

## مقاله پژوهشی

# بررسی رفتار خزشی نمونه‌هایی از سنگ بکر گچ سازند گچساران در شرایط دمای محیط و دمای پوش سنگ

جواد احمدزاده<sup>۱</sup>؛ غلامرضا لشکری پور<sup>۲\*</sup>؛ ناصر حافظی مقدس<sup>۲</sup>؛ محمد غفوری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری؛ زمین شناسی گرایش مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد؛ گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.378811.1184

واژگان کلیدی	چکیده
ژئوپس، انیدریت، مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش خزش، دما، معادله خزش.	شناخت رفتار خزشی سنگ در پوش‌سنگ‌های تبخیری به‌منظور بررسی همگرایی در جداره چاه‌های نفتی اهمیت زیادی دارد. به‌طور کلی در بین سنگ‌های تبخیری رفتار خزشی ژئوپس و انیدریت نسبت به هالیت‌ها کمتر بررسی شده‌اند. از آنجاکه دسترسی به مغزه‌های چاه‌های حفاری شده نفتی در سازند گچساران بسیار مشکل و هزینه‌بر می‌باشد، در این تحقیق از رخنمون‌های سطحی بخش ۱ سازند گچساران نمونه‌برداری صورت گرفت تا مغزه‌های لازم جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و خزش تهیه شوند. روی مغزه‌ها انجام گرفت تا مقدار تنش آغازین جهت آزمایش خزش مشخص گردد. در ادامه، بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و متوسط دمای حاکم بر پوش‌سنگ‌ها، آزمایش‌های خزش چندمرحله‌ای تک‌محوری از نوع تنش ثابت در دو دمای آزمایشگاه و محیط پوش‌سنگ و در دو سطح تنش آغازین ۰/۱ تنش تسلیم و ۰/۷۵ تنش تسلیم انجام شدند. سپس برآزش معادلات خزشی نمایی و توانی (پاورلاو) بر روی داده‌های خزش انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تنش تسلیم خزشی به مقدار ۱۲ مگاپاسکال برای ژئوپس و ۲۰ مگاپاسکال برای انیدریت پورفیری بوده است. بر اساس این آزمایش‌ها، حد ویسکوز خطی برای خزش ژئوپس و انیدریت به ترتیب برابر با ۵/۵ الی ۶/۷ مگاپاسکال و ۹/۸ الی ۱۵/۱۵ مگاپاسکال بدست آمد. ضمناً ژئوپس تحت دما در مقایسه با انیدریت، پلاستیسیته و خزش یکنواخت بیشتری نشان داد. درحالی‌که برای انیدریت، آستانه خزش شتابدار پایین آمده و از تداوم زمان خزش نیز کاسته شد. نهایتاً علاوه بر بررسی رفتار خزشی ژئوپس و انیدریت، مقایسه‌ای بین خواص رئولوژیکی و تعیین معادله خزشی این دو نوع سنگ نیز انجام شده است.

## ۱. پیش‌گفتار

سولفات‌ها مانند ژئوپس و انیدریت در مقایسه با هالیت کم‌تر انجام شده است. ژئوپس در متون علمی جزء نمک‌های تبخیری رده‌بندی می‌شود که به همراه سایر نمک‌ها همچون هالیت، پتاس، سیلویت، کارنالیت و سنگ‌هایی مانند گل‌سفید، مادستون، سیلتستون، شیل و مارن جزء سنگ‌های رسوبی سست و ضعیف رده‌بندی می‌شود. بازه معمول مقاومت فشاری تک‌محوری این سنگ‌ها از ۵ الی ۲۵ مگاپاسکال است [۵-۷]. بل در سال ۱۹۸۱ مطالعات مفصلی بر روی خواص ژئوتکنیکی سنگ‌های رسوبی تبخیری همچون سولفات‌ها، هالیت و پتاس در تعدادی از معادن آمریکا انجام داد. او در بررسی‌های خود

وجود سنگ‌های تبخیری مانند نمک هالیت و نمک‌های سولفات‌ها می‌توانند سبب بروز تمرکز شدید تنش‌های موضعی در جداره چاه‌های نفتی شوند [۱-۴]. مشکلاتی همچون انسداد چاه‌ها به دلیل تورم سنگ‌های دیواره چاه و حتی شکست دیواره چاه، برش خوردن لوله جداره‌ها از جمله مشکلات متعددی است که حفاران با آن‌ها مواجه هستند. رفتار وابسته به زمان توده سنگ در این میان نقش مهمی دارد که در مطالعات متعددی به آن اشاره شده است. همچنین مطالعات در مورد خواص مکانیکی سنگ‌های

فشاری تک‌محوری و شاخص‌های کش‌سانی در آزمایشگاه تعیین شوند.

وجه تمایز این تحقیق با پژوهش‌های مشابه و با موضوعیت خزش، اختصاص آن به ژئوپس و انیدریت سازند گچساران و مقایسه رفتار رئولوژیکی این دو سنگ است و این در حالی است که در اغلب تحقیقات صرفاً سنگ نمک مورد بررسی قرار گرفته و مطالعه تغییرشکل درازمدت ژئوپس و انیدریت مورد غفلت واقع شده است. ضمناً بررسی اثر میانگین دمای حاکم بر پوش‌سنگ‌های جنوب غرب ایران از دیگر اختصاصات تحقیق حاضر می‌باشد. علاوه بر این، مراحل رفتار خزشی انیدریت سازند گچساران قبلاً توسط نویسنده مورد ارزیابی اولیه قرار گرفته است [۴۹].

## ۲. مواد و روش‌ها

در این مقاله خواص مقاومتی درازمدت و وابسته به زمان دو نوع سنگ ژئوپس و انیدریت در قالب مغزه‌های تهیه‌شده از رخنمون‌های سازندی در جنوب غرب ایران و ناحیه فروافتاده دزفول بررسی شده است. از آنجاکه انیدریت و ژئوپس نقش مهمی در مباحث ژئومکانیکی مناطق نفتی دارند، سازند گچساران و به‌ویژه بخش یک یا پوش‌سنگ آن نیز در زمره نکات مورد تمرکز این مطالعه قرار گرفته است. یکی از اهداف این تحقیق بررسی اثر دما بر روی رفتار خزشی و همچنین مقاومت خزشی سنگ بوده است. در این راستا اقدام به تهیه بلوک‌های سنگی و نمونه‌های مغزه از آن‌ها شده و آزمایش‌های خزش فشاری تک‌محوری در دستور کار قرار گرفتند.

### ۱.۲. نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

سازند گچساران یک سازند مهم در گستره جنوب غربی و جنوب ایران به شمار می‌آید. کمبود مغزه‌های موجود از سازند گچساران همواره یکی از مشکلات رایج در مطالعات این سازند می‌باشد [۱۴]. در مطالعه میدانی نفتی ایران به‌ندرت از سازند گچساران مغزه گیری شده است لذا در این مطالعه از رخنمون‌های سطحی این سازند در استان خوزستان در شمال این استان نمونه‌برداری شد. برای این منظور از رخنمون‌های ژئوپسی و انیدریتی در همبری‌های دو سازند آسماری و گچساران واقع در جاده شهرستان گچساران به بی‌بی حکیمه و مسیر آزادراه خرم آباد-پل زال بازدید بعمل آمد (شکل ۱). همبری دو سازند گچساران و آسماری در مناطق مذکور،

وزن مخصوص انیدریت و ژئوپس را به ترتیب ۲/۸۹ و ۲/۳۹ گرم بر سانتی مترمکعب و مقاومت فشاری تک‌محوری این دو سنگ را به ترتیب ۹۱/۷ و ۲۷/۵ مگاپاسکال به دست آورد. برای ژئوپس و انیدریت مقادیر مدول الاستیسیته آغازین و نسبت پواسون نیز به ترتیب ۵۶/۷ و ۲۴/۸ گیگاپاسکال و ۰/۳۴ و ۰/۲۴ تعیین شده است. البته وجه تمایزی بین انیدریت و ژئوپس با هالییت و پتاس وجود دارد و آن‌هم نسبت مدولی بالاتر انیدریت و ژئوپس می‌باشد [۸]. رفتار تغییرشکلی اغلب نمونه‌های انیدریتی در آزمایش‌های بل در سال ۱۹۸۱ و هنگز و همکاران در سال ۲۰۰۹ نیز رفتاری نیمه الاستیک بوده و در بعضی موارد نیز رفتاری پلاستیک توأم با اتساع و گسیختگی داشتند [۸،۹]. همان‌طور که ذکر شد بیشتر مطالعات بر روی خزش تک‌محوری و سه محوری سنگ نمک متمرکز بوده و تحقیق بر روی خزش ژئوپس و انیدریت بسیار کم است [۵۱،۵۰،۳۸]. در حوضه‌های حاشیه دریای مدیترانه و شمال آن ژئوپس‌هایی با ساختار توده‌ای و بافت آلاباسترین به سن میوسن رخنمون دارند که به لحاظ زمانی معادل با ژئوپس‌های آلاباسترین سازند گچساران می‌باشند. مقاومت فشاری تک‌محوری این ژئوپس‌های نئوزن از ۱۸ تا ۳۶ مگاپاسکال به دست آمده است [۱۰]. در یک بررسی، مقاومت فشاری تک‌محوری ژئوپس‌های ممبرهای سطحی سازند گچساران در شمال شرق خوزستان از ۲۳ الی ۵۰ مگاپاسکال گزارش شده است [۱۱].

سازند گچساران نقش یک پوش‌سنگ بسیار مؤثر را در مخازن هیدروکربوری جنوب ایران دارد [۱۲-۱۵]. این سازند از بخش‌های هفت‌گانه شاخصی تشکیل شده است که لایه‌های رسوبی تبخیری متعددی که کاملاً مستعد خزش می‌باشند را در خود جای داده است [۱۵-۱۷]، [۲،۳،۱۸]. در مطالعه‌ای، زمانی و همکارانش سنگ نمک سازند گچساران در میدان نفتی کوپال را مورد مطالعه قرار داده و پارامترهای خزشی نمک سازند مذکور را نیز مدل‌سازی کردند [۴۶]. در تحقیقات مشابه بر روی سازند گچساران، میدان نفتی مارون نیز بارها مورد مطالعه قرار گرفته و مشکلات حفاری و ژئومکانیکی متعدد ناشی از بخش‌های شکل‌پذیر سازند گچساران مورد اشاره و بررسی قرار گرفته است [۴۷،۴۸]. در مطالعه خواص ژئومکانیکی پوش‌سنگ‌ها، در صورت دسترسی به مغزه از پوش‌سنگ، بهتر است فاکتورهای مهمی همچون مقاومت

کرد. شکل ۲ مغزه‌های تهیه شده جهت این پژوهش را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز تعداد آزمایشات انجام‌یافته به تفکیک هر نوع سنگ ذکر شده است.

جدول ۱- تعداد آزمایشات انجام‌یافته به تفکیک نوع سنگ

نوع سنگ	تعداد آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری انجام‌یافته	تعداد آزمایش خزش تک‌محوری انجام‌یافته
ژیپس	۴ آزمایش	۲ آزمایش
انیدریت	۳ آزمایش	۲ آزمایش

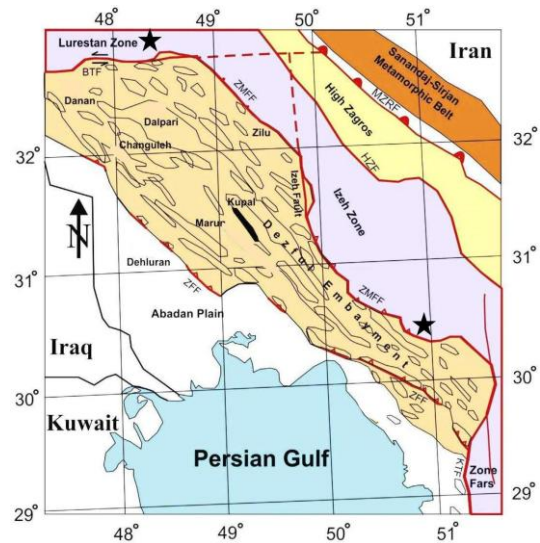
مغزه‌ها قبل از آزمایش به مدت حداکثر ۸ ساعت در آون تحت دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا هم از تبدیل ژیبس به بازائیت جلوگیری شود و هم نمونه‌های دچار پوکیدگی نگردند. سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری با تعیین تغییر شکل‌های عمودی و جانبی انجام شد. به‌طور کلی تعداد ۷ آزمایش UCS انجام شد که ۶ مورد آن موفقیت‌آمیز بود که به ترتیب سه مورد به ژیبس و سه مورد دیگر به انیدریت اختصاص داشتند. از مقادیر UCS به‌دست‌آمده در تعیین تنش آغازین جهت آزمایش‌های خزش بر روی ژیبس و انیدریت بهره گرفته شد.



شکل ۲- دستگاه مغزه گیر و مغزه‌های تهیه‌شده جهت انجام آزمایش خزش، (ژیپس و انیدریت پورفیبری).

دارای رخنمون‌هایی از لایه‌های انیدریتی پورفیری هستند که بخش سطحی از آنها به جهت تماس با آب‌های سطحی به ژیبس آلاستر تبدیل شده‌اند. این سولفات‌های تبخیری در کنتاکت بین دو سازند، متعلق به ممبر قاعده‌ای (بخش یک) سازند گچساران می‌باشند که معادل پوش‌سنگ‌های میادین نفتی در فروافتادگی دزفول می‌باشند.

برای تهیه نمونه جهت آزمایش‌ها، بلوک‌هایی از بخش ۱ سازند تهیه شدند. همه بلوک‌ها از بخش‌های همگن لایه‌ها و تا حد ممکن به موازات لایه‌بندی جمع‌آوری شدند تا مغزه گیری نیز عمود بر سطح لایه‌بندی انجام گیرد. در آزمایشگاه، مغزه گیری از بلوک‌ها توسط دستگاه مغزه گیر پایه آبی با سایز استاندارد تهیه شدند (شکل ۲) و تلاش شد تا نسبت طول بر قطر استاندارد که حداقل ۲/۵ می‌باشد در آنها رعایت شود [۲۰، ۱۹]. سپس مغزه‌ها جهت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش خزش به آزمایشگاه مکانیک سنگ گروه معدن دانشگاه تربیت مدرس ارسال شدند.



شکل ۱- نقشه موقعیت نقاط نمونه‌برداری و میدان نفتی کوپال در فروافتادگی دزفول (با تغییر از [۴۵]).

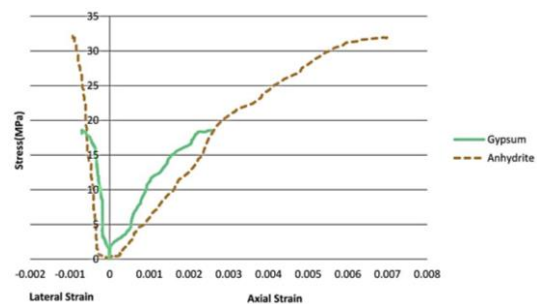
هنگام مغزه گیری، ابتدا بلوک‌ها به دلیل انحلال و مقاومت کم سنگ گچ دچار فروپاشی می‌شدند و فرآیند تهیه مغزه به‌سختی انجام می‌شد. برای حل این مشکل، جهت خنک‌سازی دستگاه مغزه گیر، محلول نمک غلیظ به مقدار فراوان تهیه شد تا بتوان مغزه‌ها را سالم از بلوک‌ها استخراج

### ۳. خواص مکانیکی و رئولوژیکی ژئوپیس و انیدریت

تغییر شکل ژئوپیس در طولانی مدت قابل توجه بوده و یک سنگ سست و داکتیل در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. اما از نظر هوگزا و همکارانش، ژئوپیس آلباستر حتی در جریان خزش نیز، نهایتاً دچار گسیختگی در ساختار بلورین می‌شود و نرخ خزش در آن به شدت به رطوبت نسبی محیط و سطح تنش وابسته است [۲۱]. در مورد خواص مکانیکی و تغییرشکلی ژئوپیس نیز همچنین دانش کمی در دست است [۲۲]. مطالعات اولیه بر روی خزش ژئوپیس را گریگز در سال ۱۹۳۹ و سپس کراکر و شاپلر در سال ۱۹۶۲ انجام دادند [۲۳، ۲۴]. تحقیقات بل نشان داد که ژئوپیس در تنش معادل با یک چهارم تا نصف مقاومت نهایی (گسیختگی)، شروع به تغییرشکل پلاستیک می‌کند در حالی که برای انیدریت این شروع در نقطه ۶۰ الی ۸۰ درصد مقاومت نهایی آن قرار دارد [۸]. در مقایسه با هالیت که تنش تسلیم فشاری آن ۷ مگاپاسکال تعیین شده است [۲۵]. در این تحقیق میزان تنش تسلیم برای ژئوپیس و انیدریت به ترتیب برابر با ۱۲ مگاپاسکال و ۲۰ مگاپاسکال به دست آمد. در آزمایش خزش بر روی ژئوپیس‌های نئوزن ناحیه مراش زنجان مشخص گردید که این سنگ در دمای پایین و بارگذاری‌های سریع‌تر با اختلاف زمانی کمتر، رفتاری شکننده و بدون خزش چشمگیر نشان می‌دهد اما در دمای بالاتر رفتار شکل‌پذیر در آن دیده می‌شود [۲۶]. در حوزه ژئومکانیک مخازن، دادلی و همکارانش پژوهشی حول خزش تحت فشار محصور نشده انجام دادند. آن‌ها روش‌های استاندارد *ISRM* را در این زمینه بررسی نموده و نکته نظراتی را جهت تعیین معادلات ویسکوالاستیک خزش و فرونشست مخازن بیان کردند [۲۷].

در این پژوهش مغزه‌های ژئوپیس مورد آزمایش از بافت متبلور ریزبلور موسوم به ژئوپیس آلباستر می‌باشند که فرم شاخص ژئوپیس در حوضه‌های رسوبی نئوزن زاگرس می‌باشد [۲۸، ۲۹]. کلیه مراحل آماده‌سازی مغزه‌ها اعم از صاف کردن سر و ته مغزه‌ها تا استقرار آن‌ها بین پلیت‌های بارگذاری دستگاه، بر اساس استانداردهای ذکر شده در *ASTM D4543-08* و *ASTM D7012-14* انجام گرفت [۲۰، ۱۹]. (شکل‌های ۴ و ۵). از ۶ مورد آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در این تحقیق، بیشترین مقدار مقاومت فشاری برای ژئوپیس ۱۸/۵۷ و برای انیدریت ۳۲/۰۰ مگاپاسکال به دست آمد.

شکل ۳ منحنی‌های تغییر شکل محوری و قطری به دست آمده را برای ژئوپیس و انیدریت نشان می‌دهد. شکل ۴ کرنش‌سنج‌های خطی-افقی جهت سنجش تغییر شکل‌های قطری را که به سطوح جانبی نمونه متصل می‌شوند نشان می‌دهد. این کرنش‌سنج‌ها اهرم‌های حسگر بسیار حساسی هستند که به جوانب مغزه متصل شده و کوچک‌ترین حرکات افقی را که در اثر تغییر شکل قطری نمونه رخ می‌دهد به دستگاه دیتالاگر انتقال می‌دهند. بدین ترتیب مقاومت نهایی ژئوپیس و انیدریت به ترتیب ۱۸ و ۳۲ مگاپاسکال به دست آمد. این نمودار مبنایی برای تصمیم‌گیری در انتخاب مقادیر تنش آغازین جهت بارگذاری در دستگاه خزش بوده است.



شکل ۳- تغییر شکل محوری و جانبی در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ژئوپیس و انیدریت.



شکل ۴- وضعیت استقرار مغزه در دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری به انضمام چارچوب استقرار اهرم‌های انتقال تغییر شکل قطری ( $LVDT^1$ ).



#### ۴. آزمایش خزش

دهند، تنش آغازین به‌اندازه نصف مقاومت فشاری تک‌محوری در نظر گرفته شد تا بتوان گسیختگی خزشی را نیز مشاهده نمود. روی هم‌رفته آزمایش‌ها تا گسیختگی همه نمونه‌ها ادامه یافتند تا داده‌های کاملی از خزش در هر نمونه به دست آید. لذا در مدت زمان آزمایش محدودیتی تعیین نشد. کمترین مدت زمان آزمایش برای نمونه انیدریت برشی شده به اندازه ۶ روز طول کشید. بیشترین زمان آزمایش خزش را نیز نمونه ژپیس  $GI$  به اندازه ۳۸ روز به خود اختصاص داد.



شکل ۵- تجهیزات آزمایش خزش و آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش‌های خزش و مقاومت تک‌محوری، محیط نرم‌افزاری و رابط گرافیکی ثبت داده‌ها، گنج‌های استرین سنج و تجهیزات اعمال دما (ترموکوپل و کابل تنظیم دما) به همراه تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده.

لازم به ذکر است که بارگذاری در همه آزمایش‌ها به‌صورت چندمرحله‌ای و افزایشی انجام شده است. بدین‌صورت که پس از هر مرحله افزایش تنش فشاری، به نمونه اجازه ثبات در تغییر با یک نرخ خزش ثابت داده می‌شود تا مرحله خزش ثانویه رخ دهد. سپس مرحله بعدی بارگذاری با تنشی بالاتر شروع می‌شود. این چرخه تا جایی ادامه می‌یابد که مغزه سنگی گسیخته شود و بعد از گسیختگی، مقاومت پس‌ماندی در نمونه مشاهده نگردد. درنهایت طی تحلیل برازش روابط خزش، برازش‌های نمایی و توانی بر روی داده‌های به‌دست‌آمده

به‌طور کلی، آزمایش خزش فشاری در محیط آزمایشگاهی در سه حالت آزمایش با سطح تنش ثابت، آزمایش با نرخ استرین ثابت و آزمایش رهایی تنش انجام می‌شود. نوع اخیر یا رهایی تنش با این هدف انجام می‌شود که کمترین تنش لازم برای شروع تغییر شکل خزشی در سنگ تعیین شود. در این تحقیق از حالت آزمایش با نرخ استرین ثابت استفاده شده است و آزمایش‌ها در دو دمای محیط آزمایشگاه و محیط پوش سنگ (به‌طور متوسط ۸۰ درجه سانتی‌گراد) انجام گرفته‌اند. دو مورد از آزمایش‌های خزش بر روی ژپیس و دو مورد بر روی انیدریت اجرا شدند. برای این منظور از استاندارد  $ASTM D-4406$  و استاندارد به‌روزرسانی شده در مقاله Aydan و همکارانش استفاده گردید [۳۰، ۳۱]. ضمناً با عطف به این موضوع که آزمایش‌های خزش به دو روش نرخ استرین ثابت و تنش ثابت انجام می‌شوند، آزمایش‌های این تحقیق از نوع نرخ استرین ثابت انجام شدند. در مجموع ۶ آزمایش خزش جداگانه انجام شد که ۴ مورد از آن‌ها با موفقیت به پایان رسیدند. نمونه‌های ژپیس مورد آزمایش همگی از نوع ژپیس ریزبلور و همگن موسوم به ژپیس آلاباستر و بدون تخلخل بودند (شکل ۲). تنش آغازین بر روی نمونه جهت بارگذاری در دستگاه خزش همواره بر اساس نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری انتخاب می‌شود. اغلب مطالعات، حداقل مقدار تنش اولیه را بیشتر از نصف مقاومت فشاری تک‌محوری در نظر می‌گیرند. به‌عنوان یک مطالعه پژوهشی موردی، تانگ و همکارانش تنش آغازین را ۹۰ درصد مقاومت تک‌محوری در نظر گرفتند [۵۲]. در سنگ‌های سستی همچون نمک، سنگ بدون نیاز به بار اولیه زیاد هم می‌تواند شروع به خزش کند لذا در بعضی پژوهش‌ها بار اولیه خیلی کمتر هم در نظر گرفته می‌شود [۵۳]. اما در پژوهش حاضر از آنجایی که سولفات‌ها مقاومت نسبی بیشتری نسبت به نمک دارند، انتخاب تنش اولیه در دو وضعیت تنظیم شده است. در وضعیت اول، تنش اولیه به‌اندازه یک‌دهم مقاومت نهایی نمونه سنگ انتخاب شد تا بتوان در تنش‌های کم هم به خزش حالت ثابت دست یافت و هم امکان تبعیت رفتار نمونه از قانون خزش توانی نورتون-بایلی بررسی شود. در وضعیت دوم از آنجایی که ممکن بود نمونه‌ها تحت تنش‌های اولیه کم، هیچ‌گاه به مرحله شکست نرسند و یا زمان بسیار زیادی را به خزش اختصاص

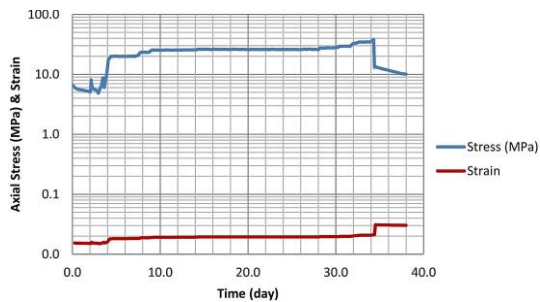
از آزمایش خزش نیز مقایسه شدند.

#### ۱.۴. رفتار خزشی ژئوپیس

در ادامه پژوهش، دو نمونه ژئوپیس آلاباستر در قالب مغزه استاندارد  $MX$  تحت آزمایش خزش قرار گرفتند. در نمودار شکل ۶، تنش و تغییرشکل محوری وارد شده به نمونه ژئوپیس اول یا  $G1$  نسبت به زمان بر حسب روز در طول آزمایش خزش نشان داده شده است. مقادیر تنش و تغییرشکل محوری عیناً به نمودار منتقل شده‌اند با این تفاوت که به منظور گنجاندن داده‌های هر دو متغیر تنش و تغییرشکل در محور عمودی، مقیاس نمایش آن لگاریتمی انتخاب شده است. قبل از بارگذاری خزشی، تنش محوری ۱۰ کیلوگرم به منظور تثبیت موقعیت مغزه در بین صفحات بارگذاری، به مدت زمان سه ساعت به مغزه وارد شد. در آزمایش خزش بر روی هر دو نمونه ژئوپیس  $G1$  و  $G2$ ، مقدار تنش آغازین کم و ۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است تا نمونه‌ها با تأخیر در گسیختگی و به‌طور کامل وارد فرایند خزش شوند با این تفاوت که نمونه اول در دمای آزمایشگاه و نمونه دوم نیز بر اساس متوسط دمای حاکم بر پوش سنگ گچساران در دمای ۸۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه  $G1$  در روز اول در برابر تنش ثابت، عکس‌العمل رهایی تنش از خود بروز می‌دهد که نشان‌دهنده شکل‌پذیری ژئوپیس و ورود بدون تأخیر آن به مرحله خزش ثانویه است. رفتار رهایی به معنی شروع تغییرشکل سخت‌شدگی نمونه در آزمایش خزش بوده و با افت تنش در دستگاه مشخص می‌شود درحالی‌که تنش محوری واقعی در آزمایش ثابت است و این کاهش تنش ناشی از کاهش طولی نمونه است. در روز دوم آزمایش، تنش به ۸ مگاپاسکال رسانده می‌شود که مجدداً شاهد رفتار رهایی تنش هستیم (شکل ۶). در ادامه آزمایش، با افزایش تنش تا سطح ثابت ۲۵ مگاپاسکال، تغییرشکل افزایشی نشان نمی‌دهد. این عدم افزایش در تغییرشکل به دلیل متراکم شدن نمونه تحت پدیده رهایی تنش است.

تحت همین مقدار تنش ۲۵ مگاپاسکال، نمونه به مدت ۳۸ روز مرحله خزش ثانویه و پایدار را طی می‌کند. در تنش بالاتر از ۱۳ مگاپاسکال، ژئوپیس  $G1$  دچار گسیختگی خزشی می‌شود اما پس از این گسیختگی نیز مجدداً به مدت چهار روز خزش نشان می‌دهد. نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که ژئوپیس  $G1$

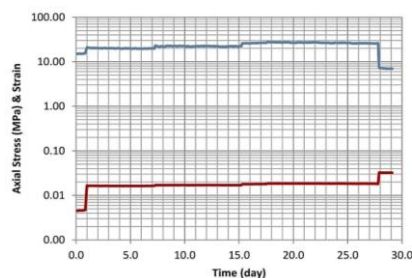
همچنان در امتداد سطح گسیختگی رفتار خزشی از نوع برشی داشته و شکست آن ناگهانی نمی‌باشد. به عبارت دیگر گسیختگی در آن از نوع داکتیل بوده تا اینکه پس از دو روز دچار فروپاشی کامل شده و آزمایش متوقف می‌شود.



شکل ۶- نمودار تنش-زمان و تغییرشکل-زمان در آزمایش خزش نمونه ژئوپیس  $G1$  در دمای آزمایشگاه.

نمونه ژئوپیس  $G2$  نیز در شرایط بارگذاری مشابه ولی تحت دمای معادل محیط پوش سنگ تحت آزمایش خزش قرار گرفت. اطلاعات محدودی در ارتباط با دمای حاکم بر سازند گچساران در شرایط پوش سنگ‌های میدان‌های نفتی دسترس است [۳۳، ۳۲]. بر همین اساس برای آزمایش خزش نمونه  $G2$ ، دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و امان اعمال‌کننده دما، به نمونه متصل گردید (شکل ۴ الف). سپس به مدت ۳ ساعت نمونه با نیروی ۱۰ کیلوگرم تثبیت‌شده و دما در هر ساعت تا ۲۵ درجه افزایش داده شد تا به ۸۰ درجه برسد. در مرحله بعد با حفظ دما و ایزوله کردن دستگاه و اتاق آزمایش، تنش محوری به ۶ مگاپاسکال رسانده شد تا نمونه شروع به تغییرشکل نموده و در حین بارگذاری مقادیر تغییرشکل نیز ثبت شدند. این مقدار تنش، تنش مرحله اول خزش می‌باشد و تا زمانی که نمونه اعمال می‌شود که تغییرشکل نمونه به نرخ ثابتی برسد. سپس یک مرحله باربرداری کامل برای نمونه  $G2$  در نظر گرفته شد تا رفتار ژئوپیس در چرخه دوم بارگذاری نیز بررسی شود (شکل ۷). قبل از اعمال تنش مرحله بعدی، ملاحظه می‌شود که از استرین ایجاد شده کمی کاسته می‌شود اما این کاهش فقط به میزان نصف کل استرین ایجاد شده است (شکل ۷) که خود حاکی از تغییر شکل‌پذیری بالای ژئوپیس در حضور دما می‌باشد. ضمناً بازیابی نسبی استرین ایجاد شده در ژئوپیس، خود حاکی از

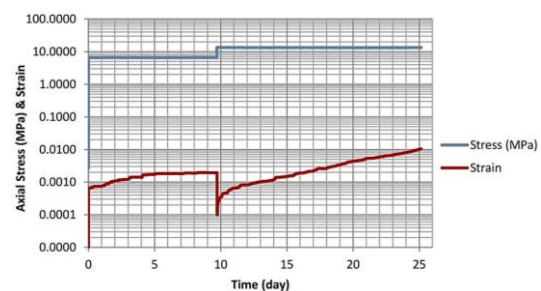
سنگ مادر خود را تا حد نسبتاً زیادی حفظ نموده‌اند [۳۴]. لذا امکان تشابهات رفتاری مکانیکی بین آن‌ها وجود دارد اما وزن حجمی و تراکم بیشتر آن ممکن است نتایج متفاوت‌تری را در آزمایش خزش به دنبال داشته باشد. در این پژوهش علاوه بر دو نمونه ژئوپیس آلاباستر، دو نمونه انیدریتی هم مورد آزمایش خزش قرار گرفتند. در ابتدای آزمایش، نمونه‌ها به مدت سه ساعت تحت نیروی ثابت ۱۰ کیلوگرم تثبیت شدند. نمونه انیدریتی اول یا *An1* در دمای ثابت آزمایشگاه تحت تنش محوری آغازین ۱۵ مگاپاسکال مورد بارگذاری خزشی ثابت قرار گرفت. نمونه انیدریت دوم یا *An2* نیز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با تنش محوری آغازین ۲ مگاپاسکال وارد آزمایش خزش شده و بدین ترتیب تغییرشکل‌های نمونه‌ها در هر ثانیه ثبت شدند. مغزه‌های *An1* و *An2* پس از آماده‌سازی و تثبیت در بین فک‌های بارگذاری دستگاه آزمایش خزش، به ترتیب با بارهای آغازین ۱۵ و ۲ مگاپاسکال بارگذاری شدند. انیدریت *An1* تغییرشکل پایدار و نسبتاً طولانی مدتی را در طی ۲۹ روز بروز می‌دهد. مرحله خزش ثانویه در *An1* طولانی بوده و بیشترین مدت از کل زمان آزمایش را به خود اختصاص می‌دهد. نظر به اینکه عواملی همچون رطوبت، اندازه دانه‌ها، جهت بارگذاری، دما و مدت زمان دوام تنش فشاری همگی در تغییرشکل خزشی مؤثر می‌باشند، تغییرشکل‌های رخ داده در نمونه *An1* نیز کاملاً با میزان تنش فشاری وارد شده نیز مرتبط می‌باشند (شکل ۸).



شکل ۸- نمودار تنش-زمان و تغییرشکل-زمان در آزمایش خزش انیدریت *An1* در دمای آزمایشگاه.

نمونه *An2* مطابق شکل ۹، پس از ۴ روز بارگذاری با تنش ۱۲ مگاپاسکال، باربرداری می‌شود تا به مقدار ۱ مگاپاسکال برسد و سپس بدون وقفه مجدداً بارگذاری می‌شود. تغییرشکل‌ها همچنان تا این مرحله، روندی رو به افزایش نشان می‌دهند. اما پس از بارگذاری مرحله بعدی به میزان ۱۰ مگاپاسکال

رفتار بارز ویسکوز توأم با پلاستیسیته در ژئوپیس است. در مرحله بعدی بارگذاری پس از یک باربرداری کامل، تنش محوری به میزان ۱۵ مگاپاسکال بر نمونه اعمال می‌شود. تنش محوری ثابت تا زمانی که آهنگ تغییرشکل در حال افزایش است به نمونه اعمال می‌شود، اما زمانی که آهنگ تغییرشکل ثابت شد، تنش محوری مجدداً افزایش داده می‌شود. مراحل افزایش تنش تا زمانی ادامه داده می‌شود که نمونه دچار گسیختگی شود. تغییرشکل‌هایی که آهنگ آن‌ها ثابت است مربوط به مرحله خزش ثانویه می‌باشند و مطالعه آن‌ها نقش مؤثری در تعیین معادله خزشی توانی دارد. شکل ۷ نمودار تنش و تغییرشکل محوری وارد شده به نمونه ژئوپیس *G2* را نسبت به زمان بر حسب روز نشان می‌دهد. مکانیک شکست نمونه *G2* نیز کاملاً مشابه نمونه *G1* است. هر دو نمونه پس از تغییرشکل، در تنش ۱۳ مگاپاسکال گسیخته می‌شوند اما در تغییرشکل *G2*، دما اثری فزاینده در شیب منحنی تغییرشکل ایفا می‌کند. درحالی‌که تغییرشکل در ژئوپیس *G1* کاملاً تابع تنش و به موازات منحنی تنش‌های وارده است، در نمونه *G2*، تغییرشکل خزشی ثانویه برخلاف *G1* به جای حالت ثابت و پایدار، ماهیتی صعودی یا افزایشی پیدا می‌کند که خود ناشی از اثر دماست. این روند تا گسیختگی تدریجی نمونه ادامه پیدا می‌کند و خبری از تغییرشکل افزایشی و شتابدار در مراحل انتهایی خزش نیست (شکل ۷).



شکل ۷- نمودار تنش-زمان و تغییرشکل-زمان در آزمایش خزش نمونه ژئوپیس *G2* تحت دمای معادل پوش سنگ.

#### ۲.۴. آزمایش تغییرشکل خزشی انیدریت

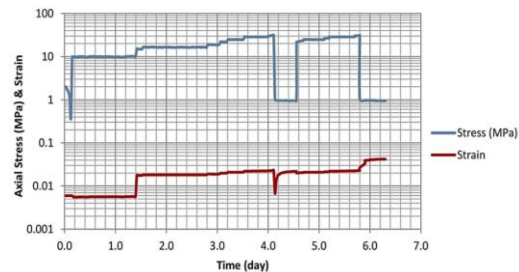
انیدریت به لحاظ کانی‌شناختی، پلی‌مورف متراکم و بی‌آب ژئوپیس است اما از لحاظ بافتی ممکن است بافت اولیه ژئوپیس را پس از تبدیل به انیدریت حفظ کرده باشد. اغلب انیدریت‌های سازند گچساران اختصاصات بافتی ژئوپیس‌های

شرایط پوش سنگ و مخازن عمیق‌تر، پس از خزش اولیه و حد الاستیک، به جای واکنش سخت‌شوندگی، خزش حالت ثابت رخ می‌دهد. برای مشخص کردن و معادله خزش سنگ و تعیین واکنش خزشی در خزش حالت ثابت یا یکنواخت و در حضور دما، معمولاً از رابطه خزشی توانی یا پاور لاو استفاده می‌شود.

## ۵. بررسی روابط خزش

هدف از تعیین معادله خزش برای یک جسم جامد، تعیین مقدار تغییر شکل خزشی بر اساس متغیرهای تنش، دما و زمان می‌باشد. رفتار تمام مراحل خزش در یک جسم جامد، همیشه غیرخطی است مگر اینکه تنش وارده همانند این تحقیق کم باشد که در آن حالت واکنش از نوع ویسکوالاستیک خطی است [۳۷]. هرگونه معادله خزش برای سنگ‌ها زمانی قابل تعریف است که نمونه مورد آزمایش همگن و همسانگرد باشد [۳۸]. از این رو از ابتدای پیمایش‌های صحرایی، تمرکز بر جمع‌آوری بلوک‌ها از رخنمون‌های گچی همگن و همسانگرد بوده است. از لحظه‌ای که منحنی تنش-تغییر شکل، حد الاستیک را پشت سر گذاشته و از حالت الاستیک خطی خارج می‌شود تغییر شکل دائمی در سنگ به وجود می‌آید که با خزش ثانویه تداوم می‌یابد. خزش ثانویه طولانی‌ترین و غالب‌ترین مرحله از تغییر شکل خزشی سنگ‌ها بوده و بر اساس تحقیق آلتنباخ و همکارانش ممکن است از رابطه نمایی و یا توانی پیروی کند [۳۹]. در یک آزمایش خزش برای برازش نمایی یا توانی به مرحله خزشی ثانویه، لازم است ابتدا مراحل تغییر شکل به‌خوبی از یکدیگر تفکیک شوند. این تفکیک در عمل و مانند منحنی‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق ممکن است مشکل به نظر برسد. ترازهای مختلف تنش که به‌صورت مرحله‌ای اعمال می‌شوند، می‌توانند راهنمای خوبی برای تفکیک مراحل خطی و توانی تغییر شکل باشند [۳۹]. آیدان و همکارانش در سال ۱۹۹۶ و سپس سینگ و همکارانش در سال ۱۹۹۸ جهت تعیین رابطه خزش، روش برازش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی خزش را پیشنهاد نمودند [۴۰، ۴۱]. تعیین قاعده نمایی خزش ساده بوده ولی در مورد خزش توانی، با ترسیم نمودار نرخ تغییر شکل نسبت به لگاریتم تنش در مرحله خزش ثانویه و در دمای ثابت، یک معادله برازشی به وجود می‌آید که برای معادلات نمایی و توانی می‌توان آن‌ها را به ترتیب

نخستین شکست در انیدریت رخ می‌دهد که در نمودار به‌صورت یک افت در منحنی تغییر شکل دیده می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹- نمودار تنش-زمان و تغییر شکل-زمان در آزمایش خزش انیدریت An2 تحت دمای معادل پوش سنگ.

در بارگذاری‌های بعدی نیز تغییر شکل مجدداً افزایش می‌یابد اما هیچ‌گاه از یک حد مشخصی فراتر نمی‌رود تا اینکه پس از روز ششم، در تنش ۱۲ مگاپاسکال دچار گسیختگی نهایی شده و آزمایش به اتمام می‌رسد. خزش کوتاه مدت و گسیختگی زود هنگام انیدریت An2 می‌تواند با شکننده و ترد شدن آن در اثر اعمال دما به نمونه مرتبط باشد.

## ۳،۴ نقش دما در آزمایش خزش

دما یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر مقدار پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها نسبت به افزایش عمق زمین می‌باشد [۳۵]. مطالعات کمی در زمینه اثر دما و تأثیرات گرادیان زمین‌گرایی در علم ژئومکانیک در دسترس است. گرجیان و همکارانش مقاومت فشاری تک‌محوری مغزه‌های انیدریتی سازند گچساران را در محدوده دمای ۲۳ الی ۱۰۰ درجه بررسی کرده و افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته را در دمای بالا برای انیدریت نتیجه گرفتند [۳۳]. در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت ژئوپس با افت زیادی مواجه می‌شود [۳۶]. هنگز و همکارانش نیز همین نتیجه را در آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی انیدریت‌های سازند Zechstein کشور هلند به دست آوردند [۹]. زینلزاده در تهیه مقطع گرادیان زمین‌گرایی برای تاق‌دیس سازند گچساران در میدان نفتی گچساران، میزان حرارت پوش سنگ و مخزن را در بازه ۷۰ الی ۱۳۰ درجه برآورد کرده است [۳۲]. لازم به ذکر است برای محیط‌های خزشی دمابالا، تغییر شکل سخت‌شوندگی اتفاق نمی‌افتد و در



به صورت روابط زیر نوشت:

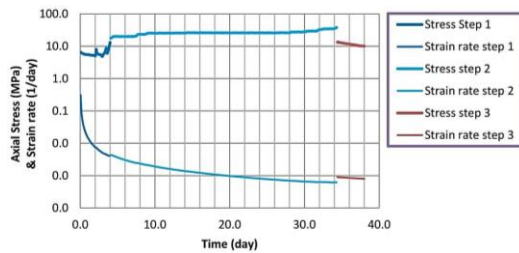
$$\dot{\epsilon} = e^{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_r = a_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n + a_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (2)$$

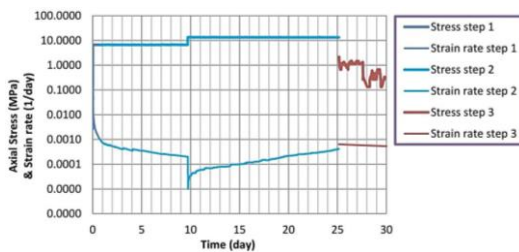
رابطه (۱) را می‌توان به عنوان رابطه نمایی خزش مورد استفاده قرارداد که در آن مقدار تغییر شکل خزشی در ساده‌ترین حالت و به طور مستقیم توسط تنش لحظه‌ای، قابل تعیین می‌باشد. رابطه دوم به رابطه پاور لاو یا توانی خزش مشهور است که در آن نرخ تغییر شکل خزشی بوده و تابع تفاضل تنش حاکم بر سنگ و دمای سنگ است. در این رابطه  $\sigma_0$  تنش تحولی تراگذر از تغییر شکل خطی به غیرخطی یا از خزش اولیه به ثانویه بوده و  $\sigma$  تنش اعمال شده در هر لحظه است که از ابتدای بارگذاری تا لحظه شکست را شامل می‌شود. معادله مذکور فقط برای آزمایش‌هایی کاربرد دارد که در دمای ثابت انجام می‌گیرند.  $a$  با یکای  $MPa \cdot day / I$  معرفی می‌شود و گویای شیب دو بخش خطی و غیرخطی منحنی نرخ تغییر شکل می‌باشد و در بعضی منابع ممکن است با  $\alpha$  نشان داده شود.  $n$  نمای تنش یا ضریب سخت‌شوندگی نامیده می‌شود و از شیب نمودار پراکنش لگاریتم تنش-لگاریتم نرخ تغییر شکل تعیین می‌شود [۴۲، ۴۳]. بر اساس بعضی پژوهش‌های انجام یافته در زمینه خزش سنگ‌ها، ضریب توانی  $n$  برای سنگ‌ها بین ۳ الی ۵ تعیین شده است [۴۴]. بایستی خاطر نشان نمود از آنجاکه در این تحقیق تنش‌های آغازین در آزمایش‌های خزش، کمتر از تنش تسلیم نمونه‌ها بوده و از طرفی دیگر دمای آزمایش ثابت بوده است، مناسب آن است که به جای رابطه خزش برگر از روابط نمایی و توانی استفاده شود. به منظور تعیین روابط خزش ابتدا نمودارهای تنش-نرخ تغییر شکل هر ۴ نمونه مورد آزمایش، مجدداً به صورت شکل ۸ ترسیم شدند تا داده‌های مراحل خزش از هم تفکیک شوند. سپس منحنی‌های تنش-تغییر شکل برازشی در محیط نرم‌افزار *MATLAB* پیاده شده و ضرایب روابط خزشی نیز تعیین شدند (جدول ۲). منحنی‌های تنش-نرخ تغییر شکل برای ۴ نمونه مورد آزمایش در تصاویر ۹ الی ۱۲ آورده شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای معادله پاور لاو، به دست آمده برای

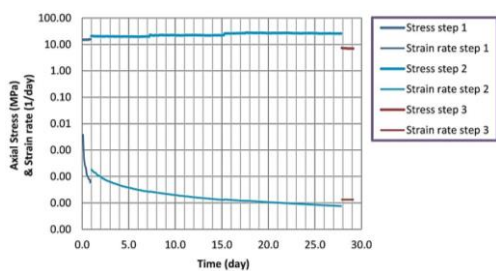
نمونه‌ها	$(\sigma_0)$ (MPa)	$N$	$a1$	$a2$
ژئیس G1	۵/۵	۲	۱۶	۰/۰۶۷
ژئیس G2	۶/۶۸	۲/۳۱	۱۴	۰/۰۹۸
انیدریت An1	۱۵/۱۵	۰/۶۵	۱۲/۴۰	۰/۰۴۳
انیدریت An2	۹/۸	۰/۷۱	۷/۱۲	۰/۲۷



شکل ۱۰- منحنی مراحل مختلف تغییر شکل و تفکیک آن‌ها (نمونه G1).



شکل ۱۱- منحنی مراحل مختلف تغییر شکل و تفکیک آن‌ها (نمونه G2).



شکل ۱۲- منحنی مراحل مختلف تغییر شکل و تفکیک آن‌ها در آزمایش خزش برای نمونه An1.

در وهله بعد تنش تحولی تراگذر در هر ۴ نمونه مطابق جدول ۲ تعیین شدند. به عبارت دیگر بر روی نمودار نرخ تغییر شکل نقطه عطفی وجود دارد که قبل از آن نرخ تغییر شکل کاهشی بوده تا اینکه پس از ورود به آن نقطه نرخ خزش به حالت ثابت

مبتنی بر سری‌های زمانی و یا روابط همبستگی استفاده شود.

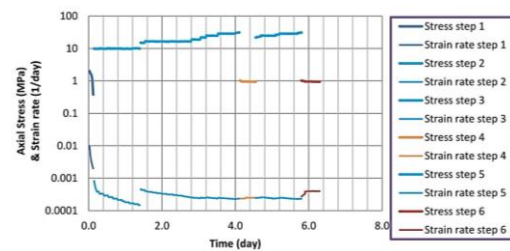
جدول ۳- روابط خزشی نمایی و توانی (پاور لاور) برای نمونه‌های آزمایش خزش

نمونه‌ها	نوع رابطه	ضریب همبستگی خزش ثانویه	ضریب همبستگی کل منحنی خزش	رابطه خزش ثانویه
نمایی	توانی	۰/۱۶	۰/۰۸	$\dot{\epsilon}_r = 0.01 e^{0.008\sigma}$
				$\dot{\epsilon}_r = 16 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n + 0.067 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n$
نمایی	توانی	۰/۰۲	۰/۰۲	$\dot{\epsilon}_r = 0.007 e^{1.63\sigma}$
				$\dot{\epsilon}_r = 14 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n + 0.098 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n$
انیدریت	توانی	۱/۰	۱/۰	$\dot{\epsilon}_r = 0.005 e^{0.051\sigma}$
				$\dot{\epsilon}_r = 12.4 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n + 0.043 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n$
انیدریت	توانی	۱/۰	۱/۰	$\dot{\epsilon}_r = 0.0037 e^{0.073\sigma}$
				$\dot{\epsilon}_r = 7.12 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n + 0.27 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n$

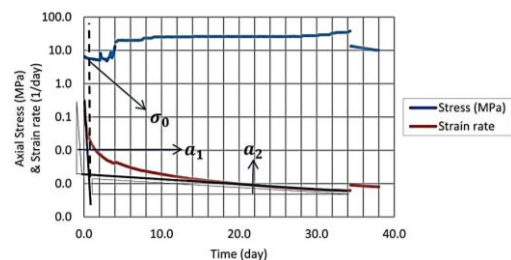
### ۶. نتیجه گیری

از آنجاکه تغییر شکل خزشی سولفات‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته و از طرفی دیگر گسترش آن‌ها در مناطق نفت‌خیز کشورمان حائز اهمیت زیادی است این مطالعه می‌تواند از مباحث شاخصی باشد که به این مقوله پرداخته است. علاوه بر آن افق دید و امکان مقایسه اولیه بین رفتار تغییر شکل خزشی این دو نوع سنگ در بررسی حاضر فراهم شده است.

و پایدار می‌رسد. با رسم خطوط مماسی بر منحنی نرخ تغییر شکل مطابق شکل ۱۴ می‌توان تنش تحولی را تعیین نموده و در رابطه خزش توانی به کار گرفت. در نمودارهای شکل ۱۰ الی شکل ۱۳، بخش میانی منحنی‌ها از خزش یکنواخت تبعیت می‌نمایند. لذا معادلات نمایی و توانی بر بخش خزش ثابت نمونه‌ها برازش یافته و ضرایب همبستگی آن‌ها تعیین گردید. روابط برازش یافته نمایی و توانی برای نمونه‌های G1, G2, An1 و An2 به همراه ضرایب رگرسیون مربوطه در جدول ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۳- منحنی مراحل مختلف تغییر شکل و تفکیک آن‌ها در آزمایش خزش برای نمونه An2.



شکل ۱۴- تعیین تنش تحولی ( $\sigma_0$ ) و ضرایب یا مقادیر شبیه a1 و a2 در نمودار تنش- نرخ تغییر شکل (نمونه G1).

به دلیل وجود گسستگی در داده‌ها، روابط نمایی و توانی در مورد تعیین نرخ تغییر شکل رخ داده در سنگ برای کل آزمایش، حرف چندان برای گفتن ندارند. در مورد خود تغییر شکل نیز وضعیت به همین منوال است و گسستگی که در هنگام باربرداری خزشی در منحنی تغییر شکل و نرخ تغییر شکل در داده‌ها به وجود می‌آید با روابط آماری معمولی همچون روابط نمایی و توانی، قابل برازش نیست، اما در برآورد و تخمین نرخ تغییر شکل در محدوده خزش یکنواخت برازش‌ها می‌توانند قابل قبول باشند.

برای تخمین کل رفتار خزشی و منحنی خزش بهتر آن است که از روش‌های قدرتمندتری همچون روش‌های هوشمند

رفتار خزشی انیدریت اثر مؤثری ندارد. یکی دیگر از تفاوت‌های بارز در رفتار خزشی ژئوپس و انیدریت، مقادیر تغییرشکل آغازین خیلی کمتر در انیدریت نسبت به ژئوپس است. این امر نشان می‌دهد شکل‌پذیری ژئوپس بیشتر از انیدریت می‌باشد. بر اساس مطالعات مشابه قبلی، انیدریت در بارگذاری کم‌سرعت و استاندارد ۱ نیوتن بر دقیقه سطح شکست برشی مورب نشان می‌دهد و در بارگذاری‌های سریع‌تر از این نرخ، دچار سطح شکست کششی عمودی می‌شود. در پژوهش حاضر نیز با وجود نرخ بارگذاری کم، به دلیل حضور دما، سطح شکست کششی عمودی و نامنظم نشان داده است.

## ۷. تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند از نظرات اصلاحی داوران محترم مجله که موجب ارتقا و بهبود کیفی مقاله شدند تشکر و سپاس‌گزاری نمایند.

## ۸. مراجع

- [1] Weijermars, R., Jackson, M.P.A. & Dooley, T.P., 2013. Quantifying drag on wellbore casings in moving salt sheets, *Geophys. J. Int.*, 198(2): 965-977.
- [2] Taheri, S.R., Pak, A., Shad, S., Mehrgini, B., Razifar, M., 2020. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *Int J of Mining Sci and Technol*, 30: 357-365.
- [3] Mohammadi, S., Sedaghatzadeh, M., Pourafshary, P., 2020. Solid-geo-mechanical investigation of the effect of salt creep on casing stability using finite element method: a case study. *SN Applied Sciences*. 2, 1268. Doi: 10.1007/s42452-020-3083-7.
- [4] Zoback, M., 2008. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge Univ Press.
- [5] Marinos, P., Hoek, E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 60, 85-92.
- [6] CGS (Canadian Geotechnical Society), 1985. *Canadian Foundation Engineering Manual*. Part 2, second ed. Vancouver, British Columbia, Canada.
- [7] ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R, Hudson JA (eds) *Suggested methods prepared by the commission on*

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ژئوپس و انیدریت در بارگذاری فشاری و گسیختگی، خواص اتساعی مشابهی دارند که مکانیک شکست آن دو را به هم شبیه‌تر می‌سازد. همچنین در آزمایش خزش، دما اثر مهمی در تنش گسیختگی خزشی در مرحله خزش شتابدار برای نمونه‌های ژئوپس دارد. در آزمایش خزش در دمای آزمایشگاه، نمونه‌های ژئوپس در مقاومتی بالاتر از مقاومت نهایی خود گسیخته می‌شوند اما در صورت اعمال دما وضعیت برعکس است و ژئوپس در ۱۵ مگاپاسکال معادل با ۷۵٪ به مقدار ۵۵ درصد مقاومت نهایی خود دچار گسیختگی خزشی می‌شود. به عبارت دیگر افزایش دما سبب کاهش مقاومت درازمدت ژئوپس می‌شود. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل از دست رفتن آب از شبکه بلورین ژئوپس و افزایش انرژی فعال‌سازی واکنشی در سنگ باشد. انیدریت نیز در حضور دما در تنش‌های بالاتر از مقاومت نهایی خود گسیخته می‌شود که تحقیقات قبلی را مبنی بر اینکه دما سبب افزایش مقاومت انیدریت می‌شود تأیید می‌کند. همچنین برخلاف سنگ نمک که فقط در دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس از حضور دما متأثر می‌شود و تغییرشکل‌پذیری خزشی آن افزایش می‌یابد، در این تحقیق مشخص شد که تغییرشکل انیدریت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نیز از دمای محیط تأثیر می‌پذیرد. بررسی منحنی‌های تغییرشکل مغزه‌ها در مراحل اولیه آزمایش‌های خزش حاکی از آن است که انیدریت‌ها برخلاف ژئوپس‌ها رفتار رهایی تنش یا کرنش سخت شونده نشان نمی‌دهند. عدم بروز رفتار رهایی تنش در انیدریت‌ها به دلیل تراکم زیاد بافتی در آن‌ها می‌باشد که یکی از تفاوت‌های آن با ژئوپس در آزمایش خزش است. از آنجاکه لوله جدارهای موجود در افق‌های انیدریتی چاه‌های نفت سالم مانده و بدون مچالگی می‌باشند، همین مسأله، تغییرشکل خزشی کمتر آن در چاه‌های نفتی را تأیید و تصریح می‌نماید.

نتایج نشان داد که باربرداری و بارگذاری مجدد در آزمایش خزش بر روی ژئوپس، تنش گسیختگی نهایی آن را تا حد زیادی کاهش می‌دهد که با مقایسه نمودار تنش-واکنش دو نمونه  $G1$  و  $G2$  می‌توان به این امر پی برد. در مورد انیدریت نیز مشخص شد که اعمال دمای محیط پوش سنگ به مغزه تحت خزش، صرفاً منجر به انتقال فازهای شکننده انیدریت به مراحل و زمان‌های بالاتر دگرشکلی می‌شوند و در ماهیت و

- [18] Dehghan, A.N., Khodaei, M., 2021. The effect of rock salt creep behavior on wellbore instability in one of the southwest Iranian oil fields. *Arab Geosci*, 14, 2079.
- [19] ASTM D4543-08, 2008. Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [20] ASTM D7012-14, 2014. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [21] Hoxha, D., Homand, F., Auvray, C., 2006. Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions. *Engineering Geology*, 86: pp: 1-17.
- [22] Bartel, E. M., Neubauer, F., Heberer, B., Genser, J., 2014. A low-temperature ductile shear zone: The gypsum-dominated western extension of the brittle Fella-Sava Fault, Southern Alps. *J. of Structural Geology*, 69:18-31.
- [23] Griggs, D., 1939. Creep of Rocks. *The J of Geology*, 47(3): 225-251.
- [24] Craker, W.E., Schiller, K.K., 1962. Plastic deformation of gypsum. *Nature*, 193: 672-673.
- [25] Jeremic, M.L., 1994. *Rock Mechanics in Salt Mining*. CRC Press.
- [۲۶] وحدت، ر.، ۱۳۹۱. بررسی تغییرشکل پذیری مصالح ژئیس تحت شرایط مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه زنجان. ۹۳ ص.
- [27] Dudley, J.W., Brignoli, M., Crawford, B.R., Ewy, R.T., Love, D.K., McLennan, J.D., Ramos, G.G., Shafer, J.L., Sharf-Aldin, M.H., Siebrits, E., Boyer, J., Chertov, M.A., 2016. ISRM Suggested Method for Uniaxial-Strain Compressibility Testing for Reservoir Geomechanics. *Rock Mech Rock Eng*, 49:4153-4178.
- [28] Ghobadi, M.H., Mohamadian, M., Mohseni, H., Karami, R., 2013. Effects of engineering geological properties of Gachsaran Formation gypsum on karst development (Khuzestan, Ramhormoz). *Journal of Iranian association of Engineering Geology*. Vol. 6(3-4):1-16. (in farsi).
- [29] Caselle, C., Bonetto, S., Colombero, C., Comina, C., 2019. Mechanical properties of microcrystalline testing methods, international society for rock mechanics, compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- [8] Bell, F.G., 1981. "Geotechnical properties of some evaporitic rocks", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, pp 137-144.
- [9] Hangx, S., Spiers, C., Peach, C., 2009. The mechanical behavior of anhydrite and the effect of Co2 injection. *Energy Procedia*, 1: 3485-3492.
- [10] Karacan, E., Yilmaz, I., 2000. "Geotechnical evaluation of Miocene gypsum from Sivas (Turkey)", *Geotechnical and Geological Engineering*, 18: 79-90.
- [11] Hashemi, M., Saki, A., Nikudel, M.R., 2020. Effects of chemical composition on the solubility and geomechanical characteristics of gypsum rocks from Gachsaran Formation, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Doi: 10.1007/s10064-020-01794-y.
- [12] Pourmorad, S., Jokar, A., Jahan, S., 2021. Determination of key beds from the cap rocks of oil reservoirs using a novel method, Case study: The Gachsaran Formation, Southwest Iran. *Lithology and Mineral Resources*, 56: 559-578.
- [13] Alizadeh, B., Maroufi, K., Fajrak, M., 2018. Oil-oil correlation, geochemical characteristics, and origin of hydrocarbons from Mansourabad oilfield, SW Iran. *J of African Earth Sciences*. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.06.008.
- [14] Mehrgini, B., Memarian, H., Dusseault, M., Ghavidel, A., Heydarizadeh, M., 2016. Geomechanical characteristics of common reservoir caprock in Iran (Gachsaran Formation), experimental and statistical analysis. *J of Nat Gas Sci and Eng*, 34: 898-907.
- [15] Ghavidel, N.A., Nezam, A., Heydarizadeh, M., Moosavi, M., Memarian, H., 2014. Identification of rheological behavior of salt rock at elevated temperature, Case study: Gachsaran evaporative formation, Iran. *ISRM Regional Symposium – EUROCK*, Vigo, Spain.
- [۱۶] مهرگینی، ب.، ۱۳۹۵. بررسی رفتار پوش‌سنگ مخزن آسماری در اثر فشار افزایشی ناشی از تزریق گاز به منظور افزایش بهره‌برداری. رساله دکتری. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ۱۹۵ ص.
- [17] Ghodusi, F., Jalalifar, H., Jafari, S., 2019. Analysis of the casing collapse in terms of geomechanical parameters and solid mechanics. *J of Chemical and Petrol Eng*, 53(2): 211-225.

- [41] Singh, A.K., Balasingh, C., Mao, H.K., Hemley, R.J., Shu, J., 1998. Analysis of lattice strains measured under nonhydrostatic pressure. *J Appl Phys*, 83:7567–7575.
- [42] Jones, D.R.H., Ashby, M.F., 2019. *Engineering Materials: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Fifth Ed., Elsevier. 564 p.
- [43] May, D.L., Gordon, A.P., Segletes, D.S., 2013. The application of the Norton-Bailey law for creep prediction through power law regression. *Proceedings of ASME Turbo Exposition 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*, San Antonio, Texas, USA.
- [44] Zulauf, J., Zulauf, G., 2004. Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain. *J of Structural Geology*, 26: 725–737.
- [45] Ghanadian, M., Faghih, A., Abdollahie Fard, I., Kusky, T., Maleki, M., 2017. On the role of incompetent strata in the structural evolution of the Zagros Fold-Thrust Belt, Dezful Embayment, Iran. *Marine and Petroleum Geology* 81: 320-333.
- [۴۶] زمانی، ن.، فاتحی مرجی، م.، سلطانیان، ح.، عبدالهی پور، ا.، ۱۳۹۸. آنالیز برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی مدل برگر و شبیه‌سازی آزمایش خزش تک‌محوره سنگ نمک میدان نفتی کوپال با استفاده از FLAC3D. سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران.
- [۴۷] کریمی، م.ر.، ۱۳۸۵. بررسی علل مچالگی لوله‌های جداری میدان نفتی مارون. بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۴۸] هاشمی، ص.، سلیمانی، ب.، ناصری کریموند، ف.، ۱۳۹۴. بررسی دلایل مچالگی لوله‌های جداری و تغییرات فشار سازندی زون ۴ بخش ۷ سازند گچساران در میدان نفتی مارون. نشریه پژوهش نفت، جلد ۲۵، شماره ۲-۸۵.
- [۴۹] قبادی، م.ح.، احمدزاده، ج.، طالب بیدختی، ع.، ۱۳۹۳. بررسی رفتار خزشی درازمدت انیدریت سازند گچساران در مقیاس آزمایشگاهی. سی و سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [50] Bérest, P., Karimi-Jafari, M., and Brouard, B., 2005. Transient Creep in Salt Caverns, In *Proceedings of 2005 ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and Materials*, Louisiana, USA.
- branching selenite gypsum samples and influence of constituting factors. *J of Rock Mech and Geotech Eng* 11: 228-241
- [30] ASTM D-4406, 1996. Test Method for Creep of Cylindrical Rock Core Specimen in Triaxial Compression. ASTM International, USA.
- [31] Aydan, Ö., Ito, T., Özbay, U., Kwasniewski, M., Shariar, K., Okuno, T., Özgenog'lu, A., Malan, D.F., Okada, T., 2014. ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock. *Rock Mech Rock Eng*. 47: 275–290.
- [۳۲] زینلزاده، ا.، ۱۳۸۷. مدل‌سازی حرارتی مقطع عرضی تاق‌دیس گچساران. *مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز*. جلد ۱۹ (ب): ص ۴۶-۵۹.
- [۳۳] گرجیان، م.، موسوی، م.، معاریان، ح.، میرمحمدلو، ع.، ۱۳۸۹. تأثیر دما بر خصوصیات ژئومکانیکی انیدریت‌های سازند تبخیری گچساران. چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. شهریورماه سال ۱۳۸۹، دانشگاه ارومیه.
- [۳۴] موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا.، امیری بختیار، ح.، باوی عویدی، ع.، ۱۳۸۸. تاریخچه رسوب‌گذاری سازند گچساران (پوش‌سنگ مخزن آسماری) در میدان نفتی آب تیمور. پژوهش نفت، سال ۱۹، جلد ۶۰: ص ۳۰-۴۳.
- [35] Jaeger, J. L., Cook, N.G.W., Zimmernan, R.W., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*. Blackwell Publishing, Fourth Edition.
- [36] Liang, W., Yang, X., 2012. Experimental study of mechanical properties of gypsum soaked in brine. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53: 142-150.
- [37] Medvedev G.A., Caruthers J.M., 2015. Stochastic Model Prediction of Nonlinear Creep in Glassy Polymers, *Polymer*, doi: 10.1016/j.polymer.
- [38] Cristescu, N.D., Hunsche, U., 1998. Time effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons.
- [39] Altenbach, H., Gorash, Y., Naumenko, K., 2008. Steady-state creep of a pressurized thick cylinder in both the linear and the power law ranges. *Acta Mechanica*, 195: 263–274.
- [40] Aydan, O., Akagi, T., Kawamoto, T., 1996. The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan. *J Rock Mech Rock Eng*, 29(3):125–143.



[51] Hunsche, U., Hampel, A., 1999. Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, 52: 271–291.

[52] Tang, L., Zhao, Y., Liao, J., Liu, Q., 2020. Creep Experimental Study of Rocks Containing Weak Interlayer Under Multilevel Loading and Unloading Cycles. *Frontiers in Earth Science*, 8: 1-14.

[53] Hosseini, S.M.A., Sereshki, F., Shariati, M., Jalali, S.M.E., Crotagino, F., 2012. Development of a new creep testing equipment to obtain long-term deformation parameters of salt. *J of Mining & Environment*, 3(1): 27-32.