

## Deformation behaviour Investigation of gypsum materials with variation moisture and stress

Alireza Moazzami<sup>1\*</sup>, Reza Vahdat<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Master of Civil Engineering, Department of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

### ABSTRACT

Due to the complex behavior of materials containing gypsum, loading of structures containing these materials such as dams and bridges, etc. is very important. Therefore, it is important to pay attention to the deformability of these materials under different environmental conditions such as humidity and stress. The present study has investigated the effect of moisture and stress changes on the samples extracted from the Marash Dam site located in Mahneshan city of Zanjan province. For axial loading, a device similar to uniaxial device was designed and built and 9 samples were exposed to different loads in three modes of humidity percentage of 30, 50 and 80%. Loads were applied at different time intervals and sometimes up to 45 days for creep testing. The results showed that with increasing stress, the amount of creep strain increases and with the stresses approaching the uniaxial strength of the sample, the values of creep strain increase so that with increasing stress from 1.3 to 3.5 MPa, the values of creep strains sometimes increases up to 2.5 times. According to the results, most creep strains occur in the early days. Also, with increasing humidity, the strain of the sample increases and the behavior of the sample changes so that in low humidity the strain is elastic and reversible and in higher humidity the strain is plastic. Increasing the relative humidity increases the deformation of these materials so that as they approach the saturation state, the sample showed a very large volume change. The results also showed that when the sample is placed in water for a longer period of time, water easily penetrates into the microcracks and joints of the sample and reduces the integrity of the sample and its loosening.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 13 December 2021

**Revise Date:** 14 March 2022

**Accept Date:** 19 April 2022

### Keywords:

Gypsum materials

Deformation

Stress

elastic and plastic strain

joints and cracks

creep

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.318658.2663>

\*Corresponding author: Alireza Moazzami

Email address: moazzami@znu.ac.ir

## بررسی رفتار تغییر شکل پذیری مصالح ژئوپسی با تغییرات رطوبت و تنش

علیرضا معظمی<sup>۱\*</sup>، رضا وحدت<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- کارشناسی ارشد عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

### چکیده

با توجه به رفتار پیچیده مصالح حاوی ژئوپس، بارگذاری ساختگاههای حاوی این مصالح مانند سدها و پل ها و ... دارای اهمیت زیادی می باشد. لذا توجه به تغییر شکل پذیری این مصالح تحت شرایط محیطی مختلف مانند رطوبت و تنش مهم است. تحقیق حاضر اثر تغییرات رطوبت و تنش بر روی نمونه های استخراج شده از ساختگاه سد مراش واقع در شهرستان ماهنشان از توابع استان زنجان مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بارگذاری محوری یک دستگاه مشابه دستگاه تک محوری طراحی و ساخته شد و ۹ نمونه در معرض بارگذاری های مختلف در سه حالت درصد رطوبت ۳۰، ۵۰ و ۸۰ درصد قرار گرفتند. بارگذاری ها در بازه های زمانی مختلف و بعضا تا بیش از ۴۵ روز برای انجام آزمایش خزش لحاظ شدند. نتایج نشان داد با افزایش تنش، میزان کرنش خزشی افزایش می یابد و با نزدیک شدن تنش ها به مقاومت تک محوری نمونه، مقادیر کرنش خزشی افزایش پیدا می کند بطوریکه با افزایش تنش از ۱/۳ به ۳/۵ مگاپاسکال، مقادیر کرنش های خزشی گاهی تا ۲/۵ برابر افزایش می یابد. بر اساس نتایج بدست آمده بیشتر کرنش های خزشی در روزهای اولیه اتفاق می افتد. همچنین با افزایش رطوبت، کرنش های نمونه افزایش یافته و رفتار نمونه تغییر می یابد بطوریکه در رطوبت های پایین کرنش ها از نوع الاستیک و برگشت پذیر بوده و در رطوبت های بالاتر کرنش ها از نوع پلاستیک می باشند. افزایش رطوبت نسبی باعث افزایش تغییر شکل این مصالح می شود به طوری که با نزدیک شدن به حالت اشباع، نمونه تغییر حجم بسیار زیادی را نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند وقتی که نمونه در مدت زمان بیشتری در آب قرار می گیرد، آب به راحتی در ریزترک ها و درزه های نمونه نفوذ کرده و باعث کاهش یکپارچگی نمونه و سست شدن آن می شود.

کلمات کلیدی: مصالح ژئوپس، تغییر شکل، تنش، کرنش الاستیک و پلاستیک، درزه و ترک، خزش.

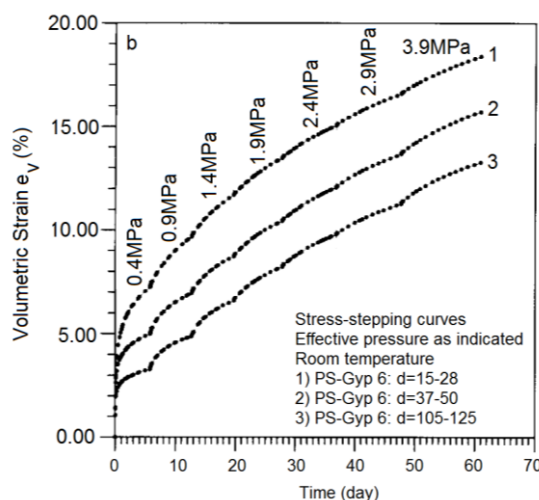
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.318658.2663	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2022.318658.2663	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۱۲/۲۳	۱۴۰۰/۰۹/۲۲
علیرضا معظمی moazzami@znu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

یکی از مسائلی که همواره در سازه‌ها مشکل آفرین بوده، نشست آنها می‌باشد. این مسئله مهندسان را با چالش‌های زیادی مواجه کرده است. یکی از مهمترین عواملی که باعث نشست می‌شود، تغییر شکل بستر سازه و مصالحی است که سازه بر روی آن احداث گردیده است. این مسئله در سازه‌های بزرگ نظیر سد‌ها بیشتر مورد توجه می‌باشد زیرا که این تغییر شکل‌ها باعث نشست‌هایی شده که گاهی ممکن است خسارات جبران ناپذیری به همراه داشته باشد، در برخی مواقع شرایطی پیش می‌آید که به ناچار ساختگاه سد بر روی لایه‌های زبیدی و انیدریتی قرار می‌گیرد، تغییر شکل زیاد این نوع سنگ‌ها ممکن است سبب توسعه ترک‌ها و شکاف‌ها، افزایش نفوذ پذیری، تخریب پرده تزریق و بروز مشکلاتی در زمینه پایداری سدها بشود. ازین رو نیاز است که تغییر شکل آنها مورد بررسی دقیق قرار گیرد. سنگ‌های ژئوپس و انیدریت، دارای ساختمان‌ها و بافت‌های مشخصی هستند و به جانشینی، تبلور مجدد و انحلال حساس‌اند. شواهد زمین‌شناسی و رویدادهای عصر حاضر نشان می‌دهد که هم ژئوپس و هم انیدریت ممکن است در سطح زمین، در زیر آب (در آب‌های کم عمق و عمیق) و در خشکی (در سبخ‌های ساحلی و خشکی) رسوب کنند. با این وجود، در هنگام دفن تا اعماق بیش از چند صد متر، تمام سولفات کلسیم موجود به صورت انیدریت است و معمولاً در هنگام بالا آمدن انیدریت به ژئوپس تبدیل می‌شود (ژئوپس ثانویه). بیشتر مطالعات ژئوپس-انیدریت نشان داده‌است که فاز پایداری به وسیله اکتیویته آب (در ارتباط با درجه شوری است) و درجه حرارت تعیین می‌گردد [۱]. در ادامه تحقیقات صورت گرفته بر روی پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل پذیری سنگ‌های ژئوپس ارائه شده است.

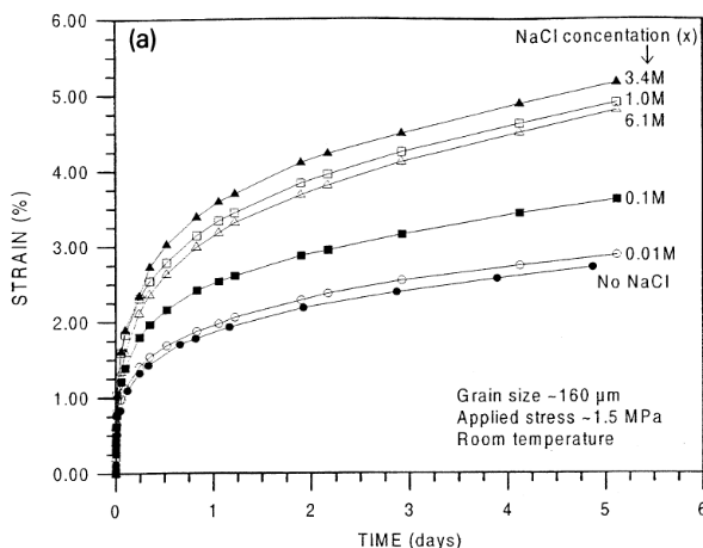
## ۲- سوابق مطالعاتی

در سال ۱۹۸۱ خواص ژئوتکنیکی چند نوع سنگ تبخیری از جمله ژئوپس و انیدریت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که همه این سنگ‌ها از تخلخل بسیار کمی برخوردارند و معمولاً قبل از شکستن تحت بار محوری تغییر شکل پلاستیک بسیاری را از خود نشان می‌دهند و خزش ژئوپس قبل از خرابی بیشتر از انیدریت می‌باشد [۲]. در سال ۱۹۹۵ خزش مصالح ژئوپس در شرایط بار گذاری هیدرواستاتیکی بررسی شد و مطالعات نشان داد که نرخ خزش و تراکم به اندازه دانه‌ها و تنش موثر وابسته است همچنین ریزساختار نمونه‌های آزمایش شده با رطوبت نشان داد که تراکم در اثر فرآیند انحلال با تماس‌های دانه و بارش بر روی دیواره‌های منافذ رخ داده است. با توجه به وجود لایه‌های مختلف ژئوپس در طبیعت، برخی از محققین با تهیه نمونه‌های دست خورده نسبت به تهیه نمونه‌های ژئوپسی با دانه بندی مختلف نموده‌اند. میر و اسپایر در سال ۱۹۹۵ مطالعاتی را بر روی رفتار خزشی ژئوپس با دانه بندی‌های مختلف انجام دادند که نتایج نشان داد که کاهش اندازه دانه‌ها باعث افزایش مقدار خزش می‌شود [۳]. نتایج حاصل از این آزمایشات در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان برای اندازه دانه‌های مختلف [۳]

بعد از آن در سال ۱۹۹۹ تأثیرات شوری آب حفره ای بر روی رفتار اینگونه مصالح بررسی شد و نتایج نشان داد رفتار خزشی آن ها نیز به شوری آب بستگی دارد و با افزایش شوری تغییر شکل پذیری این مصالح افزایش می یابد و در برخی موارد تا ۵۰ برابر خزش مصالح ژئوسی بیشتر از حالت بدون حضور نمک می باشد [۴]. در شکل ۲ این تغییرات نشان داده شده است.



شکل ۲. تغییرات کرنش بر حسب زمان برای دانه های  $160 \mu\text{m}$  در شوری های مختلف [۴]

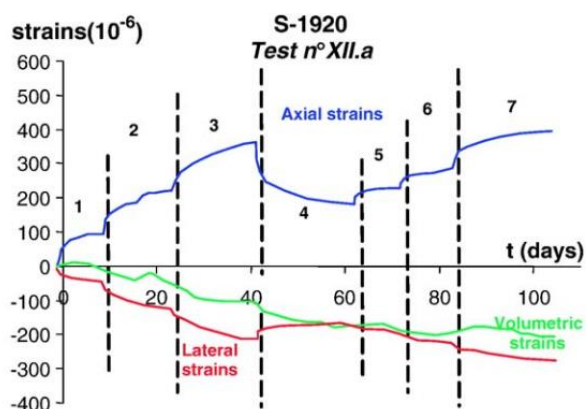
بر اساس آزمایشاتی که در سال ۲۰۰۰ بر روی سنگ ژئوس گرفته شده از ناحیه سیواس ترکیه<sup>۱</sup> انجام شده است، سنگ ژئوس را از نوع سنگ های تقریباً تغییر شکل پذیر دسته بندی کردند و با ماندن ژئوس درون آب مقاومت کششی و فشاری آن کاهش می یابد. وقتی نمونه ها به مدت ۲۰ روز در آب نگهداری شدند، مقاومت ژئوس تقریباً ۵۵٪ کاهش یافت. اکثر نمونه ها تغییر شکل پلاستیک - الاستیک - پلاستیک را نشان می دهند [۵].

در سال ۲۰۰۱ خزش مصالح کریستالی هم از نظر آزمایشگاهی و هم از نظر مکانیزم موجود مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعات نشان داد که دما نیز می تواند تأثیرات بسیار زیادی بر خزش این مصالح داشته باشد. برای برخی مصالح کریستالی یک معیار سخت شونده و برای برخی دیگر یک معیار نرم شونده معرفی کردند [۶].

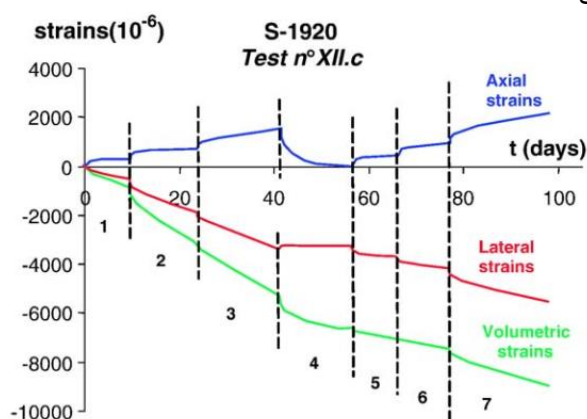
در سال ۲۰۰۴ پدیده پیر شدگی<sup>۲</sup> ژئوس در معادن زیر زمینی مورد مطالعه قرار گرفت و پارامترهایی از قبیل مقاومت تک محوری، مقاومت برشی و نفوذ پذیری بررسی شد. این مطالعات نشان داد که یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار در طول زمان بر این مصالح، انحلال است. این پدیده باعث افزایش تخلخل و گسترش ترک ها می شود. همچنین تغییر شکل دانه های ژئوس در تنش های بالا و دمای زیاد بررسی شد، مشاهدات نشان داد که تغییر شکل ها معمولاً بصورت یکنواخت بودند و قبل از شکسته شدن تغییر شکل نمونه بسیار زیاد می شد. در سال ۲۰۰۶ رفتار کوتاه مدت و بلند مدت سنگ ژئوس طبیعی و مکانیزم تغییر شکل آن بررسی شد و نتایج بدست آمده حاکی از این بود که در رفتار کوتاه مدت، رطوبت کمتر از ۳۰٪ تأثیر خاصی ندارد. در این تحقیقات مکانیزم تغییر شکل این سنگ نیز مورد بررسی قرار گرفت [۷]، [۸] و [۹]. در شکل ۳ این تغییرات نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Sivas, Turkey

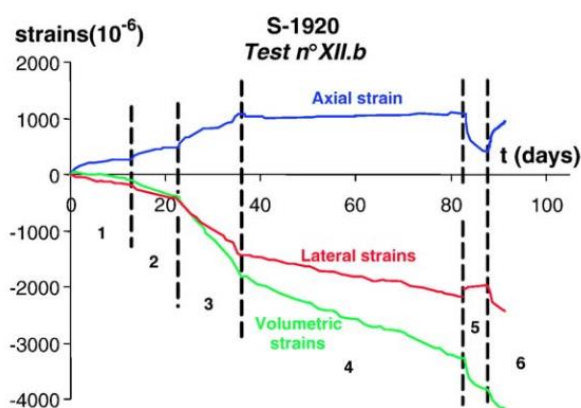
<sup>2</sup> aging



(۱) رطوبت نسبی ۷۵٪



(۳) رطوبت نسبی ۹۵٪



(۲) رطوبت نسبی ۹۰٪

شکل ۳. تغییرات کرنش بر حسب زمان برای بار گذاری گام به گام [۹]

همانطور که نمودارهای فوق نشان می دهد، تغییر شکل های پلاستیک بسیار زیاد بوده و می توان اظهار داشت که رطوبت نسبی در این تغییر شکل ها تاثیر بسیار زیادی دارد [۹].

در سال ۲۰۰۸ رابطه بین مقاومت تک محوری این مصالح با مدول یانگ بررسی شد. مشاهدات نشان داد، با توجه به اینکه شرایط آزمایش یکسان بود، انحراف قابل توجهی بین نتایج حاصله از مصالح مناطق متفاوت وجود دارد. با این حال در حالت کلی یک رابطه خطی بین نسبت پواسون و تنش و همچنین مدول یانگ و تنش وجود دارد. در سال ۲۰۰۹ نیز رفتار خزشی سنگ کالسیت در حضور نمک و گاز CO<sub>2</sub> بررسی شد و نتایج نشان داد که با زیاد شدن شوری در حضور دی اکسید کربن، نرخ خزش بسیار بالا رفته و گاهی تا ۱۰ برابر افزایش می یابد. در سال ۲۰۱۲ خصوصیات خصوصیات مکانیکی ژئوپس مانده در آب شور مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایشات نشان داد که وجود شوری در دمای مناسب باعث ضعیف شدن سنگ ژئوپس و افزایش تغییر شکل پذیری آن و در نهایت باعث کاهش مقاومت آن می شود [۱۰]، [۱۱] و [۱۲].

پاچون و همکاران در سال ۲۰۱۴ آزمایشات مکانیکی خزش خمشی ژئوپس مرطوب و اندازه گیری میزان انحلال و ضریب انتشار را برای یافتن منشا این خزش انجام دادند. هر دو این آزمایشات در غیاب و حضور مواد افزودنی ضد خزش مختلف شناخته شده انجام شده است. نتایج نشان می دهد که سرعت خزش و انحلال به شدت با هم ارتباط دارند. مطابق تحقیق یو و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک محلول آبی می تواند سنگ ژئوپس را به طور قابل توجهی نرم کند [۱۳] و [۱۴].

در یک مطالعه توسط منگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، تکامل ریزساختی ژئوپس - نمک و مکانیسم های تضعیف آن در شرایط مختلف آب نمک (یا محیط های حرارتی-هیدرولوژیکی-شیمیایی همراه) بررسی شد و نتایج نشان داد که برای یک غلظت معین، تخلخل و ابعاد فراکتال نمونه ها به تدریج با افزایش دما افزایش می یابد. در تحقیق انجام شده توسط صادقی میرشهیدی و ویتون در سال ۲۰۱۹، مقاومت ژئوپس در شرایط اشباع دریافت شده با استفاده از آزمون مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی برزیل (BTS) و شاخص بار نقطه ای (PLI) بررسی گردید. با توجه به نتایج، همبستگی های جدیدی برای توصیف اثر اندازه نمونه بر روی هر دو حالت UCS و BTS در شرایط خشک و اشباع به دست آمد [۱۵] و [۱۶].

بر اساس تحقیقات بهنام طلب و همکاران در سال ۲۰۱۹، اثر دمای جریان آب (T)، عدد رینولدز (Re) و هد آب (H) بر میزان انحلال ژئوپس به طور تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درجه حرارت میزان انحلال ژئوپس به طور قابل توجهی افزایش می یابد. بر اساس تحقیقات کاسله و همکاران در سال ۲۰۲۰، ساختار کریستالی نمک با لایه های مولکول های آب به توسعه ساختارهای پلاستیکی در سنگ ژئوپس کمک می کند. بر اساس تحقیق عبدالرحمن و همکاران در سال ۲۰۲۱، هنگامی نمونه های سنگ ژئوپس در معرض رطوبت در محیط بسته قرار می گیرند وزن سنگ ها در دوره ۲۴ ساعت افزایش یافته و هیچ اثری از ژئوپس در محیط که ناشی از انحلال باشد دیده نشد [۱۷]، [۱۸] و [۱۹].

مطالعات رامون و همکاران در سال ۲۰۲۱، بر روی مقاومت و خزش نمونه های ژئوپسی نشان می دهد که رطوبت نسبی به شدت بر رفتار مکانیکی تاثیرگذار بوده و باعث افزایش میزان کرنش و کاهش حداکثر مقاومت سنگ های ژئوپسی می شود. مطابق مطالعات لیو و همکاران در سال ۲۰۲۱، مقاومت نهایی ژئوپس با افزایش فشار محصور کننده و کاهش دما افزایش می یابد، همچنین نفوذپذیری با افزایش دما در مرحله تراکم و تغییر شکل الاستیک خطی کاهش می یابد. مطالعات ژو و همکاران در سال ۲۰۲۱ نشان می دهد که رفتار آسیب خستگی سنگ ژئوپس به دلیل حالت خاص آسیب آن که شامل ریزساختارهای کریستالی است، به طور قابل توجهی با سایر انواع سنگ ها متفاوت است. همچنین مشخص شد که ویژگی های خستگی سنگ گچ، مانند عمر خستگی و تکامل تغییر شکل خستگی، به شرایط بارگذاری چرخه ای متعدد مانند سطح تنش، فرکانس چرخه ای و دامنه تنش حساس هستند [۲۰]، [۲۱] و [۲۲].

### ۳- روش تحقیق

به منظور کاهش هزینه ها و تسریع در انجام آزمایشات، یک دستگاه به ساده ترین شکل و بصورت یک اهرم مکانیکی با عملکردی شبیه به دستگاه تحکیم ساخته شد (شکل ۴). نمونه های تهیه شده به قطر ۵۵ mm و به ارتفاع ۱۱۰ mm بودند. نمونه ها از ساختگاه سد مراش در ۱۲۵ کیلومتری غرب شهر زنجان بدست آمده اند. نتایج آزمایشات XRD حاکی از آن است که عناصر تشکیل دهنده حاوی ۳۷ درصد انیدریت ۵۴ درصد ژئوپس و ۹ درصد ناخالصی های دیگر از جمله مارن و ... می باشد. بعد از تهیه نمونه ها از ساختگاه سد مراش، عملیات کپینگ نمونه ها انجام و ابتدا و انتهای نمونه ها صاف شد (شکل ۵).



شکل ۴. دستگاه اهرم مکانیکی طراحی شده برای آزمایش خزش



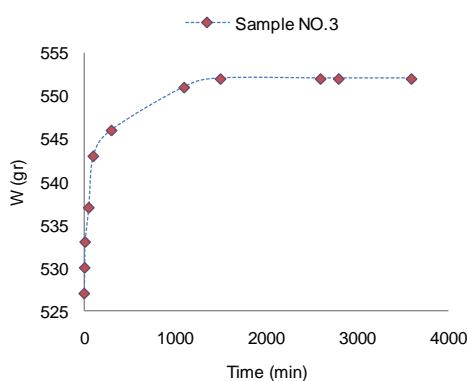
شکل ۵. عملیات کپینگ و آماده سازی نمونه ها

در مجموع ۱۳ نمونه برای آزمایش آماده سازی شدند که ۴ نمونه برای آزمایش جذب آب و تعیین درصد اشباع و مابقی نمونه ها (۹ نمونه) برای آزمایش خزش در نظر گرفته شدند. شرایط نمونه ها در آزمایش خزش بصورت جدول ۱ می باشد. آزمایش خزش در سه بارگذاری ۱/۳۳ و ۲/۱۸ و ۳/۴۹ مگاپاسکال بوسیله اعمال بارمحوری ثابت در مدت زمانهای مختلف ۳۵ الی ۴۵ روز انجام شده که در حین آزمایش که با رطوبت مشخص و معین انجام می شد (۳۰ و ۵۰ و ۸۰ درصد)، مقادیر کرنش محوری نمونه با استفاده از کرنش سنج ها قرائت و ثبت گردید.

جدول ۱. شرایط نمونه ها در آزمایش خزش

Sample NO.	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Stress (Mpa)	1.33	1.33	1.33	2.18	2.18	2.18	3.49	3.49	3.49
Percentage of humidity	30	50	80	30	50	80	30	50	80

قبل از انجام آزمایشات تک محوری و خزش، درصد رطوبت نمونه ها برای مقادیر مورد نظر تغییر داده می شد که در شکل ۶ تغییرات وزن نمونه ۳ با قرار گرفتن در آب ارائه شده است. در واقع این نمودار بیانگر تغییرات وزن نمونه نسبت به زمان با توجه به میزان جذب آب می باشد که پس از مدتی (۱۵۰۰ دقیقه) به اشباع رسیده و تغییرات وزن ثابت مانده است.



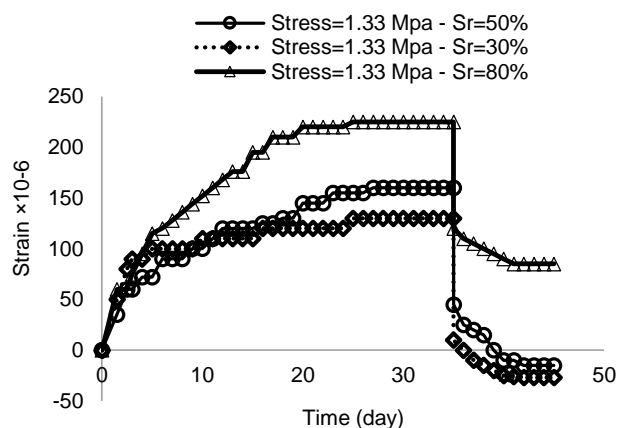
شکل ۶. تغییرات وزن نمونه شماره ۳ در داخل آب نسبت به زمان

برای رساندن نمونه ها با بارگذاری مورد نظر از بارگذاری تک محوری استفاده شد. با توجه به نتایج آزمایشات تک محوری، مقادیر تنش ماکزیمم و مدول الاستیسیته نمونه ها مطابق جدول شماره ۲ بدست آمد.

جدول ۲. مقادیر مدول الاستیسیته بدست آمده برای نمونه ها

Sample NO.	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Humidity	30%	50%	80%	30%	50%	80%	30%	50%	80%
Modulus of elasticity (Mpa)	324.7	305.5	274.9	463	469.5	437.6	656.9	607	450.79
Stress (Mpa)	1.33	1.33	1.33	2.18	2.18	2.18	3.49	3.49	3.49

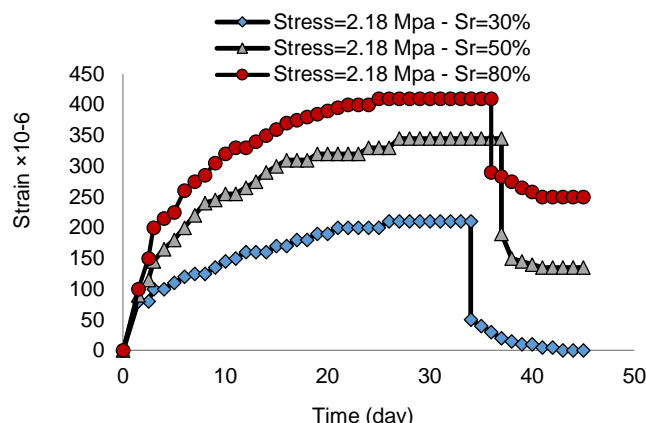
همانطوریکه شکل های ۷ الی ۹ نشان می دهند، افزایش تنش باعث افزایش خزش می شود و بیشترین مقادیر کرنش های خزشی در تنش های بالاتر، در روزهای اول آزمایش اتفاق افتاده است و همچنین با افزایش تنش زمان رسیدن به پایداری برای نمونه ها افزایش پیدا کرده است. در مرحله باربرداری نیز مشاهده می شود نمونه ها در یک زمان کوتاه کرنش های الاستیک را از خود نشان داده اند و به نظر می رسد با افزایش تنش، زمانی که لازم است تا نمونه ها کرنش برگشت پذیر را نشان دهند و به ثبات برسند کاهش پیدا می کند. بطور کلی می توان گفت که هرچه درصد رطوبت نمونه بالاتر رود، نمونه شکل پذیرتر می شود. این امر دلایل مختلفی می تواند داشته باشد از قبیل اینکه برای رسیدن به درصد اشباع بالاتر نمونه مدت زمان بیشتری در آب قرار می گیرد و میزان رطوبت نمونه افزایش پیدا می کند. یک نظریه این است که این موضوع باعث می شود که مقداری از انیدریت نمونه در مجاورت آب به ژئپس تبدیل شود که باعث شکل پذیرتر شدن نمونه شود. از طرفی وقتی که نمونه در مدت زمان بیشتری در آب قرار می گیرد، آب به راحتی در ریزترک ها و درزه های نمونه نفوذ کرده و باعث کاهش یکپارچگی نمونه و سست شدن آن می شود. یک فرآیند دیگر که ممکن است در این حالت تاثیرگذار باشد فرآیند انحلال است. زمانی که نمونه در مدت زمان بیشتری در آب قرار می گیرد مقدار ژئپس بیشتری انحلال یافته و به نوبه خود موجب سست تر شدن نمونه می شود. با توجه به شکل ۷، مقادیر کرنش با گذشت زمان برای تنش اعمالی ثابت ۱/۳۳ مگاپاسکال افزایش می یابد و پس از گذشت حدود ۲۵ روز کرنش ثابت مانده و در ۳۵ امین روز در مرحله باربرداری برگشت تغییرشکلها اتفاق افتاده و کرنش ها در یک بازه کوتاه الاستیک بوده و سپس ثابت می شوند. حداکثر میزان کرنش در بارگذاری ۱/۳۳ مگاپاسکال، برای رطوبت ۸۰ درصد بوده و معادل  $10^{-6} \times 225$  می باشد.



شکل ۷. نمودار کرنش خزشی در رطوبت مختلف تحت تنش 1.33 Mpa

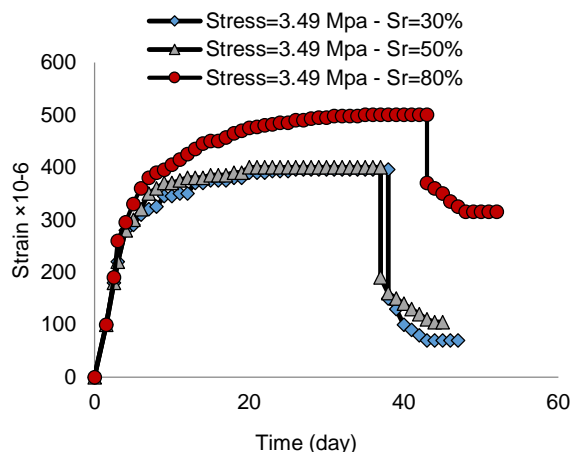
با توجه به شکل ۸، مقادیر کرنش با گذشت زمان برای تنش اعمالی ثابت ۲/۱۸ مگاپاسکال افزایش می یابد و پس از گذشت حدود ۲۵ روز کرنش ثابت مانده و در مرحله باربرداری برگشت تغییرشکلها اتفاق افتاده و کرنش ها در یک بازه کوتاه الاستیک بوده و سپس ثابت می شوند. حداکثر میزان کرنش در بارگذاری ۲/۱۸ مگاپاسکال، برای رطوبت ۸۰ درصد بوده و معادل  $10^{-6} \times 410$  می باشد که نسبت به حالت قبل (بارگذاری ۱/۳۳ مگاپاسکال) بیش از ۸۰ درصد افزایش یافته است.





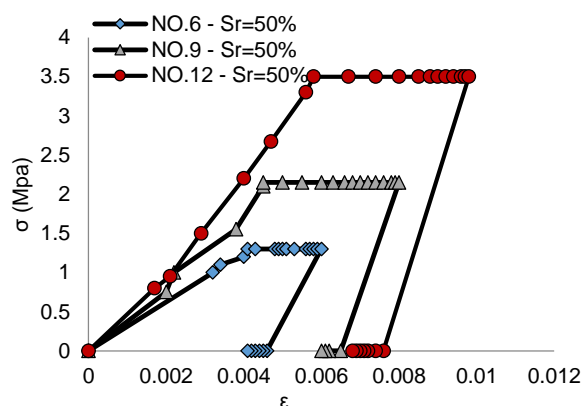
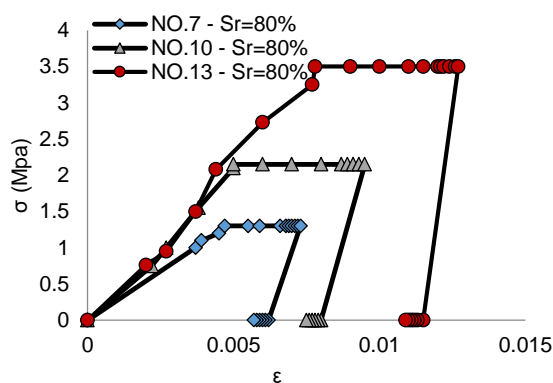
شکل ۸. نمودار کرنش خزشی در رطوبت مختلف تحت تنش 2.18 Mpa

با توجه به شکل ۹، مقادیر کرنش با گذشت زمان برای تنش اعمالی ثابت  $3/49$  مگاپاسکال افزایش می‌یابد و پس از گذشت حدود ۲۵ روز برای رطوبت ۸۰ درصد و حدود ۲۰ روز برای رطوبت‌های ۳۰ و ۵۰ درصد کرنش ثابت مانده و در مرحله باربرداری برگشت تغییرشکلها اتفاق افتاده و کرنش‌ها مشابه بارگذاری‌های قبلی در یک بازه کوتاه الاستیک بوده و سپس ثابت می‌شوند. حداکثر میزان کرنش در بارگذاری  $3/49$  مگاپاسکال، برای رطوبت ۸۰ درصد بوده و معادل  $500 \times 10^{-6}$  می‌باشد که نسبت به بارگذاری  $1/33$  مگاپاسکال در حدود ۱۲۰ درصد افزایش یافته است.



شکل ۹. نمودار کرنش خزشی در رطوبت مختلف تحت تنش 3.49 Mpa

در ادامه نیز تغییرات تنش - کرنش نمونه‌ها در رطوبت ۵۰ و ۸۰ درصد در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های نشان داده شده، برای یک رطوبت ۵۰ درصد مقادیر کرنش‌ها در همه نمونه‌ها نسبت به رطوبت ۸۰ درصد کمتر بوده و شیب نمودار تنش - کرنش یا همان مدول الاستیسیته در رطوبت ۵۰ درصد بیشتر از رطوبت ۸۰ درصد می‌باشد. بعبارتی نمونه‌های با رطوبت ۸۰ درصد انعطاف پذیرتر از نمونه‌های با رطوبت ۵۰ درصد می‌باشد و به همین علت تغییرشکل‌های پلاستیک در نمونه‌های با رطوبت ۸۰ درصد بیشتر از نمونه‌های با رطوبت ۵۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰. نمودار تنش - کرنش نمونه ها تا پس از مرحله باربرداری با رطوبت ۵۰٪ و ۸۰٪.

همچنین با توجه به شکل ۱۰، هرچه مقادیر تنش و رطوبت افزایش می یابد، از مقادیر کرنش های الاستیک کاسته شده و به کرنش های پلاستیک افزوده می شود به طوری که بیشترین کرنش پلاستیک مربوط به نمونه شماره ۱۳ با رطوبت ۸۰ درصد و تنش ۳/۴۹ مگاپاسکال می باشد. همچنین در رطوبت های پایین کرنش ها بصورت الاستیک و برگشت پذیر بوده اند. این موضوع نشان می دهد که مقادیر رطوبت پایین نقش زیادی در تغییر شکل ها نداشته و در رطوبت های بالاتر تغییر شکل ها بسیار مشهود است.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاکی از آن است که:

- ۱- با نزدیک شدن تنش ها به مقاومت تک محوری نمونه، مقادیر کرنش خزشی افزایش پیدا می کند بطوریکه با افزایش تنش از ۱/۳ به ۳/۵ مگاپاسکال، مقادیر کرنش های خزشی گاهی تا ۲/۵ برابر افزایش می یابد.
- ۲- بیشتر کرنش های خزشی در روزهای اولیه اتفاق می افتد که بر این اساس می توان مقادیر خزش در روزهای اول را معیاری برای خزش کلی سنگ های ژئوتکنیک در نظر گرفت.
- ۳- افزایش رطوبت باعث افزایش مقدار خزش و مقادیر کرنش پلاستیک می شود. در رطوبت های پایین کرنش ها تقریباً الاستیک بوده ولی با افزایش رطوبت کرنش ها وارد مرحله پلاستیک می شود.
- ۴- افزایش رطوبت نسبی باعث افزایش تغییر شکل این مصالح می شود به طوری که با نزدیک شدن به حالت اشباع، نمونه تغییر حجم بسیار زیادی را نشان داد. از آنجایی که ژئوتکنیک در آب انحلال پذیر نیز می باشد، افزایش رطوبت تاثیر واضحی بر روی تغییر شکل های پلاستیک این مصالح دارد.
- ۵- شیب نمودار تنش - کرنش یا همان مدول الاستیسیته در رطوبت ۵۰ درصد بیشتر از رطوبت ۸۰ درصد می باشد که این موضوع نشان می دهد نمونه های با رطوبت بیشتر دارای انعطاف پذیری بیشتری نسبت به نمونه های با رطوبت کمتر می باشد.

#### ۵- قدردانی

با تشکر از مدیران و کارکنان شرکت مشاور ارکان رهاب زنگان و آزمایشگاه تک آزما که در عملیات مغزه گیری و تهیه نمونه های لازم از سد مراش کمک های فراوانی کردند.

#### ۶- مراجع

- [1] Hardie, L. A. (1967), "The gypsum—anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure" *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 52(1-2), 171-200.
- [2] Bell, FG, (1981), "Geotechnical properties of some evaporitic rocks", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, pp 137-144
- [3] De Meer, S and Spiers, C.J. (1995), "Creep of wet gypsum aggregates under hydrostatic loading Conditions", *Tectonophysics*, 245, pp 141-173
- [4] De Meer, S and Spiers, CJ, (1999), "Influence of pore-fluid salinity on pressure solution creep in gypsum", *Tectonophysics*, 308, pp 311-330
- [5] Karacan, E and Yilmaz, I, (2000), "Geotechnical evaluation of Miocene gypsum from Sivas (Turkey)", *Geotechnical and Geological Engineering*, 18, pp 79-90
- [6] Blum, W. (2001), "Creep of crystalline materials: experimental basis, mechanisms and models", *Material Science & Engineering*, 319, pp 8-15
- [7] Auvray, C and Homand, F, (2004), "The aging of gypsum in underground mines", *Engineering Geology*, 74, pp 183-196
- [8] Barberini, V and Burlini, L. (2005), "High-strain deformation tests on natural gypsum aggregates in torsion", *Geological Society, London, Special Publications*, 245, pp 277-290
- [9] Hoxha, D and Homand, F and Auvray, C. (2006), "Deformation of natural gypsum rock: Mechanisms and questions", *Engineering Geology*, 86, pp 1-17
- [10] Arslan, A.T and Koca, M.Y, (2008), "Correlation of Unconfined Compressive Strength with Young's Modulus and Poisson's Ratio in Gypsum from Sivas (Turkey)", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41, pp 941-950
- [11] Liteanu, E and Spiers, C., (2009), "Influence of pore fluid salt content on compaction creep of calcite aggregates in the presence of supercritical CO<sub>2</sub>", *Chemical Geology*, 265, pp 134-147
- [12] Liang, w, and Yang, X, (2012), "Experimental study of mechanical properties of gypsum soaked in brine", *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, pp142-150
- [13] Pachon-Rodriguez, E. A., Guillon, E., Houvenaghel, G., & Colombani, J. (2014). Wet creep of hardened hydraulic cements—Example of gypsum plaster and implication for hydrated Portland cement. *Cement and concrete research*, 63, 67-74.
- [14] Yu, W. D., Liang, W. G., Li, Y. R., & Yu, Y. M. (2016). The meso-mechanism study of gypsum rock weakening in brine solutions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 359-367.
- [15] Meng, T., Xiangxi, M., Donghua, Z., & Hu, Y. (2018). Using micro-computed tomography and scanning electron microscopy to assess the morphological evolution and fractal dimension of a salt-gypsum rock subjected to a coupled thermal-hydrological-chemical environment. *Marine and Petroleum Geology*, 98, 316-334.
- [16] Sadeghiamirshahidi, M., & Vitton, S. J. (2019). Mechanical properties of Michigan Basin's gypsum before and after saturation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 739-748.
- [17] Behnamtalab, E., Delbari, A., & Sarkardeh, H. (2019). Effect of water flow characteristics on gypsum dissolution. *The European Physical Journal Plus*, 134(12), 591.
- [18] Caselle, C., Bonetto, S. M. R., & Costanzo, D. (2020). Crack coalescence and strain accommodation in gypsum rock. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(52), 247-255.
- [19]. Hasan, F., & Ibrahim, A. (2021). The effect of saturation Methods on natural gypsum rocks. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 877, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- [20]. Ramon, A., Caselle, C., Bonetto, S. M. R., Costanzo, D., & Alonso, E. E. (2021). Effect of microstructure and relative humidity on strength and creep of gypsum. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(8), 4121-4145.
- [21]. Lyu, C., Liu, J., Wu, Z., Liu, H., Xiao, F., & Zeng, Y. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties, Permeability and Acoustic Emission Characteristics of Gypsum Rock Under THM Coupling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(11), 5761-5779.
- [22]. Zhu, Y., Huang, X., Liu, Y., Liu, Z., Lan, H., & Tian, W. (2021). Nonlinear Viscoelastoplastic Fatigue Model for Natural Gypsum Rock Subjected to Various Cyclic Loading Conditions. *International Journal of Geomechanics*, 21(5), 04021062.