

بررسی آزمایشگاهی رفتار خزش سه محوری بر روی استوانه توخالی جداره ضخیم سنگ نمک شکوفه رحیمی^۱، مهدی حسینی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۳/۰۵/۲۰

دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۲۳

چکیده

سنگ نمک، متعلق به گروه سنگ‌های رسوبی شیمیایی غیرآلی بوده و عمدتاً از هالیت تشکیل شده است. گنبد‌های نمکی یکی از مهم‌ترین تله‌های نفتی مطرح هستند. حفاری در مقاطع نمکی با مشکلات زیادی همراه است. از مشکلات چالش برانگیزی که در عملیات حفاری این سازندها روی می‌دهد می‌توان به گیر افتادن رشته حفاری، کاهش قطر چاه و در نتیجه سیمان کاری نامناسب، گیر افتادن و گسیختگی لوله جداری اشاره کرد. همگرایی دیواره چاه در نمک‌ها در اثر پدیده خزش به وجود می‌آید. خزش یک پدیده وابسته به زمان است که تحت تنش ثابت رخ می‌دهد. در این پژوهش به بررسی اثر فشار محصور کننده و تنش تفاضلی بر روی رفتار خزش و سرعت کرنش سنگ نمک پرداخته شده و در نهایت رابطه‌ای که بر اساس پارامترهای فوق بتوان مقدار سرعت کرنش را تخمین زد ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش تنش تفاضلی و افزایش فشار محصور کننده سرعت کرنش افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: نمک، خزش، فشار محصورکننده، تنش تفاضلی، کرنش جانبی، استوانه توخالی

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،

۲. استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، Meh_hosseini18@yahoo.com

* مسول مکاتبات

۱. مقدمه

سنگ نمک، متعلق به گروه سنگ‌های رسوبی شیمیایی غیرآلی بوده و عمدتاً از هالیت (Halite) تشکیل شده است (اخروی، ۱۳۸۲). نمک ماده‌ای طبیعی است که تحت تأثیر تنش‌های انحرافی و فرآیندهای تغییر شکل، از کنار هم قرار گرفتن اجزا تشکیل دهنده آن در طول دوران زمین‌شناسی به وجود آمده است (Cristescu and Hunsche, 1998). ذخایر نمک به دو صورت گنبدی و لایه‌ای در طبیعت یافت می‌شوند (Goodman, 1989). در منابع مختلف، شکست هالیت تحت بارهای فشاری به هر دو صورت ترد گونه و تغییر شکل‌پذیر گزارش شده است (Agergaard, 2009). رفتار نمک را می‌توان برآیندی از تغییر شکل‌های الاستیک، الاستو-پلاستیک و پلاستیک در نظر گرفت. البته عوامل متعددی همچون دما، رطوبت، سطح تنش‌های انحرافی و غیره نیز بر رفتار نمک تأثیر گذارند (Jeremic, 1994). لذا سنگ نمک یکی از پیچیده‌ترین مصالح موجود در طبیعت است که به عنوان سنگ میزبان، برای ساخت و توسعه فضاها‌های زیرزمینی نظیر معادن نمک و مغاره‌های بزرگ مقیاس، همواره مورد مطالعه محققان بوده است. خواص ویژه نمک از جمله تخلخل و نفوذپذیری بسیار اندک، تغییرشکل زیاد، خواص ترمیم‌پذیری و ... موجب شده تا از سنگ نمک به عنوان میزبانی مناسب برای ایجاد حفاریات زیرزمینی به منظور ذخیره نفت، گاز، هوای فشرده و سایر سیالات استفاده شود که توانایی انحلال و واکنش با آن را ندارد (Yang and Yin, 1999). حفاری در مقاطع نمکی با مشکلات زیادی همراه است. از مشکلات چالش برانگیزی که در عملیات حفاری این سازندها روی می‌دهد می‌توان به گیر افتادن رشته لوله‌های حفاری، کاهش قطر چاه و در نتیجه سیمان کاری نامناسب، گیر افتادن و گسیختگی لوله جداري اشاره کرد. از آنجایی که حوزه‌های نفتی زیادی در زیر ساختارهای نمکی قرار گرفته‌اند، اطمینان داشتن از یکپارچگی و سلامت چاه‌های حفر شده در ساختارهای نمکی در طول عمر مخزن یک چالش مهم در مهندسی حفاری است. زیرا شکست چاه منجر به صرف میلیون‌ها دلار هزینه تعمیرات و از

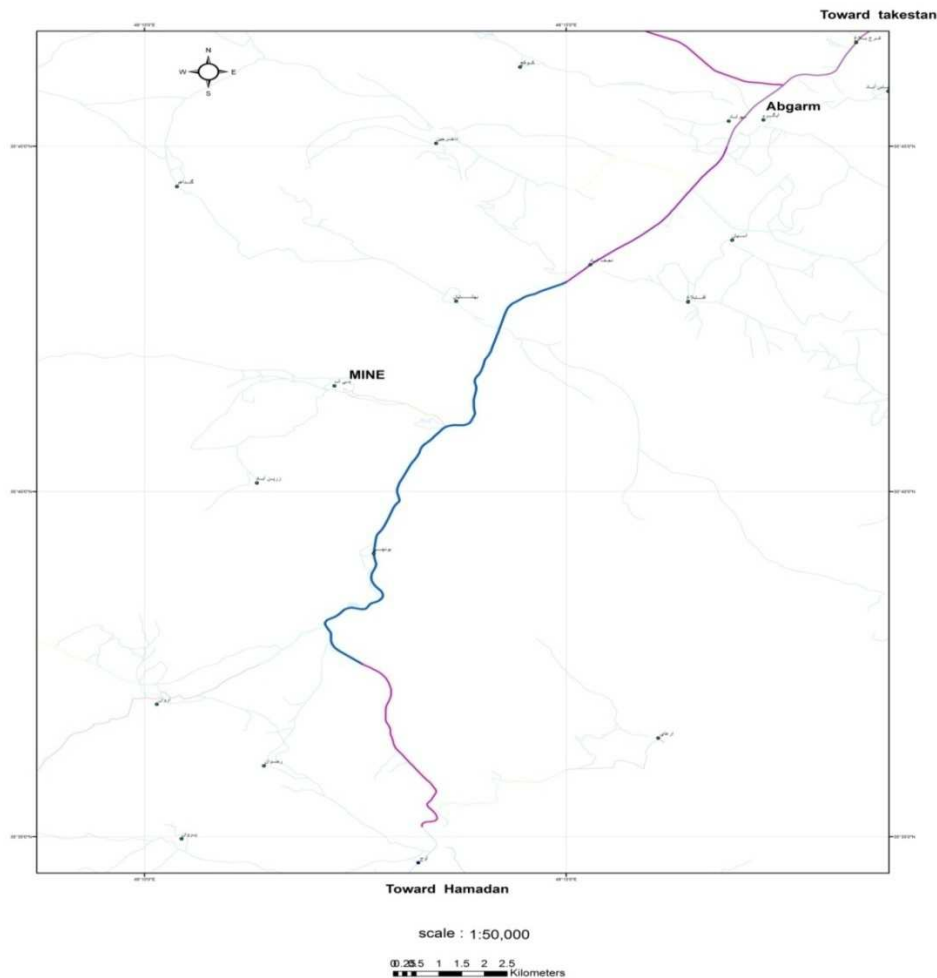
بین رفتن تولید خواهد شد (Farmer and Miller, 1996). همگرایی دیواره چاه در نمک‌ها در اثر پدیده خزش به وجود می‌آید. خزش یک پدیده وابسته به زمان است که تحت تنش ثابت رخ می‌دهد. فرایند تغییرشکل خزش وابسته به زمان را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد: مرحله خزش اولیه و ناپایا، مرحله خزش ثانویه و پایا و مرحله سوم که شکست رخ می‌دهد. همچنین خزش به چندین فاکتور مانند ویژگی ساختار سنگ، تنش، دما و زمان وابسته است. در طول دهه‌های گذشته، تلاش‌های بسیاری در جهت مطالعه بر رفتارهای وابسته به زمان سنگ نمک و پارامترهای مؤثر بر آن از جمله اثر تنش، نرخ کرنش (Farmer and Gilbert, 1984)، درجه حرارت (Cristescu and Hunsche, 1998)، رطوبت (Cleach et al., 1996) و ناخالصی (Franssen and Spiers, 1990) انجام شده است.

بنابراین یکی از اهداف اساسی در حفظ سلامت هر چاه بهره‌گیری از سیال حفاری و لوله جداري متناسب می‌باشد تا در برابر فشارها و تنش‌های موجود در زمین، همگرایی دیوار چاه را کنترل و از گسیختگی لوله جداري جلوگیری کند. برآورده کردن دو مورد اخیر تنها با مطالعه رفتار خزشی امکان‌پذیر است.

در ده‌های اخیر بسیاری از محققین، رفتار وابسته به زمان سنگ نمک را در آزمایش‌های تک‌محوری و سه محوری بررسی کرده‌اند (Munson, 1979, Hunsche, 1994). Berest et al. (2005) آزمایش خزش تک‌محوری بر روی نمونه توپر سنگ نمک انجام دادند که آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نرخ خزش با افزایش تنش اولیه اعمال شده افزایش می‌یابد. (Cristescu, 1996). Singh (1975) و Agergaard (2009) در این زمینه تحقیقات زیادی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سنگ نمک تقریباً در تنش محوری بسیار پایین نیز تغییر شکل‌های پلاستیک از خود بروز می‌دهد که این امر حکایت از تغییر شکل‌پذیری بالای این سنگ است. یانگ و همکارانش در زمینه آزمایش خزش سه محوری روی نمونه‌های توپر تحقیقاتی انجام دادند و اثر تنش تفاضلی و فشار محصور کننده

ضخیم برای ارزیابی معیار جریان یافتگی سنگ نمک بوده است و ایشان به بررسی جریان یافتگی نمک پرداخته‌اند تا یک معیار جریان یافتگی مناسبی را برای سنگ نمک ارائه دهند (Morgan and Wawersik, 1991). مورگان و واورسیک تحقیقاتی در زمینه پاسخ‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در استوانه توخالی جدار ضخیم سنگ نمک تحت بارگذاری همگن و ناهمگن انجام داده‌اند. در این تحقیق به مدل‌سازی رفتار سنگ نمک در اطراف فضا‌های زیرزمینی پرداخته‌اند (Wawersik and Morgan, 1989).

را بر روی نرخ کرنش گزارش کرده و به این نتیجه رسیدند با افزایش تنش تفاضلی نرخ کرنش افزایش و با افزایش فشار محصورکننده، نرخ کرنش کاهش می‌یابد (Yang et al., 1999). در زمینه آزمایش خزش تک محوری و سه محوری بر روی استوانه توخالی جدار ضخیم آزمایش‌های زیادی انجام نشده است. هانش نتایج آزمایش تک محوری در تنش محوری ۲۱/۵ مگاپاسکال روی استوانه توخالی را گزارش کرده‌اند. این آزمایش برای تعیین کرنش به عنوان تابع زمان تحت بار ثابت می‌باشد که اغلب با افزایش نرخ کرنش شکست اتفاق می‌افتد (Hunsche, 1994). تحقیقات واورسیک و همکارانش بر روی آزمایش خزش سه محوری بر روی استوانه توخالی جدار



شکل ۱. محل نمونه‌برداری

بالا به ویژه وقتی که محصور نشده، به شدت شکننده است و همچنین در آب محلول می‌باشد. امکان انجام مغزه‌گیری خشک به خاطر ایجاد تنش حرارتی وجود ندارد. به طور مشابه، از آب هم نمی‌توان استفاده کرد زیرا باعث حل شدن سنگ نمک و تغییر در ویژگی‌های آن می‌شود. روش نهایی برای مغزه‌گیری از سنگ نمک، ترکیبی از تجارب گذشته و آزمون و خطا بود. در این روش، مغزه‌گیری با استفاده از آب نمک اشباع انجام شد (Hosseini et al., 2012). در نهایت آب نمک اشباع به عنوان سیال حفاری سنگ نمک مورد مطالعه استفاده شد. همچنین این سیال به عنوان سیال خنک کاری در برش نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سیستم بازیابی برای بازیافت آب نمک برای جلوگیری از تولید آب شور بیشتر، مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). بعد از برنامه مغزه‌گیری، ابعاد نمونه با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. در نهایت، بعد از برش و تسطیح (شکل ۳)، برای جلوگیری از اثر هرچند ناچیز آب نمک اشباع، مغزه‌ها به سرعت خشک شده و پس از اندازه‌گیری دوباره ابعاد و کدگذاری، در محفظه‌های در بسته قرار گرفتند تا رطوبت و شرایط طبیعی آن‌ها دستخوش حداقل تغییرات شود (شکل ۴).



شکل ۲. سیستم بازیابی آب شور

در این مقاله خواص وابسته به زمان سنگ نمک توسط آزمایش خزش سه محوری بر روی استوانه توخالی جدار ضخیم بررسی شده است. هدف از این تحقیق بررسی اثر فشار محصور کننده و تنش تفاضلی بر روی رفتار خزش و سرعت کرنش سنگ نمک و در نهایت به دست آوردن رابطه‌ای است که براساس پارامترهای فوق بتوان مقدار سرعت کرنش را تخمین زد. در این مقاله یک رابطه برای تخمین نرخ کرنش مرحله خزش پایدار به کمک تنش تفاضلی و فشار محصور کننده ارائه شده است.

۲. نمونه مورد مطالعه

در زمان انجام این تحقیق، به دلیل اینکه برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای قطر بزرگ از گنبد‌های نمکی واقع در سازند گچساران مغزه‌گیری نشده بود، نمونه‌های سنگی مورد نظر از یک معدن نمک در زون آبگرم واقع در جنوب شهرستان قزوین که با نمک سازند گچساران که در مناطق نفت خیز جنوب واقع است همسن می‌باشد (لازم به ذکر است نمونه استوانه‌ای قطر ۵۴ میلی‌متر از سازند گچساران وجود داشت که بر روی آن آزمایش تک‌محوری انجام شد که نتایج نشان می‌دهد ثابت‌های الاستیک و مقاوم تک‌محوری آن نزدیک به نمونه‌های برداشت شده از زون آبگرم ۱ ست)، برداشت شده است. نقشه محدوده و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. مغزه‌گیری و آماده‌سازی نمونه

تهیه مغزه‌های استوانه توخالی جدار ضخیم با قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است. نمونه‌ها از بلوک‌های سنگی که از معدن روباز واقع در جنوب قزوین برداشت شده تهیه شده است. برنامه مغزه‌گیری آزمایشگاهی بر روی بلوک سنگی نیاز به صرف زمان، تلاش و مواد مصرفی زیاد دارد. شماری از مشکلات مغزه‌گیری مستقیماً به ساختار داخلی نمک وابسته است. این ماده نرم با ساختار بلوری، در دمای



شکل ۴. نمونه آماده شده برای آزمایش خزش



شکل ۳. برش و تسطیح

جدول ۱. نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه مورد مطالعه

مقاومت تراکم تک محوری (مگاپاسکال)	مدل الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	جرم مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱۹/۵	۵۹۷/۷	۰/۳۱	۰/۹۱	۴۴/۴	۱/۸	۱/۹۹

سپس میانگین پارامترهای نتیجه شده از این آزمایش به عنوان خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ نمک در نظر گرفته شده است. همچنین جرم مخصوص خشک نمونه‌ها نیز تعیین شده است. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۵. سلول آزمایش خزش سه محوری

سلول خزش سه محوری برای انجام آزمایش خزش روی استوانه‌ی توخالی نمونه‌های سنگ نمک تحت تراکم سه محوری در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) طراحی و ساخته شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سلول این است که امکان نصب کرنش سنج الکترونیکی بر روی نمونه وجود دارد. در ضمن با بالا و پایین بردن پیستون امکان نصب نمونه‌هایی با ارتفاع تا ۱۷۰ میلی‌متر نیز وجود دارد. یک برش از این سلول در شکل ۵ نمایش داده شده است. با این سلول امکان اعمال تنش تا فشار ۵۰

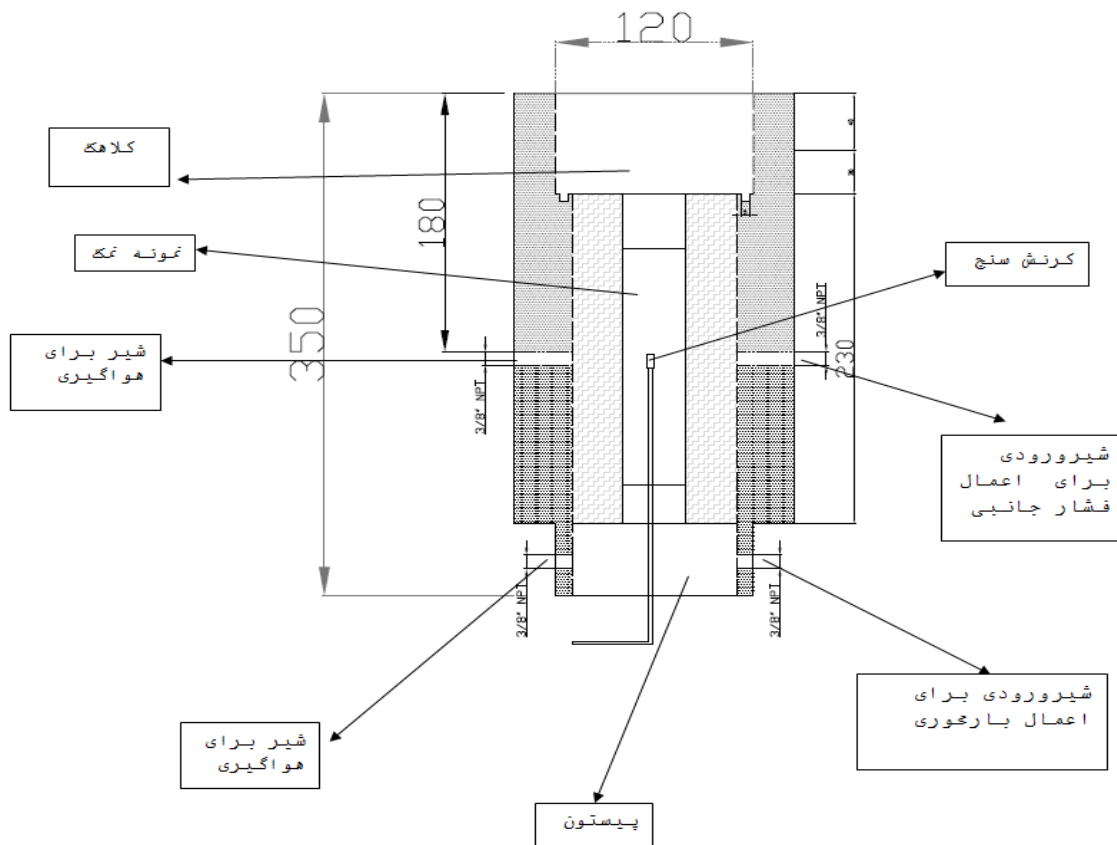
۴. آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های سنگ نمک

قبل از انجام آزمایش‌های خزش، باید آزمایش‌های پایه مکانیک سنگ به منظور به دست آوردن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش انجام شود. آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های نمک انجام شده است شامل آزمایش‌های تراکم تک محوری، سه محوری و برزیلی می‌باشد. مغزه‌های استوانه‌ای توپر با قطر ۵۱ و ۵۴ میلی‌متر با نسبت طول به قطر ۲ بر اساس استاندارد ASTM، برای انجام آزمایش‌های مقاومت تراکم تک محوری، مقاومت تراکم سه محوری، مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شده است. از آزمایش‌های تک محوری می‌توان مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و از آزمایش‌های سه محوری می‌توان مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تعیین کرد.

لازم به ذکر است هر کدام از آزمایش‌های تراکم تک محوری، سه محوری و آزمایش برزیلی روی ۵ نمونه انجام شده است و

اعمال می‌کند. این دستگاه در طول آزمایش فشار را ثابت نگاه می‌دارد و به سلول خزش سه محوری متصل است. تغییر شکل جانبی توسط کرنش سنج اندازه‌گیری می‌شود.

مگاپاسکال وجود دارد. دستگاه پمپ اعمال فشار محصورکننده، فشار جانبی را توسط روغن هیدرولیک به نمونه وارد می‌کند. این پمپ با داشتن دو خروجی بار محوری را هم



شکل ۵. برشی از سلول سه محوری خزش

کمترین اصطکاک را بین صفحه فولادی و سطح نمونه ایجاد کند. برای آبنندی سیستم از اورینگ‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود و هر دو پوشش لاستیکی روی صفحه بارگذاری بالا و پایین توسط اورینگ ثابت می‌شود که باعث فیکس شدن پوشش لاستیکی بر روی نمونه نمک می‌شوند. در این مقاله از سه اورینگ استفاده شده است. در نهایت بخش بالایی توسط دو کلاهک استوانه‌ای که یکی در جداره داخلی سلول پیچ می‌شود و دیگری در قسمت مرکز کلاهک اول پیچ می‌شود و بر روی صفحه بارگذاری نیرو وارد می‌کند بسته می‌شود (شکل ۱۰). در شکل ۱۱ نمای کلی از سلول در حال انجام آزمایش خزش سه محوری مشاهده می‌شود.

بار محوری از طریق پیستون که در قسمت پایین سلول قرار دارد به نمونه وارد می‌شود (شکل ۶). نمونه برای حفاظت در برابر نفوذ روغن توسط پوشش لاستیکی احاطه می‌شود که در این مقاله از تیوپ موتور استفاده شده است (شکل ۷). پوشش لاستیکی مستقیماً بر روی نمونه کشیده شده سپس دومین پوشش زیر پوشش اول به طول ۳/۵ سانتی‌متر در قسمت بالا و پایین نمونه جاگذاری می‌شود تا در محل تماس با صفحات بارگذاری تقویت گردد. سپس کرنش سنج در وسط حفره مرکزی چسبانده می‌شود (شکل ۸). نمونه‌ی استوانه‌ای بین دو صفحه بارگذاری که از جنس فولاد است قرار داده می‌شود (شکل ۹). سطح این صفحات فولادی کاملاً صیقلی شده‌اند تا



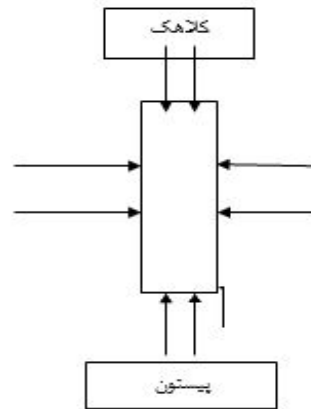
شکل ۹. نمونه نصب شده در سلول



شکل ۱۰. الف- کلاهک بارگذاری



شکل ۱۰. ب- قرار گرفتن کلاهکها بر روی سلول خزش



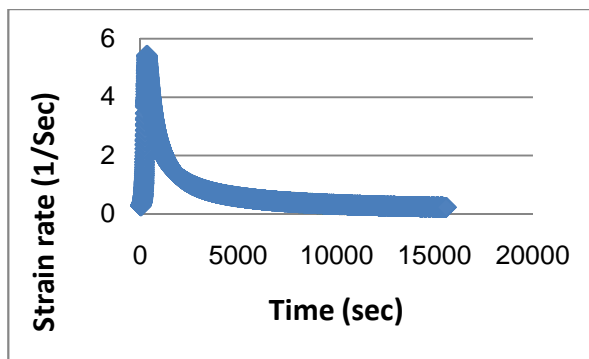
شکل ۶. نمایی از فشار جانبی و تنش محوری



شکل ۷. کشیدن پوشش لاستیکی



شکل ۸. نصب کرنش سنج در داخل حفره



شکل ۱۳. نرخ کرنش در طول آزمایش تحت فشار محصورکننده ۶ مگاپاسکال

در شکل ۱۳ نرخ کرنش در مقابل زمان از ابتدای بارگذاری تا مرحله پایانی نشان داده شده است، اما شامل مرحله سوم خزش نمی‌شود.

۶.۲. آزمایش خزش سه محوری کوتاه مدت پلکانی

آزمایش خزش پلکانی بر روی سه نمونه، A_1 ، B_2 و B_5 ، با مشخصات مندرج در جدول ۲ انجام شد.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های استفاده شده در آزمون خزش پلکانی

نمونه	ارتفاع (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)
B_2	۱۶۵	۲۵	۷۳/۴۷
B_5	۱۶۵	۲۵	۷۳/۴۷
A_1	۱۵۸	۲۵	۷۳/۰۹

به عنوان مثال آزمون روی نمونه B_5 در فشار جانبی ۲ و ۴ مگاپاسکال و تنش‌های محوری ۲، ۴، ۶ و ۸ مگاپاسکال در مدت ۹ ساعت بر روی نمونه‌ها انجام شد. ابتدا تنش محوری ۲ مگاپاسکالی به نمونه اعمال و سپس در مدت انجام آزمون توسط پمپ دستی متصل به سلول سه محوری خزش ثابت نگه داشته شد. و کرنش مماسی نمونه از طریق کرنش سنج، اندازه‌گیری و ثبت شدند. پس از این مدت، تنش محوری وارد بر نمونه به ۴، ۶ و ۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. نتایج آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

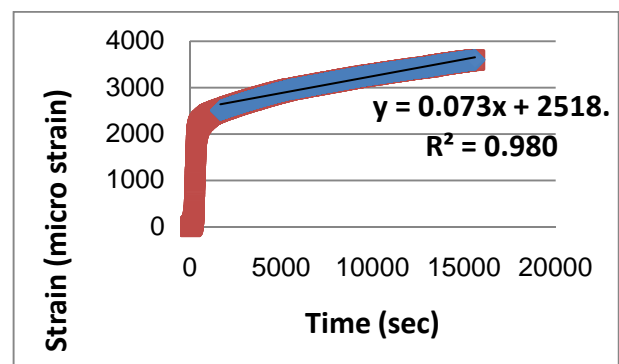


شکل ۱۱. انجام آزمون خزش سه محوری

۶. آزمایش خزش سه محوری

۶-۱. آزمایش خزش سه محوری کوتاه مدت غیر پلکانی

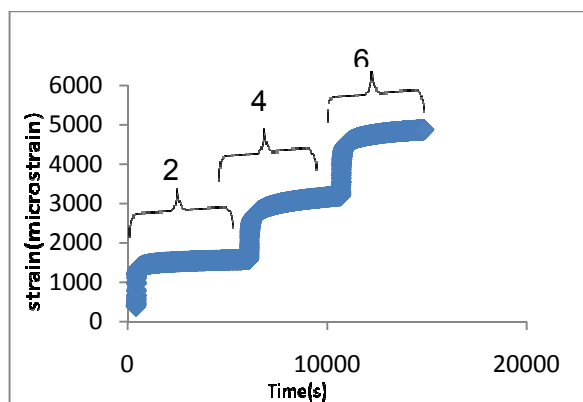
به منظور بررسی ویژگی خزش سه محوری نمونه‌های سنگ نمک، نمونه‌ها به طور مداوم برای مدت حداکثر ۶ ساعت بارگذاری شد. این آزمون با بار ثابت و با استفاده از دستگاه خزش سه محوری انجام می‌شود. در طول آزمایش تغییر شکل مماسی ثبت می‌شود که نتایج آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. کرنش جانبی نمونه تحت فشار محصورکننده ۶ مگاپاسکال

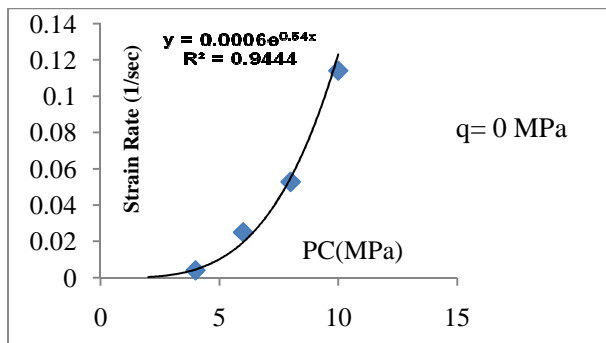
جدول ۵. نتایج آزمون روی نمونه B₅

تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تنش تفاضلی (MPa)	نرخ کرنش (1%/sec)
۲	۲	۰	۰/۰۱۵
۴	۲	۲	۰/۰۵۲
۶	۲	۴	۰/۰۶۶
۴	۴	۰	۰/۰۰۴
۶	۴	۲	۰/۰۱۲
۸	۴	۴	۰/۰۳



۷-۱. اثر فشار محصورکننده بر رفتار خزش

برای بررسی اثر فشار محصور کننده، تنش تفاضلی در طول آزمایش ثابت نگه داشته می شود. نتیجه این آزمایش ها در شکل ۱۵ به نمایش در آمده است.



شکل ۱۵. نمودار نرخ کرنش نسبت به تنش محصورکننده در تنش تفاضلی ثابت صفر

رگرسیون نمایی نرخ خزش پایا در میدان های مختلف تنش، رابطه ۱ را به دست خواهد داد.

$$R = A \exp^{B \cdot Pe} \quad (1)$$

که در این رابطه R نرخ کرنش، Pe تنش جانبی بر حسب مگاپاسکال و A, B ثابت ماده می باشند. شکل ۱۵ نشان می دهد که با افزایش تنش محصورکننده، نرخ کرنش افزایش می یابد.

۷-۲. اثر تنش تفاضلی بر رفتار خزش

برای بررسی اثر تنش تفاضلی، فشار محصور کننده در طول آزمایش ثابت نگه داشته می شود. نتیجه این آزمایش بر روی نمونه B₅ در شکل ۱۶ به نمایش در آمده است.

شکل ۱۴. نمودار پلکانی کرنش - زمان برای نمونه B₅ برای فشار جانبی ۲ مگاپاسکال

۷. نتایج حاصل از آزمایش

نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه های A₁, B₂ و B₅ که شامل سرعت کرنش در مرحله خزش پایا می باشد در جداول ۳، ۴ و ۵ آورده شده است. سپس منحنی نرخ کرنش بر حسب تنش محصورکننده و تنش تفاضلی رسم می شود و از رگرسیون نمایی منحنی آن، تابع نمایی به دست آورده می شود.

جدول ۳. نتایج آزمون روی نمونه A₁

تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تنش تفاضلی (MPa)	نرخ کرنش (1%/sec)
۶	۴	۲	۰/۰۰۴
۸	۴	۴	۰/۰۱۴
۱۰	۴	۶	۰/۰۴۶
۶	۶	۰	۰/۰۲۵
۸	۸	۰	۰/۰۵۲۸
۱۰	۱۰	۰	۰/۱۱۴۱

جدول ۴. نتایج آزمون روی نمونه B₂

تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)	تنش تفاضلی (MPa)	نرخ کرنش (1%/sec)
۶	۴	۲	۰/۰۳
۸	۴	۴	۰/۰۳۱
۱۰	۴	۶	۰/۰۳۵

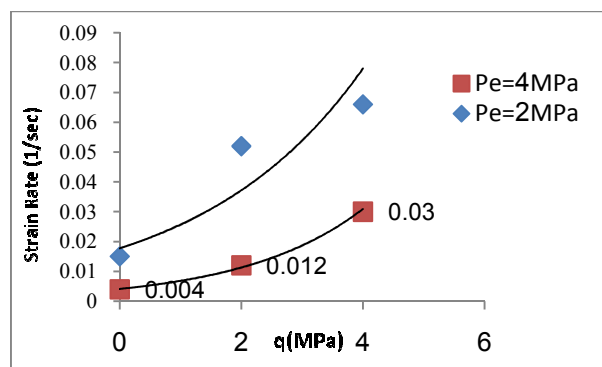
نمودار نشان می‌دهد که با افزایش تنش تفاضلی، نرخ کرنش به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۳.۷. اثر هم‌زمان فشار محصورکننده و تنش تفاضلی بر روی نمونه

در شکل ۱۷ اثر فشار محصور کننده و تنش تفاضلی بر روی خزش نمونه‌های سنگ نمک نشان داده شده است. براساس نمودار نشان داده شده در شکل ۱۷، با افزایش فشار محصور کننده و تنش تفاضلی نرخ خزشی سنگ نمک افزایش می‌یابد. رگرسیون نرخ خزش پایا در میدان تنش‌های مختلف، رابطه ۳ را به دست خواهد داد که سرعت کرنش را در حالات مختلف نشان می‌دهد.

$$\ln Z = a + b \cdot X^{1.5} + \frac{cX}{\ln X} + d \cdot Y^{0.5} \quad (3)$$

در این $a = -15/58$ ، $b = -0/154$ ، $c = 4/21$ ، $d = 0/590$ در این رابطه Z نرخ کرنش، X فشار محصور کننده، Y تنش تفاضلی، a و b و c و d ضرایب ثابت می‌باشند.

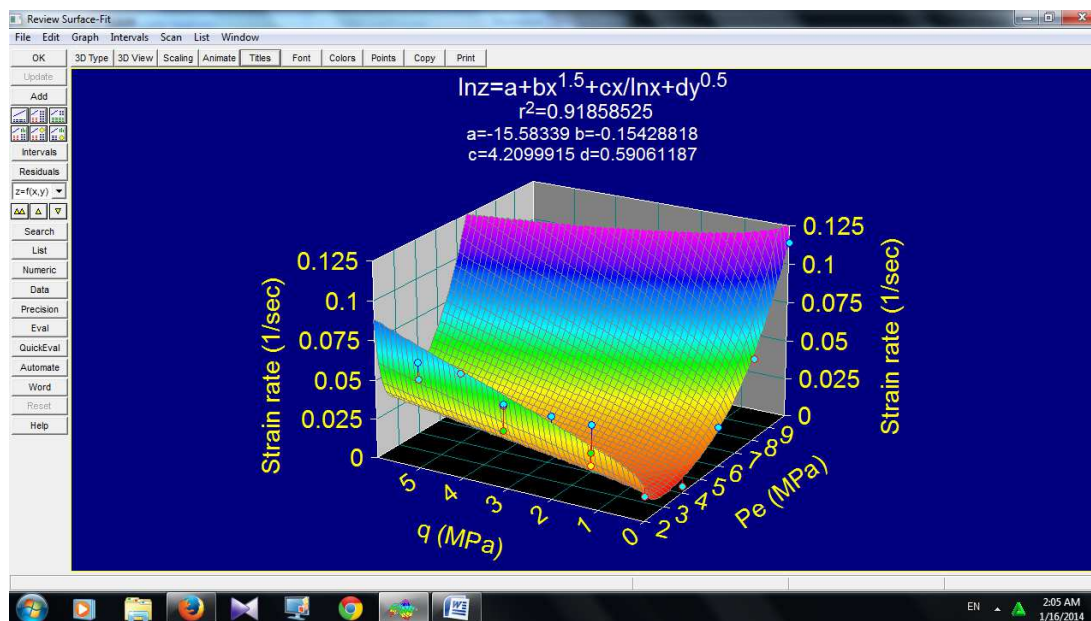


شکل ۱۶. نمودار نرخ کرنش نسبت به تنش تفاضلی در فشارهای محصورکننده ثابت برای نمونه B₅

رگرسیون نمایی نرخ خزش پایا در میدان‌های مختلف تنش تفاضلی، رابطه ۲ را به دست خواهد داد.

$$R = C[\exp^{D(q)}] \quad (2)$$

در این رابطه R نرخ کرنش، q تنش تفاضلی بر حسب مگاپاسکال، C و D ضرایب ثابت سنگ نمک هستند. این



شکل ۱۷. منحنی سه بعدی اثر فشار محصور کننده و تنش تفاضلی بر سرعت کرنش نمونه ها

۸. نتیجه گیری

کرنش مماسی در دیواره داخلی استوانه جدار ضخیم در طول آزمون ثبت شد. نتایج زیر ماحصل انجام تحقیق حاضر می‌باشد:

در این تحقیق، آزمایش خزش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی سنگ نمک انجام شد. نمونه‌های سنگ از یک معدن نمک در منطقه آبگرم واقع در جنوب قزوین جمع‌آوری شد.

- برای مغزه گیری از سنگ نمک بهترین سیال حفاری استفاده از آب نمک اشباع از جنس خود سنگ نمک است. این سیال حداقل تأثیر مخرب را بر روی نمونه‌ها خواهد داشت. سایر روش‌ها نظیر مغزه‌گیری خشک با جریان هوا روش‌های چندان مؤثری در حفظ ساختار سنگ نیستند.
- سنگ نمک تقریباً در تنش‌های انحرافی بسیار پایین نیز تغییر شکل‌های پلاستیک از خود بروز می‌دهد که این امر حکایت از تغییر شکل‌پذیری بالای این سنگ دارد.
- با افزایش خطی فشار محصور کننده، نرخ کرنش به صورت غیرخطی از ۰/۰۰۴ تا ۰/۱۱۴۱ بر ثانیه افزایش می‌یابد.
- با افزایش خطی تنش تفاضلی، نرخ کرنش به صورت غیرخطی در حالت فشار محصور کننده ۲ مگاپاسکال از ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۶۶ بر ثانیه و در حالت فشار محصور کننده ۴ مگاپاسکال از ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۳ بر ثانیه افزایش می‌یابد. رابطه‌ای حاصل شد که با داشتن فشار محصور کننده و تنش تفاضلی سرعت کرنش تخمین زده می‌شود.

منابع

- اخروی، ر. (مترجم)، ۱۳۸۲. تاریخ ا.ج. و لوتگ، ف. ک: مبانی زمین‌شناسی، انتشارات مدرسه.
- Agergaard, F. A., 2009. Modeling of rock salt creep. Master Thesis.
- ASTM D2938, 2006. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core samples, Annual Book of ASTM Standards.
- Bérest, P., Karimi-Jafari, M., and Brouard, B., 2005. Transient Creep in Salt Caverns, In Proceedings of 2005 Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and *Materials*, Louisiana, USA.
- Cleach, J. M. L., Ghazali, A., Deveughele, H., and Brulhet, J., 1996. Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behavior of various halitic rocks. In Proceedings of the Third Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 231-236). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Cristescu, N.D., and Hunsche, U., 1996. A comprehensive constitutive equation for rock salt determination and application', In Proceedings of the 3th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (pp. 191-205), Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Cristescu, N.D., and Hunsche, U., 1998. Time Effects in Rock Mechanics. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Farmer, P., Miller, D., 1996. Exploring the subsalt, pp. 53-55.
- Farmer, I.W., and Gilbert, M.J., 1984. Time dependent strength reduction of rock salt. In Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behaviour of Salt (pp. 3-18). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.
- Franssen, R.C.M., and Spiers, C.J., 1990. Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250-350°C. Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Geological Society Special Publication. Vol.45:201-213.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, Second Edition, John Whiely and sons publication.
- Hosseini, S.M.A., F Sereshki, F., Shariati, M., Jalali, S.M.E., Crotofino, F., 2012. Development of a new creep testing equipment to obtain long-term deformation parameters of salt. Journal of mining & Environment. Vol. 3: 27-32.
- Jeremic, M.L., 1994. Rock mechanics in salt mining, A.A. Balkema Publishers, Netherland, ISBN: 9054101032, P. 517.
- Munson, D.E., 1979. Constitutive modeling of salt behavior state of the technology'. In: Proceedings of 7th International Congress on Rock Mechanics, p. 1979±1810.
- Singh, D.P., 1975. A Study of Creep of Rocks, International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanic Abstracts (Pergamon Press) Vol. 12, 271.

- Wawersik, W.R., Morgan, H.S., 1989. Computed and measured responses of thickwalled hollow cylinder of salt subjected to both homogeneous and inltomogeneous loading', Pro_. 30th U. S. Syrup. Rock Mech., p. 361.368. Rotterdam: Balkenm.
- Morgan, H.S., Wawersik, W., 1991. The Use of Thick-walled Hollow Cylinder Creep Tests For Evaluating Flow Criteria For Rock Salt, Engineering and Structure Mechanic Division, 7th International congerss on Rock Mechnics.
- Yang , C., Yin, J., 1999. Experimantal investigation of creep behavior of salt rock , International journal of Rock Mechanics and mining science 233-242.