

## Comparison of constant dissolution coefficient of gypsum and anhydrite materials in surface flows using the results of laboratory models

Jalal Bazargan<sup>1\*</sup>, Alireza Moazzami<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Zanjan University, Zanjan, Iran

2- PhD in Civil Engineering - Geotechnics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

*Dissolution of soluble minerals in the construction site of dams will lead to the development of cracks and increase the permeability of foundations and abutments, destruction of injection molding and problems in the stability of dams. Increasing the dissolution rate with the development of cracks and fissures leads to increasing the permeability of the foundation and then the currents passing through the joints will not be similar to groundwater flows and the flow behavior will be similar to surface currents. The passage of current through the surface of gypsum and anhydrite-containing materials, the mechanism of behavior of gypsum and anhydrite materials against surface currents have been investigated, and then, using the experiences gained from past research, finally relations to estimate the constant rate of dissolution  $K$  It has been extracted in these two materials. the highest correlation with flow and temperature flow is linear and time parameter is exponential. Also, the solubility coefficient of gypsum materials is higher than anhydrite in the presence of surface currents. For a constant temperature, the gypsum  $K$  coefficient is about 10,000 times that of anhydrite, and at a constant temperature,  $K$  for gypsum is equivalent to 1000 times that of anhydrite. In general, the effect of discharge on the dissolution of gypsum is greater than anhydrite.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 25 July 2020

**Revise Date:** 12 August 2020

**Accept Date:** 23 September 2020

### Keywords:

*Gypsum and anhydrite materials, soluble minerals, circulation test, rock permeability, joint stones, constant rate of dissolution*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.241145.2201>

\*Corresponding author: Jalal Bazargan

Email address: : [jbazargan@znu.ac.ir](mailto:jbazargan@znu.ac.ir)

## مقایسه ضریب ثابت انحلال مصالح ژئوپس و انیدریت در جریان های سطحی با استفاده از نتایج مدل های آزمایشگاهی

جلال بازرگان<sup>۱\*</sup>، علیرضا معظمی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دکتری عمران- ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

انحلال کانی های انحلال پذیر در ساختگاه سدهای ساخته شده سبب توسعه ی ترک ها و شکاف ها، افزایش نفوذپذیری پی و تکیه گاه ها، تخریب پرده ی تزریق و بروز مشکلاتی در زمینه ی پایداری سد خواهد شد. افزایش میزان انحلال با توسعه ترک ها و شکاف ها به افزایش نفوذپذیری پی سنگ منجر می شود و در ادامه جریان های عبوری از درزه ها مشابه جریان های زیرزمینی نبوده و رفتار جریان مشابه جریان های سطحی خواهد بود در این تحقیق با استفاده از آزمایش گردش آب با دبی و دماهای مختلف و با عبور دادن جریان از روی سطح مصالح حاوی ژئوپس و انیدریت، مکانیزم رفتار مصالح ژئوپس و انیدریت در برابر جریان های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه با استفاده از تجربیات بدست آمده از تحقیقات گذشتگان، در نهایت روابطی برای برآورد میزان ثابت سرعت انحلال  $K$  در این دو مصالح استخراج گردیده است. در رابطه  $K$  بیشترین همبستگی با دبی جریان و دما بصورت خطی و پارامتر زمان بصورت نمایی می باشد. همچنین ضریب انحلال پذیری مصالح ژئوپس در شرایط وقوع جریان های سطحی بیشتر از انیدریت می باشد. به ازای یک دمای ثابت، ضریب  $K$  ژئوپس در حدود ۱۰۰۰۰ برابر انیدریت و در دمای ثابت این ضریب برای ژئوپس معادل ۱۰۰۰ برابر انیدریت می باشد. بطور کلی تاثیرگذاری دبی بر روی انحلال ژئوپس بیشتر از انیدریت می باشد.

کلمات کلیدی: مصالح ژئوپس و انیدریت، کانی های انحلال پذیر، آزمایش گردش آب، نفوذپذیری سنگ، سنگ های درزه دار، ثابت سرعت انحلال.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.241145.2201	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.241145.2201	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۰۲	۱۳۹۹/۰۷/۰۲	۱۳۹۹/۰۵/۲۲	۱۳۹۹/۰۵/۰۴
جلال بازرگان jbazargan@znu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

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 سبخاهای ساحلی و خشکی) رسوب کنند. با این وجود، در هنگام دفن تا اعماق بیش از چند صد متر، تمام  $CaSO_4$  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].

مصالح انحلال‌پذیر در شکل‌های مختلفی ظاهر می‌شوند، بنابراین، مکانیزم‌های انحلال مختلفی بدلیل وجود تشکیلات سنگی حاوی مصالح حل‌شونده مختلف وجود دارد؛ (۱) انحلال تشکیلات سنگی حاوی مصالح انحلال‌پذیر ذره‌ای؛ (۲) انحلال از میان بدنه سنگ‌های درزه‌دار انحلال‌پذیر؛ (۳) انحلال سطح سنگ‌های حل‌شونده به وسیله رژیم جریان آشفته (به‌عنوان مثال بستر رودخانه‌ها)؛ (۴) انحلال بدنه انحلال‌پذیر سنگ‌ها بوسیله انتشار رژیم جریان آرام در سطح تماس با لایه‌های خاک [۲]. در اثر انحلال و تشکیل فروچاله‌ها، سدهای متعددی از جمله سد سان فرانسیسکو، سد لار، سد آوالون و بسیاری سدهای دیگر دچار مشکلات فراوان و بعضاً موجب شکست سد شده است. بر اساس مکانیزم‌های بیان شده توسط فرید و حبیب آگهی که رژیم آشفته جریان منجر به انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر می‌شود، می‌توان دریافت که جریان عبوری سطحی از مجاورت مصالح انحلال‌پذیر می‌تواند آسیب‌های بیشتری در اثر انحلال به سازه‌های در معرض آب وارد کند [۲]. لذا در این تحقیق اثر جریان‌های سطحی بر روی مکانیسم انحلال و ضریب ثابت سرعت انحلال  $K$  مصالح ژئوپس و انیدریت مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه‌ای بین رفتار این دو کانی انجام شده است.

## ۲- سوابق مطالعاتی

یکی از اولین تحقیقات روی انحلال در سال ۱۹۰۴ انجام گرفته است. در این تحقیقات وضعیت انحلال مصالح حل‌شونده در پی سدها و در نتیجه انحلال این کانی‌ها در آب جریان یافته از پی سدها مورد بررسی قرار گرفته است [۲]، [۳]، [۴]. از جمله اولین کسانی که در مورد انحلال‌پذیری سنگ مطالعات نسبتاً جامعی را آغاز کردند، کالکانو و الزورا بودند که در سال ۱۹۶۷ پدیده انحلال‌پذیری سنگ‌های سولفات (ژئوپس و انیدریت) را بررسی و از دیدگاه مهندسی مورد بحث قرار دادند [۵]. پژوهشگران یاد شده سپس چگونگی تراوش آب را در محل تماس سولفات کلسیم با سایر مواد و نحوه ایجاد و گسترش پدیده‌های حاصل از انحلال را مطالعه نمودند [۳]. لیو و نانکولاس در سال ۱۹۷۱ انحلال کریستال‌های ریز ژئوپس را تابعی خطی از غلظت عادی (C) و غلظت اشباع (Cs) محلول حاوی ژئوپس دانستند و این پدیده را به صورت رابطه ۱ بیان کردند [۳].

$$\frac{dM}{dt} \propto (C_s - C) \quad (1)$$

که در آن:

dM: تغییرات جرم یا وزن

dt: تغییرات زمان

C: غلظت اولیه یون کلسیم

Cs: غلظت یون کلسیم در حالت اشباع

فابوس و همکاران (۱۹۶۹) برای انحلال انیدریت رابطه ۲ را ارائه کردند:

$$\frac{dM}{dt} \propto (C_s - C)^2 \quad (2)$$

جیمز و لوپتون در سال ۱۹۷۸ بررسی جامعی تحت عنوان انحلال ژئوپس و انیدریت در پی سازه‌های هیدرولیکی ارائه کردند که ضمن جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده قبلی، براساس روش‌های تئوری و تجربی برای محاسبه انحلال‌پذیری ژئوپس و انیدریت به ترتیب روابط ۳ و ۴ را ارائه کردند [۳].

$$\frac{dM}{dt} = KA(C_s - C) \quad (3)$$

$$\frac{dM}{dt} = KA(C_s - C)^2 \quad (4)$$

که در آن:

$$K: \text{ ثابت سرعت انحلال (برای گچ بر حسب } \frac{m}{s} \text{ و برای انیدریت بر حسب } \frac{m^4}{kg \cdot s} \text{ بیان می‌شود).}$$

A: سطح در معرض تماس با آب (متر مربع)

مقدار K به مساحت سطح جریان آب عبوری و سرعت جریان آب بستگی دارد، به طوری که با افزایش مساحت سطح جریان آب و سرعت جریان، مقدار K افزایش می‌یابد. بنابراین در ذرات ژئوپس نواری (با سطح تماس زیاد) و با سرعت جریان زیاد می‌توان انتظار داشت که مقدار ثابت سرعت انحلال افزایش یابد.

تراوش می‌تواند مصالح حل‌شونده موجود در لایه‌های خاک یا در سازندهای سنگی را حل و انحلال ناشی از آن می‌تواند تراوش را تسهیل کند، که سبب افزایش انحلال در یک حالت پیش‌رونده می‌شود [۲].

در سال ۲۰۰۰ استفن و لیدل بر روی انحلال ژئوپس بر مبنای مدل جریان لوله پیوسته (continuum-pipe flow model (EVE)) مطالعه نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مرحله آغازین، توسعه مجرا تحت شرایط آرتزین توسط قطر اولیه مجرا و تبادل آب بین مجرا و لایه ژئوپس کنترل می‌شود. اما در مرحله بعدی رشد مجرا نسبت به این پارامترها حساس نیست. رشد دراز مدت مجراهای با قطرهای اولیه متفاوت منجر به قطرهای مشابه می‌شود که می‌تواند با استفاده از حل تحلیلی پیش‌بینی شود [۶].

در سال ۲۰۰۳ آقای باوئر و همکاران مطالعه‌ای را بر روی مدل‌سازی پیدایش آبخوان کارستی با در نظر گرفتن تأثیر جریان تبدالی انجام دادند. این پژوهش یک مطالعه با مدل عددی که مراحل اولیه کارستی شدن یک مجرای واقع در سیستم درز و ترک‌دار را شبیه‌سازی می‌کند، ارائه می‌دهد. یک مدل ترکیبی جریان لوله‌ای پیوسته - مجزا (CAVE) برای این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۷].

در سال ۲۰۰۷ الجبوری و الکاواس مطالعاتی را بر روی انحلال ژئوپس تحت شرایط محیطی مختلف انجام دادند. یکی از حالات مورد آزمایش در معرض قرار دادن مصالح ژئوپسی در جریان آب رودخانه بود که بر اساس نتایج بدست آمده، ضریب K بصورت تابع خطی از سرعت و دما بوده که در این رابطه تأثیر سرعت بر روی انحلال خیلی بیشتر از دما نشان داده شده است [۸].

در سال ۲۰۱۱، الراوی و همکاران تحقیقاتی را بر روی سنگ‌های ژئوپسی تحت شرایط مختلف انجام دادند که نتایج این تحقیقات به این صورت بوده که در دماهای بالاتر، مقادیر و نرخ تجزیه گچ بیشتر می‌باشد. همچنین غلظت نهایی تجزیه گچ با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش قطر حفره سنگ‌های گچی، مقدار غلظت انحلالی گچ افزایش می‌یابد [۹].

در سال ۲۰۱۳، کوپر و گوئیرز بر روی مشکلات کارست‌های ژئوپسی تحقیقات محلی انجام دادند که بر اساس تحقیقات آنها، مشکلات کارست گچ را می‌توان با استفاده از نقشه برداری دقیق و بررسی‌های علمی و به دنبال آن برنامه ریزی مرحله‌ای پیشگیری،

تحقیقات زمینی و ساخت و ساز با استفاده از طرح های ضد آب چاه کاهش داد. از جمله بخش هایی از شهرهای پاریس (فرانسه)، درژینکسک (روسیه)، مادرید و ساراگوزا (اسپانیا)، بیرزای (لیتوانی) و ریون و دارلینگتون (انگلستان) در چنین زمینهایی توسعه یافته اند که به دستورالعمل های محلی و روش های ساخت ویژه نیاز دارند. جاده ها، راه آهن ها، خطوط لوله و پل ها به ویژه در برابر چنین فرونشینی آسیب پذیر هستند و نیاز به توجه ویژه دارند [۱۰].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۴، منشأ و تکامل رخساره های سنگ گچ و نمک سازند لیکوپو در حوضه سیچوان مرکزی در چین را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و نقش کنترل کننده و تاثیر گچ نمک را در تشکیل سنگهای موجود در مخزن سازند لیکوپو در منظر رخساره های رسوبی، فرآیند دیاژنتیکی و تکتونیزه مورد بررسی قرار دادند که در نتیجه آن سنگهای گچ-نمک در حوضه مرکزی سیچوان در محیط کوچک و مسطحی از آب دریاچه های قاره ای تشکیل می شوند که شامل حوضچه گچ-هالیت منطقه ساحلی و هالیت گنبدی هم رنگ و رخساره های شامل گچ - هالیت می باشد [۱۱].

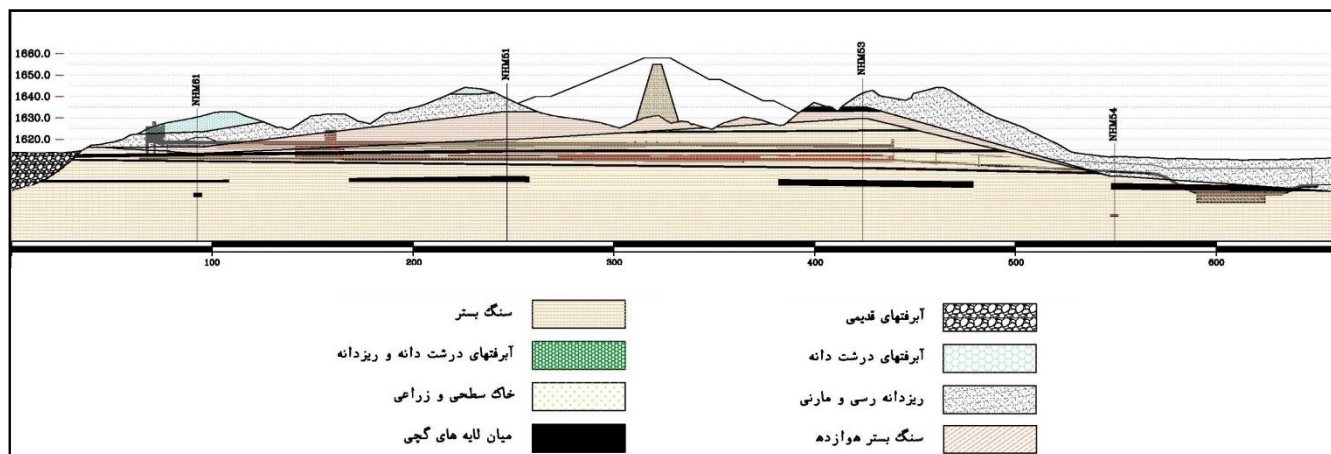
بر اساس تحقیقات آدامو و الانصاری در سال ۲۰۱۶، سد موصل که به لحاظ ظرفیت مخزن آن دومین سد بزرگ در خاورمیانه است، از زمان بهره برداری از این سد در سال ۱۹۸۶ به دلیل انحلال لایه های گچ و انیدریت در زیر پی مشکلات تراوش فراوانی وجود دارد. این پدیده نگرانی در مورد ایمنی سد را برانگیخته است. مطالعات انجام شده طی سالهای اخیر نشان داد که کارهای تزریقی در بهترین حالت فقط می توانند به عنوان راه حل موقت در نظر گرفته شوند و این کار باید در اسرع وقت انجام شود زیرا سد با گذشت زمان بیشتر علائم ضعف را نشان می دهد [۱۲].

مطابق تحقیقات فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، انحلال موضعی ژئوپس در نمونه های مختلف با استفاده از میکروسکوپ دیجیتالی هولوگرافی بر روی شکافهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هندسه شکاف تاثیر زیادی بر مشخصات جریان عبوری از شکاف و سپس بر روی انحلال دارد. سطوحی که بدون شکاف بودند دارای انحلال کم و سطوحی که دارای شکاف باریک و عمیق بودند دارای انحلال بیشتر و رشد انحلال بیشتر از مناطق صاف بود [۱۳].

در طی یک تحقیقات آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۸ توسط هانگ و همکاران، بررسی ها نشان داد که در انحلال سنگ ژئوپس خصوصیات فیزیکیوشیمیایی سنگ بسیار مهم می باشد [۱۴].

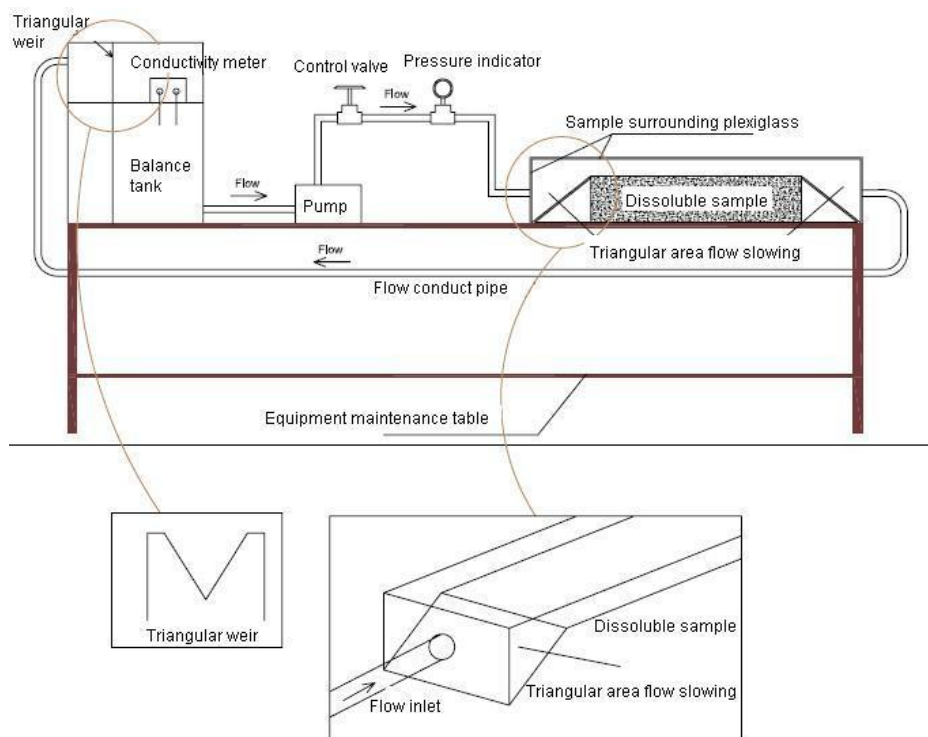
### ۳- روش تحقیق

در این پژوهش، با استفاده از آزمایش گردش آب بر روی مصالح ژئوپسی و انیدریتی در حالت جریان سطحی انجام شده است. نمونه های حاوی ژئوپس و انیدریت از ساختگاه سد مراش تهیه و جهت تشخیص کانی های تشکیل دهنده به آزمایشگاه منتقل شدند. سد مراش در حدود ۱۲۰ کیلومتری از شهر زنجان و در شهرستان ماهنشان از توابع استان زنجان واقع می باشد که برای اهداف شرب، صنعت و کشاورزی در حال ساخت می باشد. با توجه به وجود میان لایه های ژئوپسی و انیدریتی که در ساختگاه سد وجود دارد (شکل ۱) و احتمال بروز انحلال در این مصالح پس از آبیگری مخزن وجود دارد، لذا به این دلیل مصالح مورد آزمایش از این ساختگاه تهیه گردید. میان لایه های گچی بصورت لایه های سیاه رنگ در شکل (۱) نشان داده شده اند.



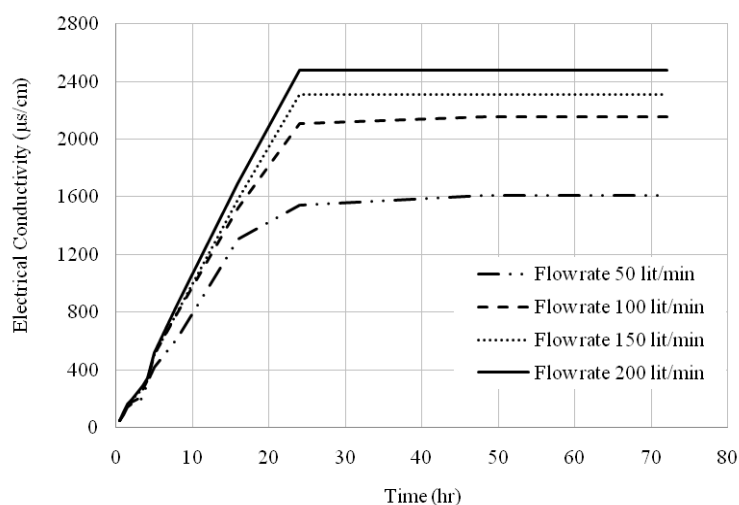
شکل ۱: پروفیل زمین شناسی ساختگاه سد مراش

نتایج آزمایش‌های XRD حاکی از آن است که عناصر تشکیل دهنده حاوی ۳۷ درصد انیدریت ۵۴ درصد ژپس و ۹ درصد ناخالصی‌های دیگر می‌باشد. به منظور تعیین حداکثر ژپس و انیدریت محلول در آب از دو روش کندانکتومتر و تیتراسیون استفاده گردید. تیتراسیون عبارتست از اندازه‌گیری حجم دقیق یک محلول با غلظت کاملاً مشخص، به نام محلول استاندارد که برای انجام کامل واکنش با مقدار معلومی از ماده مورد تجزیه لازم است. محلول استاندارد را تیتروکننده و ماده مورد تجزیه را تیتروشونده می‌نامند. معمولاً محلول استاندارد را درون بورت یا وسیله دیگر اندازه‌گیری حجم می‌ریزند. نتایج این دو روش در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج تیتراسیون بهتر و دقیق‌تر از نتایج کندانکتومتر برای تعیین حداکثر ژپس و انیدریت محلول در آب بود و لذا در بررسی‌ها نتایج آزمایش تیتراسیون مورد توجه قرار گرفته است. برای تعیین انحلال ناشی از جریان سطحی بر روی مصالح ژپس و انیدریت از سیستمی مطابق شکل (۲) بهره گرفته شده است.



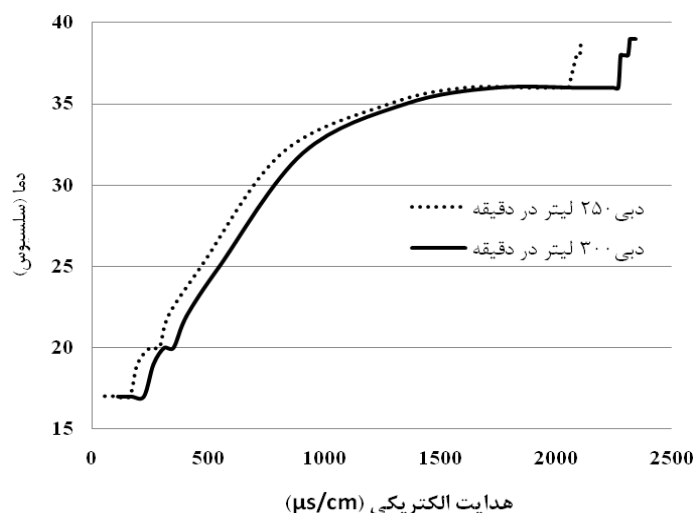
شکل ۲: سیستم طراحی شده برای آزمایش گردش آب

در ابتدا نمونه مکعبی شکل به ابعاد  $15 \times 30 \times 5$  سانتی متر از مصالح حاوی ژئوپس استخراج شده از ساختگاه سد مراش تهیه شد. سپس با استفاده از شیشه های پلکسی از تمام وجوه محصور و از یک وجه آزاد و در تماس با جریان قرار گرفت. به منظور آرام نمودن جریان پمپاژ شده به سیستم، قسمت ورودی و خروجی جریان بصورت فضای شیبدار مثلثی شکل ساخته شد و جهت آبیندی کل سیستم از چسب آکواریوم استفاده گردید. وجه بالایی نمونه مذکور با یک فاصله مشخصی از صفحه پلکسی جهت عبور جریان تنظیم و نصب گردید. با استفاده از پمپ نصب شده مابین مخزن متعادل کننده و نمونه مورد آزمایش، جریان بصورت تحت فشار از فضای بین شیشه پلکسی و نمونه ژئوپسی عبور داده شده و در اثر عبور جریان انحلال مصالح رخ داده و بوسیله کنداکتومتر تغییرات یون کلسیم ناشی از انحلال تا زمان رسیدن به حالت اشباع و تعادل ثبت گردید. تغییرات هدایت الکتریکی در مقابل زمان در شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود با افزایش میزان دبی جریان، میزان هدایت الکتریکی در مقابل زمان افزایش می یابد. همچنین مطابق شکل (۴) با افزایش دمای جریان به ازای یک دبی مشخص، میزان هدایت الکتریکی افزایش می یابد که با افزایش دبی، نرخ تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به دما افزایش می یابد.



شکل ۳: تغییرات میزان هدایت الکتریکی نسبت به زمان در دبی های مختلف

همچنین در شکل ۴، تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به دما در دبی های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴: تغییرات میزان هدایت الکتریکی نسبت به دما در دبی های مختلف

در انجام آزمایش‌های گردش آب در ابتدا و انتهای نمونه دو عدد گیج فشارسنج نصب گردیده بود تا میزان تغییرات فشار یا گرادبان هیدرولیکی در طول آزمایش اندازه‌گیری شود. نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان فشارهای ثبت شده توسط گیج‌ها در طول آزمایش تغییر محسوسی نداشتند و لذا بررسی گرادبان هیدرولیکی و تاثیر آن بر میزان انحلال در آزمایش طراحی شده در این تحقیق موضوعیت نخواهد داشت.

آزمایش‌های انجام شده تاکنون نشان می‌دهند که میزان هدایت الکتریکی و همچنین ضریب ثابت سرعت انحلال به پارامترهایی از قبیل زمان ( $t$ )، دبی (سرعت جریان) ( $v$ )، دما ( $T$ ) و نوع مصالح (ژیپسی یا انیدریتی) ( $MK$ ) بستگی دارد. این ارتباط در رابطه ۵ نشان داده شده است:

$$K(m/s) = f(t, v, T, MK) \quad (5)$$

نحوه ارتباط ضریب ثابت سرعت انحلال به هر یک از پارامترها می‌تواند به توابع دو جمله‌ای یا توانی و یا نمایی و یا هر تابع دیگر با در نظر گرفتن یک، دو و ... پارامتر با استخراج ضرایب معادله پیشنهادی به دست آید. در این راستا با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و نحوه ارتباط این ضریب با تک تک پارامترها، می‌توان یک رابطه منطقی جهت محاسبه ضریب ثابت سرعت انحلال بدست آورد. از نتیجه آزمایش‌ها چنین بدست می‌آید که ضریب هدایت الکتریکی ( $EC$ ) با هر یک از پارامترهای اشاره شده رابطه‌ای دارد.

$$EC = \begin{cases} f(t) \\ f(v) \text{ or } f(Q) \\ f(T) \\ f(MK) \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به استخراج رابطه  $EC = 0.2219C$  از آزمایش تعیین حداکثر ژپیس و انیدریت محلول در آب می‌توان نوشت:

$$C = \begin{cases} f(t) \\ f(v) \text{ or } f(Q) \\ f(T) \\ f(MK) \end{cases} \quad (7)$$

با استفاده از رابطه ۷ و نوع مصالح (ژیپسی یا انیدریتی)، رابطه ضریب ثابت سرعت انحلال ( $K$ ) نیز بصورت رابطه ۸ خواهد شد:

$$K(m/s) = \begin{cases} f(t) \\ f(v) \text{ or } f(Q) \\ f(T) \\ f(MK) \end{cases} \quad (8)$$

با اندازه‌گیری تغییرات جرم ناشی از انحلال ژپیس یا انیدریت در آب در آزمایش گردش آب، می‌توان صحت مقدار  $K$  محاسبه

$$\text{شده را با استفاده از رابطه } K = \frac{\Delta M}{\Delta t (A(C_s - C))^n} \text{ سنجید.}$$

پس از استخراج  $K_i$  ها که با هریک از پارامترها بطور مستقل بستگی دارد، ضریب  $K$  کلی که بصورت تابعی از تمامی پارامترها باشد بصورت ذیل تعریف می‌شود:



$$K = at + bv + cT + dMK \quad (9)$$

یا

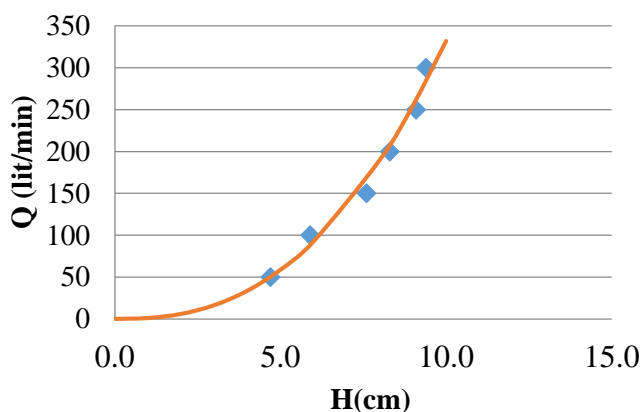
$$K = A.e^{at+bv+cT+dMK} \quad (10)$$

که در آن  $a, b, c, d$  ضرایب هستند که بایستی با سعی و خطا محاسبه می شوند. پارامتر  $MK$  می تواند بصورت درصدی از ژئیس

و انیدریت تعریف گردد:  $MK = \alpha(\text{gypsum}) + \beta(\text{Anhydrite})$

برای اندازه گیری دبی از سرریز مثلثی استفاده شده است (شکل ۵). با استفاده از اندازه گیری حجمی دبی آب و ثبت ارتفاع تیغه

آب، منحنی دبی - اشل سرریز استخراج و پس از آن با استفاده از رابطه پیشنهادی با اندازه گیری ارتفاع تیغه آب، می توان دبی جریان در زمان آزمایش را بدست آورد.



شکل ۵: منحنی دبی - اشل سرریز مثلثی آزمایش گردش آب

با توجه به شکل (۵) رابطه دبی - اشل سرریز بصورت  $Q = C.H^{2.5}$  می باشد. که با اندازه گیری ارتفاع تیغه آب، دبی سیستم

با استفاده از رابطه فوق محاسبه می گردد. لازم به ذکر اینکه مقدار  $C$  در رابطه فوق معادل  $1/0.5$  با ضریب همبستگی  $0.98$  به دست آمده است. نمایی از سرریز مورد استفاده در آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: نمایی از سرریز مورد استفاده در آزمایش

برای نمونه ژئوپسی با انجام آزمایش گردش آب و استخراج روابط برای محاسبه ضریب  $K$ ، رابطه حاصل از نتایج بصورت رابطه (۱۱) می باشد:

$$K = (3E - 8Q + 1E - 5).e^{(8E-5Q+0.0178)t} + 1.00E - 9T + 7.00E - 8 \quad (11)$$

برای نمونه انیدریتی با انجام آزمایش گردش آب و استخراج روابط برای محاسبه ضریب  $K$ ، رابطه حاصل از نتایج بصورت رابطه (۱۲) می باشد:

$$K = (4E - 12Q + 1E - 09).e^{(0.0002Q+0.036)t} + 6E - 12T + 4E - 11 \quad (12)$$

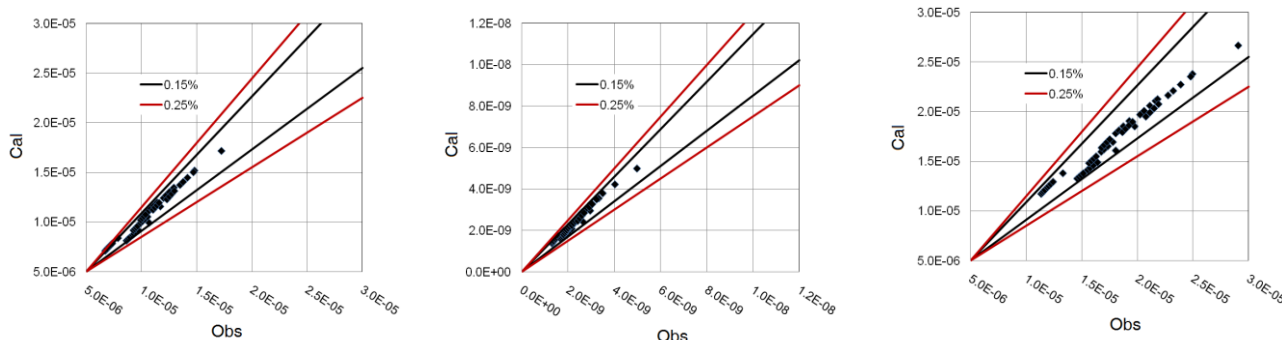
با در نظر گرفتن ترکیب مصالح حاوی ژئوپس و انیدریت، نتایج بصورت رابطه (۱۳) خواهد شد.

$$K = (2E - 8Q + 6E - 6).e^{(9E-05Q+0.0177)t} + 1E - 10T + 1E - 8 \quad (13)$$

جدول ۱- میزان خطا و همبستگی روابط پیشنهادی  $K$  در نمونه های مختلف

نام نمونه	RMSE	R <sup>2</sup>
نمونه ژئوپسی	9.65E-7	0.98
نمونه انیدریتی	1.49E-10	0.98
نمونه حاوی انیدریت و ژئوپس	3.81E-07	0.98

در شکل (۷) نیز میزان همبستگی و پراکندگی داده های مربوط به ضریب  $K$  بدست آمده از روابط پیشنهادی ارائه شده است.



ج - نمونه ژئوپسی و انیدریتی

ب - نمونه انیدریتی

الف - نمونه ژئوپسی

شکل ۶: همبستگی بین رابطه  $K$  با مقادیر مشاهداتی و آزمایشگاهی در نمونه های مورد آزمایش

همانطوریکه در شکل (۷) نشان داده شده است، با در نظر گرفتن بازه اطمینان ۲۵ درصد، رابطه پیشنهادی با در نظر گرفتن نمونه ژئوپسی و انیدریتی دارای دقت مناسبی می باشد. به این دلیل که در این حالت ژئوپس ۵۴ درصد و انیدریت ۳۷ درصد در نظر گرفته شد که مطابق با درصد اندازه گیری شده با آزمایش xrd می باشد.

## ۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که:

- ۱- انحلال ژپس و انیدریت در شرایط سطحی متفاوت از شرایط درزه و شکاف بوده و پیچیده تر از آن می باشد.
- ۲- بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات دیگر محققین، تغییرات ثابت سرعت انحلال بصورت یک متغیر ثابت در معادله انحلال ذکر شده در صورتیکه بر اساس نتایج تحقیق حاضر، ضریب  $K$  با زمان و دبی و دما تغییر می کند که می بایست در معادلات دیده شود.
- ۳- بهترین رابطه با همبستگی بالا برای رابطه بین  $K$  و دبی بصورت خطی، رابطه بین  $K$  و دما نیز بصورت خطی و رابطه  $K$  و زمان هم بصورت نمایی بدست آمده است.
- ۴- ضریب رابطه  $K$  و دبی با فرض نمونه ژپسی، انیدریتی و ژپس و انیدریت بصورت توام به ترتیب معادل  $3E-8$ ،  $4E-12$  و  $2E-8$  به دست آمده است که نشان می دهد تاثیرگذاری دبی بر روی انحلال ژپس بیشتر از انیدریت بوده و همچنین به ازای یک دبی ثابت، ضریب انحلال پذیری ژپس در حدود  $10000$  برابر انیدریت در شرایط انحلال سطحی می باشد.
- ۵- ضریب رابطه  $K$  و دما با فرض نمونه ژپسی، انیدریتی و ژپس و انیدریت بصورت توام به ترتیب معادل  $1E-9$ ،  $6E-12$  و  $1E-10$  به دست آمده است که نشان می دهد تاثیرگذاری دما بر روی انحلال ژپس بیشتر از انیدریت بوده و همچنین به ازای یک دمای ثابت، ضریب انحلال پذیری ژپس در حدود  $1000$  برابر انیدریت در شرایط انحلال سطحی می باشد.

## 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] Farid, Arvin M; Habibagahi, Ghasem. (2007). *Dissolution-Seepage Coupled Analysis through Formations Containing Soluble Materials*. Journal of Engineering Mechanics Vol. 133, Iss. 6, pp 713-722.
- [3] James, A.N. and Lupton, A.R.R. (1978). *Gypsum and Anhydrite in foundation of hydraulic structures Geotechnique*. N0.28, PP.249-272.
- [4] James, A.N. and Kirkpatrick, I.M. (1980). *Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils Quarterly Journal of Engineering Geology*. No.13, pp.189-198.
- [5] James, A.N. Binnie, and Partners. (1981). *Solution Parameters of carbonate rock Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No.24, pp.19-25.
- [6] Steffen, B. and Leidel, R., (2000). *Characterization of gypsum aquifers using a coupled continuum-pipe flow model Applied Geology*. Geological Institute, University of Tübingen, Sigwartstrasse 10, D-72076 Tübingen, Germany.
- [7] Bauer, S., R. Liedl, and M. Sauter, (2003). *Modeling of karst aquifer genesis: Influence of exchange flow*. Water Resour. Res., 39(10), 1285, doi:10.1029/2003WR002218.
- [8] Aljubouri, Z.A. and Alkawas, H.A., (2007). *Dissolution rate of gypsum under different environments*. Iraqi Jour. Earth Sci., Vol.7, No.2, pp.11-18.
- [9] Al-Rawi, O. and Ghannam, S. and Al-Ani, H.R., (2011). *Dissolution of Gypseous Rocks under Different Circumstances*. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 5, No. 3.
- [10] Cooper, A. H., & Gutiérrez, F. (2013). *Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning* (pp. 451-462). Elsevier.
- [11] Zhu, T., Wang, X. Z., Shen, Z. M., Li, L., Li, H., & Wang, P. (2014). The origin of gypsum-salt rock of Leikoupo Formation and its influence on the gas reservoir in central Sichuan Basin. *Geology in China*, 41(1), 122-134.
- [12] Adamo, N., & Al-Ansari, N. (2016). Mosul dam full story: Safety evaluations of mosul dam. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 6(3), 185-212.
- [13] Feng, P., Brand, A. S., Chen, L., & Bullard, J. W. (2017). In situ nanoscale observations of gypsum dissolution by digital holographic microscopy. *Chemical geology*, 460, 25-36.
- [14] Hong, D., Fan, M., Yu, L., & Cao, J. (2018). *An experimental study simulating the dissolution of gypsum rock*. Energy Exploration & Exploitation, 36(4), 942-954.