ارزیابی اثر دما، فشار محصورکننده و نرخ کرنش بر رفتار ژئومکانیکی پوش‌سنگ مخزن آسماری در میادین نفتی ایران

سیدرضا طاهری [۱و۴]، علی پاک*[۱و۴]، سعید شاد [۲و۴] و بهزاد مهرگینی[۳]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- شرکت خدمات مهندسی نفت کیش، تهران، ایران

۴- پژوهشکده بالادستی نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۱۳

چکیده

گسیختگی لوله جداری به عنوان یکی از رخدادهای هزینه‌بر و تهدیدکننده ایمنی در صنعت نفت مطرح است. برای نمونه، در میدان نفتی کوپال، حدود یک سوم چاه‌ها به‌دلیل مچالگی از مدار تولید خارج شده و تحت تعمیر با دکل قرار گرفته‌اند که در بعضی موارد به از دست رفتن چاه منجر شده است. از آن جا که اکثر این مچالگی‌ها در سازند گچساران اتفاق افتاده است، این ضرورت وجود دارد که روشی مناسب برای تعیین خصوصیات ژئومکانیکی پوش سنگ مخزن آسماری و لایه‌های دیگر سازند گچساران با توجه به شرایط خاص دما و فشار در عمق واقعی به‌کار برده شود. در مقاله حاضر، پس از بحث در خصوص اثر دما، نرخ اعمال کرنش، و فشار محصورکننده بر رفتار ژئومکانیکی کلی سنگ‌ها و خصوصا سنگ انیدریت (پوش سنگ مخزن آسماری)، نتایج آزمایش‌های ژئومکانیکی انجام شده در شرایط دما و فشار متفاوت بر روی این نوع سنگ و مقایسه با نتایج متناظر مربوط به محققین دیگر ارائه می‌شود. به‌طور کلی، نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در نرخ بارگذاری ثابت، هر مگاپاسکال افزایش فشار محصورکننده، میزان مقاومت پوش‌سنگ را در حدود MPa ۱ افزایش می‌دهد، در شرایطی که هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، سبب کاهش مقاومت پوش‌سنگ در حدود MPa ۰/۲ می‌گردد.

کلمات کلیدی: پوش‌سنگ، مخزن آسماری، سازندگچساران، دما، فشار محصورکننده، نرخ کرنش.

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی pak@sharif.edu

(DOI: 10.22078/pr.2018.3040.2415)

مقدمه

یکی از معضلات برداشت از میادین نفتی جنوب ایران، وقوع گسیختگی در لوله جداری است که عمدتا در سازند گچساران ایجاد شده است. این سازند نوعی سازند تبخیری است که دارای هفت بخش است. بخش پایینی یا اول آن بر روی سازند کربناته آسماری قرار گرفته و به عنوان پوش‌سنگ[1] این مخزن نفتی محسوب می‌شود. این پوش سنگ عمدتا از جنس انیدریت بوده و در آن، میان لایه‌های مارنی، شیل‌های بیتومینه و گاهی اوقات، لایه‌های نازک سنگ آهک نیز مشاهده می‌شوند، شکل ۱ (M1) [۱].

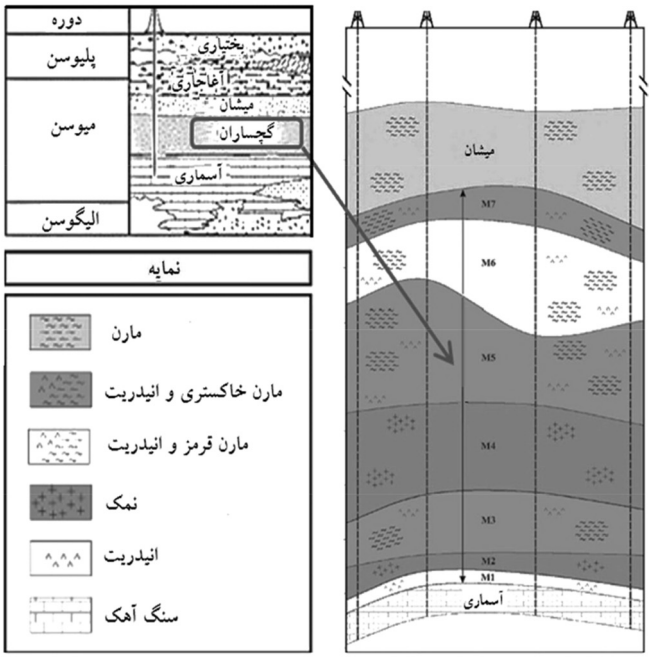
با وجود نقش بنیادی مطالعات ژئومکانیکی، مغزه‌گیری از سازند گچساران به علت تبخیری بودن آن بسیار مشکل بوده و تغییرشکل زیاد مغزه در زمان نمونه‌گیری سبب می‌شود که نتایج آزمایش بر روی آن، از دیدگاه ژئومکانیکی ارزش چندانی نداشته باشد. ضمن آن که ثبت اطلاعات لاگ در پوش سنگ نیز مرسوم نمی‌باشد که این عوامل، مانعی جدی برای بررسی دقیق رفتار این سازند به حساب می‌آیند. از آن جا که پارامترهای ژئومکانیکی با دقت مناسب، صرفا با انجام آزمایش بر روی مغزه تعیین می‌گردند. لذا، این ضرورت وجود دارد که روشی مناسب برای تعیین خصوصیات ژئومکانیکی پوش‌سنگ مخزن آسماری با توجه به شرایط خاص دما و فشار موجود به‌کار برده شود. در مقاله حاضر، پس از مرور مطالعاتی در خصوص اثرات دما، نرخ اعمال کرنش، فشار محصورکننده بر رفتار ژئومکانیکی کلی سنگ‌ها و خصوصا انیدریت (پوش سنگ مخزن آسماری)، نتایج آزمایش‌های ژئومکانیکی انجام شده برای شرایط دما و فشار متفاوت بر روی این نوع سنگ و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از طریق مقایسه با نتایج محققین دیگر ارائه می‌گردد.

اثر فشار، دما و نرخ بارگذاری بر رفتار ژئومکانیکی کلی سنگ‌ها

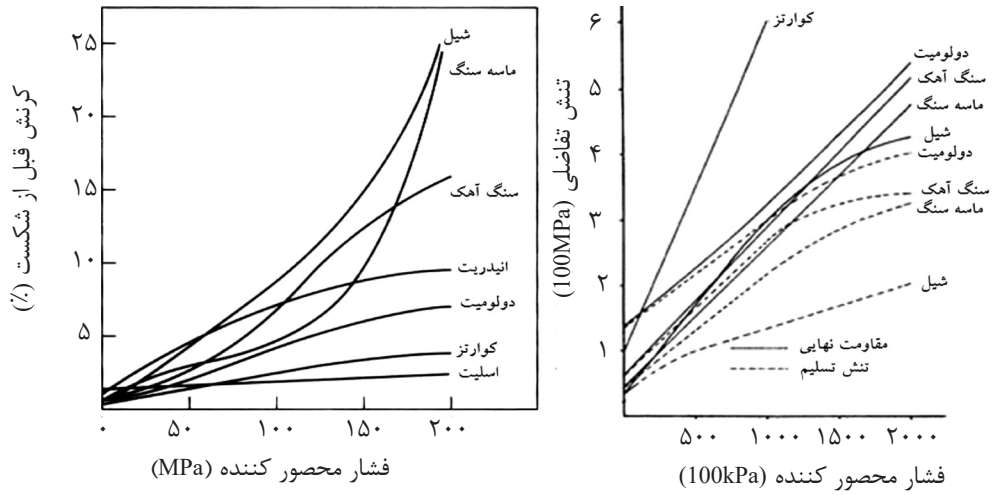
تعیین اثر عواملی نظیر فشار محصورکننده، نرخ اعمال کرنش، دما بر خصوصیات رفتاری سنگ‌ها اهمیت زیادی دارد. در این میان، اثر برخی عوامل، نظیر فشار محصورکننده بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است به‌طوری‌که با افزایش میزان فشار محصورکننده، مقاومت سنگ افزایش می‌یابد و رفتار سنگ از حالت ترد شکن[2] به سمت شکل‌پذیر[3] حرکت می‌کند [۲-۸]. شکل ۲ تاثیر تغییر فشار محصورکننده بر مقاومت و شکل‌پذیری انواع مختلف سنگ را نشان می‌دهد. همان‌گونه‌که مشخص است میزان کرنش قبل گسیختگی (شکل‌پذیری) در سنگ‌های مختلف، بسیار متفاوت می‌باشد و افزایش فشار محصورکننده، سبب افزایش برش قابل تحمل توسط سنگ می‌گردد.

تاثیر دما عامل مهم دیگری است که در ادبیات فنی مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر سنگ‌ها در دمای پایین در شرایط ترد قرار داشته و زودتر دچار شکست می‌شوند و در این حالت، بیشتر کرنش قبل از شکست، برگشت‌پذیر (الاستیک) می‌باشد. با افزایش دما، بخش الاستیک کرنش تدریجا کاهش یافته و سهم کرنش پلاستیک بیشتر می‌شود. به‌طور کلی، با افزایش دما، اغلب سنگ‌ها با کاهش مقاومت و افزایش شکل‌پذیری همراه می‌گردند [۳ و ۹]. شکل ۳، اثر افزایش دما بر روی مقاومت برشی سنگ‌های مختلف را مشخص کرده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد در تمام موارد، با افزایش دما و با وجود شکل‌پذیری بیشتر، سنگ در برش ضعیف‌تر می‌گردد. در شکل ۴ اثر نرخ اعمال کرنش بر روی نوعی سنگ کوارتز و یک نوع نمک به عنوان سنگ تبخیری نشان داده شده است. همان گونه که واضح است، با افزایش نرخ بارگذاری، میزان مقاومت در دمای ثابت افزایش می‌یابد [۳ و ۱۰]. رفتار سنگ تبخیری انیدریت به عنوان پوش سنگ آسماری به طور خاص در بخش بعدی بررسی می‌گردد.

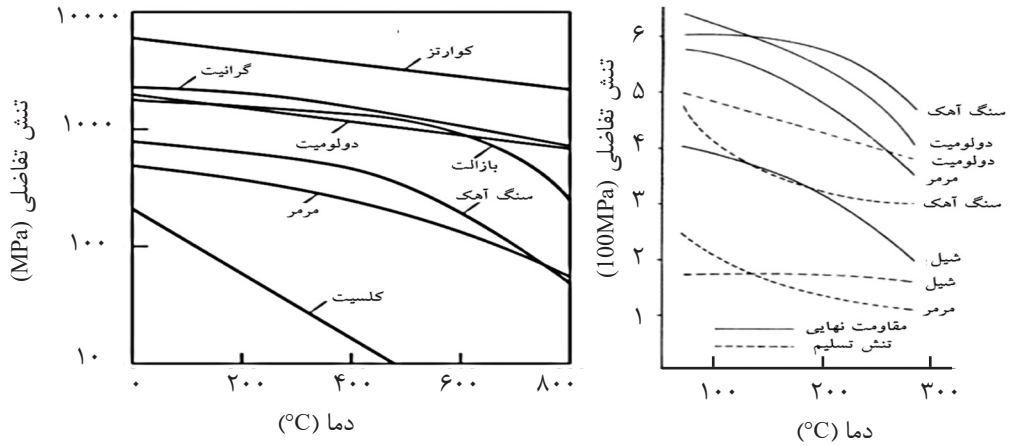
1. Caprock
2. Brittle
3. Ductile



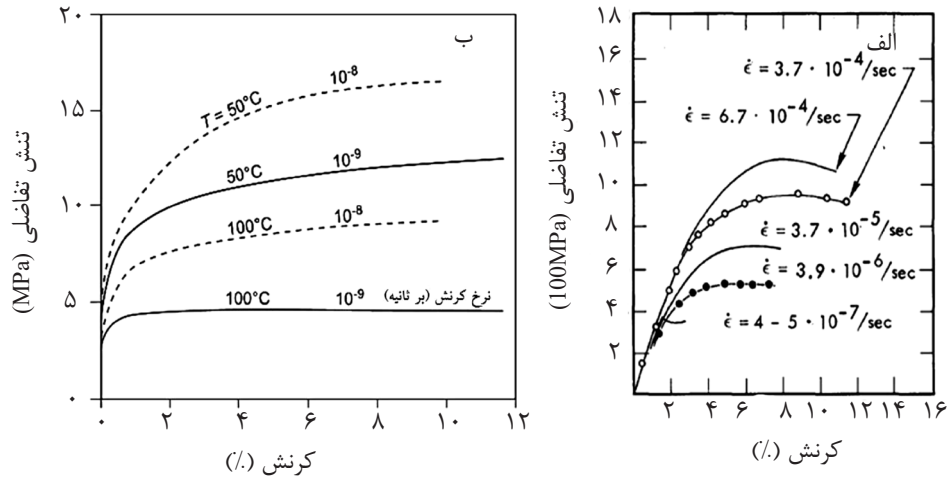
شکل ۱ وضعیت قرارگیری سازند گچساران و مخزن آسماری در میادین نفتی جنوب غرب ایران [۱] (محدوده پوش سنگ انیدریتی M1)



شکل ۲ تاثیر تغییر فشار محصورکننده بر روی مقاومت و شکل‌پذیری انواع مختلف سنگ [۲]



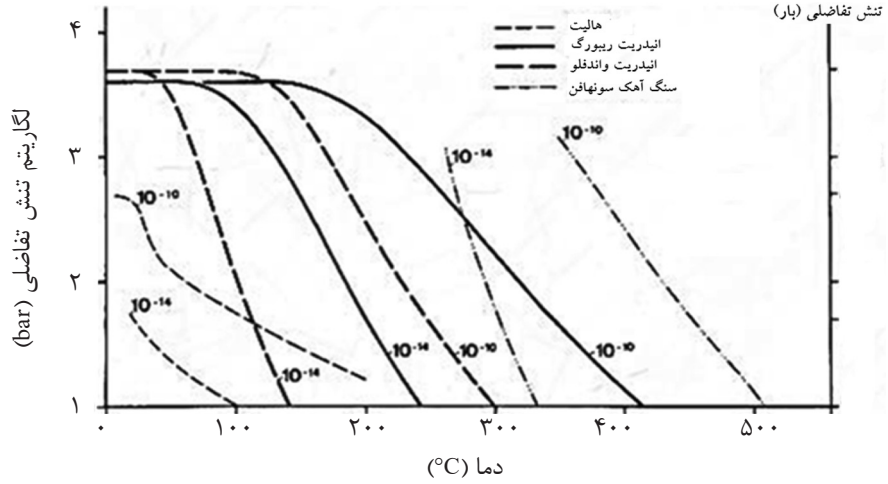
شکل ۳ تاثیر افزایش دما بر قابلیت سنگ‌های مختلف برای تحمل تنش برشی [۹]



شکل ۴ الف- منحنی تنش-کرنش نوعی کوارتز در فشار محصورکننده ۸ kbar، دمای ۹۰۰°C و نرخ کرنش متفاوت [۳] و ب- اثر دما و نرخ کرنش بر روی رفتار تغییرشکلی نوعی سنگ نمک در طول ۳/۵ سال [۱۰]

اثر فشار، دما و نرخ بارگذاری بر رفتار ژئومکانیکی انیدریت (پوش سنگ مخزن آسماری)

شواهد تجربی کمی در خصوص تغییرشکل انیدریت تحت شرایط مخزن وجود دارد. در علم زمین شناسی، انیدریت با فرمول شیمیایی سولفات‌کلسیم[1]، به عنوان سنگی که رفتاری نسبتا شکل‌پذیر حتی در دماهای نسبتا پایین دارد شناخته می‌شود. در واقع، گرچه در دما و فشار محیط و در شرایط تک محوری، انیدریت رفتاری نسبتا ترد دارد، با اعمال فشار محصورکننده در دمای اتاق هم رفتار آن تدریجا شکل‌پذیر می‌گردد. بر اساس شواهد میدانی، این سنگ تحت نرخ‌های کرنش معمول، مقاومتی نظیر سنگ‌های کلسیتی را دارا می‌باشد [۱۱]. تحقیقات قبلی بر روی انیدریت نشان‌دهنده اثر قابل توجه ابعاد ذرات کانی‌ها بر روی مقاومت آن در دمای معمول می‌باشد طوری که سنگ‌های ریزدانه به طور قابل توجهی، مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهند. در شرایطی که در دمای اتاق مقاومت انیدریت حدودا دو برابر نمک می‌باشد اما با افزایش دما به ویژه بالاتر از ۱۰۰ تا ۲۰۰°C، مقاومت آن با توجه به ابعاد دانه‌ها و نرخ اعمال کرنش به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد طوری که در چنین دماهایی، مقاومت انیدریت مشابه نمک می‌شود [۱۱].



شکل ۵ تغییرات مقاومت برشی بر حسب دما نشان‌دهنده مقاومت نسبی در کرنش ۱۰٪ برای هالیت، دو نوع انیدریت و نوعی سنگ آهک در نرخ کرنش‌های معمول زمین‌شناسی [۱۱]

1. $CaSO_4$

در محدوده دمایی بالاتر از ۳۰۰°C ، انیدریت محصور شده، مقاومت تسلیم ناچیزی از خود نشان داده و به سرعت جریان می‌یابد. شکل ۵ مقاومت دو نوع سنگ انیدریت و همچنین، هالیت و نوعی سنگ آهک در نرخ کرنش‌های معمول زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. همان‌طورکه دیده می‌شود، گرچه انیدریت مقاومت زیادی در دمای اتاق دارد، در دماهای بالاتر بین ۱۰۰ تا ۲۰۰°C، نمونه‌های آن با توجه به ابعاد ذرات کانی‌ها و نرخ کرنش، مقاومت خود را به سرعت از دست می‌دهند. به طور خلاصه، می‌توان گفت که سنگ انیدریت در دمای اتاق مقاومت متوسطی دارد، اما با افزایش دما از مقاومت آن کاسته می‌شود، طوری که در دماهای بالاتر از ۲۰۰°C، مقاومت انیدریت در حد مقاومت نمکی می‌گردد که حدود ۱۰۰°C دمای کمتری دارد [۱۱].

مطالعات قبلی در خصوص پارامترهای ژئومکانیکی انیدریت سازند گچساران

بررسی سوابق مطالعاتی داخلی نشان می‌دهد که با وجود نقش کلیدی مطالعات ژئومکانیکی و نقش اساسی سازند گچساران در فرآیند برداشت از میادین هیدروکربنی ایران، دلایلی نظیر تبخیری بودن و عدم مرسوم بودن ثبت اطلاعات لاگ این سازند، موانعی جدی برای بررسی دقیق رفتار ژئومکانیکی آن با توجه به شرایط خاص دما و فشار به حساب می‌آیند. عمده پارامترهای ژئومکانیکی محدود به‌دست آمده نیز به صورت دینامیکی، بر اساس لاگ چاه‌ها و تنها در محدوده مخزن تعیین شده‌اند. از طرفی، روش‌های تبدیل پارامترهای دینامیکی به استاتیکی که صرفا مبتنی بر تجربه‌اند چندان معتبر نبوده و تنها تعداد محدودی روش تئوریک در این خصوص وجود دارد. در واقع، از آنجا که نوع کانی‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها، درجه سیمانی شدن[1] و خصوصیات مکانیکی تغییر می‌کند، تعیین رابطه کلی بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی دشوار است. به نظر می‌رسد تنها تحقیقات پیشین برای تعیین پارامترهای استاتیکی سازند گچساران مربوط به تحقیق مهرگینی و همکارن [۱] می‌باشد که در بخش "مقایسه نتایج با کار محققین قبلی"، کامل‌تر به آن پرداخته می‌شود.

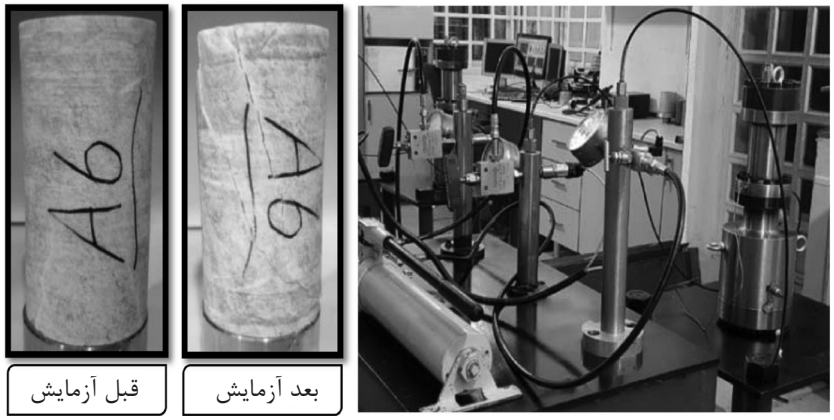
مراحل و نتایج آزمایش‌های ژئومکانیکی انجام شده (انیدریت گچساران)

با توجه به لزوم تعیین مشخصات ژئومکانیکی پوش‌سنگ سازند گچساران در شرایط دما و فشار واقعی از یک سو و با در نظر گرفتن عدم امکان دسترسی به مغزه این سازند از چاه‌های نفت این محدوده از سوی دیگر، نمونه‌های لازم از ساختگاه سد گتوند که گچساران رخنمون دارد، اخذ شد و انجام آزمایش‌هایی با مشخصات زیر در دستور کار قرار گرفت:

- نرخ کرنش محوری بر اساس استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ[2]
- حداکثر بار وارده ۵۰۰ تن
- قطر نمونه: ۳۵- ۴۰ mm
- اعمال فشار محصورکننده مختلف (۰، ۶، ۱۲، ۱۶، ۳۲ و ۴۸ MPa)
- اعمال سه دمای مختلف (۳۰، ۶۰ و ۹۰°C)

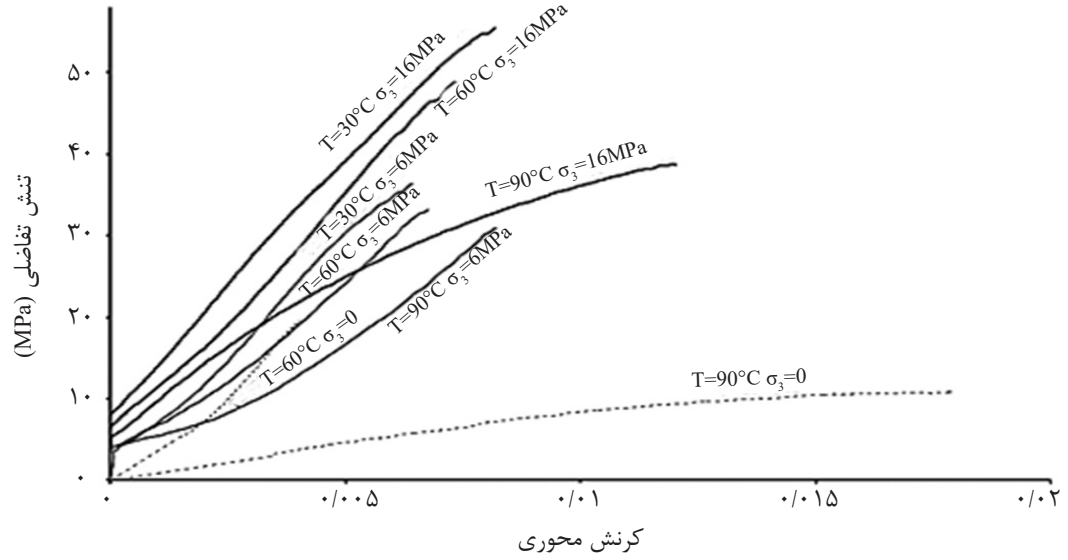
برای انجام تست در دماهای ۶۰ و ۹۰°C، ابتدا نمونه ۴۸ hr در کوره قرار داده شد (۲۴ hr برای ۶۰°C و ۲۴ hr دیگر برای دمای ۹۰°C). سپس نمونه با پوشش خاصی برای جلوگیری از اثر روغن بر روی انیدریت پوشانده و در داخل سلول تا رسیدن به شرایط دمایی مورد نظر قرار داده شد. بارگذاری از طریق اعمال نرخ کرنش ثابت ۴×۱۰^{-۶}/s اعمال شد تا بتوان نقطه شکست و رفتار بعد آن را نیز ثبت نمود. شکل ۶ دستگاه آزمایش به همراه شرایط یک نمونه قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد. نمودار تنش-کرنش چند نمونه در شکل ۷ ارائه شده است.

1. Cementation
2. ISRM-International Society for Rock Mechanics



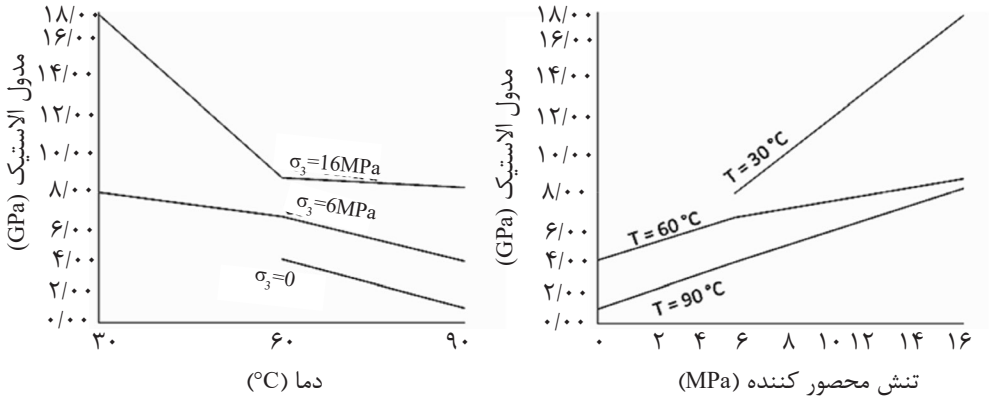
شکل ۶ دستگاه آزمایش سه محوری شرکت ناموران پویش بالادستی به همراه شرایط یک نمونه قبل و بعد از آزمایش

همان‌طور که مشخص است، در موارد فشار محصورکننده ارائه شده (۰، ۶ و ۱۶ MPa) افزایش دما سبب کاهش مقاومت (حداکثر تنش تفاضلی قابل تحمل) و سختی[1] (شیب منحنی تنش- کرنش) می‌شود. ضمن آن که در همه موارد حتی در فشار محصورکننده صفر (تک محوری) رفتار سخت شونده در انیدریت مشاهده می‌گردد. برای آن که امکان بررسی دقیق‌تر نتایج فراهم گردد، تغییر مدول الاستیسیته سنگ انیدریت با دما و فشار محصور شده در شکل ۸ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، شکل ۸ سمت چپ نشان می‌دهد که برای فشار محصور کننده ثابت، افزایش دما سبب کاهش سختی می‌گردد. در شرایطی که بر اساس تصویر سمت راست این شکل، افزایش فشار محصورکننده در دمای ثابت با افزایش سختی همراه است. همچنین، همان‌گونه‌که شکل ۹ نشان می‌دهد، افزایش دما سبب می‌شود، پوش مقاومت انیدریت کوچک‌تر شود که این امر معادل است با کاهش چسبندگی و کاهش مقاومت کششی با افزایش دما. هر چند که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (شیب منحنی) با تغییر دما چندان تغییری نمی‌یابد. ضمن آن که انتظار می‌رود که با افزایش تنش نرمال در دمای ثابت، میزان چسبندگی ظاهری متناظر افزایش و میزان زاویه اصطکاک متناظر کاهش یابد.

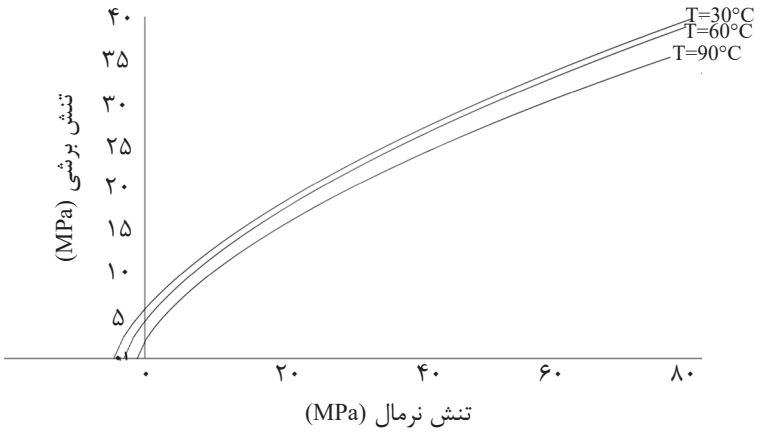


شکل ۷ نتایج رفتار تنش- کرنش برای سه دما و سه فشار محصور کننده مختلف

1. Stiffness

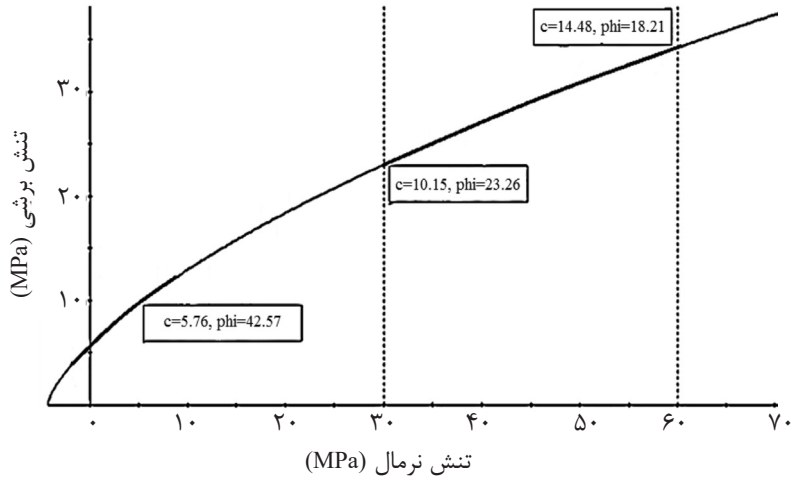


شکل ۸ تغییر مدول الاستیسیته با دما و فشار محصور شده مربوط به پوش‌سنگ گچساران

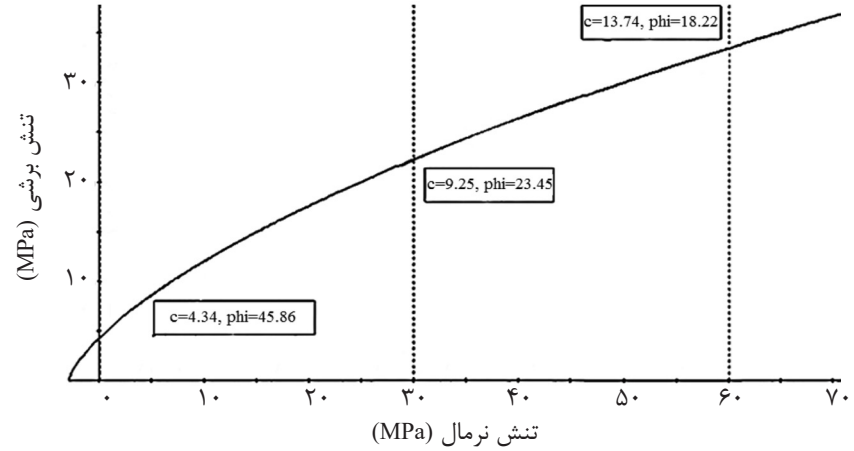


شکل ۹ کاهش پوش مقاومتی انیدریت با افزایش دما

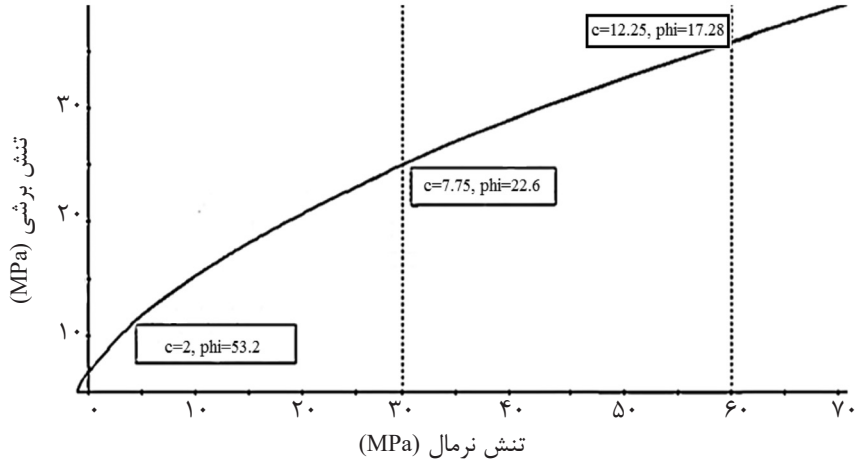
برای بررسی دقیق‌تر، چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک متناظر با تغییر تنش نرمال برای سه دمای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ °C به ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ تغییر چسبندگی ظاهری (c) و زاویه اصطکاک سنگ (phi) انیدریت با تنش نرمال در دمای ۳۰°C



شکل ۱۱ تغییر چسبندگی ظاهری (c) و زاویه اصطکاک سنگ انیدریت (phi) با تنش نرمال در دمای ۶۰°C

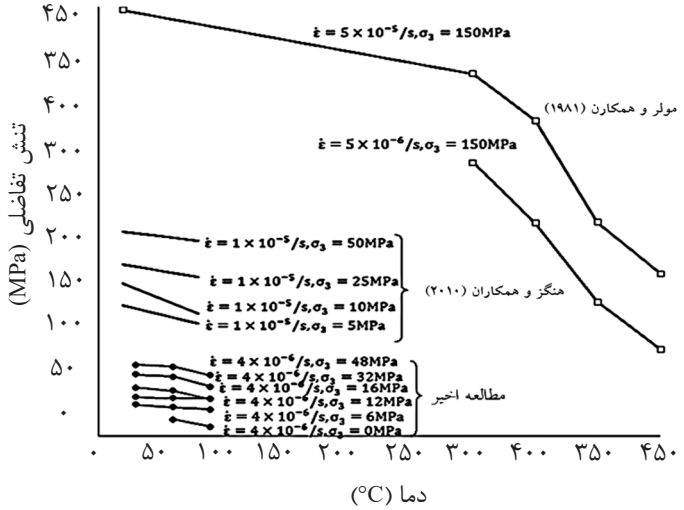


شکل ۱۲ تغییر چسبندگی ظاهری (c) و زاویه اصطکاک سنگ (phi) انیدریت با تنش نرمال در دمای ۹۰°C

نکته مهم آن است که با توجه به اثر قابل توجه میزان دما، نرخ کرنش، و فشار محصورکننده بر نتایج، هنگام ارائه پارامترهای ژئومکانیکی، بایستی این شرایط دقیقا عنوان شود، به عنوان مثال، لازم است این گونه عنوان شود که مدول الاستیسیته انیدریت (پوش سنگ گچساران) در دمای ۹۰°C، نرخ کرنش 4×10^{-6} /s و فشار محصور کننده ۱۶ MPa، برابر با ۸/۳۶ GPa می‌باشد، در شرایطی که سختی همین سنگ تحت نرخ کرنش ثابت یکسان ولی در دمای ۳۰°C و تحت فشار محصور کننده ۱۶ MPa، ۱۹ GPa می‌باشد.

مقایسه نتایج با کار محققین قبلی

برای مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج آزمایش‌های مشابه روی انیدریت، تغییر تنش تفاضلی بر حسب دما برای سه سری آزمایش شامل تحقیق حاضر، مولر و همکاران [۱۱] و هنگز و همکاران [۱۲] در شکل ۱۳ ارائه شده است. ضمن آن که میزان نرخ اعمال کرنش و فشار محصورکننده برای هر مورد مشخص است. نکته قابل توجه تشابه روند تغییر مقاومت برای هر سه سری آزمایش با وجود تفاوت موقعیت مکانی و در نتیجه، تفاوت نوع کانی انیدریت می‌باشد. به‌طوری‌که در همه موارد، افزایش دما سبب کاهش مقاومت با شیب نسبتا مشابه شده، در حالی که افزایش نرخ بارگذاری و فشار محصورکننده با افزایش مقاومت همراه است.

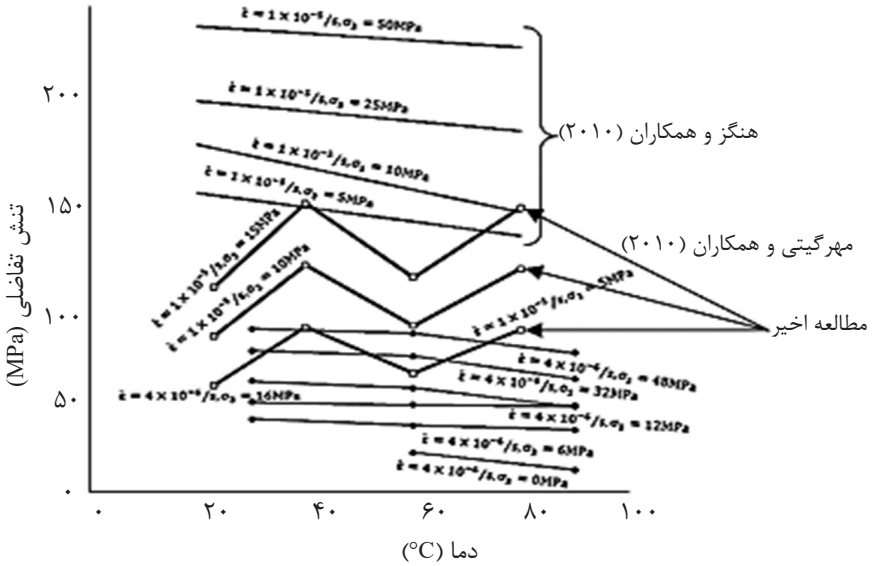


شکل ۱۳ تغییرات مقاومت انیدریت با دما برای سه سری آزمایش شامل تحقیق حاضر و مراجع [۱۱ و ۱۲]

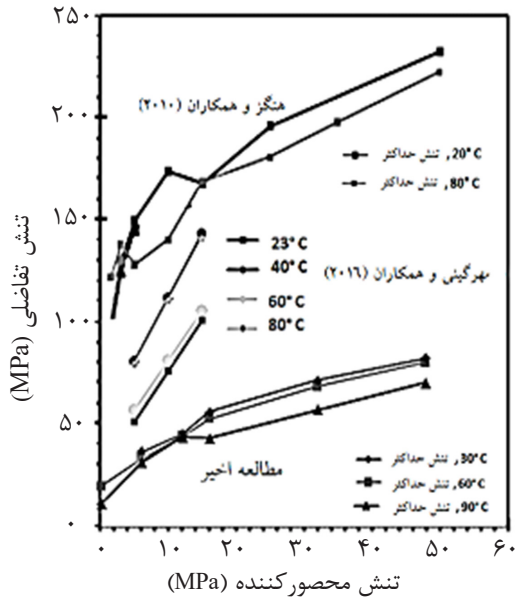
همان‌طور که پیشتر عنوان شد، خصوصیات ژئومکانیکی سازند گچساران در مجموعه مطالعات صورت گرفته توسط مهرگینی و همکاران نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ مشابه شکل ۱۳ ولی با تمرکز بیشتر در محدوده دمایی حداکثر ۱۰۰°C نشان داده شده، ضمن آن که نتایج تحقیق مهرگینی و همکاران نیز اضافه شده است. اختلاف روند نتایج در برخی موارد مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تفاوت در سرعت اعمال بار، نحوه اعمال دما، ابعاد ذرات و تخلخل بین نمونه‌های سنگ انیدریت باشد. در ادامه، برای اطمینان بیشتر، بخش دیگر نتایج با نتایج آزمایش‌های مهرگینی و همکاران و همچنین، هنگز و همکاران مقایسه شد. بر اساس شکل ۱۵، جز در موارد محدود فشار محصورکننده کمتر از ۳ تا MPa ۴، روند کاهش مقاومت با افزایش دما، مشابه نتایج آزمایش‌های جدید در مطالعات هنگز و همکاران نیز برقرار است.

نتیجه‌گیری

مدتها است که گسیختگی لوله جداری به عنوان یکی از رخدادهای هزینه‌بر و تهدیدکننده ایمنی در صنعت نفت مطرح بوده و در بسیاری گزارش‌ها از این پدیده به عنوان مشکلی اساسی نام برده می‌شود.



شکل ۱۴ تغییر مقاومت انیدریت با دمای حداکثر ۱۰۰°C در سه سری آزمایش شامل تحقیق حاضر و مراجع [۱ و ۱۲]



شکل ۱۵ تغییر مقاومت انیدریت با فشار محصور کننده با دما برای سه سری آزمایش تحقیق حاضر و مراجع [۱ و ۱۲]

این پدیده، سبب تحمیل هزینه‌های سنگین به صنعت نفت شده است. ضمن آن که ضرر حاصل از تاخیر در تولید نفت را نیز بایستی به این میزان افزود. در میدان نفتی کوپال، حدود یک سوم چاه‌ها به‌دلیل مچالگی از مدار تولید خارج شده و تحت تعمیر با دکل قرار گرفته‌اند که در بعضی موارد به از دست رفتن چاه منجر شده است. اکثر این مچالگی‌ها در سازند گچساران اتفاق افتاده است. لذا، این ضرورت وجود دارد که روشی مناسب برای تعیین خصوصیات ژئومکانیکی پوش‌سنگ و دیگر لایه‌های گچساران با توجه به شرایط خاص دما و فشار موجود به‌کار برده شود. در این مقاله، ابتدا اثر دما، نرخ اعمال کرنش، فشار محصورکننده بر رفتار سنگ‌ها در حالت کلی و همچنین، سنگ انیدریت به عنوان پوش‌سنگ مخزن آسماری بررسی شده و در ادامه، نتایج آزمایش‌های ژئومکانیکی تحت شرایط مختلف دما و فشار در این نوع سنگ و همچنین، مقایسه‌ای با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات مشابه دیگر ارائه گردید. نتایج زیر از این مقاله برای سنگ انیدریت (پوش سنگ مخزن آسماری) به‌دست آمده است:

۱- افزایش فشار محصورکننده در دمای ثابت با افزایش سختی همراه است. این تاثیر برای دماهای پایین‌تر (۳۰°C) بیشتر می‌باشد، طوری که با افزایش فشار محصور کننده از ۶ به MPa ۱۶، سختی حدود ۲/۵ برابر می‌گردد. ضمن آن که در همه موارد حتی فشار محصورکننده صفر، رفتار سخت شونده مشاهده می‌گردد.

۲- برای فشار محصور کننده ثابت، افزایش دما سبب کاهش سختی می‌شود طوری که سختی پوش سنگ در دمای ۹۰°C و در شرایط محصور نشده، به شدت کاهش یافته و در حدود GPa ۱ می‌گردد.

۳- افزایش دما سبب می‌شود، پوش مقاومت انیدریت کوچک‌تر شود که این امر معادل است با کاهش چسبندگی و کاهش مقاومت کششی با افزایش دما، طوری که با افزایش دما از ۳۰ به ۹۰°C و برای شرایط تنش نرمال صفر، میزان چسبندگی پوش سنگ از ۵/۷ به MPa ۲ کاهش می‌یابد. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی با تغییر دما، چندان تغییری نمی‌یابد. به عنوان نمونه، برای شرایط تنش نرمال MPa ۳۰، در تمام محدوده دمایی ۳۰ تا ۹۰°C، مقدار زاویه اصطکاک، ۲۳ درجه می‌باشد.

۴- با افزایش تنش نرمال در دمای ثابت، میزان چسبندگی ظاهری پوش سنگ انیدریت افزایش و زاویه اصطکاک متناظر کاهش می‌یابد. برای نمونه، در دمای ثابت ۹۰°C، میزان زاویه اصطکاک ۵۳° مربوط به تنش نرمال صفر، به میزان ۲۳° برای تنش نرمال MPa ۳۰

می‌رسد، در شرایطی که چسبندگی آن از MPa ۲ به حدود MPa ۷/۷ افزایش می‌یابد.

۵- با افزایش نرخ بارگذاری، میزان مقاومت پوش سنگ در دما و فشار محصورکننده ثابت افزایش می‌یابد. ضمن آن که روند تغییر مقاومت با تغییر فشار محصورکننده و دما برای انیدریت گچساران با نتایج متناظر مربوط به دیگر تحقیقات انجام شده بر روی این نوع سنگ، منطبق می‌باشد.

۶- به‌طور کلی، نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در نرخ بارگذاری ثابت، هر مگاپاسکال افزایش فشار محصورکننده، میزان مقاومت پوش سنگ را در حدود MPa ۱ افزایش می‌دهد، در شرایطی که هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، سبب کاهش مقاومت پوش سنگ در حدود MPa ۰/۲ می‌گردد.

تشکر و قدردانی

این طرح پژوهشی با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (قرارداد شماره ۹۶۰۰۲۲۱۹ و گرنت شماره ۹۶۰۰۱۵۸۹) انجام گرفته که بدین وسیله از این حمایت سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

[1]. Mehrgini B., Memarian H., Dusseault M. B., Ghavidel A. and Heydarzadeh M., "*Geomechanical characteristics of common reservoir caprock in Iran (gachsaran formation), experimental and statistical analysis*," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 34, pp. 898-907, 2016.

[2]. Handin J. and Hager R. V., Jr., "*Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at room temperature on dry samples*," Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., Vol. 41, pp. 1–50, 1957.

[3]. Heard H. C., "*The influence of environment on the inelastic behavior of rocks*," Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, California, 94550, 1969.

[4]. Hokka M., Black J., Tkalich D., Fourmeau M., Kane A., Hoang N. H., Li C.C., Chen W.W. and Kuokkala V. T., "*Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite*," International Journal of Impact Engineering, Vol. 91, pp. 183–193, 2016.

[5]. Liu Z., and Jin D., "*Experimental research of rock strength and permeability characteristics under different confining and hydraulic pressure*," An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges - Sui, Sun & Wang (eds), China University of Mining and Technology Press, 2014.

[6]. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P. and Raaen A. M., "*Petroleum related rock mechanics*," 2nd Edition, Elsevier, 2008.

[7]. Mogi K., "*Experimental rock mechanics*," Taylor & Francis, p. 361, 2007.

[8]. Brady B. H. G. and Brown E. T., "*Rock mechanics for underground mining*," 3rd edition, Kluwer Academic Publishers, 2005.

[9]. Handin J. and Hager R. V., Jr., "*Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at high temperature*," Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull. Vol. 42, pp. 2892-2934, 1958.

[10]. Jackson M. P. A. and Hudec M. R., "*Salt tectonics: principles and practice*," Cambridge University Press, 2017.

[11]. Muller W. H., Schmid S. M. and Briegel U., "*Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: rheology and microfabric*," Tectonophysics, Vol. 78, pp. 527-543, 1981.

[12]. Hangx S. J. T., Spiers C J. and Peach C. J. "*Mechanical behavior of anhydrite caprock and implications for CO_2 sealing capacity*," Journal of Geophysical Research, Vol. 115, Issue B7, 2010.

Petroleum Research

Petroleum Research 2018 (December-January), Vol. 28, No. 102. 8-11

DOI: 10.22078/pr.2018.3040.2415

Assessment of the Effects of Temperature, Confining Pressure, and Loading Rate on the Geomechanical Behavior of Caprock of Asmari Reservoir in Iranian Oil Fields

S.Reza Taheri [1,4], Ali Pak* [1,4], Saeed Shad [2,4], and Behzad Mehrgini [3]

1. Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2. Chemical and Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3. Kish Petroleum Engineering, Oil Engineering Services Company, Tehran, Iran

4. Upstream Petroleum Research Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

pak@sharif.edu

DOI: 10.22078/pr.2018.3040.2415

Received: December/20/2017 Accepted: July/04/2017

INTRODUCTION

Casing collapse is one of the main troubles of oil industry worldwide, as well as southwest Iranian oil fields, where these incidents mostly occurred in Gachsaran formation which is underlain by the giant reservoir, Asmari. The first member of the Gachsaran consists of anhydrite type of rock, the geomechanical characteristics of which at various temperatures, confining pressures and strain rates are specified in this study. Because it is the first step to evaluate the possible scenarios of casing collapse in this layer.

According to the previous studies, the rock strength increases often by adding up the confining pressure, which causes that the rock behavior changed from brittle to ductile [1, 2 , 3 , 4 , 5, 6]. Meanwhile, most rocks lose their strength and become more ductile by temperature increment [1, 7]. Moreover, as the loading rate increases, the strength of rock increases too [1].

At the same time, there are some exceptions for each of these scenarios. Additionally, there are few studies about the behavior of anhydrite rock type at reservoir conditions. Figure 1 shows the results of one study in the regard [8].

As shown in Figure 1, it seems that the strength anhydrite among the rock types decreases by temperature, so that at temperatures higher than around 150 °C, its strength loses considerably.

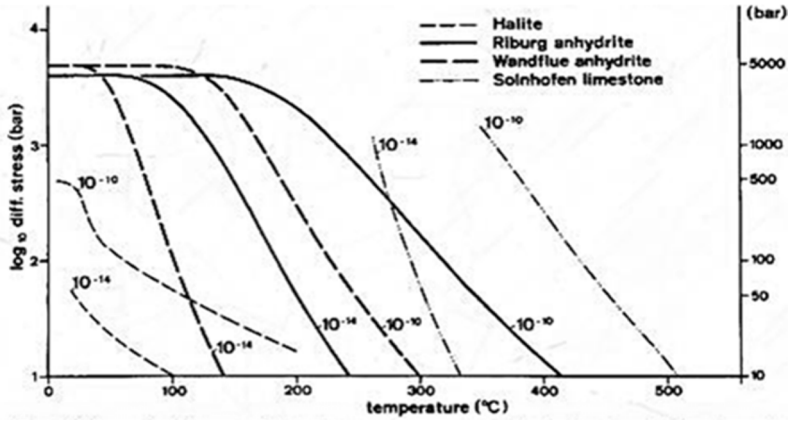


Figure 1. Variations of shear strength vs. temperature for some types of rock including anhydrite [8]

This finding depicts the importance of specifying the geomechanical properties at in-situ conditions of temperature and confining pressure. In the following, the geomechanical propertires of the caprock anhydrite are specified experimentally at various values of temperature and confining pressure.

EXPERIMENTAL PROCEDURES

A number of uniaxial and triaxial compression tests are conducted at the elevated confining pressures up to 48 MPa and the elevated temperatures up to 90 °C to include the in situ conditions of the caprock which are at real depths. Figure 2 shows the experiment set up used for conducting the experiments. The samples were processed into cylinders with a height/diameter ratio of around 2.

All tests were performed according to the methods suggested by International Society of Rock Mechanics (ISRM).

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the stress-strain curve of some samples. As shown, for all cases, adding up the temperature reduces the strength. Also, the caprock shows the hardening behavior for all the proposed results. Additionally, an increase in temperature reduces the rock stiffness, while the stiffness value rises by an increase in confining pressure.

Figure 2: The experimental apparatus.

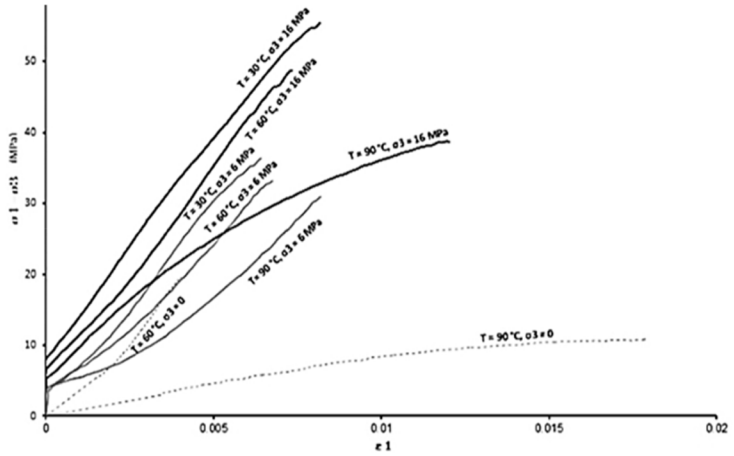


Figure 3: Stress-strain curves of the caprock anhydrite samples.

It must be noted that it is essential to express the in-situ conditions where the geomechanical properties are to be presented. For example, the elasticity modulus of the caprock strength is 8.36 GPa at 90 °C, strain rate of 4μ, and confining pressure of 16 MPa, while the corresponding parameter is 19 GPa at 30 °C, strain rate of 4μ, and confining pressure of 16 MPa.

CONCLUSION

In this study, the effects of temperature, confining pressure, and strain rate on the geomechanical properties of the anhydrite caprock in Iranian oil fields were studied. The results show that:

- Incensement of confining pressure causes the caprock stiffness to rise, especially at ambient temperature.
- An increase in temperature causes that the caprock strength envelope to be reduced. That is equal to decease in cohesion, while the friction value does not change considerably.
- With increasing strain rate, the caprock strength rises under constant temperature and confining pressure.
- The trends of strength variations of the anhydrite caprock with temperature and confining pressure are compatible with the previous studies conducted on anhydrite rock type in other parts of the world.

REFERENCES

[1]. Heard H. C., "*The influence of environment on the inelastic behavior of rocks*," Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, California, 94550, 1969.

[2]. Hokka M., Black J., Tkalich D., Fourmeau M., Kane A., Hoang N. H., Li C.C., Chen W.W. and Kuokkala V. T., "*Effects of strain rate and confining pressure on the compressive behavior of Kuru granite*," International Journal of Impact Engineering, Vol. 91, pp. 183–193, 2016.

[3]. Liu Z., and Jin D., "*Experimental research of rock strength and permeability characteristics under different confining and hydraulic pressure*," An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges - Sui, Sun & Wang (eds), China University of Mining and Technology Press, 2014.

[4]. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P. and Raaen A. M., "*Petroleum related rock mechanics*," 2nd Edition, Elsevier, 2008.

[5] Mogi K., "*Experimental rock mechanics*", Taylor & Francis, 2007.

[6]. Brady B. H. G. and Brown E. T., "*Rock mechanics for underground mining*," 3rd edition, Kluwer Academic Publishers, 2005.
[7]. Handin J. and Hager R. V., Jr., "*Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: tests at high temperature*," Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull. Vol. 42, pp. 2892-2934, 1958.
[8]. Muller W. H., Schmid S. M. and Briegel U., "*Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: rheology and microfabric*," Tectonophysics, Vol. 78, pp. 527-543, 1981.