

ارتباط تراکم‌پذیری منافذ با ضریب سیمان‌شدگی با هدف تأثیر بافت و نوع تخلخل در سنگ‌های کربناته

عزت اله کاظم‌زاده^{۱*}، جعفر ولی^۲ و حسام آلوقی بختیاری^۲

^۱استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۲عضو هیات علمی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

bakhtiarh@ripi.ir, valij@ripi.ir, Kazemzadehe@ripi.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۹/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۶/۲۵)

چکیده

در این تحقیق تأثیر بافت و نوع تخلخل نمونه سنگ‌های مخزن کربناته در تراکم‌پذیری (عکس مدول بالک) و همچنین ارتباط بین تراکم‌پذیری نمونه‌ها با ضریب سیمان‌شدگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تعداد ۹۰ نمونه استوانه‌ای (پلاگ) از سنگ‌های کربناته میدان نفتی در ناحیه جنوب غرب ایران تهیه شد. بررسی تصاویری تی‌اسکن و مقاطع نازک میکروسکوپی به منظور تعیین نوع کانی، نوع بافت و تخلخل صورت گرفته است. بررسی‌های زمین‌شناسی روی نمونه‌ها نشان دهنده آن است که فراوان‌ترین بافت در سنگ‌ها دولستون و بیشترین تخلخل نیز مربوط به نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای بوده است. در این تحقیق نمودارهای ضریب سیمان‌شدگی بر حسب تراکم‌پذیری منافذ برای انواع تخلخل و بافت نمونه‌های کربناته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل و یا با تغییر بافت از دولستون ماسه‌ای به مالدستون، تراکم‌پذیری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار مؤثر، تراکم‌پذیری کاهش و ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات تراکم‌پذیری منافذ در نمونه‌های دارای ضریب سیمان‌شدگی کم، بیشتر از نمونه‌های با ضریب سیمان‌شدگی زیاد است.

واژه‌های کلیدی: سنگ کربناته، تراکم‌پذیری، تخلخل، ضریب سیمان‌شدگی

Relationship between pore volume compressibility and cementation factor with the aim of considering the effect of texture and pore type in carbonate rocks

Ezattallah Kazemzadeh^{1*}, Jafar Vali¹ and Hessam Aloki Bakhtiar¹

¹Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 20 December 2008, accepted: 16 September 2009)

Summary

Pore volume compressibility, which is the reverse of bulk modulus, is one of the most important and effective parameters of mechanical, seismic and reservoir properties of hydrocarbon reservoirs. The investigation of elastic modulus is essential for using geophysical data in reservoir production and EOR. In order to determine the pore compressibility of Asmari carbonate reservoir rocks, a total of 90 samples from different types of carbonate rocks were selected from oil reservoir for this study. Petrographical analyses were conducted to determine the effect of textures; type and value of porosity on

*Corresponding author:

kazemzadehe@ripi.ir

*نگارنده رابط:

pore compressibility, and then the effect of net confining pressure and pore compressibility on the Archie cementation coefficient was studied. To achieve this purpose, after geological examinations and grouping the samples based on type of textures and pores, the relationships between cementation coefficient and pore compressibility were calculated.

Pore compressibility experiments as well as the determination of the cementation factor were performed using the "Overburden FRF Rig" apparatus. Hydrostatic pressure up to 10000 psi may be applied to samples via this apparatus. The sample that is fully reservoir brine saturated is located in a rubber sleeve of hydrostatic core holder and surrounded by two rings. After purging the system, the confining pressure was increased from 435 psi up to 4000 psi. The increase of pressure on rocks causes pore compaction and expels the fluid from the sample. The volume of fluid expelled from the samples shows the volume of pore volume reduction due to the increase of pressure. Pore compressibility was determined by derivation of each pressure point by plotting the logarithm of variation of pore volume reduction vs. effective confining pressure. In order to study pore compressibility under hydrostatic pressure, five steps of increasing the net pressure, which were 435, 1000, 2000, 3000 and 4000 psi, were selected.

Pore compressibility is a function of porosity and it increases as porosity decreases. The power function, expressed as $C_p = a(P)^b$, usually shows the best fit for the compressibility and net pressure relationship.

The results of this study show that for almost all of the selected samples, the cementation factor increases when the pressure is increased. The compaction of rocks causes changes in the structure of the pores and grain shapes, and reduces the pore volumes. In a few of the samples, increasing the pressure caused a reduction in the cementation factor. The main reason for this reduction could be due to damage to the structure of the rocks.

Two main differences were observed between the changes in compressibility and cementation factor: (1) by increasing compressibility, the reduction of the cementation factor is accelerated in samples with a higher cementation factor and (2) changes of pore compressibility are higher for samples with a lower cementation factor.

Isolated porosity and separated vug porosity are closed by a slight increase of pressure in comparison with connected porosity, and therefore reduction in cementation factor is correlated with low pore compressibility. An increase of dolomitization in the samples from packstone to dolopackstone and dolostone causes better connections among pores and the effect of pore compressibility is more pronounced. A summary of results is as follows:

- 1) The slope of curve increased in a cross plot of the measures of cementation coefficient vs. compressibility due to a change in texture from packstone to dolopackstone and dolostone.
- 2) Increasing the net confining pressure increases cementation factor.
- 3) Variation of pore compressibility is higher in the samples with lower a cementation factor.
- 4) The cementation factor is reduced by an increase of pore compressibility, and reduction of cementation factor occurred faster in the samples with a higher cementation factor.
- 5) In the investigated formation, the value of pore compressibility is dependent on the texture, type and value of porosity.
- 6) Pore compressibility is higher in sandy dolostone with porosity measuring less than 15 percent compared to other carbonate textures, and it decreases with change in texture from sandy dolostone to mudstone.

A power function in the form of $C_p = a(P)^b$ usually shows the best fit for compressibility and the net confining pressure relationship.

Key words: Carbonate rocks, pore volume compressibility, porosity, cementation factor

۱ مقدمه

تراکم‌پذیری یا همان عکس مدول بالک منافذ سنگ‌های مخازن هیدروکربوری، یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر خواص مخزنی، لرزه‌ای و مکانیکی مخازن هیدروکربوری است. در تحقیقات ژئوفیزیکی، بررسی مدول‌های کشسان به منظور به‌کارگیری داده‌های ژئوفیزیکی در تولید از مخازن و فرایندهای ازدیاد برداشت ضروری است. لذا شناخت رفتار سنگ مخزن نسبت به تغییرات فشار موثر در ارزیابی مخازن هیدروکربنی حائز اهمیت است.

براون و کورینگا (۱۹۷۵) با اضافه کردن متغیر تراکم‌پذیری، مدلی برای محاسبه مدول بالک سنگ اشباع برای محیط‌های متخلخل با هندسه منافذ متغیر عرضه کردند. تحقیقات نیومن (۱۹۷۳) در ارتباط با مدول بالک روشن ساخت که تغییرات تراکم‌پذیری بر حسب تغییرات در تخلخل در ماسه‌سنگ‌های متراکم، نسبت به سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگ‌های شکننده و ماسه‌سنگ‌های نامتراکم، تفاوت فاحشی دارند. به بیان وی ممکن است همبستگی خوبی بین مدول بالک و تخلخل اولیه برای ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی با خواص زمین‌شناسی یکسان وجود داشته باشد. همچنین گرینولد و همکاران (۱۹۸۱) مدلی برای تراکم‌پذیری حجم منافذ در ماسه‌سنگ‌ها عرضه کردند. آنها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تخلخل اولیه، مقدار شیل، فاکتور شکل منافذ، مشخصات درزه‌ها، نوع کانی‌ها و مدول‌های بالک آنها، مدلی برای برآورد کردن تراکم‌پذیری منافذ سنگ بر حسب فشار همه‌جانبه برای سه نوع ماسه‌سنگ معرفی کردند. حراری و همکاران (۱۹۹۴) تحقیقات آزمایشگاهی روی تراکم‌پذیری منافذ نمونه‌های آهکی مخزنی نفتی واقع در عربستان سعودی به‌انجام رسانده‌اند. آنها با اعمال فشار همه‌جانبه تا ۴۵۰۰ (پوند بر اینچ مربع) بر نمونه‌های استوانه‌ای از مغزه، تراکم‌پذیری منافذ سنگ را تعیین

کردند. نتایج حاصل بیانگر ارتباط خطی منفی بین تراکم‌پذیری منافذ و فشار مؤثر روی نمودار تمام لگاریتمی است. ماوکو و موکرجی (۱۹۹۵) با اندازه‌گیری سرعت‌های لرزه‌ای، تراکم‌پذیری منافذ را تعیین کردند و روشن ساختند که تراکم‌پذیری منافذ با سرعت‌های لرزه‌ای در سنگ‌های خشک و اشباع در ارتباط است و می‌توان از آن در معادله گاسمن (۱۹۵۱) برای جایگزینی سیال استفاده کرد و به‌منظور بررسی مدول بالک سنگ اشباع با معادله گاسمن اندازه‌گیری دقیق تراکم‌پذیری منافذ ضروری است. مقدار تراکم‌پذیری منافذ به نوع کانی‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده سنگ و بافت آن بستگی دارد. به لحاظ تنوع بافتی در مخازن کربناته، تعیین پارامتر تراکم‌پذیری منافذ برای گونه‌های متفاوت سنگ کربناته لازم است. تحقیقات صورت‌گرفته به منظور بررسی اثر فشار همه‌جانبه روی ضریب سیمان‌شدگی بیشتر روی ماسه‌سنگ‌ها، نمونه‌های مصنوعی تشکیل شده از گلوله‌های ریز شیشه‌ای، ماسه‌سنگ‌های محصورشده در پوشش‌های اپوکسی رزین بوده و روی نمونه‌های کربناته، تحقیقات کمتری شده است. در خصوص تاثیر فشار همه‌جانبه روی ضریب سیمان‌شدگی محمود و همکاران (۱۹۹۱) آزمایش‌هایی صورت داده‌اند. آنها روی نمونه‌های مصنوعی از جنس آلوندوم تغییرات قابل ملاحظه‌ای در تخلخل و در نتیجه مقدار ضریب سیمان‌شدگی مشاهده نکردند، اما در نمونه‌های ماسه‌سنگی با کاهش کم در مقدار تخلخل افزایش کوچک در مقدار ضریب سیمان‌شدگی مشاهده کردند. این تغییرات احتمالاً با تصحیح تخلخل، کمتر خواهد بود. آنان دلیل افزایش ضریب سیمان‌شدگی با فشار همه‌جانبه قبل از تصحیح تخلخل را پیچیدگی سامانه تخلخل کربناته‌ها عنوان کرده‌اند. لانگرون و همکاران (۱۹۸۹) نمونه‌های زیادی را تحت فشارهای همه‌جانبه ۴۰۰ الی ۲۹۰۰ (پوند بر اینچ مربع) قرار دادند و افزایش در مقدار ضریب مقاومت ویژه

نوع تخلخل در نمونه‌ها است. سایر انواع تخلخل مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی شامل تخلخل‌های، قالبی (MO)، بین‌بلوری (IX)، بین‌دانه‌ای (IP) و شکاف‌دار (FR) هستند که برحسب تخلخل غالب موجود در نمونه‌ها به ترتیب فراوانی شامل حفره‌ای- بین‌بلوری، قالبی- حفره‌ای، بین‌بلوری- حفره‌ای، بین‌دانه‌ای، قالبی، شکاف‌دار- حفره‌ای‌اند.

۳ شرح آزمایش

خواص پتروفیزیکی شامل تخلخل و تراوایی مطلق نسبت به هوا نمونه‌های پلاگ انتخابی با قطر $3/8$ سانتی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر پس از فرایندهای شستشو و خشک‌شدن، اندازه‌گیری شد. در آزمایشگاه با استفاده از آب مقطر و نمک خالص، آب شور سازندی بازسازی شد. به منظور اشباع کردن نمونه‌ها با آب شور سازندی، نمونه‌ها درون اشباع‌کننده مغزه‌ها و در یک دستگاه بسته قرار داده شدند. اشباع کردن نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در فشار ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) ادامه می‌یابد تا نمونه ۱۰۰ درصد از آب سازندی اشباع شود.

آزمایش‌های تراکم‌پذیری سنگ مخزن به همراه تعیین ضریب سیمان‌شدگی با دستگاه Overburden Rig صورت گرفته است. در این دستگاه می‌توان فشار همه جانبه سه‌محوری تا ۱۰۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) را به نمونه اعمال کرد. نمونه پس از اشباع کامل در نمونه‌نگهدار دستگاه با آستر لاستیکی که با دو حلقه محاط شده است، قرار داده می‌شود. پس از اطمینان از هواگیری بخش‌های متفاوت دستگاه، فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه از ۴۳۵ تا ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) افزایش یافت. افزایش فشار همه‌جانبه بر سنگ عامل تراکم منافذ سنگ و باعث خروج سیال از نمونه می‌شود که میزان سیال خروجی از نمونه نشان‌دهنده میزان کاهش حجم فضای خالی موجود در نمونه به واسطه افزایش فشار همه‌جانبه است. مقدار تراکم‌پذیری سنگ مخزن با رسم لگاریتمی

سازندی به مقدار ۱۵ درصد برای ماسه‌سنگ‌ها و ۱۱ درصد برای کربناته‌ها را گزارش کردند. در واقع در سنگ‌های کربناته، تغییرات ضریب سیمان‌شدگی با افزایش فشار همه‌جانبه نسبت به ماسه‌سنگ‌ها خیلی کمتر است. فوک و مان (۱۹۸۷) روشن‌ساختند که با افزایش فشار همه‌جانبه در تخلخل‌های قالبی، مقدار ضریب سیمان‌شدگی بیشتر از دولومیت‌های با تخلخل بین‌دانه‌ای افزایش می‌یابد. نتیجه کلی تحقیقات آنها بیانگر این مطلب است که افزایش در ضریب سیمان‌شدگی با افزایش فشار همه‌جانبه، تابعی از فشار همه‌جانبه حتی بعد از اعمال تصحیحات مربوط به تخلخل است.

در این تحقیق به منظور تعیین مدول بالک منافذ سنگ مخزن کربناته آسماری تعداد ۹۰ نمونه از گونه‌های متفاوت سنگ کربناته از یک میدان نفتی انتخاب شد. ابتدا به منظور شناسایی تاثیر بافت، نوع تخلخل و مقدار تخلخل بر تراکم‌پذیری منافذ، پتروگرافی نمونه‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و در نهایت تاثیر فشار مؤثر و تراکم‌پذیری منافذ بر ضریب سیمان‌شدگی آرچی بررسی شده است. بدین منظور پس از تحقیقات زمین‌شناسی و تقسیم‌بندی نمونه‌ها براساس نوع بافت و نوع منافذ، روابط ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ برای گونه‌های متفاوت سنگ کربناته سازند آسماری مورد بررسی، آورده شده است.

۲ پتروگرافی نمونه‌ها

بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی نمونه‌ها نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها بدون شیل‌اند و براساس طبقه‌بندی دانه‌ایم (۱۹۶۲) برای انواع بافت به ترتیب فراوانی شامل دولوستون، پکستون، دولوپکستون، دولوکستون، دولومادستون، وکستون، دولستون ماسه‌ای و مادستون هستند. همچنین بررسی‌های مقاطع نازک به همراه تصاویر سی‌تی‌اسکن نمونه‌ها نشان داد که براساس طبقه‌بندی چوکت و پری (۱۹۷۰) تخلخل حفره‌ای (V) فراوان‌ترین

متخلخل درحکم یک دستگاه شامل دو مولفه سیال و جامد بسته است، بدان معنا که آب درون سنگ تحت هیچ شرایطی از سنگ خارج نمی‌شود. بنابراین با توجه به فرض‌های فوق، کاربرد معادله گاسمن در محیط‌های متخلخل واقعی خصوصاً سنگ‌های کربناته دارای عدم قطعیت است. در محیط‌های متخلخل واقعی فضای منافذ بی‌قاعده است و لزوماً در کل سنگ پیوسته نیست. براون و کورینگا (۱۹۷۵) مدلی برای محاسبه مدول بالک سنگ اشباع با اضافه کردن متغیر تراکم‌پذیری برای محیط‌های متخلخل با هندسه منافذ متغیر عرضه کردند.

$$K_{st} = K_{dy} + \frac{\alpha^2}{\alpha/K_s + \phi(1/K_f - 1/K_\phi)} \quad (2)$$

که α ضریب بیوت و به صورت $\alpha = 1 - (K_{dry} / K_s)$ تعریف شده است. $(K_\phi)^{-1}$ تراکم‌پذیری منافذ سنگ و طبق تعریف، نرخ تغییرات حجم فضای خالی موجود در سنگ به تغییرات فشار موثر است، به طوری که برای محیط‌های متخلخل همگن، K_ϕ همان K_s است. زیرا در یک محیط متخلخل همگن با تغییر فشار منافذ و ثابت نگه‌داشتن اختلاف فشار، بر سطوح داخلی و خارجی منافذ، یک مقدار فشار اعمال می‌شود.

به منظور بررسی تراکم‌پذیری منافذ در شرایط فشار هیدرواستاتیک و بررسی تغییرات آن با تغییر فشار موثر، پنج مرحله افزایش فشار موثر برای هر نمونه شامل فشارهای ۴۳۵، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) در نظر گرفته شد. نمودار تراکم‌پذیری نمونه‌ها در فشارهای موثر در مقابل تخلخل اولیه (تخلخل در فشار موثر صفر) نشان می‌دهد که تراکم‌پذیری منافذ تابع اندازه تخلخل است به طوری که در شکل ۱ با کاهش میزان تخلخل، تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد. تابع توانی به شکل $C_p = a(P)^b$ عموماً بهترین برازش را برای ارتباط بین تراکم‌پذیری و فشار موثر نشان می‌هد (ژانگ و همکاران ۱۹۹۰؛ حراری و همکاران ۱۹۹۴).

تغییرات کاهش حجم منافذ برحسب فشار همه‌جانبه موثر و مشتق‌گیری در هر نقطه تعیین شده است.

مقاومت الکتریکی خاصیت مهم پتروفیزیکی سنگ‌های مخزن است. این اطلاعات به منظور واسنجی (کالیبراسیون) لاگ‌های الکتریکی و همچنین برآورد کردن صحیح اشباع‌شدگی آب در مخازن هیدروکربوری از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از اساسی‌ترین فرمول‌های اشباع‌شدگی، رابطه آرچی است.

$$F = R_0/R_w = 1/\phi^m \quad (1)$$

که در آن R_0 مقاومت ویژه الکتریکی نمونه صد در صد اشباع از آب سازند، R_w مقاومت ویژه آب سازند، ϕ تخلخل نمونه و m نیز ضریب سیمان‌شدگی هستند. بنابراین با اندازه‌گیری مقاومت اهمی نمونه در هر مرحله از فشار همه‌جانبه و تصحیح دمایی و همچنین اندازه‌گیری مقاومت آب سازند می‌توان در نمودار لگاریتمی مقدار F برحسب تخلخل، ضریب سیمان‌شدگی را در هر فشار همه‌جانبه محاسبه کرد. فاکتور m پارامتر پیچیده‌ای است و عواملی چون تخلخل، مقدار تخلخل ثانویه، قطر گلوگاه‌ها، توزیع اندازه گلوگاه‌ها و نوع تخلخل بر بزرگی آن تأثیر دارد. مقدار m می‌تواند از کمتر از یک تا بیشتر از پنج متغیر باشد (رضایی و همکاران، ۲۰۰۷).

۴ تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تراکم‌پذیری منافذ

به طور متداول در صنعت نفت و گاز از معادله گاسمن برای برآورد کردن تأثیر سیالات گوناگون روی مدول بالک سنگ اشباع به منظور تفسیر نگارهای صوتی و بی‌هنجاری‌های دامنه در داده‌های بازتابی لرزه‌ای استفاده می‌کنند (گاسمن ۱۹۵۱؛ بیوت ۱۹۵۶؛ براون و کورینگا ۱۹۷۵؛ مورفی و همکاران ۱۹۹۳). معادله گاسمن در بسامدهای کم صادق است و دارای فرض‌های اولیه اساسی است، از جمله همگن و همسانگرد بودن سنگ متخلخل، به هم پیوسته و مرتبط بودن همه حفره‌ها؛ و یا اینکه سنگ

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تراکم‌پذیری در هر دو حالت، مربوط به دولومیت‌های ماسه‌ای است. همچنین با افزایش میزان خمیره نسبت به دانه در سنگ (تغییر بافت از پکستون به مادستون) مقدار تراکم‌پذیری منافذ کاهش می‌یابد. که در آن C_p تراکم‌پذیری منافذ و P فشار موثر است.

$$C_p = 3611.3(P)^{-0.8147} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.98.$$

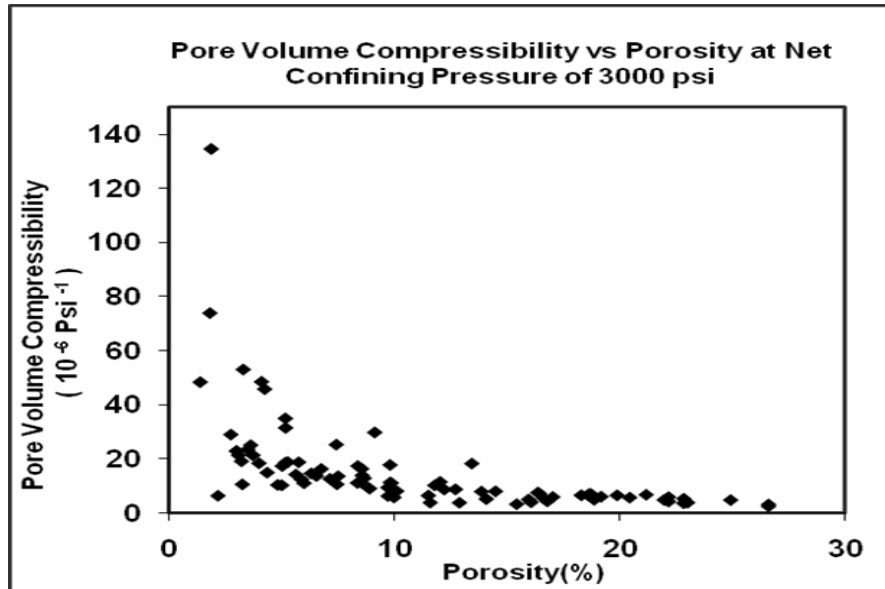
در شکل ۲ برای بافت‌های گوناگون تابع توانی بهترین برازش را بر داده‌ها داشته است. نتایج مربوطه برای همه نمونه‌ها بر مبنای بافت شامل ضرایب تابع توانی (a, b) و ضریب همبستگی (R^2) در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ضرایب برازش تابع توانی (a, b) و ضریب همبستگی تراکم‌پذیری منافذ برحسب فشار مؤثر برای بافت‌های متفاوت.

R^2	b	a	بافت سنگ
0.99	-0.5498	5744.8	دولوستون ماسه‌ای
0.99	-0.5371	2794.9	پکستون
0.99	-0.774	2443.9	وکستون
0.98	-0.8235	12270	دولوپکستون
0.96	-0.8065	1046.6	دولوستون
0.98	-0.736	4073.5	دولووکستون
0.96	-0.8966	12028	دولومادستون
0.99	-0.8237	9180.5	مادستون

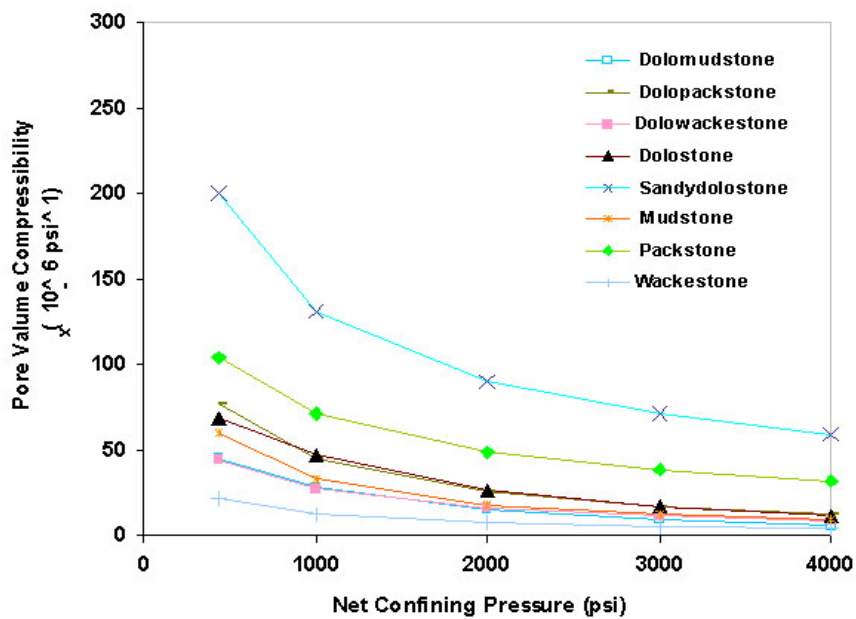
جدول ۲. ضرایب برازش تابع توانی (a, b) تراکم‌پذیری منافذ برحسب فشار مؤثر برای انواع منافذ.

R^2	b	a	نوع منافذ غالب
0.96	-1.1246	65.667	قالبی - حفره‌ای
0.76	-1.1565	83.194	حفره‌ای - بین کریستالی
0.97	-1.0935	64.959	بین کریستالی - حفره‌ای
0.96	-1.0794	92.84	شکافدار
0.98	-1.2446	94.731	قالبی
0.98	-1.1095	75.457	بین دانه‌ای
0.99	-1.014	105.09	حفره‌ای

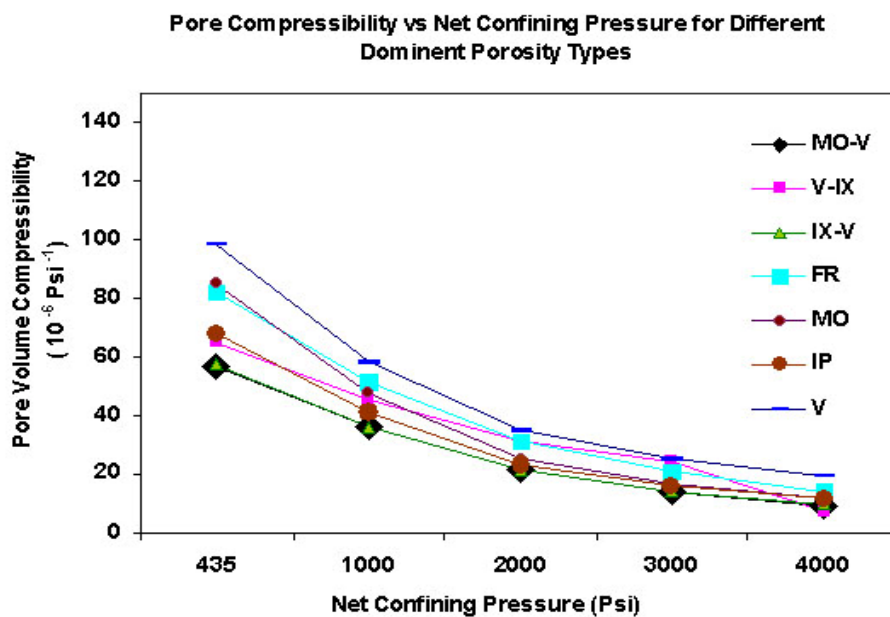


شکل ۱. تراکم‌پذیری منافذ در فشار مؤثر ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) برحسب تخلخل اولیه.

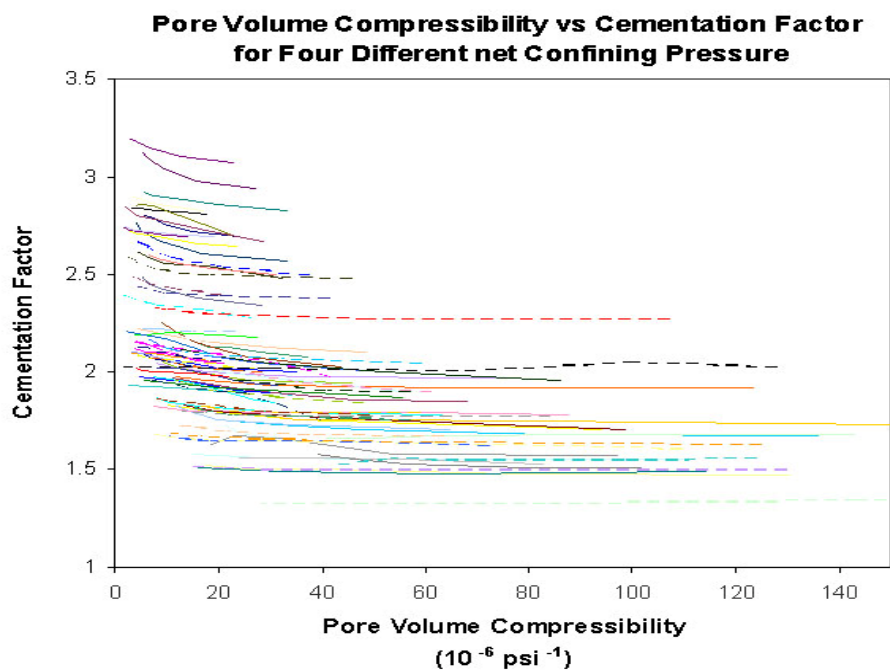
Pore Volume Compressibility Vs Net Confining Pressure For Different Rock Textures



شکل ۲. تراکم‌پذیری منافذ برحسب فشار مؤثر برای بافت‌های متفاوت.



شکل ۳. تراکم‌پذیری منافذ برحسب فشار مؤثر برای انواع تخلخل غالب.



شکل ۴. ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ برای نمونه‌های متفاوت.

به شرح زیر دارند.

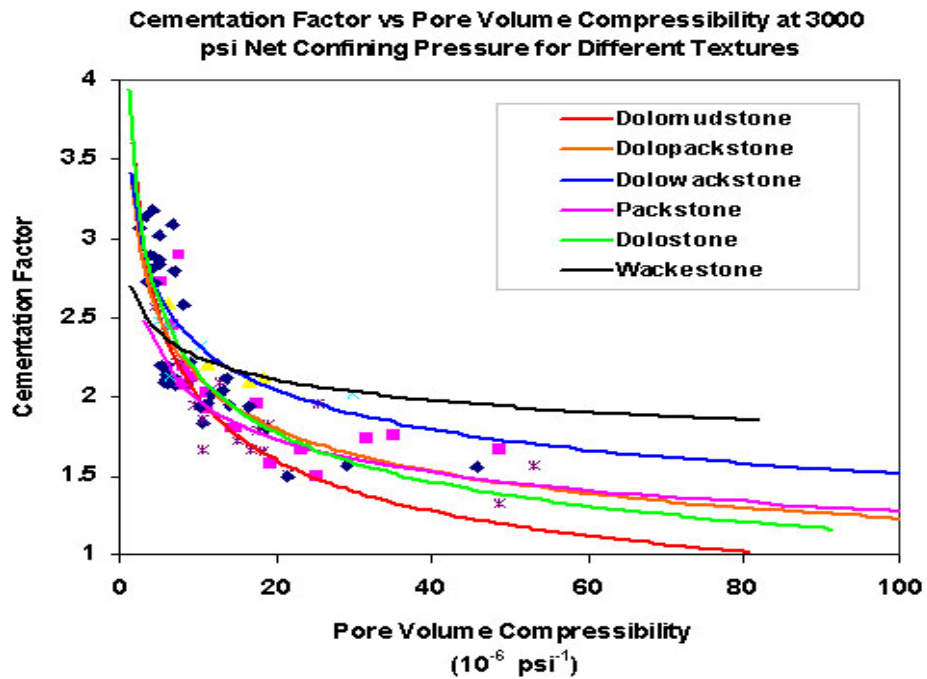
الف- با افزایش تراکم‌پذیری منافذ در نمونه‌های با ضریب سیمان‌شدگی بیشتر، کاهش ضریب سیمان‌شدگی سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

ب- در نمونه‌های دارای ضریب سیمان‌شدگی کمتر، تغییرات تراکم‌پذیری منافذ از فشار مؤثر ۴۳۵ (پوند بر اینچ مربع) تا ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) به مراتب بیشتر از نمونه‌های دارای ضریب سیمان‌شدگی بیشتر بوده است. این روند تغییرات به دلیل آن است که در نمونه‌های دارای تخلخل‌های منزوی (ایزوله) و بعضاً حفره‌ای، شبکه ارتباطی منافذ با اعمال فشار مؤثر کمتری نسبت به نمونه‌های دارای تخلخل‌های مرتبط بسته شده است، بنابراین کاهش ضریب سیمان‌شدگی در تراکم‌پذیری‌های کم اتفاق می‌افتد. شکل‌های ۵ و ۶ ارتباط بین ضریب سیمان‌شدگی و تراکم‌پذیری منافذ را برای انواع بافت‌ها و تخلخل‌های غالب سنگ نشان می‌دهد. با تغییر بافت شیب نمودار لگاریتمی ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ تغییر می‌کند به طوری که با افزایش دولومیتی‌شدن نمونه‌ها از پکستون به دلوپکستون و دولوستون، این شیب افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دولومیتی‌شدن فضای متخلخل مرتبط افزایش می‌یابد و در نتیجه انتظار می‌رود که تأثیر تراکم‌پذیری منافذ، بیشتر نمایان شود. همچنین با تغییر نوع تخلخل، شیب نمودار ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ تغییر می‌کند. در شکل‌های ۷ و ۸ معادله بهترین برازش نمایی برای ارتباط بین ضریب سیمان‌شدگی و تراکم‌پذیری منافذ برای انواع بافت و تخلخل غالب به تفکیک آورده شده است، به طوری که مقدار متوسط ضریب همبستگی بین ضریب سیمان‌شدگی و تراکم‌پذیری منافذ برای بافت‌های گوناگون، برابر ۰/۷۱ و برای انواع تخلخل غالب برابر ۰/۶۴ است.

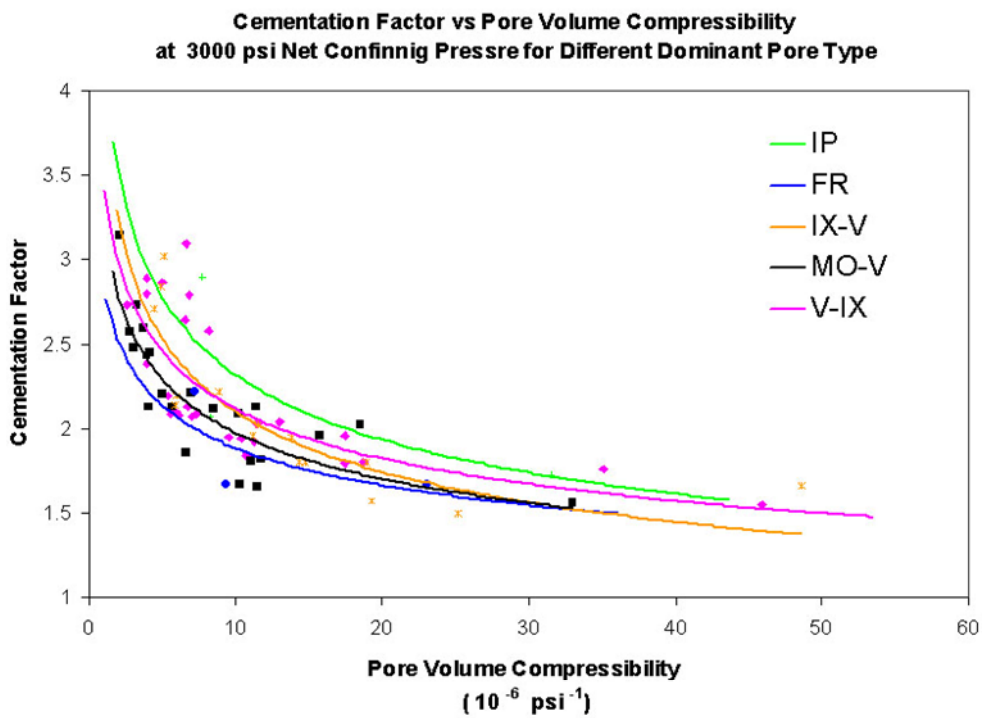
شکل ۳ اثر تخلخل غالب در سنگ را روی تراکم‌پذیری منافذ نشان می‌دهد. هر منحنی بیانگر مقدار میانگین تراکم‌پذیری برای تخلخل غالب مورد نظر است. بهترین برازش نمودارهای تراکم‌پذیری منافذ برحسب فشار مؤثر در این حالت نیز تابع توانی به شکل $C_p = aP^b$ برای انواع تخلخل غالب است. و نتایج مربوط برای همه نمونه‌ها شامل ضرایب تابع توانی (a, b) و ضریب همبستگی (R^2) در جدول ۲ آمده است.

۵ ارتباط فشار و تراکم‌پذیری منافذ با ضریب سیمان‌شدگی

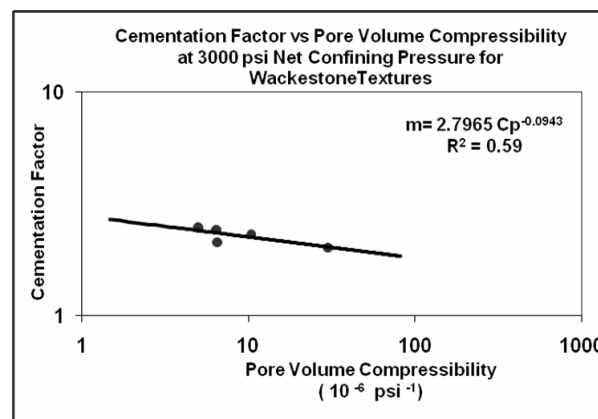
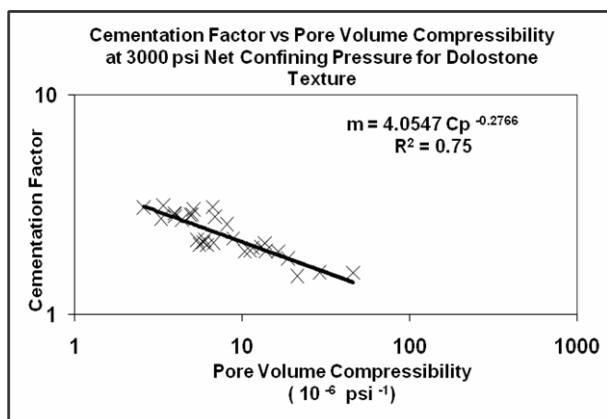
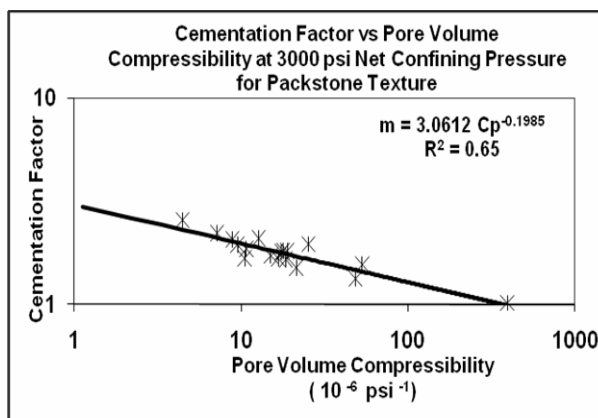
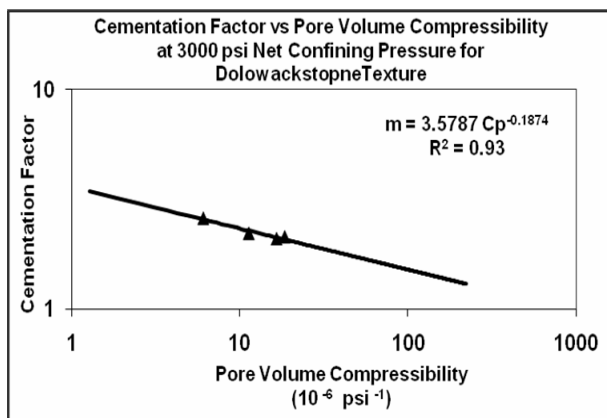
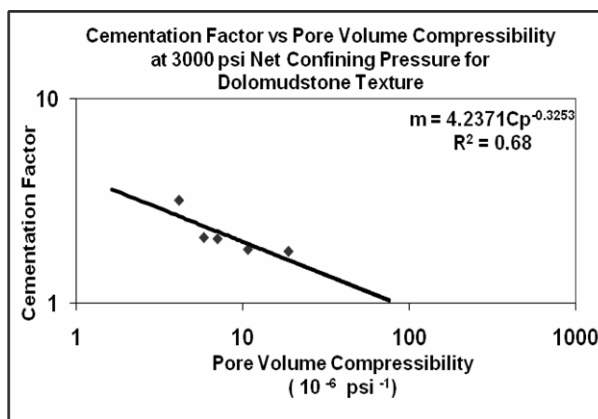
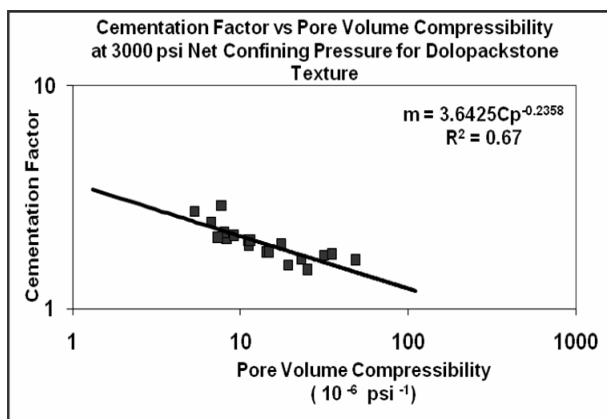
نتایج حاصل از این بررسی نیز بیانگر افزایش ضریب سیمان‌شدگی با افزایش فشار مؤثر بعد از اعمال تصحیحات مربوط به تخلخل برای همه نمونه‌ها، به جز چند مورد استثناء است. این افزایش را می‌توان به این صورت توجیه کرد که فشردگی سنگ باعث تغییرات ساختار منافذ و شکل دانه‌ها می‌شود. تا زمانی که درجه فشردگی افزایش می‌یابد، دانه‌ها بیشتر هموار می‌شوند و تغییر شکل می‌دهند که نتیجه آن افزایش در زاویه‌دار شدن دانه‌ها، انقباض و تغییر شکل یافتن منافذ، افزایش درجه سیمان‌شدگی و مقاومت سنگ خواهد بود. بنابراین انتظار می‌رود که در حالت کلی با افزایش فشار مؤثر، مقدار m افزایش یابد. تنها در نمونه‌های نادر، با افزایش فشار مؤثر، کاهش ضریب سیمان‌شدگی مشاهده شده است که دلیل عمده این کاهش را می‌توان به ازهم‌پاشیدگی ساختار سنگ نسبت داد. شکل ۴ ارتباط بین ضریب سیمان‌شدگی و تراکم‌پذیری منافذ را از فشار مؤثر ۴۳۵ (پوند بر اینچ مربع) تا ۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) برای همه نمونه‌ها نشان می‌دهد. روند کلی کاهش ضریب سیمان‌شدگی با افزایش تراکم‌پذیری مشاهده می‌شود. ولی روند تغییرات تراکم‌پذیری و ضریب سیمان‌شدگی دو تفاوت اساسی



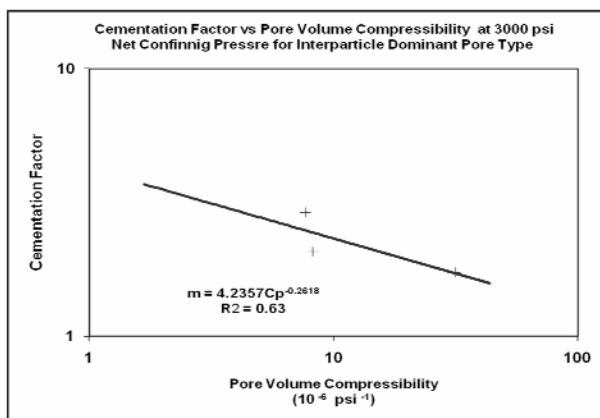
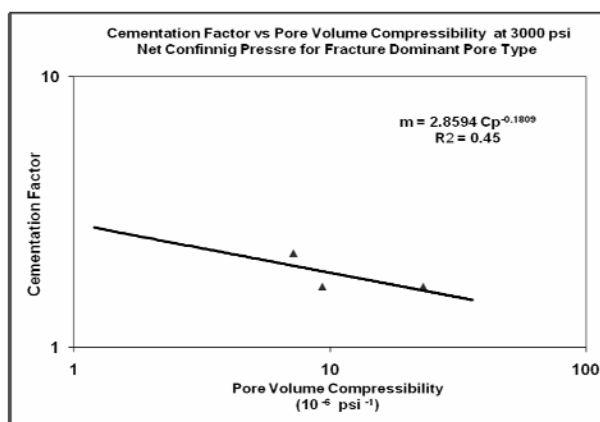
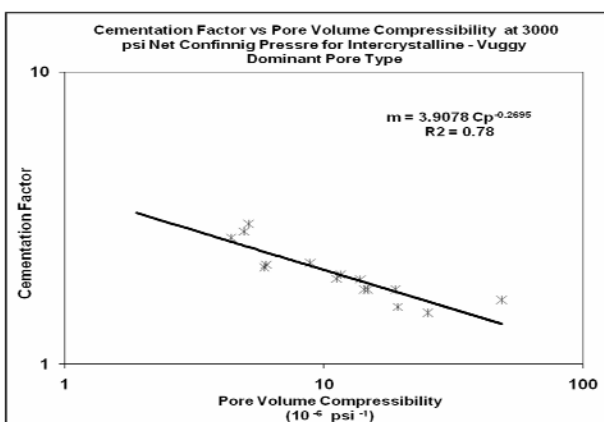
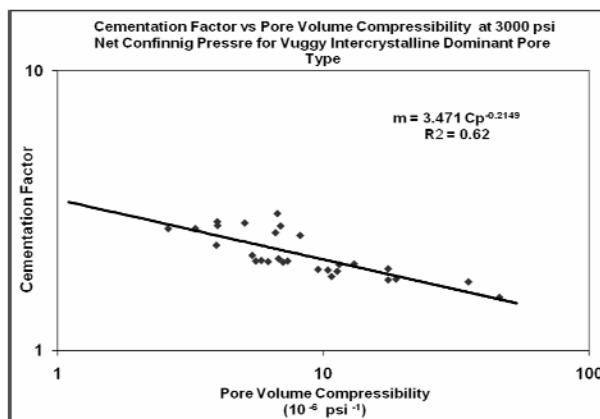
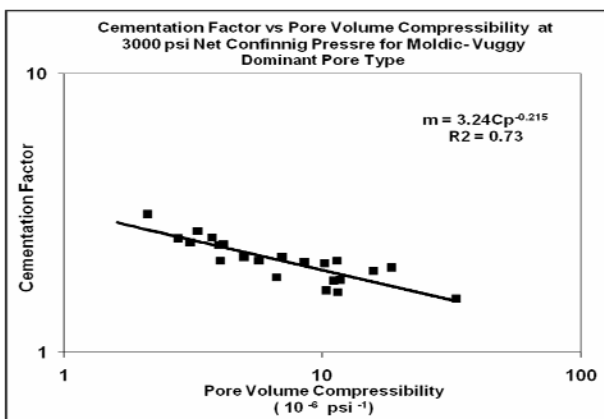
شکل ۵. ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ برای انواع بافت‌ها در فشار مؤثر ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع).



شکل ۶. ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ برای انواع تخلخل غالب در فشار مؤثر ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع).



شکل ۷. ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ در فشار مؤثر ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) برای انواع بافت‌ها به تفکیک.



شکل ۸. ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ در فشار مؤثر ۳۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) برای انواع تخلخل غالب به تفکیک.

۶ نتیجه‌گیری

می‌یابد.

۳. در نمونه‌های دارای ضریب سیمان‌شدگی کم، تغییرات تراکم‌پذیری منافذ بیشتر از نمونه‌های با ضرایب سیمان‌شدگی زیاد است.
۴. با افزایش تراکم‌پذیری، منافذ ضریب سیمان‌شدگی

۱. با تغییر بافت از پکستون به دولوپکستون و دولوستون، شیب نمودار ضریب سیمان‌شدگی برحسب تراکم‌پذیری منافذ افزایش می‌یابد.
۲. با افزایش فشار مؤثر، ضریب سیمان‌شدگی افزایش

- reservoirs: SPE paper No. 13735, SPE Formation Evaluation, no. 2, 155-167D
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poröser medien: Veierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in zürich, **96**, 1-23.
- Greenwald, R. F., Hart, H., and Somerton, W. H., 1981, A theoretical model for determination of pore volume compressibility of consolidated sandstone: SPE paper, no. 10076, 1-13.
- Harari, Z., Wang, S., Saner, S., 1994, Pore Compressibility study of Arabian Carbonate reservoir rocks: SPE paper, no. 27625, 1-31.
- Longeron, D. G., Argaud, M. J., and Bouvier, L., 1989, Resistivity index and capillary pressure measurements under reservoir conditions using crude oil: SPE paper, no. 19589, presented at the 64rd Annual Technical Conference.
- Mahmood, S. M., Maerefat, N. L., and Chang, M. M., 1991, Laboratory measurement of electrical resistivity at reservoir conditions: 63rd SPE, Formation Evaluation, **8**, 291-300.
- Mavko, G., and Mukerji, T., 1995, Seismic pore space compressibility and Gassmann's relation: Geophysics, **60**, 1743-1749.
- Murphy, W., Reischer, A., and Hsu, k., 1993, Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies: Geophysics, **58**, 227-239.
- Newman, G. H., 1973, Pore volume compressibility of consolidated, friable, and unconsolidated reservoir rocks under hydrostatic loading: JPT, 129-134.
- Rezaee, M., R, Motiee, H., Kazemzadeh, E., 2007, A new method to acquire m exponent and tortusity factor for microscopically hetrogeneouse carbonate: JPSE, **56**, 241-251.
- Zheng, Z., McLennan, J., and Jones A., 1990, Pore volume compressibility under different stress conditions: Proceedings, SCA 4th Annual Technical Conference, Paper no. 9005.
- کاهش می‌یابد، به طوری که در مقادیر سیمان‌شدگی زیاد، کاهش ضریب سیمان‌شدگی، سریع‌تر اتفاق می‌افتد.
۵. در سازند مورد بررسی، مقدار تراکم‌پذیری منافذ در سنگ‌های کربناته به بافت سنگ، نوع و مقدار تخلخل بستگی دارد.
۶. در نمونه‌های دارای بافت دولوستون ماسه‌ای، در تخلخل‌های کمتر از ۱۵ درصد، تراکم‌پذیری منافذ از سایر بافت‌های کربناته موجود بیشتر است و با تغییر بافت از دولستون ماسه‌ای به مادستون، میزان تراکم‌پذیری منافذ کاهش می‌یابد.
۷. تراکم‌پذیری منافذ نمونه‌ها برحسب فشار موثر با تابع‌نمایی به شکل $C_p = aP^b$ بهترین برازش را دارد.

منابع

- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid part I (low frequency range) and part II (high frequency range): J. Acous. Soc. Am, **28**, 168-191.
- Brown, R. J. S., and Korringa, J., 1975, On the dependence of the elastic properties of a porouse rock on the compressibility of the pore fluid: Geophysics, **40**, 608-616.
- Choqutee, P. W., and Pray, L. C., 1970, Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: Bull. AAPG, **54**, 207-250.
- Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to their depositional texture, In E. Ham, W.E., Ed., Classification of carbonate rocks: AAPG Memoir I, 108-121.
- Focke, J. W. and Munn, D., 1987, Cementation exponents in Middle Eastern carbonate