



ارزیابی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین رفتار مقاومتی و خزشی نمونه‌های نمکی – مطالعه موردی میدان نصرآباد کاشان

ایوب الیاسی^۱؛ علی تیموری یادکوری^۲؛ حسین شیخزاده^۳

چکیده

شناخت خصوصیات حرارتی و مکانیکی سنگ نمک بمنظور ارزیابی حجم و مدت زمان ذخیره‌سازی در مغار نمکی و تجزیه و تحلیل ایمنی لازم ضروری بوده و جهت نیل به این هدف مطالعات آزمایشگاهی مورد نیاز است. برنامه مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های مغار نمکی نصرآباد کاشان شامل آزمایشات تعیین خصوصیات مکانیکی کوتاه مدت و رفتار وابسته به زمان بر روی نمونه‌های نمکی اعماق مرجع تقریبی ۱۱۰۰ تا ۱۴۰۰ متر از چاه حفاری شده می‌باشد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل، بترتیب دارای طول و قطر ۱۸۰ و ۹۰ میلی‌متری می‌باشند. این ابعاد نسبتاً بزرگ برای کاهش تأثیر بلورهای بزرگ تا حد امکان و برای به حداقل رساندن تأثیر نقاط اعمال نیرو در نتایج آزمایش انتخاب شده‌اند. آزمایشات انجام گرفته تعیین خواص مکانیکی شامل اندازه گیری‌های سرعت صوت، آزمایشات مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت فشاری سه محوره و مقاومت کششی سه محوره و آزمایشات وابسته به زمان خزش فشاری تک محوره می‌باشند. اطلاعات حاصل در طراحی و ارزیابی مغار و تأسیسات ذخیره‌سازی استراتژیک گاز طبیعی در این گنبد بکار گرفته خواهند شد. در این مطالعه به ارزیابی و تشریح نتایج آزمایشات کوتاه مدت و وابسته به زمان پرداخته شده و نحوه تعیین مدول یانگ در آزمایشات کوتاه مدت، انرژی تغییر شکل، مقاومت شکست، مقاومت اتساع بر اساس هر دوی کرنش حجمی و زمان سیر موج التراسونیک و خرابی نمونه‌های نمکی ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: ذخیره سازی گاز طبیعی، مغار نمکی، کوتاه مدت، خزش، مقاومت شکست، اتساع، خرابی

۱- مقدمه

سنگ نمک بدلیل خاصیت ویسکوزیتی و ارائه تغییر شکل بدون شکستگی وابسته به زمان در تنش‌های تفاضلی رفتار نسبتاً منحصر بفردی در مقایسه با سایر محیط‌های زمین‌شناسی دارد این ویژگی، احداث فضاهای زیرزمینی بزرگ را که طی مدت زمان طولانی پایدار می‌مانند ممکن می‌سازد. از طرفی، تغییر شکل مداوم نمک منجر به کاهش حجم ذخیره‌سازی و بسته شدن مغار در طول زمان می‌شود [۱]. پارامترهای ژئومکانیکی نظیر پارامترهای مقاومتی محیط و میزان تنش‌های وارده بر دیواره‌های مغار از عوامل مؤثر بر طراحی مغار محسوب می‌شوند. از آنجاییکه معمولاً عمق احداث مغارهای واقع در گنبدهای نمکی بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر زیر زمین است آبهای زیرزمینی یا سایر عوامل سطحی تأثیر کمی بر رفتار مغار دارند. لذا این عوامل کمتر در طراحی مغار مدنظر قرار

^۱ نویسنده اول: کارشناس ارشد ژئومکانیک، گروه مشاوران کیپ، elyasi@capegroup.ir

^۲ نویسنده مسوول: رئیس امور مهندسی تحت‌الارضی، شرکت ملی گاز ایران، alithca@yahoo.ca

^۳ نویسنده سوم: کارشناس ارشد زمین‌شناسی نفت، شرکت ملی گاز ایران، sheikhzadeh_h@yahoo.com

می گیرند. با توجه به رفتار ویسکوپلاستیک نمک در اعماق زیاد، میزان تنش های تفاضلی و جهت آنها تعیین کننده رفتار سنگ نمک در دیواره مغار است. این تنش ها در شرایطی از بزرگی می تواند باعث ایجاد ریزشکاف ها و در نتیجه اتساع نمک گردد [۲]. با افزایش عمق مغارهای واقع در گنبد های نمکی، حجم بیشتری از مواد هیدروکربوری قابل ذخیره سازی است، اما مشکلاتی از قبیل افزایش خزش دیواره های مغار بدلیل افزایش تنش های برجا سبب کاهش حجم آن می شود. همچنین با کاهش عمق قرارگیری مغار، احتمال بروز شکستگی های ناشی از تنش کششی و اتساعی در دیواره و سقف مغار افزایش می یابد که این امر باعث تحمیل هزینه ها و ریسک های بیشتری به پروژه می شود. با توجه به ویژگی های منحصر به فرد نمک، طراحی فضاهای زیرزمینی واقع در آن از پیچیدگی های خاصی برخوردار است.

پروژه ذخیره سازی گاز طبیعی در ساختار نمکی نصرآباد کاشان تا کنون با موفقیت توسعه یافته است. در ابتدا با مطالعات ژئوفیزیک (غیر لرزه ای و لرزه ای) آغاز و سپس اولین چاه در این ساختار حفاری گردید. نتایج حفاری چاه و مغزه گیری از آن نشان دهنده ضخامت مناسب نمک جهت احداث مغار ذخیره سازی می باشد. آزمایشات مکانیک سنگی مغزه ها در آزمایشگاه بخش ژئومکانیک دانشگاه کلاوستال کشور آلمان به انجام رسیده است. آزمون های آزمایشگاهی انجام گرفته شامل آزمایشات مقاومت فشاری تک محوره (UC)، مقاومت فشاری سه محوره (TC)، مقاومت کششی سه محوره (TE) و خزش فشاری تک محوره (UCC) می باشند. تمامی نمونه ها در شرایط خشک و مطابق استاندارد ASTM D4543 [۳] آماده شده و دارای طول و قطر بترتیب ۱۸۰ و ۹۰ میلیمتر می باشند. قبل از آزمایش، نقاط ضعف مهم و صافی سطوح نمونه مورد بررسی قرار گرفته و عکس نمونه ها تهیه می گردد. بعد از تهیه عکس، نمونه ها در دستگاه آنالیز موج اتساعی قرار گرفته، سرعت امواج التراسونیک فشاری (P) و برشی (S) اندازه گیری و وضعیت مکانیکی نمونه ها بررسی می شوند. جهت محاسبه مدول الاستیک و نسبت پواسون دینامیک از روابط موجود که در اغلب منابع کتابخانه ای مرتبط یافت می شود استفاده می گردد.

اهداف انجام آزمون های آزمایشگاهی مورد اشاره عبارتند از:

- تعیین ثابت های الاستیک که مشخصه های سنگ های غیر نمکی و نمک را بخوبی ارائه می کند.
 - تعیین مقاومت شکست، مقاومت اتساع، خرابی و ... نمونه ها
 - تعیین تغییر شکل وابسته به زمان نمونه های نمکی
- نتایج بالا، خواص مکانیکی شبه استاتیک و رفتار خزش سنگ های میزبان را که برای طراحی، ساخت و بهره برداری از مغار/مغارهای ذخیره سازی نصرآباد کاشان ضروری است، ارائه می دهد.

۲- آزمایشات کوتاه مدت

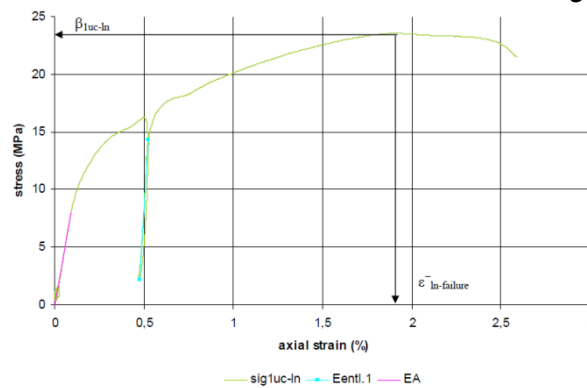
آزمون کوتاه مدت بدین معنی است که مدت زمان انجام آن به چند دقیقه تا چند ساعت می رسد. این آزمایشات بصورت تنش کنترل شده (نرخ تنش ثابت) و یا تحت کرنش کنترل شده (نرخ کرنش ثابت) انجام می گیرند.

۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

مقاومت فشاری یکی از پرکاربردترین پارامترها برای بررسی مشخصات سنگ نمک است. نتایج مطالعات نشان می دهد شکست سنگ نمک تحت تنش فشاری تک محوره با شروع و تشکیل شکستگی های ریز از قسمت ناهمگن یا نقیصه های ذاتی نظیر ترک ها شروع می شود. در تنش های فشاری تک محوره، رشد پایدار این ترک ها باعث شروع اتساع نمونه ها می شود [۴]، [۵]، [۶]. بطور کلی در مرحله تغییر شکل الاستیک، حجم نمونه بدلیل تراکم و بسته شدن ریزترک ها کاهش و بعد از مرحله تغییر شکل الاستیک بدلیل بازشدگی مجدد ترک ها و همچنین ایجاد

ارزیابی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین رفتار مقاومتی و خزشی نمونه‌های نمکی ۳

ترک‌های جدید افزایش می‌یابد [۷]، [۸]. آزمایش کوتاه مدت مقاومت فشاری تک محوره توسط دستگاه با سیستم اعمال فشار هیدولیکی و با ظرفیت اعمال فشار ۲۵۰ کیلو نیوتن و در دمای اتاق (تقریباً ۲۵ درجه سانتیگراد) انجام گرفته است. آزمایشات در نرخ ثابت کرنش ($\dot{\epsilon}_1 = 0.25\%/min = 4.17 \times 10^{-5} s^{-1}$) انجام گرفته تا اینکه مقدار کرنش محوری (ϵ_1) به ۰/۵ درصد برسد. سپس، جهت اندازه‌گیری مدول الاستیک نمونه، سیکل باربرداری-بارگذاری بصورت تنش کنترل شده انجام می‌گیرد. در نهایت، آزمایش تا شکست نمونه با نرخ کرنش کنترل شده مورد اشاره ادامه می‌یابد. در طی آزمایش، در ابتدا، تنش سریعاً با کرنش نمونه افزایش می‌یابد، هرچند نهایتاً تنش به مقدار ماکزیمم رسیده و با ادامه کرنش نمونه، کاهش پیدا می‌کند. تنش ماکزیمم بعنوان مقاومت فشاری تک محوره در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): تعیین مقاومت شکست کوتاه مدت (β_{1uc-ln}), کرنش شکست ($\epsilon_{1uc-failure}$) و مدول تغییر شکل (E) در آزمایش UC

تغییر شکل نمونه و فشار اعمالی بصورت پیوسته و الکترونیکی هر یک ثانیه اندازه‌گیری و کرنش محوری (ϵ_t) نمونه از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. با محدود کردن ارزیابی به تغییر شکل‌های کوچک ($\epsilon < 2\%$), کرنش بعنوان کرنش مهندسی (technical strain) و با توجه به تعریف استاندارد کرنش محاسبه می‌گردد.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

که ϵ_t کرنش مهندسی (٪)، l_0 طول اولیه نمونه و Δl تغییر شکل محوری نمونه می‌باشد. در شرایط تغییر شکل بزرگتر نمونه ($\epsilon > 2\%$), کرنش مهندسی توسط کرنش واقعی (لگاریتمی) جایگزین و از انتگرال نسبت تغییرات لحظه‌ای طول نمونه (بی‌نهایت کم) به طول لحظه‌ای آن بدست می‌آید:

$$\epsilon_{ln} = \left| \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \right| \cdot 100\% = \left| \ln \frac{l}{l_0} \right| \cdot 100\% = |\ln(1 - \epsilon_t)| \cdot 100\% \quad (2)$$

که ϵ_{ln} کرنش واقعی (٪) نمونه می‌باشد.

تنش تصحیح شده توسط یک تصحیح خطی یا لگاریتمی سطح مقطع بصورت رابطه (۳) تعیین می‌گردد.

$$\sigma_{1uc} = \frac{F_1}{A} \text{ where } A = \frac{A_0}{1 - \epsilon_t} \quad (3)$$

$$\sigma_{1uc-ln} = \frac{F_1}{A} \text{ where } A = \frac{A_0}{1 - \epsilon_{ln}} \quad (4)$$

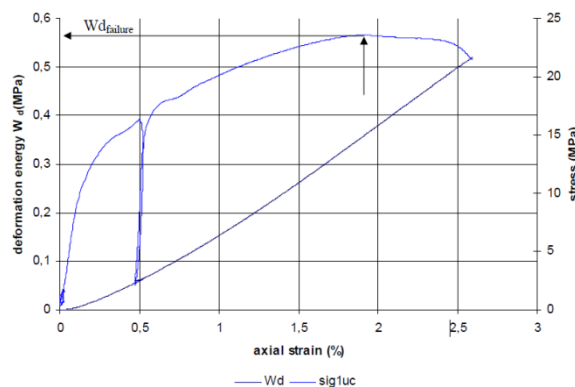
۴..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

که σ_{1uc} تنش محوری تصحیح شده خطی، σ_{1uc-ln} تنش محوری تصحیح شده لگاریتمی، F_1 نیروی محوری، A سطح مقطع نمونه تحت آزمایش، A_0 سطح مقطع اولیه نمونه، ε_t کرنش مهندسی و ε_{ln} کرنش واقعی (لگاریتمی) می‌باشد.

پارامتر دیگر مکانیکی که برای توصیف رفتار تنش-کرنش استفاده می‌شود، انرژی تغییر شکل در نقطه شکست بوده و از رابطه (۵) تعیین می‌گردد:

$$W_d = \int_0^{\varepsilon_{failure}} \sigma_v \cdot d\varepsilon_v \quad (5)$$

که σ_v تنش تصحیح شده فون میسز بصورت لگاریتمی، ε_v کرنش لگاریتمی فون میسز و W_d انرژی تغییر شکل می‌باشد. نمونه‌ای از انرژی تغییر شکل آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در شکل (۲) نشان داده شده است.



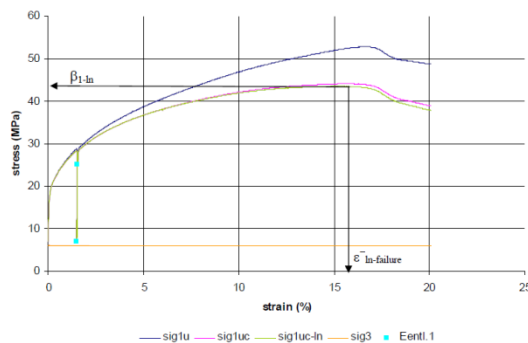
شکل (۲): تعیین انرژی تغییر شکل در لحظه شکست نمونه در آزمایش UC

۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری سه محوره

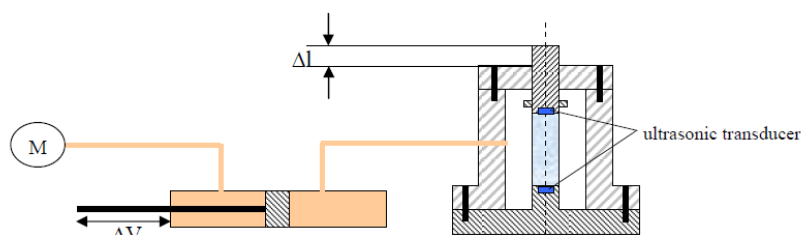
قبل از شروع آزمایش، نمونه به مدت یک شبانه روز در دما و فشار برجا قرار داده می‌شود (فشار هیدرواستاتیک ۳۰ مگاپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد). بعد از اتمام فاز تراکم‌سازی مجدد، فشار محوری و محصورکننده بصورت یکنواخت تا فشار اتمسفر پایین آورده می‌شود. سپس، مرحله اصلی آزمایش شروع می‌گردد بطوری که نمونه تا رسیدن به فشار محصورکننده در معرض فشار هیدرواستاتیک یکنواخت قرار می‌گیرد. سایر مراحل انجام آزمایش همانند آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و دمای آزمایش در طول آزمایش ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. لازم به ذکر است قبل از جایگذاری در سلول سه محوره، نمونه توسط غشای نفوذ ناپذیر به ضخامت ۳ میلی‌متر و جهت جلوگیری از برخورد سیال با نمونه و انجام واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پوشانده می‌شود.

علاوه بر ثبت پارامترهای معمول آزمایش نظیر فشار محوری، فشار محصورکننده، تغییر شکل محوری (شکل ۳) و دما، تغییرات حجم نمونه و تغییرات سرعت التراسونیک نظیر بطور مداوم حین آزمایش اندازه‌گیری می‌گردند. تغییر حجم از تغییر شکل محوری نمونه و تغییرات حجم روغن سلول سه محوره بدست می‌آید (شکل ۴). لازم به ذکر است تغییرات حجم نمونه با دقت ۰/۰۰۲۵ درصد اندازه‌گیری می‌شود.

ارزیابی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین رفتار مقاومتی و خزشی نمونه‌های نمکی ۵

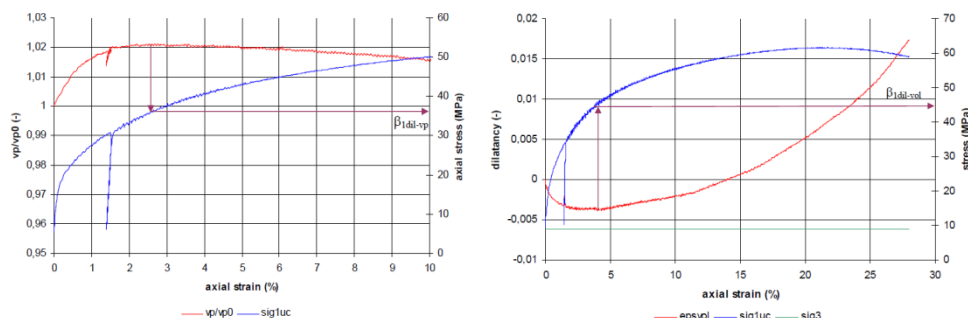


شکل (۳): تعیین مقاومت شکست کوتاه مدت، کرنش شکست و مدول تغییر شکل در آزمایش TC



شکل (۴): شماتیک اندازه گیری اتساع

همانطور که در شکل (۵) - راست نشان داده شده است مقاومت اتساع بر اساس تغییرات حجم تعیین می‌گردد ($\beta_{1dil-vol}$) و تنش محوری متناسب با حداقل تغییر حجم نمونه بعنوان مقاومت اتساع نامیده می‌شود. بمنظور تعیین دقیق‌تر مقاومت اتساع، ردیاب‌های تراسونیک در داخل پوشش و صفحات فشار قرار داده شده‌اند. اندازه گیری پیوسته سرعت التراسونیک طی آزمایش کمک می‌کند که مقاومت اتساع مستقل از تغییرات حجم بدست آورده شود. این مهم توسط تشخیص کاهش سرعت سیر التراسونیک ناشی از افزایش تغییر شکل‌های فیزیکی (ریزشکاف‌ها) انجام می‌گردد (شکل ۵- چپ). این شکل، ارتباط بین زمان سیر موج التراسونیک لحظه‌ای (V_P) و زمان سیر موج التراسونیک در زمان شروع آزمایش (V_{P0}) را نشان می‌دهد که ابتدا افزایش (در طی تراکم نمونه) و در نهایت با ادامه بارگذاری نمونه و در اثر تشکیل ریزشکاف‌ها کاهش می‌یابد. تنش محوری که در آن نسبت $\frac{V_P}{V_{P0}}$ حداکثر می‌شود مقاومت اتساع ($\beta_{1dil-vp}$) نامیده می‌شود.



شکل (۵): تعیین مقاومت اتساع بر اساس تغییرات کرنش حجمی (راست) و بر اساس زمان سیر موج التراسونیک (چپ) در آزمایش TC

۶..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

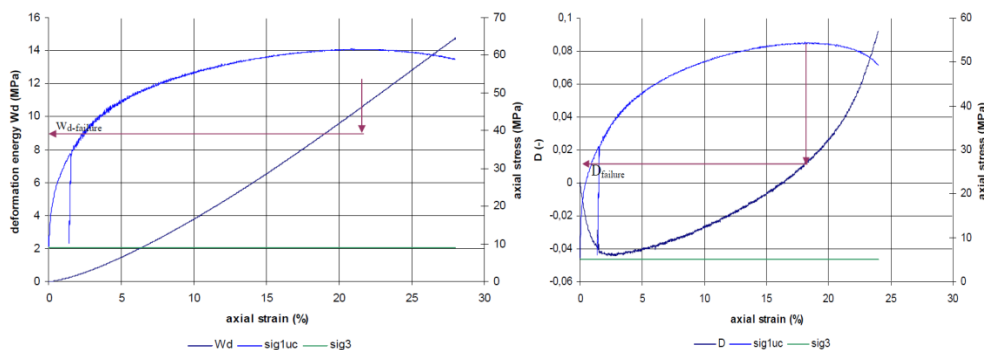
یکی از مدل‌های که امروزه بیشترین استفاده را در ارائه رفتار نمونه‌های نمکی دارد مدل هو-لوکس (Hou/Lux) می‌باشد. در این مدل، تغییرات حجم نمونه و سرعت التراسونیک جهت تعیین شدت خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$\frac{v_p}{v_{p0}} = \frac{v_s}{v_{s0}} = \sqrt{(1-D) \cdot (1-\varepsilon_{vol})} \quad (۶)$$

$$D = 1 - \frac{1}{1-\varepsilon_{vol}} \cdot \left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^2 = 1 - \frac{1}{1-\varepsilon_{vol}} \cdot \left(\frac{v_s}{v_{s0}}\right)^2 \quad (۷)$$

که v_{p0} و v_{s0} بترتیب سرعت امواج فشاری و برشی در ابتدای آزمایش، v_p و v_s بترتیب سرعت امواج فشاری و برشی لحظه‌ای، D خرابی و ε_{vol} تغییرات حجم (-) اتساع و + تراکم) می‌باشد.

شکل (۶)-راست خرابی نمونه طی آزمایش مقاومت فشاری سه محوره را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، خرابی در اوایل بارگذاری و به دلیل افزایش سرعت موج و کاهش حجم نمونه بصورت منفی می‌باشد. بعد از رسیدن آن به کمترین مقدار، بطور پیوسته و حسب نرخ تغییرات حجم و تغییرات سرعت موج افزایش می‌یابد. همانند آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، در این آزمایش نیز انرژی تغییر شکل نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌گردد (شکل ۶-چپ).

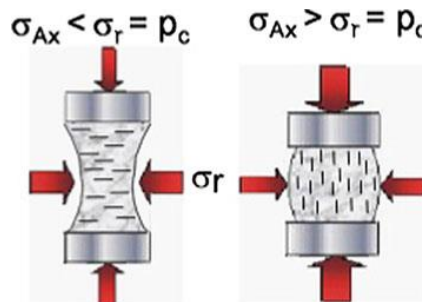


شکل (۶): تعیین خرابی (راست) و انرژی تغییر شکل (چپ) در نقطه شکست در آزمایش TC

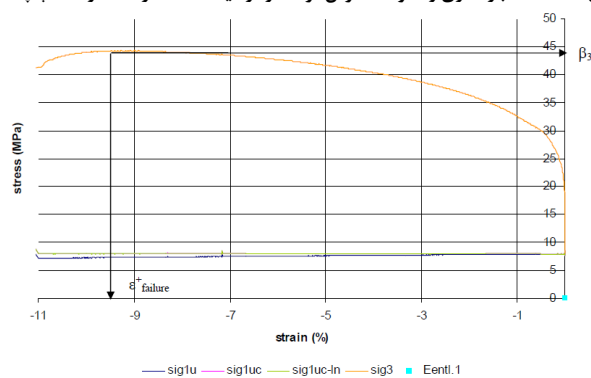
۳-۲- آزمایش مقاومت کششی سه محوره

محاسبات عددی نشان می‌دهد زمانیکه مغار در حالت حداقل فشار داخلی یا فشار نزدیک به آن است تنش در نزدیکی مغار بیشتر بصورت سه محوره کششی می‌باشد تا سه محوره فشاری [۹]. لذا انجام این آزمایش در ارزیابی رفتار مغارهای ذخیره‌سازی بسیار حائز اهمیت است. بطور کلی، ابزار اندازه‌گیری و همچنین ارزیابی نتایج این آزمایش همانند آزمایش مقاومت فشاری سه محوره است. تنها تفاوت این دو آزمایش شرایط بارگذاری نمونه می‌باشد. در آزمایش مقاومت کششی سه محوره، تنش محصور کننده در حالت تنش ثابت محوری تا لحظه شکست نمونه افزایش می‌یابد (شکل ۷) و بر خلاف آزمایش TC، آزمایش TE منجر به کشیدگی نمونه می‌شود. معمولاً، جهت تشخیص بهتر شرایط مختلف بارگذاری، تغییر شکل محوری این آزمایش در مقایسه با آزمایش مقاومت فشاری سه محوره در جهت عکس ترسیم می‌گردد (شکل ۸).

ارزیابی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین رفتار مقاومتی و خزشی نمونه‌های نمکی ۷

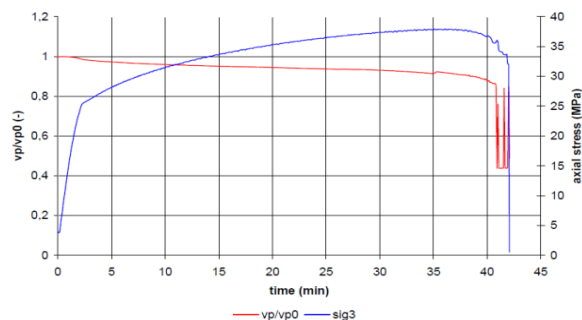


شکل (۷): حالت بارگذاری و نحوه گسترش ترک در آزمایشات TC (راست) و TE (چپ) [۱۰]



شکل (۸): تعیین مقاومت شکست و کرنش شکست در آزمایش TE

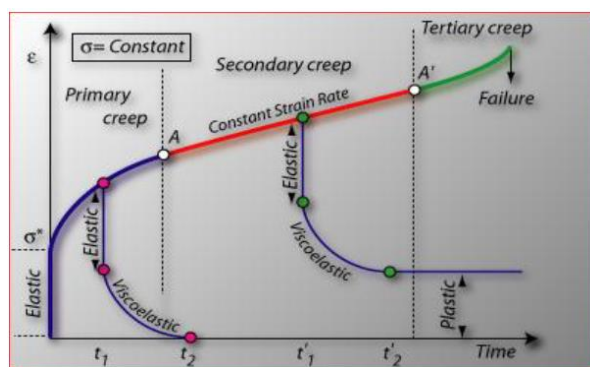
در این آزمایش، اتساع ناشی از خرابی و تغییر شکل الاستیک بدون خرابی در جهت یکسانی هستند. علاوه بر این، فشار محصورکننده و همچنین قابلیت فشرده‌سازی متعلق به سیستم آزمایش (روغن، سیلندر و ...) به صورت پویا تغییر می‌کند. بنابراین، مقاومت اتساع را نمی‌توان از طریق نقطه چرخش بین تراکم و اتساع نمونه در طی آزمون تعیین نمود. علاوه، نسبت سرعت موج التراسونیک لحظه‌ای به سرعت موج التراسونیک در شروع آزمایش در تمام مدت آزمایش روند کاهشی دارد (شکل ۹). یعنی بر خلاف آزمایش TC، کشیدگی محوری در طول آزمایش رخ می‌دهد نه تراکم محوری. در نتیجه، تغییر حجم ناشی از خرابی و کرنش الاستیک در جهت محوری منجر به کاهش تراکم در جهت محوری شده و نقطه چرخش بین افزایش و کاهش سرعت موج التراسونیک مشاهده نمی‌شود و نمی‌توان مقاومت اتساع را از اندازه‌گیری سرعت موج P تعیین نمود.



شکل (۹): زمان سیر موج التراسونیک در آزمایش TE

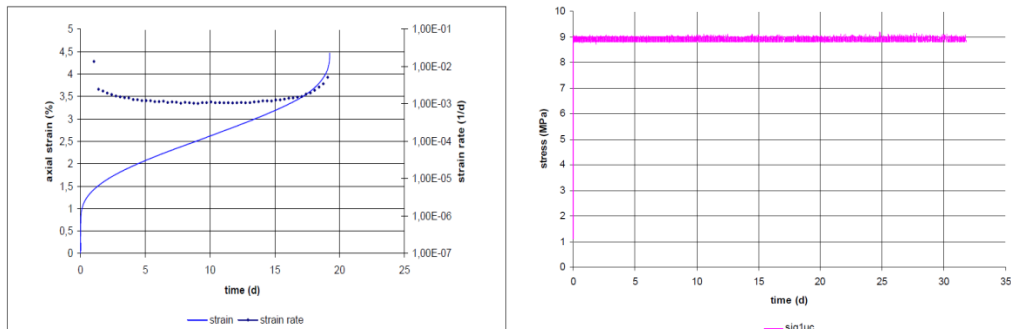
۳- آزمایشات وابسته به زمان

در شرایط بار ثابت، سنگ نمک دارای رفتار فیزیکی غیر خطی وابسته به زمان و دما است. مقاومت آن بستگی به میزان تنش و زمان موثر اعمال آن دارد. مقاومت تعیین شده در آزمایشگاه‌ها در مدت زمان کوتاه اندازه‌گیری می‌شوند و نمی‌توانند برای دوره‌های زمانی طولانی بدون کاهش خاصی اعمال شوند. سنگ‌های سخت رفتار وابسته به زمان نداشته و شکننده‌تر هستند. دلیل اینکه نمک چنین رفتاری نشان می‌دهد مربوط به ساختار میکروکریستال‌های آن است بطوریکه لغزش و جابجایی می‌تواند بین صفحات کریستال‌ها رخ دهد. همانند بسیاری از مواد دیگر (به عنوان مثال فولاد در دمای بالا، بتن، پلاستیک) و دیگر سنگ‌ها، رفتار خزش سنگ نمک را می‌توان با تقسیم آن به سه منطقه (خزش اولیه، خزش ثانویه و خزش ثالثیه) تعیین نمود (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): شماتیک کرنش خزشی-زمان

در خزش اولیه، تغییرشکل زیادی در مدت زمان کم رخ می‌دهد که باعث ایجاد نمودار با شیب زیاد می‌شود. در زمانی که ماده هنوز در معرض بار ثابت قرار دارد افزایش تغییرشکل، با کاهش نرخ آن همراه است که این رخداد به سخت‌شوندگی ارتباط دارد و تا رسیدن به مرحله پایا ادامه می‌یابد [۱۱]. در صورت باربرداری در این مرحله، طول نمونه بحالت قبل از بارگذاری برخواهد گشت. مرحله دوم خزش از نظر زمانی، طولانی‌ترین مرحله است بطوریکه در آن نرخ کرنش تمایل به ثابت شدن دارد و در صورت باربرداری در این مرحله، کرنش نمونه کاملاً برگشت‌پذیر نبوده و تغییرشکل ماندگاری در نمونه رخ خواهد داد. مرحله سوم وقتی آغاز می‌شود که نرخ تغییرشکل به صورت نمایی افزایش یافته و باعث شکست می‌شود. در این مرحله به خاطر تولید میکروشکستگی‌ها، افزایش حجم رخ می‌دهد. لازم به ذکر است طراحی مکانیکی مغارها اغلب بر روی دو مرحله اولیه و ثانویه متمرکز است. آزمایشات خزش بصورت تک محوره در دمای برجا (۵۰ درجه سانتیگراد) انجام و پارامترهای مرتبط با آزمایش بطور مداوم و هر ۵ دقیقه بطور خودکار اندازه‌گیری و ثبت گردیده‌اند. منحنی‌های مشخصه آزمایشات خزش براساس داده‌های اندازه‌گیری شده و در نمودارهای کرنش-زمان و نرخ خزش-زمان ترسیم می‌گردند (شکل ۱۱):



شکل (۱۱): تنش بر حسب زمان (راست) و کرنش/نرخ تنش بر حسب زمان (چپ) در آزمایش UCc

در جدول (۱) نرخ خزش پایدار که از شیب منحنی کرنش-زمان در قسمت خطی منحنی بدست آمده است به همراه پارامترهای آزمایش آورده شده است.

جدول (۱): نتایج آزمایشات UCc

نمونه	تنش محوری (MPa)	دما (C°)	نرخ کرنش پایدار (1/d)
۱	۱۰	۵۰	$1/15 \times 10^{-3}$
۲	۶	۵۰	$3/50 \times 10^{-3}$
۳	۶	۵۰	$4/54 \times 10^{-3}$
۴	۱۲٫۵	۵۰	$6/97 \times 10^{-3}$
۵	۷	۵۰	$6/80 \times 10^{-3}$
۶	۹	۵۰	$7/00 \times 10^{-3}$
۷	۸	۵۰	$6/50 \times 10^{-3}$
۸	۸	۵۰	$2/40 \times 10^{-3}$
۹	۹	۵۰	$1/15 \times 10^{-3}$
۱۰	۷	۵۰	$1/20 \times 10^{-3}$

۴- نتایج

آزمون‌های آزمایشگاهی بخش مهمی از طراحی مکانیک سنگی مغار در توده سنگ نمک هستند. تلفیق نتایج آزمایشات کوتاه مدت و بلند مدت در مدل‌های تئوری و روش‌های ارزیابی، طراحی ایمن مغار را بدست می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و تجارب مغارهای موجود نشان می‌دهد که با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و محاسبات صحیح می‌توان برآوردهای واقع بینانه از همگرایی حفره در طی عملیات ذخیره‌سازی انجام داد. تعداد آزمایشات آزمایشگاهی با توجه به حقایق اقتصادی و ضرورت اطلاعات مورد نیاز در مورد توده سنگ در منطقه پروژه تعیین می‌گردد.

آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل دارای ارتفاع و قطر به ترتیب ۱۸۰ و ۹۰ میلی‌متری انتخاب شده از محدوده بالا و پایین مغار و خود مغار (اعماق تقریبی ۱۱۰۰ تا ۱۴۰۰ متر) نصرآباد کاشان شامل هردوی آزمایشات تعیین خصوصیات مکانیکی کوتاه مدت و خزشی نمونه می‌باشد. در این مطالعه، نتایج آزمایشات

- ۱۰ سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت
- و نحوه تعیین مدول یانگ در آزمایشات کوتاه مدت، انرژی تغییر شکل، مقاومت شکست، مقاومت اتساع بر اساس هر دوی کرنش حجمی و زمان سیر موج التراسونیک، خرابی و رفتار وابسته به زمان نمونه‌های نمکی ارائه می‌گردد. برخی یافته‌ها و دستاوردهای این مطالعه عبارتند از:
- در آزمایش TC، مقاومت اتساع بر اساس هر دوی تغییرات حجم نمونه و تغییرات سرعت التراسونیک تعیین می‌گردد.
 - در آزمایش TC، خرابی در اوایل بارگذاری و به دلیل افزایش سرعت موج و کاهش حجم نمونه بصورت منفی می‌باشد. بعد از رسیدن آن به کمترین مقدار، بطور پیوسته و حسب نرخ تغییرات حجم و تغییرات سرعت موج افزایش می‌یابد.
 - در آزمایشات کوتاه مدت (UC، TC و TE)، مدول یانگ نمونه از طریق سیکل باربرداری و بارگذاری مجدد بصورت تنش کنترل شده تعیین می‌گردد.
 - در آزمایش TE، بر خلاف آزمایش TC، مقاومت اتساع را نمی‌توان از طریق نقطه چرخش بین تراکم و اتساع نمونه در طی آزمون و همچنین از طریق اندازه‌گیری موج التراسونیک تعیین نمود.
 - در آزمایش UCC، نرخ خزش پایدار که از مهمترین پارامترهای مشخصه خزشی طی طراحی می‌باشد از شیب منحنی کرنش-زمان در قسمت خطی منحنی بدست آورده می‌شود.

۵- مراجع

- [1] DeVries, K.L., Mellegard, K.D & Callahan, G.D.; (2003); "Laboratory Testing in Support of a Bedded Salt Failure Criterion", In Proceedings of the Solution Mining Research Institute Fall Meeting, Chester UK.
- [2] Munson, D.E., Fossum, A.F. & Senseny, P.E.; (1988); "Advances in Resolution of Discrepancies between Predicted and Measured In Situ WIPP Room Closures", SAND88-2948, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- [3] ASTM Standard D4543.; (2008); "Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4] Kawamoto, T., Ichikawa, Y. & Kyoya, T.; (1988); "Deformation and Fracturing Behavior of Discontinuous Rock Mass and Damage Mechanics Theory", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 12, pp. 1-30.
- [5] Tsang, C.F., Bernier, F. & Davies, C.; (2005); "Geohydromechanical Processes in the Excavation Damaged Zone in Crystalline Rock, Rock Salt, and Indurated and Plastic Clays - In the Context of Radioactive Waste Disposal", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42, pp. 109-125.
- [6] Li, Y.P., Yang, C.H., Qian, Q.H., Wei, D.H. & Qu, D.A.; (2007); "Experimental research on deformation and failure characteristics of laminated salt rock", in Proceedings of the sixth conference on the mechanical behavior of salt, Wallner, Lux, Minkley, Hardy, (Eds.), pp. 69-74.
- [7] King, M.S.; (1973); "Creep in Model Pillars of Saskatchewan Potash", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 10, pp. 363-371.
- [8] Chan, K.S., Munson, D.E., Bodner, S.R. & Fossum, A.F.; (1996) "Cleavage and Creep Fracture of Rock Salt", Acta Materialia, Vol. 44, pp. 3553-3565.
- [9] DeVries, K.L., Mellegard, K.D. & Callahan, G.D.; (2002); "Salt Damage Criterion Proof-of-Concept Research", United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory 626 Cochrans Mill Road Pittsburgh, Pennsylvania 16236.
- [10] Xing, W., Zhao, J., Düsterloh, U., Brückner, D., Hou, Z., Xie, L. & Liu, J.; (2014), "Experimental Study of Mechanical and Hydraulic Properties of Bedded Rock Salt from the Jintan Location", Acta Geotechnica, Vol. 9, pp. 145-151.
- [11] Munson D.E.; (1997); "Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34(2), pp. 233-247.



3rd National Conference on Petroleum Geomechanics

National Iranian Oil Company Exploration Directorate

Tehran, Jan,22-23,2019

Evaluation of Laboratory Tests Results to Characterize the Strength and Creep Behavior of Salt Rocks: A Case Study of Nasrabad e Kashan

Ayub Elyasi¹; Ali Teimouri Yadkuri²; Hossein Sheikhzadeh³

Extended Abstract: Understanding the thermal and mechanical properties of salt rock is necessary to evaluate the volume and duration of storage in salt caverns and required safety analysis. To achieve this goal, laboratory investigations are required. The laboratory program of Nasrabad salt cavern comprises tests to determine short-term mechanical properties and time-dependent (creep) behavior of salt. Integrating these results into the theoretical model and the assessment procedure will lead to a safe cavern design. With reference to the information regarding levels of the projected cavern (cavern top, cavern bottom, last cemented casing) the core material used for the lab tests was taken in different depths between $z \approx 1100\text{m}$ and $z \approx 1400\text{m}$. The Chair for Waste Disposal Technologies and Geomechanics at Clausthal University of Technology was engaged to conduct these tests. The cylindrical samples are 180mm and 90mm in length and diameter, respectively. These relatively large specimens were selected to reduce the influence of large crystals as much as possible, and to minimize the influence of the force application points on the results.

After a photographic documentation, the specimens were placed in the dilational wave analyzer to measure ultrasonic velocities of longitudinal waves (V_p) and transverse waves (V_s). Geomechanical tests were carried out to determine mechanical properties including ultrasonic wave velocity measurements, uniaxial compression strength test (UC), triaxial compression strength test (TC), triaxial extension strength test (TE), and uniaxial compression creep test (UCc). The data will be used in the design and evaluation of the cavern and gas storage facilities in the dome.

This study evaluates and describes the results of short-term and time-dependent rock mechanical tests and methods of accurate determination of Young's modulus in the short-term tests, deformation energy, failure strength, dilatation strength based on both volumetric strain and ultrasonic wave travel time; and damage are presented. Some findings and accomplishments are listed below:

- In the TC tests, the dilatation strength is determined based on variations of both sample size and ultrasonic velocity.
- In the short term tests, the Young's modulus is determined through a stress-controlled stress release and stress build-up cycle.
- In the TE tests, unlike the TC test, the dilation strength cannot be determined by either the turning point between compaction and dilation of the sample during the test or/and ultrasonic wave measurement.
- In the UCc tests, the stationary creep rate, were derived from the change in the linear part of the creep curve over a specific time.

Keywords: *Natural Gas Storage, Salt Cavern, Short Term, Creep, Failure Strength, Dilatation, Damage*

¹Senior Geomechanics Expert, CAPE Consultant Group | Tehran, elyasi@capegroup.ir.

²Corresponding Author: Subsurface Engineering Manager, National Iranian Gas Company | Tehran, alithca@yahoo.ca.

³Senior Petroleum Geologist National Iranian Gas Company| Tehran, sheikhzadeh_h@yahoo.com.