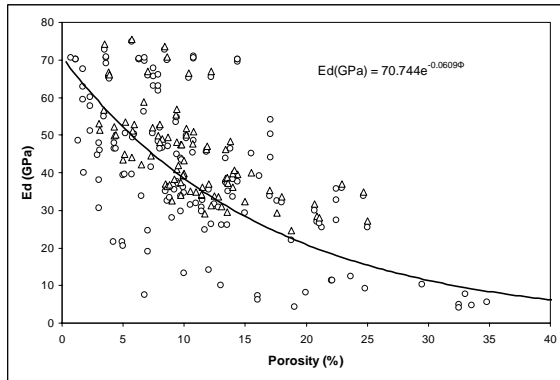
$$G_d (GPa) = 56.081e^{-0.0746\phi} \quad (12)$$

$$K_s (GPa) = 17.294e^{-0.0437\phi} \quad (13)$$

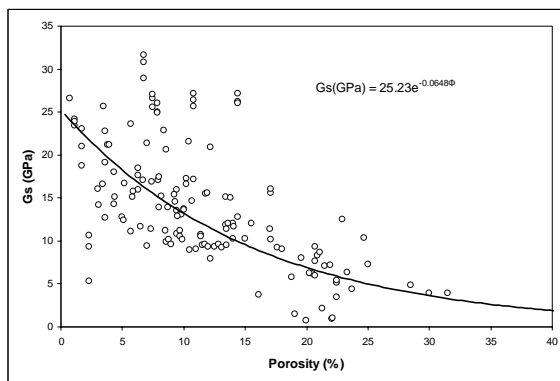
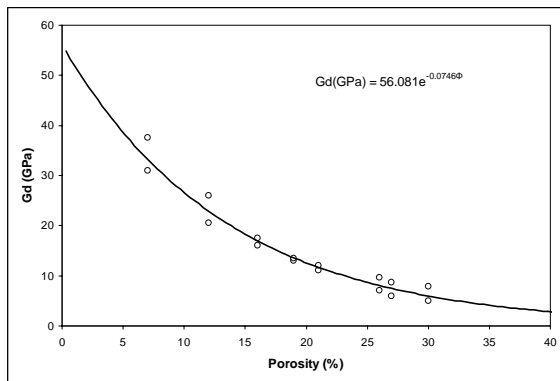
$$K_d (GPa) = 51.217e^{-0.0545\phi} \quad (14)$$



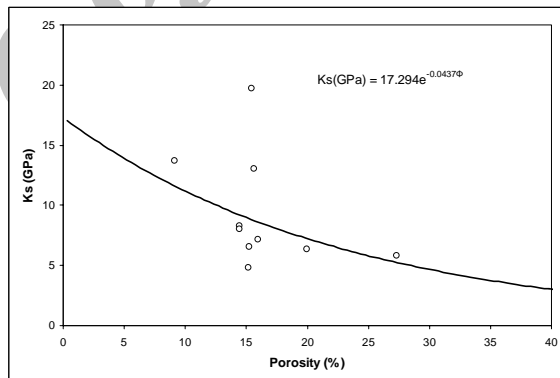
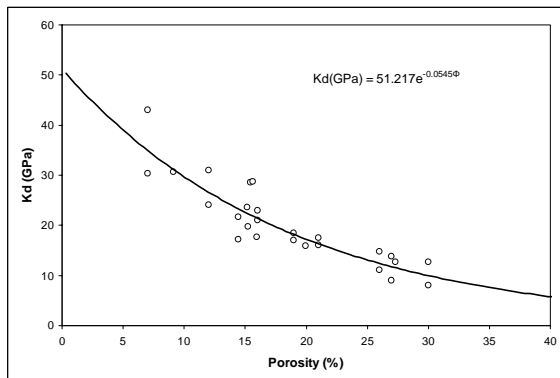
شکل ۱۲- اثر تخلخل بر نسبت پواسون استاتیکی و دینامیکی ماسه‌سنگها



شکل ۱۳- اثر تخلخل بر مدول یانگ استاتیکی و دینامیکی ماسه‌سنگها



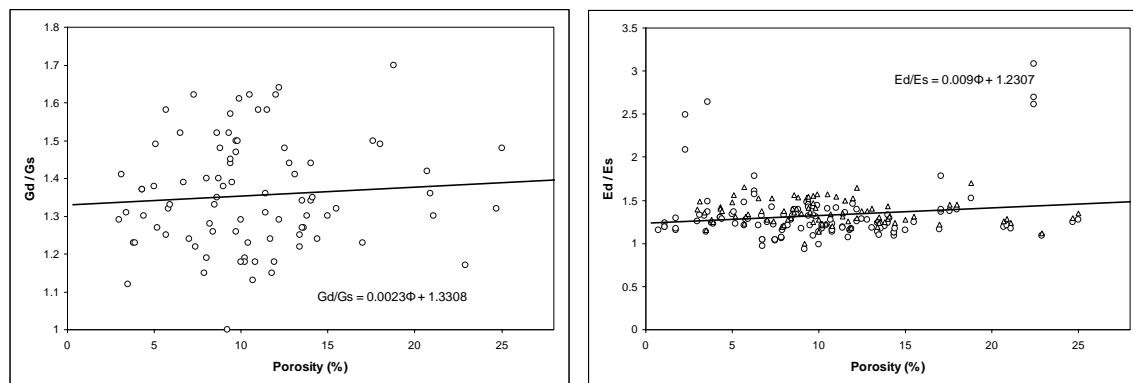
شکل ۱۴- اثر تخلخل بر مدول برشی استاتیکی و دینامیکی ماسه‌سنگها



شکل ۱۵- اثر تخلخل بر مدول حجمی استاتیکی و دینامیکی ماسه‌سنگها

۳-۴- ارتباط بین نسبت مدولها در حالت استاتیکی و دینامیکی و تخلخل

نسبت مدولها در دو حالت استاتیکی و دینامیکی (E_d/E_s و G_d/G_s) با تغییر میزان تنش همه جانبه تغییر می‌کند. بدین ترتیب که هر چه میزان تنش همه جانبه بیشتر شود این نسبتها کمتر شده و به یک میل می‌کنند. همانطور که می‌دانیم مقادیر دینامیکی مدولها با استفاده از زمان گذر موج از درون نمونه بدست می‌آید حال هر چه نمونه در اثر فشارهای جانبی متراکم‌تر شود (و در واقع میزان تخلخل آن کاهش یابد) میزان اختلاف این دو مدول کمتر شود. این امر به طور مشهود در شکل ۶ دیده می‌شود. چنانچه در این شکل دیده می‌شود با افزایش تخلخل، نسبت E_d/E_s افزایش می‌یابد. اگر به شکل فوق‌الذکر دقت شود متوجه می‌شویم که نسبت G_d/G_s تغییرات کمتری نسبت به E_d/E_s در برابر تغییرات تخلخل دارد و این پدیده ناشی از دخالت نسبت پواسون در مدول برشی می‌باشد و در مورد نسبت پواسون نیز همانطور که قبلاً اشاره شد تغییرات خاصی به ازای تغییرات تخلخل ندارد.

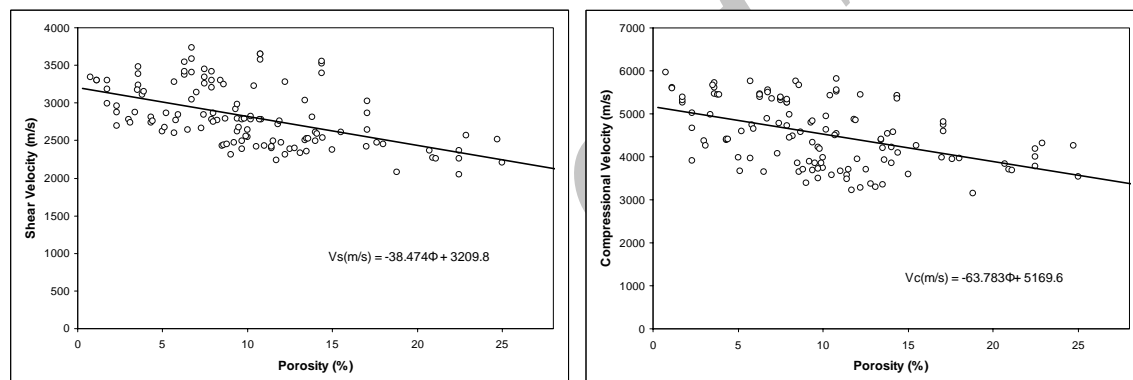
شکل ۱۶- اثر تخلخل بر E_d/E_s و G_d/G_s ماسه‌سنگها

۳-۵- ارتباط بین سرعت موج فشاری و برشی با تخلخل

همانطور که اشاره شد با افزایش تخلخل، فضای خالی بین دانه‌های ماسه افزایش یافته و با توجه به اینکه سرعت گذر موج از سیال که درون حفرات را پر کرده است، کمتر از سرعت گذر موج از دانه‌های جامد می‌باشد، لذا با افزایش تخلخل زمان گذر موج فشاری و برشی افزایش و سرعت موج فشاری و برشی کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$V_c = 14\phi + 12 \quad (15)$$

$$V_s = 17\phi + 13 \quad (16)$$



شکل ۱۷- اثر تخلخل بر سرعت موج فشاری و برشی ماسه‌سنگها

۴- نتیجه‌گیری

در مورد سنگهای متخلخل مثل ماسه‌سنگها، تخلخل نقش مهمی در پارامترهای مقاومتی ایفا می‌کند. برای بررسی این اثر داده‌های مختلف حاصل از نتایج تستهای آزمایشگاهی از سراسر دنیا جمع‌آوری شد و نتایج نشان داد که در این سنگها با افزایش تخلخل مقاومت فشاری تک‌محوره، مدولهای یانگ، برشی و حجمی به طور نمایی کاهش می‌یابند. ارتباط بین تخلخل و سرعت گذر موج فشاری و برشی به صورت خطی به دست آمد. در مواردیکه با فقدان داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ جهت تحلیل ژئومکانیکی مواجه هستیم (مانند بسیاری از چاه های نفتی)، این روابط می‌توانند به صورت مقادیری پیشنهادی در قالب راهنمای اولیه مورد استفاده قرار گیرند.

۵- مراجع

- [1] Al-Tahini A.M., Sondergeld C.H., and Rai C.S., (2004). "The Effect of Cementation on Static and Dynamic Properties in Jauf and Unayzah Formations at Saudi Arabia", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S.A., 26-29 September 2004.
- [2] MedlIn W.L. and Alhilal K.A., (1992). "Shear-Wave Porosity Logging in Sands", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 23 - 26 Sep. 1992.
- [3] Ohen H. A., (2003). "Calibrated Wireline Mechanical Rock Properties Model for Predicting and Preventing Wellbore Collapse and Sanding", SPE European Formation Damage Conference, Hague, The Netherlands, 13-14 May 2003.
- [4] García-Muñoz N.A., Garcia-Gavito D., and Ortega-Serrano R., (2005). "Assessment of Rock Mechanics Properties Starting from Geophysics Logs with the Garcia-Garcia: A General Model for Calculating Total Compressibility and Formation", SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 20 - 23 June 2005.
- [5] Al-Qahtani M. Y. and Rahim Z., (2001). "A Mathematical Algorithm for Modeling Geomechanical Rock Properties of the Khuff and Pre-Khuff Reservoirs in Ghawar Field", SPE Middle East Oil Show, Bahrain, 17-20 March 2001.
- [6] Sinha B. K., Kane M. R., and W. H. Borland, (2002). "Analyses of Sonic Data in an Indonesian Well for Formation Damage, Stresses, and Bedding", SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, 20-23 October 2002.
- [7] Raaen A. M., Hovem K. A., Jaranson H., and E. Fjær, (1996). "FORMEL: A Step Forward in Strength Logging", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, U S A, 69 October 1996.
- [8] Farquhar R.A. and Somerville J. M., (1994). "Porosity as a Geomechanical Indicator: An Application of Core and Log Data and Rock Mechanics", European Petroleum Conference held In London, U.K., 25-27 October 1994.
- [9] Sarda J. P., Kessler N., Wicquart E., Hannaford K., and Deflandre J.P., (1993). "Use of Porosity as a Strength Indicator for Sand Production Evaluation", SPE Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, 3-6 October 1993.
- [10] Miskimins J., Hurley N., and Graves R., (2002). "A Method for Developing Rock Mechanical Property Logs using Electrofacies and Core Data", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September-2 October 2002.
- [11] Chardac O., Brie A., and Chouker A. C., (2003), "Correlations of Shear vs. Compressional in Shaly Sands and Application to Quicklook Hydrocarbon Detection", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., 5 - 8 October 2003.
- [12] Pedersen S. H. and Rhett D. W., (1998). "A Parametric Study of Compressional and Shear Wave Velocities in Ekofisk Reservoir Chalk", SPE/ISRM Eurock '98, Trondheim, Norway, 8-10 July 1998.
- [13] Edlmann K., Somerville J.M., Hamilton S.A., and Crawford B.R., (1998), "Predicting Rock Mechanical Properties from Wireline Porosities", SPE/ISRM Eurock '96, Trondheim, Norway, 8 - 10 July 1996.
- [14] Yale D.P. and Jamieson Jr. W.H., (1994), "Static and Dynamic Rock Mechanical and Panama Fields, Kansas Properties in the Hugoton", SPE Mid-Continent Gas Symposium, Amarillo, Texas, 22-24 May 1994.
- [15] Ramona M. N. and Charles A. K., (1979). "Acoustic and Biaxial Measurement Of Rock Mechanical Properties for Interpretation of Logs for design of Well-Completion Operations", 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Las Vegas, Nevada, September 28 - October 3, 1973.
- [16] Pirson S. J., (1963). "Handbook of Well Log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J.
- [17] Serra O., (1984). "Fundamentals of Well-Log Interpretation", Vol. 1, The Acquisition of Logging Data, Elsevier Publication.
- [18] Brock J., (1986). "Applied Open-Hole Log Analysis - A Step-by-step Course in Well Log Interpretation from Fundamentals to Advance Concept", Gulf Publication Company, Houston, Texas.
- [19] Curtin University of Technology, (2005). "Formation Evaluation", Master of Petroleum Engineering Course Note.
- [20] Bodaghabadi, S., (2004). "Application of Rock Mechanics in Sand Production Mechanism and Its Prediction Methods", 4th Iranian Petroleum Conference, December 2005, Ahvaz, Iran.
- [21] Verwaal, W. and Mulder, A., (1993). "Estimating Rock Strength with the Eqoutip Hardness Tester", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 30, No. 6, pp: 659-662.
- [22] Vásárhelyi, B., (2005). "Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of the Miocene Limestone", Rock Mechanics and Rock Engineering. (2005) 38 (1), 69-76.

- [23] Palchik, V. and Hatzor, Y. H., (2004). "The Influence of Porosity on Tensile and Compressive Strength of Porous Chalks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (2004) 37 (4), 331-341.
- [24] Bagde, M. N. and Petroš, V., (2005). "Waveform Effect on Fatigue Properties of Intact Sandstone in Uniaxial Cyclical Loading", *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (2005) 38 (3), 169-196.
- [25] Palchik, V., (1999). "Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones", *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (1999) 32 (4), 303-309.
- [26] Hecht, C. A., Bönsch, C., and Bauch, E., (2005). " Relations of Rock Structure and Composition to Petrophysical and Geomechanical Rock Properties: Examples from Permocarboniferous Red-Beds", *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (2005) 38 (3), 197-216.

Archive of SID