

## بررسی آزمایشگاهی اثر درجه حرارت بر خزش سنگ‌نمک تحت فشارهای همه‌جانبه

حسین جلالیان<sup>۱</sup>، مهدی حسینی<sup>۲\*</sup> و علیرضا طالب بیدختی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

نویسنده مسئول: meh\_hosseini18@yahoo.com \*

دریافت: ۹۶/۸/۲۴ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۰

### چکیده

سنگ‌نمک جزو گروه سنگ‌های رسوبی شیمیایی غیرآلی بوده و غالباً از هالیت تشکیل شده است. یکی از مشخصات مواد نرم مثل سنگ نمک تغییر شکل وابسته به زمان یا رفتار خزشی است. خزش با عنوان تغییر شکل غیرقابل بازگشت در زمان شناخته می‌شود و اغلب در سنگ‌های نرم مانند سنگ‌نمک، زغال‌سنگ و سنگ‌های رسوبی نرم دیده می‌شود. بنابراین یکی از نیازهای اساسی در طراحی مهندسی سازه‌های سنگی نرم، شناخت و مدل‌سازی صحیح کرنش خزشی است. یکی از عوامل مؤثر بر روی خزش سنگ‌ها درجه‌ی حرارت می‌باشد. آگاهی از میزان خزش سنگ‌ها خصوصاً سنگ‌نمک تحت تأثیر حرارت کمک شایانی به پیشبرد اجرای کار در پروژه‌های مختلف نفتی و زیرزمینی می‌کند. در این پژوهش به بررسی اثر درجه حرارت بر روی خزش تک‌محوری و سه‌محوری سنگ‌نمک پرداخته شده است. آزمایش‌های سه‌محوری در شرایط تنش همه‌جانبه انجام شده است به دلیل آن که در اعماق زیاد معمولاً این شرایط حاکم است. بنابراین تنش تفاضلی در تمام حالت‌ها صفر است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش دما مقدار نرخ کرنش سنگ‌نمک به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و با افزایش فشار محصور کننده نرخ کرنش کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** سنگ‌نمک، خزش، کرنش جانبی، کرنش محوری، درجه حرارت، فشار محصور کننده

### ۱- مقدمه

و همکاران ۲۰۱۲، ژانگ و همکاران ۲۰۱۵). آگاهی از میزان خزش سنگ‌ها خصوصاً سنگ‌نمک تحت تأثیر حرارت کمک شایانی به پیشبرد اجرای کار در پروژه‌های مختلف نفتی و زیرزمینی می‌کند. نمک ماده‌ای طبیعی است که تحت تأثیر تنش‌های انحرافی و فرآیندهای تغییرشکل، در طول دوران زمین‌شناسی به وجود آمده است (کریستسکو و هانس، ۱۹۹۶). سنگ‌های نمکی به دلیل ساختار بلورین، ترکیب شیمیایی و شرایط محیط شکل‌گیری‌شان، رفتار ویژه‌ای از خود بروز می‌دهند که می‌توان به تخلخل و نفوذپذیری بسیار اندک، تغییر شکل زیاد، خواص ترمیم‌پذیری و ... اشاره کرد (پاچو، ۱۹۹۰). رفتار تغییرشکل گونه‌ی سنگ‌نمک را از دو جهت می‌توان بررسی کرد. اولاً بلورهای نمک تحت شرایط معین، قادر به نمایش رفتار ترد گونه (شکننده) از خود، مشابه مصالح طبیعی نظیر سنگ‌ها هستند. ثانیاً شبیه بسیاری از فلزات، از خود رفتاری شکل‌پذیر تحت تغییرشکل غیرالاستیک با حداقل شکستگی یا حتی بدون شکستگی در ساختار از خود نشان می‌دهد (آبرتین و همکاران، ۱۹۹۲). در منابع مختلف، حالت شکست سنگ‌نمک تحت

امروزه با پیشرفت جوامع بشری، ایجاد سازه‌هایی با طول عمر بالا همانند فضا‌های زیرزمینی امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به طولانی بودن زمان عملکرد این سازه‌ها به نظر می‌رسد که بررسی رفتار تابع زمان آن‌ها دارای اهمیت بالایی باشد. یکی از پدیده‌های مهم تابع زمان سازه‌ها خزش<sup>۱</sup> می‌باشد. خزش به عنوان تغییر شکل غیرقابل بازگشت در طی زمان شناخته می‌شود و اغلب در سنگ‌های نرم همانند سنگ‌نمک، گلسنگ و شیل دیده می‌شود. در صورتی‌که آثار زمان در رفتار ماده در یک بارگذاری محسوس باشد، رفتار مواد ویسکوز در نظر گرفته می‌شود. در این راستا برای مدل‌های ویسکوالاستیک مدل‌های ماکسول، کلوین و برگر ارائه شده است و در حالت ویسکوپلاستیک نیز می‌توان به مدل مدل برگر با سطح تسلیم موهر-کلمب اشاره کرد (گودمن، ۱۹۸۹). گسیختگی خزشی تونل‌های سنگی حتی می‌تواند تا چندین دهه بعد از ساخت رخ بدهد (ژائو

<sup>۱</sup> Creep

تحقیقاتی که توسط ویستسین و همکاران (۲۰۱۵) جهت تعیین مقاومت کششی وابسته به زمان و قابلیت تغییر شکل سنگ‌نمک تحت تاثیر نرخ بارگذاری و دما انجام گرفته نشان می‌دهد که نمک مورد آزمایش تغییر شکل الاستیک و وابسته به زمان را نشان می‌دهد و مقاومت کششی نمونه با افزایش دما به صورت خطی کاهش می‌یابد.

هم‌چنین تحقیقاتی که توسط ژانگ به صورت سه‌محوره بر روی سنگ‌نمک انجام گرفته نشان می‌دهد که در مقادیر فشار محصورکننده پایین، کرنش جانبی به تدریج نقشی کلیدی پیدا می‌کند که در نتیجه انبساط حجمی می‌باشد.

اوسن و همکاران (۲۰۱۴) جهت بررسی رفتار خزشی سنگ نمک توزکوی مطالعات آزمایشگاهی را در فشارهای مختلف انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایش، یک مدل ریاضی که رفتار خزشی را توضیح می‌دهد برای منطقه توزکوی پیشنهاد دادند.

در ایران اکثر تحقیقات انجام شده روی خزش سنگ نمک در سازندهای نمکی در چاه‌های نفت و گاز به کمک مدل‌سازی عددی انجام شده است که می‌توان به تحقیق توکلی و همکاران (۱۳۹۱)، زارعیان و همکاران (۱۳۸۸) و دشت بزرگی و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد. البته پژوهش‌هایی نیز به بررسی رفتار خزش با هر دو روش آزمایشگاهی و عددی پرداخته که می‌توان پژوهش فاروق حسینی و همکارانش (۱۳۸۷) را از جمله آن‌ها دانست (۱۳۸۷).

بررسی‌های کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که آزمایش خزش سه‌محوری با در نظر اثر درجه حرارت در ایران انجام نشده است. در این مقاله هدف تعیین سرعت کرنش در فشارهای محصورکننده و محدوده‌های دمایی مختلف در سنگ‌نمک است. به منظور مطالعه رفتار خزشی کوتاه مدت نمونه‌های نمکی، آزمون‌هایی با دوره‌های حدود ۹ ساعت روی مغزه‌ها، انجام شد. با توجه به تغییرات دما در هر مرحله از آزمایش، منحنی تغییر شکل در سنگ نیز تغییر می‌کند.

در این مقاله یک رابطه برای تخمین نرخ کرنش مرحله خزش پایدار به کمک دما و فشار محصورکننده ارائه شده است.

بارهای فشاری را به هر دو صورت ترد گونه و تغییر شکل‌پذیر گزارش شده است (آژرگارد، ۲۰۰۹). از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر حالت شکست سنگ‌نمک می‌توان به نرخ بارگذاری، دما، بارهای چرخه‌ای، وجود تنش‌های کششی و لنگر خمشی و وجود نواقص عمده بلوری اشاره کرد. رفتار نمک را می‌توان برآیندی از تغییرشکل‌های الاستیک، الاستو-پلاستیک و پلاستیک در نظر گرفت (آبرین و همکاران، ۱۹۹۱). عوامل مختلف دیگری همچون دما، رطوبت، طبیعت تنش سطح تنش‌های انحرافی، فشارهای محصورکننده، ساختار دانه‌ها و غیره نیز بر رفتار نمک تأثیرگذارند.

در دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی در جهت مطالعه بر رفتارهای وابسته به زمان سنگ‌نمک و پارامترهای مؤثر بر آن از جمله اثر تنش، نرخ کرنش (فارمر و همکاران، ۱۹۸۴)، درجه حرارت (کریستسکو و همکاران، ۱۹۹۸)، رطوبت (کلیچ و همکاران، ۱۹۹۶) و ناخالصی (فرانسین و اسپایرز، ۱۹۹۰) انجام شده است. مطالعات بسیاری به منظور ایمنی معادن نمک توسط محققان صورت گرفته است (درییر، ۱۹۷۲، کینگ، ۱۹۷۳). در سال‌های اخیر از سنگ‌نمک به عنوان یک میزبان ایده‌آل برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی (فیلیپ، ۱۹۸۱)، نفت (درییر، ۱۹۸۱) و باطله بخصوص زباله‌های هسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است. بررسی خواص سنگ‌نمک وابسته به زمان برای بسیاری کاربردهای مهندسی مهم می‌باشد. به همین دلیل، بسیاری از مولفان رفتار وابسته به زمان آزمایش‌های تک محوری و سه‌محوری را بررسی کرده‌اند (هانس، ۱۹۹۴) و (مانسون، ۱۹۷۹).

کریستسکو و هانس (۱۹۹۶)، سینگ (۱۹۷۵)، آژرگارد (۲۰۰۹)، در این زمینه تحقیقات زیادی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سنگ‌نمک تقریباً در تنش محوری بسیار پایین نیز تغییرشکل‌های پلاستیک از خود بروز می‌دهد که این امر حکایت از تغییر شکل‌پذیری بالای این سنگ است. یانگ و یین (۱۹۹۹) در زمینه‌ی آزمایش خزش سه‌محوری بر روی نمونه‌های نمکی تحقیقاتی انجام دادند و اثر تنش تفاضلی و فشار محصورکننده را بر روی نرخ کرنش گزارش کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش تفاضلی نرخ کرنش افزایش و با افزایش فشار محصورکننده، نرخ کرنش کاهش می‌یابد.

## ۲- نمونه‌براری

نمونه‌های سنگی مورد نظر از یک معدن نمک در زون آبگرم در جنوب غرب استان قزوین با موقعیت جغرافیایی  $35^{\circ}41'34.3''$  N  $49^{\circ}12'26.2''$  E برداشت شده است. برای رسیدن به محل معدن می‌بایست جاده قزوین - همدان را پیمود و آنگاه در ۲۴ کیلومتری پس از آبگرم، در امتداد یک جاده فرعی به سمت غرب، جاده آسفالته روستای بی‌آب را به طول حدود ۱۲ کیلومتر پیموده تا به محل معدن برسیم. این منطقه را می‌توان به دو واحد جدا از هم مربوط دانست. یکی در شمال به نام زون آب گرم که بخشی از ایران مرکزی است و دیگری در جنوب به نام زون رزن که قسمتی از زون سندانج - سیرجان است. ردیف سنگ‌های رسوبی که در ناحیه آبگرم قرار گرفته و ضخامتی در حدود ۱۰۰۰۰ متر دارد. روی سازند قم حدود ۲۷۵۰ متر از رسوب‌های آواری شامل مارن، ماسه سنگ قرمز و کنگلومرای متعلق به میوسن قرار گرفته که به طور محلی در قسمت‌های زیرین حاوی لایه‌های گچی و نمکی است که اکنون به صورت گنبد‌های نمکی رخنمون دارند. معدن نمک در واقع از همین توده گنبد نمکی استخراج می‌گردد. ترکیب شیمیایی این سنگ نمک بیش از ۹۹ درصد کلرید سدیم بوده و رنگ آن سفید می‌باشد (رحیمی، ۱۳۹۲).

## ۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

سنگ نمک به دلیل وجود کانی هالیت در ساختار بلورین خود و قابلیت انحلال زیاد آن در برابر آب در مراحل مختلف آماده‌سازی مغزه، شرایط ویژه‌ای را می‌طلبد. از جمله این شرایط ویژه حل شدن آن در مجاورت با آب و حرارت ایجاد شده در اثر دوران سرمته است. بنابراین با استفاده از روش‌های معمول مغزه‌گیری نمی‌توان از این سنگ نمونه‌های استاندارد تهیه کرد. تجربیات به دست آمده نشان می‌دهند که استفاده از آب نمک اشباع شده از جنس نمک مورد آزمایش به عنوان سیال حفاری بهترین شرایط برای تهیه مغزه‌های استاندارد از بلوک‌های نمک است. به همین دلیل مغزه‌گیری با استفاده از آب نمک اشباع شده انجام شده است. برای تهیه مغزه‌های استوانه‌ای با قطر ۷۴ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۱۵۵ میلی‌متر، از استاندارد ASTM استفاده شده است (انجمن مواد و آزمون آمریکا، ۱۹۹۷). مغزه‌های حاصله برای آزمایش خزش سه‌محوری در شرایط دمایی مختلف استفاده شدند. هم‌چنین از مغزه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۱ میلی‌متر با نسبت طول به قطر ۲ براساس استاندارد ASTM، برای انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و برزیلی استفاده شده است. در شکل ۱ تصاویری از مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱. (الف) دستگاه مغزه‌گیر و سیستم بازیابی، (ب) برش و تسطیح نمونه‌ها، (ج) نمونه‌های آماده شده نمک

## ۴- آزمایش‌های انجام شده برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ نمک

به منظور به دست آوردن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش باید قبل از انجام آزمایش‌های خزش، آزمایش‌های اولیه مکانیک سنگ انجام شود. آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های نمک بر طبق

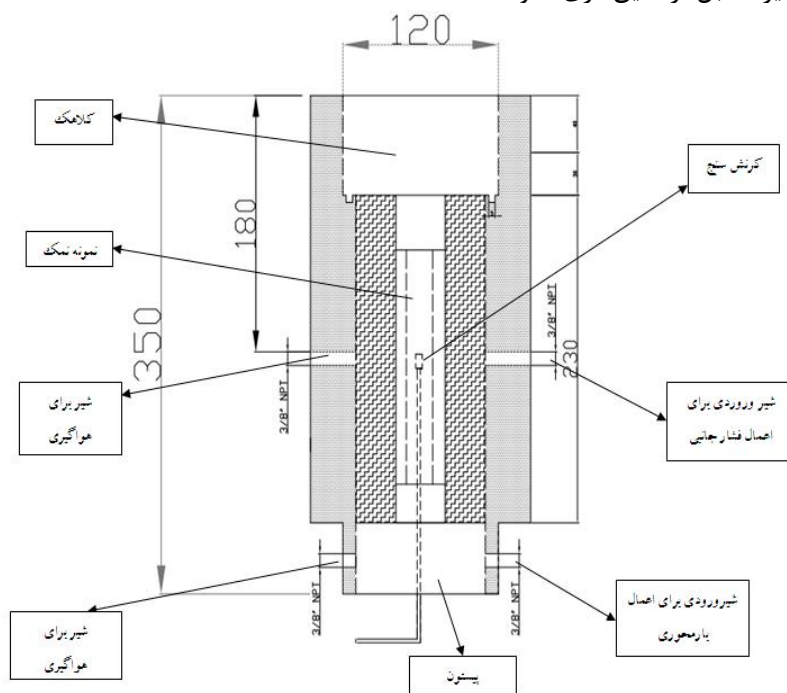
استانداردهای جامعه بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شده است، شامل آزمایش‌های فشاری تک‌محوری (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۱۹۷۹)، سه‌محوری (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۱۹۷۸)، و برزیلی (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۱۹۷۸) می‌باشد. از آزمایش‌های تک‌محوری می‌توان مقادیر مدول

کرنش‌سنج‌هایی بوسیله چسب مخصوص به منظور اندازه‌گیری کرنش‌های جانبی و محوری بر روی نمونه نصب می‌شود (شکل ۳ الف). به منظور عایق‌کاری نمونه برای جلوگیری از ورود روغن از پوشش لاستیکی استفاده شده است و برای آب‌بندی سیستم از اورینگ‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. پوشش لاستیکی، مستقیماً روی نمونه کشیده می‌شود (شکل ۳ ب). دومین پوشش لاستیکی، دولایه به طول تقریبی ۴ سانتی‌متر زیرپوشش اول در قسمت بالا و پایین نمونه جایگذاری شده تا در محل تماس نمونه با صفحات بارگذاری پوشش تقویت گردد، احتمال پاره شدن پوشش در این قسمت بیش‌تر است. سپس نمونه بین صفحات بارگذاری قرار داده می‌شوند (شکل ۳ ج). سطح این صفحات فولادی کاملاً صیقلی شده‌اند تا کمترین اصطکاک را با سطح نمونه ایجاد کنند. هر دو پوشش لاستیکی روی دو صفحه بارگذاری بالا و پایین توسط اورینگ‌ها (O-ring) ثابت می‌شوند. همچنین برای انجام آزمون‌های خزش در دماهای مختلف از یک محفظه عایق به همراه المنت الکتریکی برای افزایش دما، که به ترموکوپل و دماسنج دیجیتال مجهز است استفاده می‌شود. در شکل ۴ نمایی کلی از سلول آزمایش خزش که داخل محفظه‌ی دما قرار گرفته است و برای انجام آزمون‌های خزش سه‌محوری استفاده می‌شود، مشاهده می‌گردد.

الاستیسیته و ضریب پواسون و از آزمایش‌های سه‌محوری می‌توان مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تعیین کرد. شایان ذکر است که در آزمایشات سه‌محوری از فشارهای جانبی ۳ و ۵ مگاپاسکال استفاده شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از آزمایش‌های تراکم تک‌محوری و آزمایش برزلی روی ۵ نمونه انجام گرفته و سپس میانگین‌گیری به عمل آمده است. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۵- سلول آزمایش خزش سه‌محوری

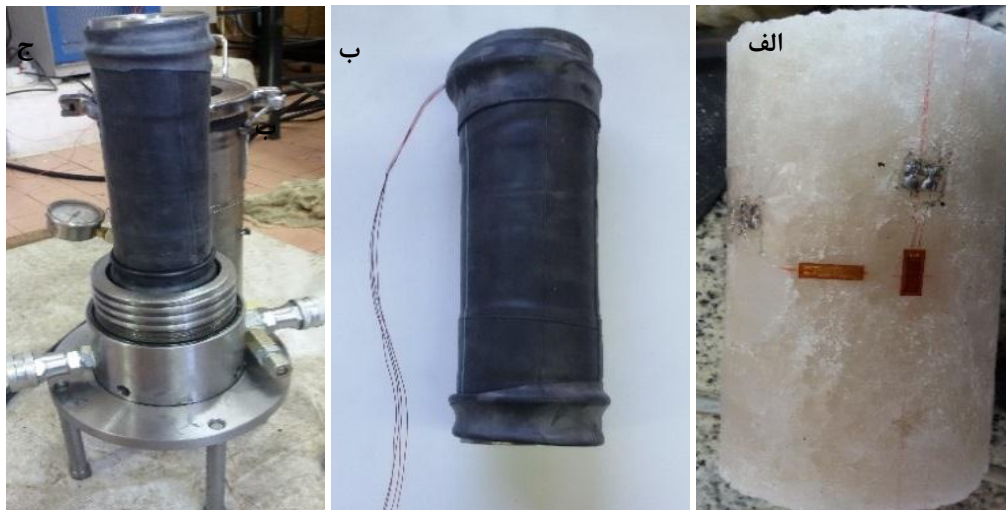
سلول خزش سه‌محوری برای انجام آزمایش خزش روی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ‌نمک تحت تراکم سه‌محوری در آزمایشگاه مکانیک‌سنگ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) طراحی و ساخته شده است. امکان نصب کرنش‌سنج الکتریکی بر روی نمونه‌های سنگ‌نمک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این سلول است. همچنین به دلیل این که امکان جابه‌جایی پیستون وجود دارد، می‌توان از نمونه‌هایی به طول بین ۱۴۵ تا ۱۷۰ میلی‌متر استفاده کرد. یک برش ساده از این سلول در شکل ۲ نشان داده شده است. با این سلول امکان اعمال تنش تا ۵۰ مگاپاسکال وجود دارد همچنین برای اعمال بار محوری از پمپ اعمال بار استفاده می‌شود و نیازی نیست که سلول زیر جک محوری قرار بگیرد. قبل از عایق‌کاری نمونه‌ها



شکل ۲. برشی از سلول سه‌محوری خزش مورد استفاده

جدول ۱. نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه مورد مطالعه

مقاومت فشاری تک‌محوری (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۲۴/۷۷	۴۸۷۵/۴	۰/۳۶	۰/۸۹	۴۳/۷	۲/۷۳	۲/۰۹



شکل ۳. الف) نصب کرنش‌سنج بر روی نمونه، ب) کشیدن پوشش لاستیکی روی نمونه، ج) نمونه نصب شده در سلول



شکل ۴. سلول سه‌محوری به همراه محفظه دما

#### ۶- آزمون‌های خزش

در جدول (۲) مشخصات نمونه‌ها و در جدول (۳) مشخصات آزمون‌های خزش پلکانی ارائه شده است.

۶-۱- آزمون خزش تک‌محوری پلکانی کوتاه مدت روی نمونه سنگ‌نمک در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد)

برای انجام آزمایش خزش تک‌محوری پس از نصب کرنش‌سنج‌ها نمونه را داخل سلول خزش گذاشته شده و سپس

تنش‌های محوری ۳، ۵، ۷، ۹، مگاپاسکال به ترتیب اعمال شده است. در شکل ۵ منحنی تغییر شکل خزشی نمونه و در شکل ۶ منحنی سرعت کرنش بر حسب تنش محوری ارائه شده است.

۶-۲- آزمون‌های خزش سه‌محوری پلکانی کوتاه مدت روی نمونه‌های سنگ‌نمک در دماهای مختلف این دسته آزمایش‌ها در شرایط تنش هیدرواستاتیک انجام شده است. به دلیل آن که در اعماق زیاد معمولاً

همه‌جانبه ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال به ترتیب اعمال شده است. مدت زمان هر آزمایش حدود ۹ ساعت می‌باشد که برای هر مرحله حدود ۳ ساعت است. در شکل ۷ منحنی‌های تغییر شکل خزشی نمونه‌ها و در شکل ۸ منحنی‌های سرعت کرنش بر حسب فشار محصور کننده ارائه شده است. همچنین منحنی سرعت کرنش بر حسب درجه حرارت برای فشارهای محصور کننده‌ی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است.

این شرایط حاکم است و از آنجایی که مقدار فشار محصور کننده و تنش محوری توسط پمپ اعمال فشار، ثابت نگه داشته می‌شود، بنابراین تنش تفاضلی در تمام حالت‌ها صفر است. برای انجام آزمایش خزش سه‌محوری در دماهای مختلف، پس از نصب کرنش‌سنج، نمونه‌ها را داخل سلول خزش گذاشته سپس سلول خزش داخل محفظه دما قرار داده می‌شود که دمای داخل این محفظه توسط تشکیلات دمایی قابل کنترل است. سپس فشار

جدول ۲. مشخصات مغزه‌های مورد استفاده در آزمون خزش سه‌محوری پلکانی کوتاه مدت در دماهای مختلف

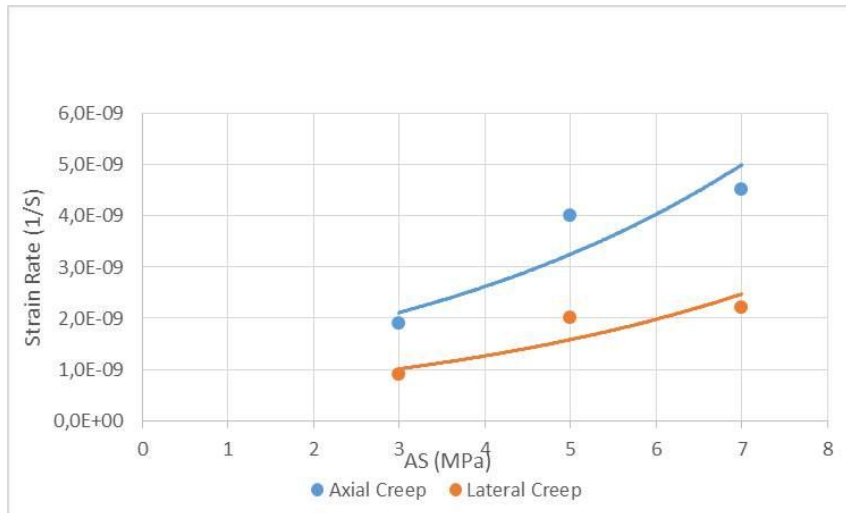
شماره نمونه	طول نمونه (mm)	قطر (mm)
C-1	۱۵۷	۷۴
A-1	۱۵۶	۷۴
A-2	۱۵۵	۷۴
A-3	۱۵۷	۷۴
A-4	۱۵۴	۷۴
B-1	۱۵۸	۷۴
B-2	۱۵۵	۷۴

جدول ۳. مشخصات آزمون خزش پلکانی کوتاه مدت انجام شده بر روی نمونه‌ها

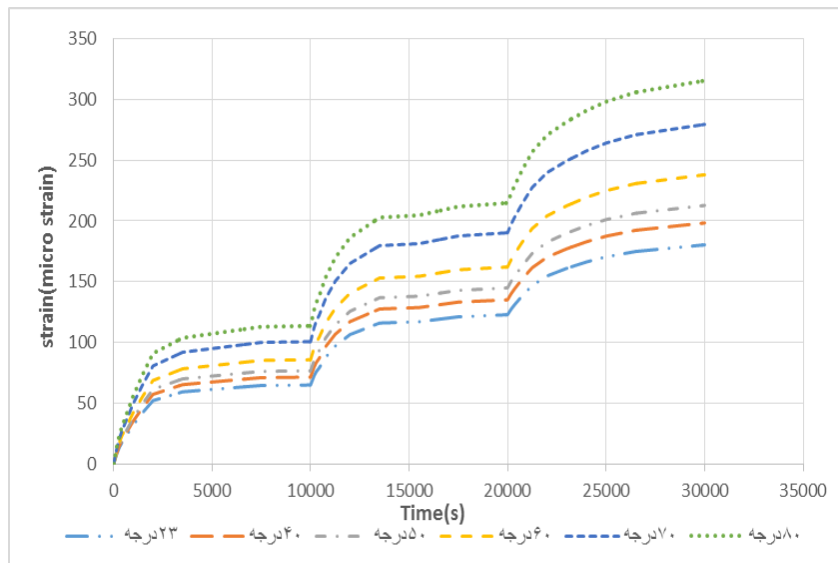
شماره نمونه	فشار جانبی (MPa)	فشار محوری (MPa)	تنش تفاضلی (MPa)	دمای آزمایش (°C)
C-1	۰	۳	۳	۲۳
	۰	۵	۵	
	۰	۷	۷	
A-1	۳	۳	۰	۲۳
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	
A-2	۳	۳	۰	۴۰
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	
A-3	۳	۳	۰	۵۰
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	
A-4	۳	۳	۰	۶۰
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	
B-1	۳	۳	۰	۷۰
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	
B-2	۳	۳	۰	۸۰
	۵	۵	۰	
	۷	۷	۰	



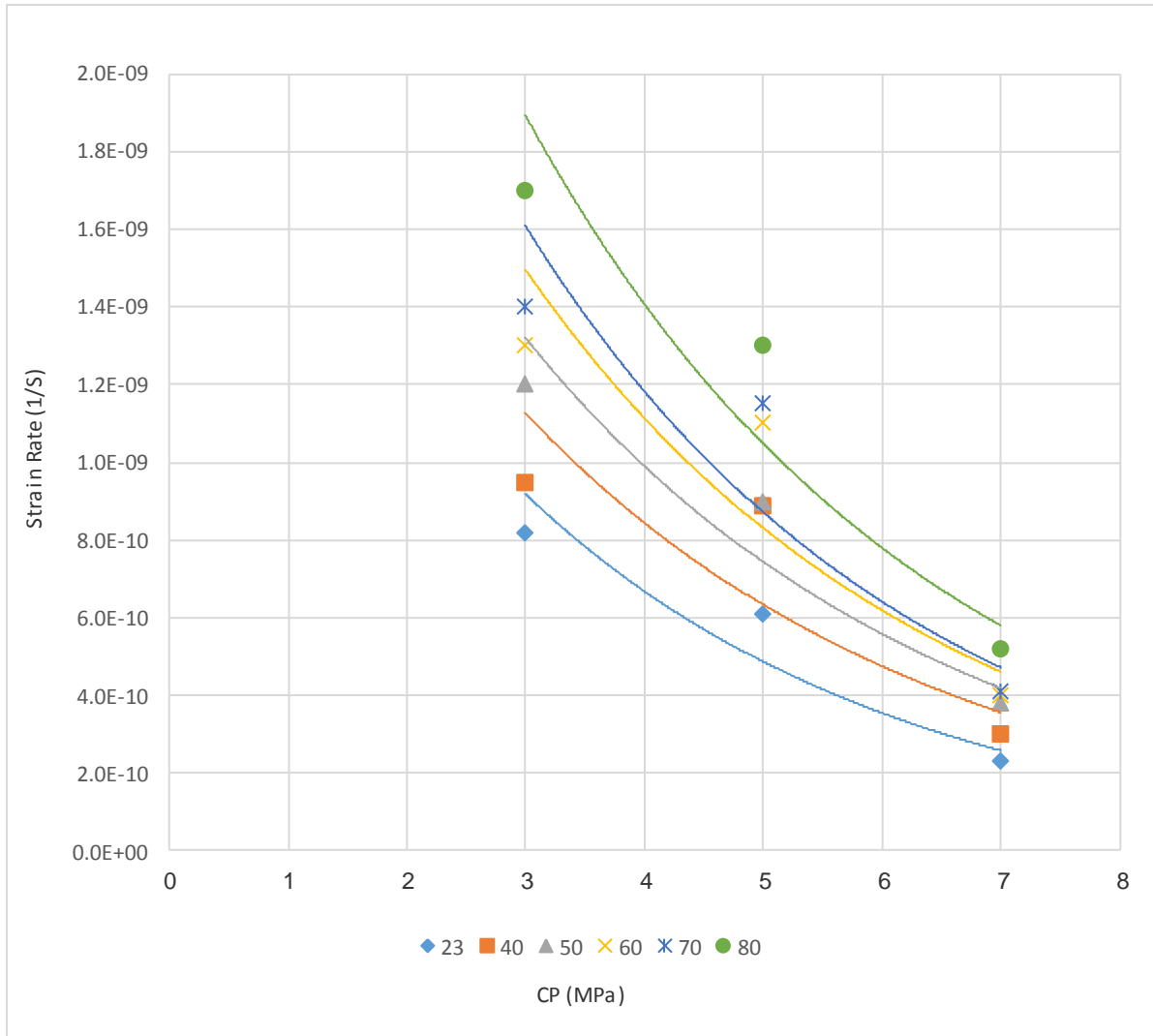
شکل ۵. منحنی خزش تک‌محوری نمونه در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد



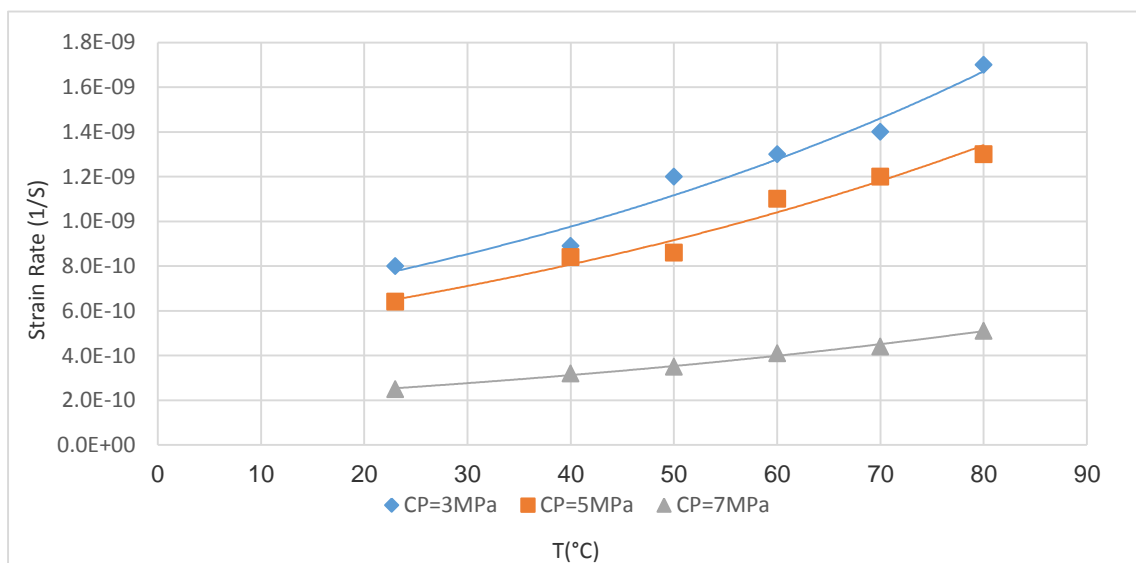
شکل ۶. سرعت کرنش‌های محوری و جانبی در دمای ۲۳ درجه برای آزمایش خزش تک‌محوری



شکل ۷. منحنی خزش سه‌محوری نمونه‌ها در دماهای مختلف در سه فشار همه جانبه ۳، ۵ و ۷ مگاپاسکال



شکل ۸. منحنی سرعت کرنش بر حسب فشار محصور کننده در دماهای مختلف



شکل ۹. منحنی سرعت کرنش بر حسب درجه حرارت برای فشارهای محصور کننده مختلف



محصورکننده نرخ کرنش خزشی سنگ‌نمک افزایش می‌یابد. رابطه‌ی (۱) نرخ خزش را بر اساس درجه حرارت و فشار محصور کننده نشان می‌دهد. در این روابط  $X$  درجه حرارت،  $Y$  فشار محصورکننده،  $Z$  نرخ کرنش و  $a$  و  $b$  و  $c$  ضرایب ثابت می‌باشند.

$$Z = a + b \ln X + c \ln Y \quad (1)$$

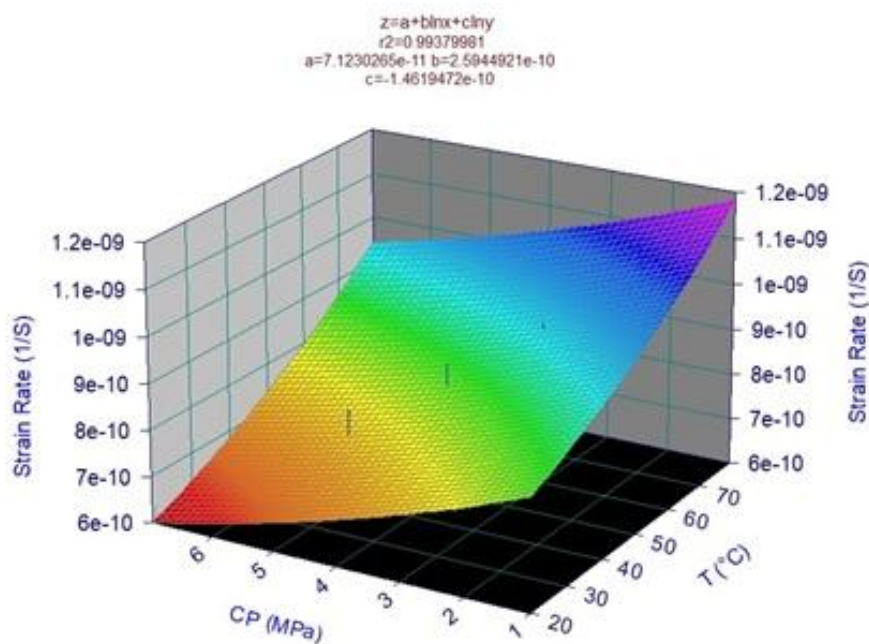
$$R^2 = 0.993$$

$$a = 7.123e-11 \quad b = 2.594e-10 \quad c = -1.461e-10$$

## ۷- بررسی اثر همزمان درجه حرارت و فشار

### محصور کننده بر روی خزش سنگ نمک

در شکل ۱۰ اثر همزمان درجه حرارت و فشار محصورکننده بر روی خزش سه‌محوری نمونه‌های سنگ نمک نشان داده شده است. بر اساس نمودار نشان داده شده که با استفاده از نرم‌افزار Table curve 3D حاصل شده است، با افزایش درجه حرارت و کاهش فشار



شکل ۱۰. منحنی سه بعدی اثر درجه حرارت و فشار محصور کننده بر سرعت کرنش نمونه‌ها

۳- با افزایش دما مقدار خزش سنگ نمک به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط ویستسین و همکاران (۲۰۱۵) گواه این موضوع است.

### ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف تعیین سرعت کرنش در فشارهای محصور کننده و محدوده‌های دمایی مختلف در سنگ نمک است. به منظور مطالعه رفتار خزشی کوتاه مدت نمونه‌های نمکی، آزمون‌هایی با دوره‌های حدود ۹ ساعت روی مغزه‌ها انجام شد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱- در حالت خزش تک‌محوری با افزایش سطح تنش، افزایش در کرنش محوری نسبت به کرنش جانبی بیشتر است.

۲- سنگ‌نمک تقریباً در تنش‌های پایین نیز

### ۸- تحلیل نتایج

۱- در حالت خزش تک‌محوری با افزایش خطی سطح تنش، کرنش محوری به صورت غیرخطی کاهش و کرنش جانبی افزایش می‌یابد. آزمایشات محققین قبلی نیز نشان می‌دهد که نرخ خزش جانبی با افزایش تنش اولیه اعمال شده افزایش می‌یابد (برست و همکاران، ۲۰۰۵).

۲- با افزایش سطح تنش، اندازه‌ی سطح خزش گذرای سنگ افزایش یافته و با شیب تندتری مرحله خزشی پایای خود را آغاز می‌کند. کریستسکو و هانس (۱۹۹۶)، سینگ (۱۹۷۵)، آزرگارد (۲۰۰۹)، برای خزش سه‌محوری نشان دادند که با افزایش سطح تنش، میزان خزش سنگ‌نمک افزایش یافته و خزش ثانویه با شیب تندتری آغاز می‌شود که این امر نشانگر تغییر شکل‌پذیری بالای این سنگ است.

- ASTM (1979) Metal Handbook. Fatigue and fracture mechanics, Vol.19.
- 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, Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 231-236.
- Cristescu, N. 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. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 191-205.
- Cristescu, N., & Hunsche, U (1998) Time effects in rock mechanics. New York: Wiley.
- Dreyer, W (1972) The science of rock mechanics. The strength properties of rock, Trans Tech Publication.
- Dreyer, W (1981) Crude oil storage in a system of salt caverns. In First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University, Nov. 9±11, 1981. Trans Tech Publications, 629-59.
- 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. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 3-18.
- 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, 45:201-213.
- Goodman, R. E (1989) Introduction to rock mechanics. Second Edition, John Wiley and Sons publication.
- Hunsche, U (1994) Uniaxial and triaxial creep and failure test on rock, experiment technique and interpretation. In: Cristescu NS, edi-tor. Visco-plastic behavior of geomaterial, Springer Verlag.
- ISRM, (1978a) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15: 99-103.
- تغییر شکل‌های پلاستیک از خود بروز می‌دهد که این امر حکایت از تغییر شکل‌پذیری بالای این سنگ دارد.
- ۳- با افزایش سطح تنش، اندازه‌ی سطح خزش گذرای سنگ افزایش یافته و با شیب تندتری مرحله خزشی پایای خود را آغاز می‌کند.
- ۴- با افزایش دما مقدار خزش سنگ‌نمک به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد.
- ۵- برای نرخ خزش پایدار سنگ‌نمک بر اساس درجه حرارت و فشار همه‌جانبه وارده به سنگ‌نمک رابطه‌ای ارائه شده است.
- ### منابع
- توکلی، ح، امیرشیرزاد، ب، دشت‌بزرگی، ج (۱۳۹۱) تاثیر جریان لایه‌های نمک بر پایداری لوله‌های جداری چاه‌های نفتی میدان مارون. اولین کنفرانس فناوری‌های معدنکاری ایران، ۱۷-۱۵ شهریور، یزد، ایران، ۱۳۹۱.
- دشت‌بزرگی، ج، محمدی، ه، صالحی کسایبی، م، ح، علی محمدی، ع (۱۳۸۸) بررسی دلائل آسیب‌دیدگی لوله‌های جداری میدان مارون و راه‌حل‌های پیشنهادی. مجله اکتشاف و تولید، شماره ۵۶، صفحات ۴۹-۵۲.
- رحیمی، ش (۱۳۹۲) مطالعات آزمایشگاهی رفتار خزش بر روی استوانه‌های توخالی جداره ضخیم سنگ‌نمک، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.
- زارعیان جهرمی، الف، کریمی نسب، س، جلالی‌فر، ح (۱۳۸۸) تحلیل نرخ همگرایی دیواره چاه‌های نفت در اثر پدیده خزش در سازندهای نمکی. سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۹-۷ بهمن، یزد، ایران.
- فاروق حسینی، م، محمودی دوم نیاسر، ح، احمدی، م، ساعتی، و (۱۳۸۷) تعیین پارامترهای خزشی سنگ‌های پی سد گتوند به روش آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل‌سازی عددی. نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۵، ص ۵۷۷-۵۸۶.
- Agergaard, F. A (2009) Modelling of rock salt creep. Master Thesis, Civil engineering, DTU.
- Aubertin, M.; Gill, D. E. and Ladanyi, B (1991) An internal variable method for the creep of Rocksalt. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 24: 81-97.
- Aubertin, M.; Gill, D. E. and Ladanyi, B (1992a) Modeling the inelastic of rock salt. in Proceeding of the 7th conference on the mechanical behavior of salt, 93-104.

- ISRM, (1978b) Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15: 47-51.
- ISRM (1979) Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci*, 16: 138-140.
- King, M. S (1973) Creep in model pillars of Saskatchewan potash. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 10: 364-371.
- Munson, D. E (1979) Constitutive modeling of salt behavior state of the technology. In: *Proceedings of 7th International Congress on Rock Mechanics*, 1979±1810.
- Ozsen Hakan, ozkan ihsan, sensogut cem, (2014) Measurement and mathematical modelling of the creep havior of Tuzköy rock salt. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 66:128-135.
- Pacheo, A (1990) A Method for Evaluating the creep. PhD THESIS, Albert University of Alberta.
- Philip, B (1981) In situ experimental and mathematical representation of the behavior of rock salt used in the storage of gas. In: *First Conference on the Mechanical Behavior of salt*. The Pennsylvania State University, Nov. 9±11, *Trans Tech Publications*, 453-72.
- Singh, D. P (1975) A Study of Creep of Rocks. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanic Abstracts (Pergamon Press)*, 12: 271-276.
- Wisetsaen, s Chaowarin , w Kittitep, F (2015) Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics & Mining*.
- Yang, C. and Yin, J (1999) Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International journal of Rock Mechanics and mining science*, 233-242.
- Zhao, X., Chen, B., Zhao, H., Jie, B., & Ning, Z (2012) Laboratory creep tests for time-dependent properties of a marble in Jinping II hydropower station. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(2): 168-176.
- Zhang, Y., Xu, W. Y., Shao, J. F., Zhao, H. B., & Wang, W (2015) Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project. *Water Science and Engineering*, 8(1): 55-62.

## Experimental study of the effect of temperature on creep of salt rock under hydrostatic pressures

H. Jalalian<sup>1</sup>, M. Hosseini<sup>2\*</sup> and A. R. Taleb Bidokhti<sup>3</sup>

1, 2- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

3- Dept., of Geology, Imam Khomeini International University, Qazvin

\*meh\_hosseini18@yahoo.com

Recieved: 2017/11/15 Accepted: 2018/3/11

### Abstract

Salt rock is part of the group of inorganic chemical sedimentary rocks and is often consisted of halite. One of the characteristics of soft materials is deformation related to the time or creep behavior. Creep is known as an irreversible deformation at the time and is often found in soft rocks such as rock salt, coal, shale and soft sedimentary rocks. Therefore, one of the basic requirements in the design of soft rock structural engineering is the correct modeling of the creep strain. One of the factors affecting the salt creep is the temperature. Knowing of the rate of rocks creep, especially the heat-treated rock salt, helps to promote the implementation of work in various oil and underground projects. In this study, the effect of temperature on the triaxial creep of salt rock has been studied. These tests have been performed under hydrostatic stress conditions, because these conditions usually prevail in the depths. Therefore, differential stress is zero in all states. Results show that with increasing temperature, the strain rate of salt rock increases nonlinearly and by increasing the confining pressure, the strain rate decreases.

**Keywords:** Salt rock, creep, lateral strain, axial strain, temperature, confining pressure