محاسبه تغییرات بازشدگی دهانه درزه‌های سنگی در اثر انحلال به روش تجربی و نظری (مطالعه موردی، ژیپسیت‌های مخزن سد چم شیر)

*مجتبی حیدری، محمد حسین قبادی، مهدی ترابی کاوه:
دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ: دریافت ۹۰/۲/۷ **پذیرش** ۹۱/۲/۱۱

چکیده

در نواحی کارستیک، مطالعات تفصیلی پدیده‌هایی از قبیل فرار آب از محل سازه‌های هیدرولیکی و فرونشست زمین در مناطق مسکونی و معدنی، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، ثابت سرعت انحلال نمونه‌های ژیپسیت سازند گچساران، اخذ شده از محل مخزن سد چم‌شیر، برابر $۰/۲٤ \times ۱۰^{-۳}$ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. سپس میزان تغییرات باز شدگی دهانهٔ درزهٔ نمونه‌ها، با استفاده از روش‌های نظری و تجربی (استفاده از مقادیر تغییرات آب‌گذری درزه‌ها و اندازه‌گیری مستقیم) محاسبه گردیده است. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که میزان بازشدگی پیش‌بینی شده برای درزه‌ها به روش نظری با مقدار اندازه‌گیری شده با استفاده از مقادیر تغییرات آب‌گذری درزه‌ها تطابق کم‌تری دارد، در حالی‌که با مقدار اندازه‌گیری شده به روش مستقیم (اندازه‌گیری با استفاده از کولیس) انطباق بیش‌تری دارد. هم‌چنین بر اساس پژوهش انجام شده چنان‌چه ژیپسیت‌های واقع در مخزن پس از آب‌گیری سد در مجاورت جریان آب قرار گیرند، مقدار بازشدگی درزه‌ای با دهانهٔ اولیه ۰/۵ سانتی‌متر پس از حدود ۲۷۸ روز به ۱۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. این افزایش دهانهٔ درزه در مقایسه با عمر مفید سد توجه ویژه به موضوع آب‌بندی مخزن سد را الزامی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انحلال، ژیپسیت، بازشدگی درزه‌ها، روش نظری، روش تجربی.

نویسنده مسئول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

مقدمه

لازمهٔ داشتن یک مخزن ایمن در برابر فرار آب، کسب اطلاعات دقیق از مشخصات آب‌خوان‌ها و سیستم‌های مجاری کارستی است [۱]. افزایش فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی ناشی از آب‌گیری مخزن یک سد، می‌تواند منجر به نشت آب ازطریق مجاری موجود در پی و تکیه‌گاه‌های سد گردد. در اثر انحلال سنگ‌های سولفاته، گسل‌ها و درزه‌های موجود در محل سدها، به‌تدریج عریض‌تر شده و در نتیجه مقدار و سرعت تخلیه آب از مخازن سدها افزایش می‌یابد [۲]، [۳]، [٤].

اجرای اجباری پروژه‌های سدسازی در مناطق کارستی، ارزیابی دقیق میزان خطر و ارائه روش‌های علاج بخشی را امری الزامی کرده است. تاکنون محققان زیادی در سراسر جهان به بررسی گسترش دهانهٔ درزه‌ها در اثر پدیده انحلال پرداخته‌اند [٥]، [٦]، [۷]، [۸]، [۹]. برای ارزیابی تغییرات دهانهٔ درزه‌ها در اثر پدیده انحلال زمین‌شناسان مهندس باید در مرحلهٔ اول، ثابت سرعت انحلال سنگ را در شرایط نزدیک به شرایط طبیعی اندازه‌گیری کنند و در مرحلهٔ بعد میزان تغییرات بازشدگی درزه‌ها را با روش‌های موجود تعیین کنند. در همهٔ تحقیقات قبلی، به‌منظور اندازه‌گیری مقدار بازشدگی درزه‌ها در اثر انحلال، از مقادیر تغییرات آب‌گذری درزه‌ها (ΔQ) در طی آزمایش آب‌گذری استفاده گردیده است. به‌دلایل مختلفی مانند تخریب نمونه‌ها در طی انجام آزمایش و تغییرات بسیار ناچیز در مقدار بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها بر اثر انحلال، امکان اندازه‌گیری مقدار بازشدگی دهانه درزه‌ها به‌صورت مستقیم در انتهای آزمایش وجود ندارد. هم‌چنین افت فشار آب در درون درزه‌ها به‌دلیل هواگیری پمپ آب، باعث بروز خطا در اندازه‌گیری تغییرات بازشدگی دهانهٔ آن‌ها با استفاده از روش تغییرات آب‌گذری درزه‌ها می‌شود. ماگمدوف در سال ۲۰۰۰ میلادی، برای محاسبهٔ تغییرات بازشدگی درزه‌ها، در اثر انحلال ناشی از جریان آب در سطح درزه‌ها، روابط نظری ارائه کرده است [٦]. این بررسی بر روی ماسه سنگ‌های با سیمان سولفاته در محل سد ایرگانای هس انجام گرفته و نتایج قابل قبولی داشته است. در این پژوهش، بعد از تعیین ثابت سرعت انحلال ژیپسیت‌های سازند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

گچساران، به بررسی تغییرات بازشدگی دهانهٔ درزه‌های موجود در آن‌ها، با استفاده از روش‌های تجربی و نظری پرداخته شده است.

موقعیت، زمین‌شناسی و زمین ساخت منطقه

سد چم‌شیر برروی رودخانهٔ زهره در ۲۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر دوگنبدان (گچساران)، با مختصات طول شرقی "۳۶ ´۵۲ °۵۰ و عرض شمالی"۵۹ ´۱۰ °۳۰ قرار گرفته است. نوع سد بتنی (قوسی و وزنی)، ارتفاع آن از پی ۱۵۵ متر و حجم مفید آن ۱/۸ میلیارد متر مکعب است [۱۰]. مخزن سد چم‌شیر تماماً در تشکیلات گروه فارس شامل سازندهای گچساران، میشان و آغاجاری قرار دارد. قدیمی‌ترین تشکیلات رخنمون یافته در مخزن را رسوبات سازند گچساران تشکیل می‌دهد. این سازند بیش‌تر قسمت‌های شرقی دریاچه سد را در خود جای داده است. در این منطقه بخش ۷ (آهک مارنی نازک لایه، انیدریت ضخیم لایه)، و بخش‌های ۵ و ٦ (عموماً شامل مارن‌های الوان، انیدریت قرمزرنگ و نمک) از سازند گچساران در تماس با مخزن هستند [۱۰]. از نظر تکتونیکی نیز منطقهٔ بررسی شده در نوار چین خورده زاگرس قرار گرفته است. سادگی ساختاری این زون در چین خوردگی‌های نسبتاً متقارن با طول موج‌های چند صدمتری تا کیلومتری به‌خوبی قابل ملاحظه است. به‌هم فشردگی‌های ناشی از اعمال نیروهای فشارشی تکتونیکی پاره‌ای از گسل‌ها و روراندگی‌های کوچک و نسبتاً بزرگ را در این منطقه ایجاد کرده است [۱۱]. گسل چم‌شیر و روراندگی دژ سلیمان نمونه‌ای از آن‌ها هستند. شکل ۱ نقشهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده را نشان می‌دهد.

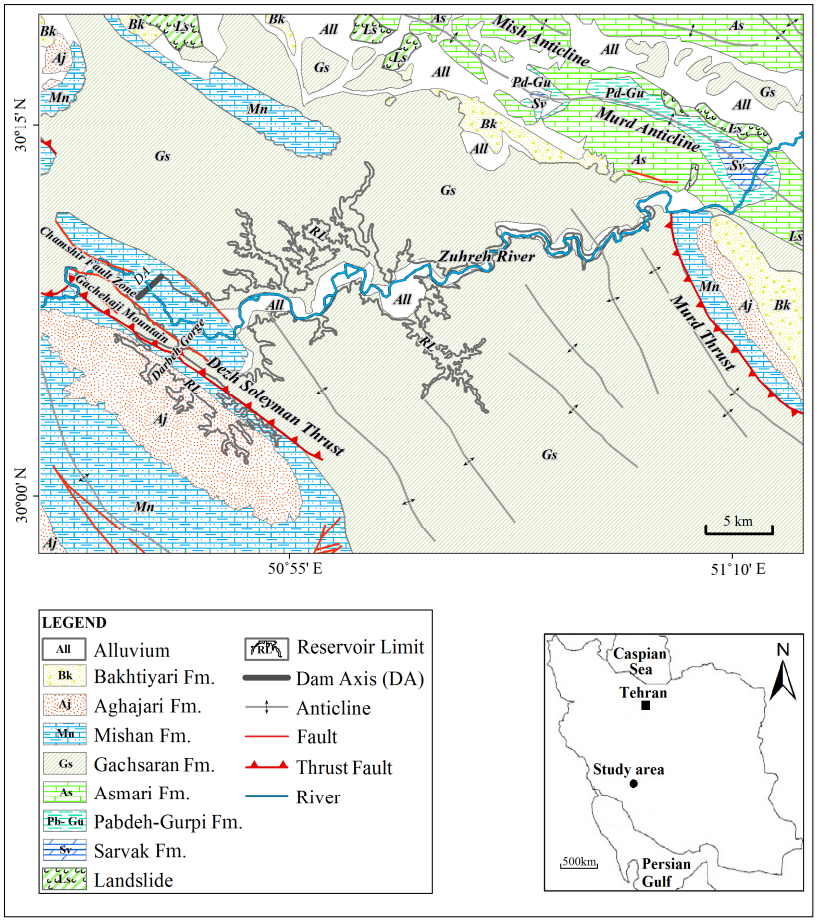
مواد و روش‌ها

دستگاه سیرکولاسیون استفاده شده در آزمایش

پیش از این برای اندازه‌گیری ثابت سرعت انحلال و آزمون آب‌گذری در داخل کشور از دستگاه سیرکولاسیون اندازه‌گیری انحلال‌پذیری، ساخته شده در سال ۱۳٦٦ به‌وسیلهٔ قبادی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

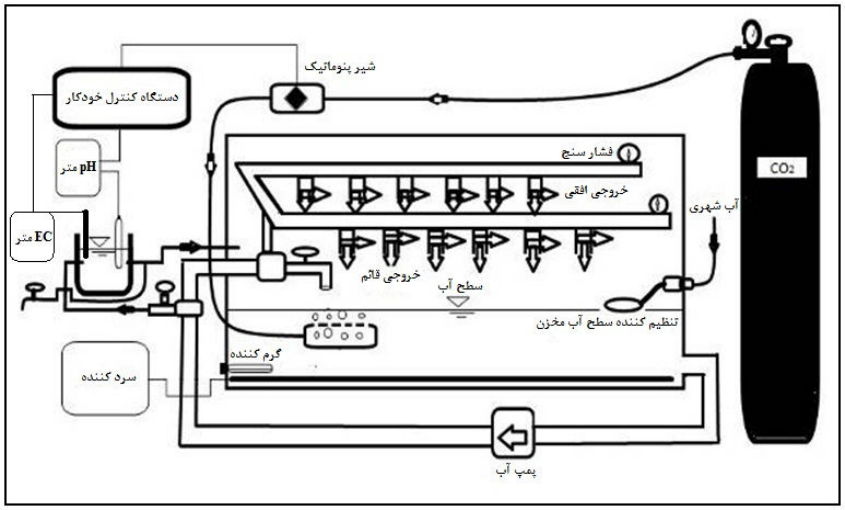


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی بررسی شده (اصلاح شده نقشهٔ زمین‌شناسی گچساران، [۱۲])

استفاده می‌شد [۱۳]، ولی به‌دلیل برخی از مشکلاتی که دستگاه مذکور داشت در سال‌های ۱۳۸۸ به‌وسیلهٔ دوستی [۱٤] و ۱۳۸۹ توسط ترابی کاوه [۱۵] مورد به‌سازی قرار گرفت. در مدل به‌سازی شده، دستگاه سیرکولاسیون دیجیتایز شده و امکان جلوگیری از نوسان اسیدیته مخزن با کنترل اتوماتیک اسیدیته و هم‌چنین ثبت EC آب مخزن امکان‌پذیر گردیده است. هم‌چنین تمامی دیواره‌های مخزن و لوله‌های رابط از جنس پلی اتیلن هستند و از حداقل اتصالات آهنی استفاده شده است زیرا وجود اتصالات آهنی در مسیر، منجر به ورود اکسید

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

آهن به آب داخل مخزن می‌شود که در اسیدیته پایین این فرآیند تشدید می‌شود. در شکل ۲ نمای شماتیکی از دستگاه سیرکولاسیون استفاده شده در آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۲. نمای شماتیکی از دستگاه سیرکولاسیون استفاده شده در آزمایش

نمونه برداری و تعیین خلوص نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، بلوک‌های سنگی از سازند گچساران واقع در محل مخزن سد چم شیر تهیه شد. از آنج که نمونه‌های موجود در نقاط مختلف مخزن سد به لحاظ ظاهری و میزان خلوص ژیپس، متفاوت بودند، نمونه‌های اخذ شده (تعداد ۹ بلوک سنگی از ٤ نقطه مختلف مخزن) به گونه‌ای انتخاب شدند که تا حد امکان معرف کل نمونه‌های موجود در منطقه باشند. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی‌سینا، برای انجام آزمایش آب‌گذری، اقدام به مغزه‌گیری از آن‌ها گردید. به‌منظور تعیین درصد ژیپس موجود در نمونه‌ها از روش استون استفاده شد [۱۵] (جدول ۱). هنگام تعیین ثابت سرعت انحلال و آزمایش آب‌گذری، نمونه‌هایی که دارای خلوص بالاتری بودند (NM2 و TD1) به‌صورت میانگین استفاده شدند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

جدول ۱. درصد ژیپس موجود در نمونه‌ها

شمارهٔ نمونه	درصد ژیپس (سولفات
P1	۳۷/۸۰
P2	۳۳/۲۲
P3	٤۲/۳۸
NM1	٤۹/۲٥
NM2	۷٤/٤۳
M1	۲٤/۰۷
M2	٥۷/۲٦
TD1	۷٤/٤۳
TD2	٦٦/٤۱

آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمایش

از بلوک‌های سنگی ۱۲ عدد مغزه به طول‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و با قطر NX (٥٤ میلی‌متر) تهیه شد و با دستگاه برش سنگ یک برش طولی در آن‌ها ایجاد گردید و در مرحلهٔ بعد با استفاده از واشرهای فلزی به ضخامت ۱ و ۳ میلی‌متر که در بین دو نیمهٔ مغزه‌های بریده شده قرار می‌گرفت، از هر نمونه با طول مشخص (۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر)، ۲ نمونه با درزه دارای دهانه ۱ میلی‌متر و ۲ نمونه با درزه دارای دهانه ۳ میلی‌متر، تهیه شده و به‌صورت کاملاً آب‌بندی شده با چسب و تیوب لاستیکی برای آزمون آب‌گذری، آماده گردیدند.

آزمون آب‌گذری نمونه‌ها طی این مراحل انجام گرفته است:

۱. نمونه‌های آماده شده برای آزمون آب‌گذری به‌حالت قائم بسته شدند. دبی اولیه (Q_0) در درزه‌ها به‌وسیلهٔ شیرهای تنظیم‌کننده تا حد امکان نزدیک به‌هم تنظیم شده‌اند و فشار آب معادل ۰/۵ بار ثابت نگه داشته شده است.

۲. از آن‌جاکه انتقال آب به‌علت مسافت زیاد منطقهٔ بررسی شده تا محل آزمایش پر هزینه بود، بنا بر این در طول آزمایش از آب شرب شهر همدان که کربناته است، استفاده گردیده است.

۳. اسیدیتهٔ آب مخزن در طول انجام آزمایش ثابت و برابر ۷/۲ بود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

٤. دمای آب مخزن با مبرد در طول آزمایش بر روی عدد ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد. هم‌چنین تزریق گاز دی‌اکسیدکربن با دستگاه اتوماتیک کنترل pH دستگاه سیرکولاسیون انحلال انجام گرفته است.

۵. برخلاف پژوهش‌های پیشین که آب مخزن پس از اشباع شدن تعویض می‌شد در این آزمون با به‌سازی‌های صورت گرفته بر روی دستگاه سیرکولاسیون جریان ورودی و خروجی به مخزن طوری تنظیم گردید که آب داخل مخزن در طول ۷ روز انجام آزمایش، اشباع نگردید. به‌این ترتیب سعی شد شرایط انجام آزمایش با شرایط واقعی در طبیعت یک‌سان باشد، زیرا جریان آب‌های زیرزمینی همواره باعث جای‌گزینی آب‌های غیر اشباع با آب‌های اشباع شده از آنیون‌ها و کاتیون‌ها در محل‌های در حال انحلال می‌شوند.

٦. برای اندازه‌گیری تغییرات جریان آب عبوری از درزه‌ها، برای هر نمونه، هر روز یک بار، مقدار جریان آب به‌مدت ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری گردیده است. در هر مورد اندازه‌گیری سه بار انجام و متوسط آن به‌عنوان میزان آب‌گذری در ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

بحث و نتایج

روش نظری

ماگمدوف در سال ۲۰۰۰ برای اولین بار روابطی را برای محاسبهٔ تغییرات بازشدگی ناپیوستگی‌ها ناشی از جریان آب در تودهٔ ماسه‌سنگی که دارای سیمانی از جنس ژیپس بود ارائه کرد [٦]. با استفاده از این روابط تنها با داشتن اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش انحلال‌پذیری می‌توان مقادیر بازشدگی ناپیوستگی‌ها را در زمان‌های متفاوت به‌دست آورد.

معادلهٔ ثابت سرعت انحلال به‌عنوان معادلهٔ پایه در این روش محسوب می‌شود که عبارت است از:

$$\frac{dM}{dt} = KS\,(C_S - C) \qquad (۱)$$

در این رابطه:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

dM مقدار مادهٔ حل شده در زمان dt، S سطح مقطع انحلال، C_s غلظت در حالت اشباع، C غلظت در زمان t و K ثابت سرعت انحلال است.

با توجه به شکل ۳ مقدار مادهٔ حل شده از دیوارهٔ درزه (برای عرض واحد) در زمان dt عبوری از مقطع dx از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید:

$$dM = \rho\zeta d\,\Delta dx\,1 \qquad (۲)$$

در این رابطه:

ρ دانسیتهٔ مادهٔ حل شونده، ζ مقدار خلوص ژیپس که به‌صورت کسری از یک بیان می‌گردد، dΔ عمق فرسایش دیوارهٔ درزه و dx طول مقطع عبوری است.

سطح انحلال نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$S = 2dx\,1 \qquad (۳)$$

با جای‌گزینی معادله‌های (۲ و ۳) (با فرض واحد بودن مقدار dx) در معادلهٔ (۱)، معادلهٔ (٤) به‌دست می‌آید:

$$\frac{d\left[(\delta-\delta_0)/2\right]}{dt} = \frac{2K}{\rho\zeta}\left(C_S - C\right) \qquad (٤)$$

در این رابطه: δ بازشدگی درزه است. با انتگرال‌گیری از معادلهٔ (٤)، معادلهٔ (٥) حاصل می‌شود:

$$\delta = \frac{2K}{\rho\zeta}\left(C_S - C\right)t + C_0 \qquad (٥)$$

با اعمال شرایط اولیهٔ t=0 و $\delta=\delta_0$ معادلهٔ (٦) به‌دست می‌آید:

$$\delta = \delta_0 + \frac{2K}{\rho\zeta}\left(C_S - C\right)t \qquad (٦)$$

مقدار نامعلوم در معادله ٦، C است که به‌طول مسیر اشباع (X) و زمان انحلال (t) بستگی دارد.

اگر حجم حلال (V) ثابت باشد:

$$M = CV \text{ and } \frac{dM}{dt} = V\,\frac{dc}{dt} \qquad (۷)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

از ترکیب معادله‌های (۷ و ۱) و انتگرال‌گیری از ۰ تا C معادلهٔ (۸) به‌دست می‌آید:

$$\frac{KSt}{V} = Ln\frac{C_S}{C_S - C} \quad (۸)$$

حجم و سطح مقطع برای آب جاری در سطح درزهٔ از روابط (۹ و ۱۰) استخراج می شود:

$$V = X\,\delta 1 \quad (۹)$$

$$S = 2X\,\zeta 1 \quad (۱۰)$$

با جای‌گزینی معادلات (۹ و ۱۰) در معادلهٔ ۸، معادلهٔ (۱۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{2K\zeta t}{\delta} = Ln\frac{C_S}{C_S - C} \quad (۱۱)$$

با جانشینی معادلهٔ (۱۱) در معادلهٔ (٦)، معادلهٔ (۱۲) برای محاسبهٔ بازشدگی درزه در طی نشت به‌دست می‌آید:

$$\delta_x = \delta_0 + \frac{2KC_S t(e)^{\frac{-2K\zeta}{\delta_0}}}{\rho\zeta} \quad (۱۲)$$

با داشتن مقادیر بازشدگی اولیه (δ_0) و ثابت سرعت انحلال (K) می‌توان بازشدگی مورد انتظار (δ_x) را در طول مسیر اشباع (X) و مدت زمان معینی از انحلال (t)، را به‌دست آورد. هم‌چنین می‌توان از طریق معادلهٔ زیر زمان لازم برای رسیدن به یک بازشدگی معین از دهانهٔ درزه را محاسبه کرد:

$$t = \frac{\rho\zeta(\delta_x - \delta_0)e^{-2K\zeta\delta_0}}{KC_S} \quad (۱۳)$$

روش‌های تجربی

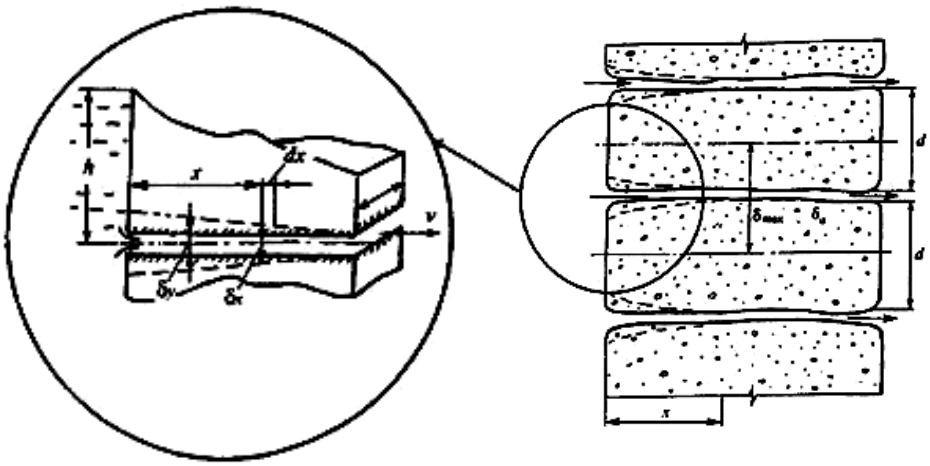
در روش‌های تجربی، تغییرات میزان بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها به‌وسیلهٔ دو روش قابل اندازه‌گیری است:

۱) اندازه‌گیری مستقیم (با استفاده از کولیس)؛

۲) ثبت تغییرات آب‌گذری درزه‌ها؛

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]



شکل ۳. نشت از درزه واقع در تودهٔ سنگ: δ_0 بازشدگی درزهٔ اولیه، δ_{max} حداکثر بازشدگی ممکن، a فاصله‌داری درزه‌ها، و x طول مسیر اشباع [برگرفته از ٦]

در روش اول، مقدار تغییرات بازشدگی درزه‌ها در انتهای آزمایش، به‌طور مستقیم با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود. اگر نمونه‌ها در برابر عبور جریان آب، استحکام کافی نداشته باشند، پس از مدتی تخریب می‌گردند. در این حالت از روش دوم برای اندازه‌گیری تغییرات بازشدگی درزه‌ها استفاده می‌گردد.

اگر Q_0 و e_0 به‌ترتیب آب‌گذری و عرض اولیه درزه‌ها باشند، می‌توان نوشت [نقل از ۱۵]:

$$Q_0 \approx e_0^{\,3} \qquad (١٤)$$

و آن‌گاه برای آب‌گذری ثانویه از رابطهٔ (۱۵) می‌توان استفاده کرد:

$$Q=Q_0+\Delta Q \rightarrow \frac{Q}{Q_0}=1+\frac{\Delta Q}{Q_0} \qquad (١٥)$$

از طرفی برای یک درزه واقع شده بین دو سطح موازی، مقادیر نفوذپذیری (K)، سرعت(V)، و گرادیان هیدرولیکی (i) با استفاده از روابط (١٦)، (١٧) و (١٨) قابل محاسبه است:

$$V=\frac{Pe^2}{12\gamma} \qquad (١٦)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

$$K = \frac{ge^2}{12\gamma} \quad (۱۷)$$

$$i = \frac{P}{L} \quad (۱۸)$$

که در این رابطه:

P: فشار

g: شتاب ثقل

γ: ویسکوزیته مایع مورد نظر در شرایط دمای آزمایشگاه است که با استفاده از قانون دارسی می‌توان نوشت:

$$V = Ki = \frac{ge^2}{12\gamma} \times \frac{P}{L} \quad (۱۹)$$

از طرفی با توجه به قانون پیوستگی جریان:

$$Q = A.V = e.b.V = e.b.\frac{ge^2 p}{12\gamma L} = \frac{e^3.bgp}{12\gamma L} \quad (۲۰)$$

و رابط G (۲۱)

$$B = \frac{bgp}{12\gamma L} \rightarrow Q = Be^3 \quad (۲۱)$$

داریم:

(۲۲)

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Be^3}{Be_0^3} = \frac{B(e_0+\Delta e)^3}{Be_0^3} = \frac{e_0\left(1+\frac{\Delta e}{e_0}\right)^3}{e_0} = \left(1+\frac{\Delta e}{e_0}\right)^3 = 1+3\left(\frac{\Delta e}{e_0}\right)+3\left(\frac{\Delta e}{e_0}\right)^2+\left(\frac{\Delta e}{e_0}\right)^3$$

در اینجا برای خطاهای محاسباتی، از مقادیر بی‌نهایت کوچک مرتبهٔ دوم و سوم (ε) صرف‌نظر می‌شود. بنا بر این:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

$$\frac{Q}{Q_0} \approx 1 + 3\frac{\Delta e}{e_0} + \varepsilon \qquad (۲۳)$$

و می‌توان نوشت:

(۲٤)

$$Q = Q_0 + \Delta Q \Rightarrow \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{\Delta Q}{Q_0} \Rightarrow 1 + \frac{\Delta Q}{Q_0} = 1 + 3\left(\frac{\Delta e}{e_0}\right) \Rightarrow \frac{\Delta Q}{Q_0} = 3\left(\frac{\Delta e}{e_0}\right)_{ave}$$

با استفاده از رابطهٔ (۲٤) و محاسبهٔ مقدار $\Delta Q/Q_0$ در هر روز برای نمونه‌ها با توجه به این که مقادیر e_0 مربوط به هر نمونه مشخص است، می‌توان تغییرات مقادیر e را برای هر کدام از نمونه‌ها طبق روابط فوق محاسبه کرد.

مقادیر تغییرات آب‌گذری اندازه‌گیری شده نسبت به دبی اولیه، در pH=۷/۲ برای نمونه‌های آزمایش شده در جدول (۲) نشان داده شده است. هم‌چنین مقدار بازشدگی درزه‌ها به‌روش مستقیم در انتهای آزمایش اندازه‌گیری شده است (شکل ٤ و جدول ۲). چنان‌که مشاهده می‌گردد، با گذشت زمان میزان آب‌گذری درزه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌هایی با بازشدگی دهانه درزه ثابت و طول بزرگ‌تر، میزان درصد آب‌گذری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های با طول کم‌تر در مدت زمان مشابه، کاهش نشان می‌دهد. به‌طورکلی می‌توان گفت که در تمامی درزه‌های دارای بازشدگی اولیهٔ یک‌سان، دهانه درزه با طول کم‌تر نسبت به درزهٔ با طول بیش‌تر، گسترش زیادتری خواهد داشت. این یافته با اندازه‌گیری‌های مستقیم نیز تأیید می‌شود (شکل ۲). علت این پدیده افزایش طول اشباع (X) و زمان اشباع (t) است، به‌طوری‌که هر چه طول اشباع افزایش یابد، میزان انحلال (C_s-C) کم‌تر شده و در نتیجه مقدار بازشدگی نهایی کاهش می‌یابد.

مقدار بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها، محاسبه شده از روش تغییرات آب‌گذری (جدول ۲)، تفاوت چشم‌گیری با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم نشان می‌دهد. این تفاوت، به وجود خطاهای آزمایشگاهی در روش غیرمستقیم (تغییرات آب‌گذری درزه‌ها) مربوط است. برای مثال مقدار آب‌گذری درزه‌ها تحت تاثیر میزان فشار آب عبوری از درزه قرار دارد و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

کوچک‌ترین اختلال در پمپاژ آب (مانند هواگرفتن پمپ) سبب تغییر در مقدار دبی عبوری آب می‌شود.

برای مقایسهٔ مقدار بازشدگی نهایی درزه‌ها در روش‌های نظری و تجربی، در محاسبات مربوط به روش نظری مقادیر pH، بازشدگی اولیه و مدت زمان انحلال مشابه با مقادیر آن‌ها در روش تجربی در نظر گرفته شد. مقدار تغییرات بازشدگی درزه‌ها با استفاده از روش نظری اندازه‌گیری شده است. برای این منظور داده‌های مورد نیاز برای محاسبات نظری در pH= ۷/۲ استخراج گردید (جدول ۳). در نهایت با استفاده از این داده‌ها مقدار بازشدگی درزه‌ها پس از مدت زمانی برابر ۷ روز پیش بینی گردید (جدول ۳). چنان‌که نتایج نشان می‌دهد، میزان بازشدگی پیش‌بینی شده برای درزه‌ها به‌وسیلهٔ رابطهٔ (۱۳) نسبت به‌روش تغییرات آب‌گذری درزه‌ها، انطباق بیش‌تری با مقدار اندازه‌گیری شده به روش مستقیم دارد.

معمولاً سازه‌های مهندسی برای مدت زمان معینی طراحی می‌شوند و بهره‌برداری بهینه در این مدت زمان، مد نظر مهندسین طراح است. به‌طور معمول عمر مفید سازه‌های مهندسی با توجه به‌نحوهٔ نگه‌داری و استفاده، ۵۰ تا ۱۰۰ سال تعیین می‌گردد و انتظار می‌رود سازهٔ مورد نظر تا پایان این مدت کارائی لازم را داشته باشد [۱٤]. پژوهش‌گران در گذشته برای ارزیابی گسترش درزه‌ها در مدت زمان معین، نحوهٔ گسترش درزه‌ها را با گذشت زمان به‌صورت خطی در نظر می‌گرفتند. این درحالی‌است که گسترش بازشدگی درزه‌ها در طول زمان دارای روند غیرخطی است. به‌همین دلیل در این پژوهش برای پیش‌بینی گسترش درزه‌ها برای دورهٔ زمانی معین از روابط ارائه شده توسط ماگمدوف استفاده شده است.

در برداشت‌های صحرایی از منطقهٔ بررسی شده، میانگین بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها حدود ۰/۵ سانتی‌متر برآورد شد. مقدار pH آب منطقه نیز حدود ۷/۸ است. با استفاده از این مقادیر و هم‌چنین داده‌های موجود در جدول ٤، مدت زمانی که طول می‌کشد تا درزه‌ها به بازشدگی حدود ۱۰ سانتی‌متر (بازشدگی بحرانی) برسند، برابر با ۲۷۸ روز محاسبه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

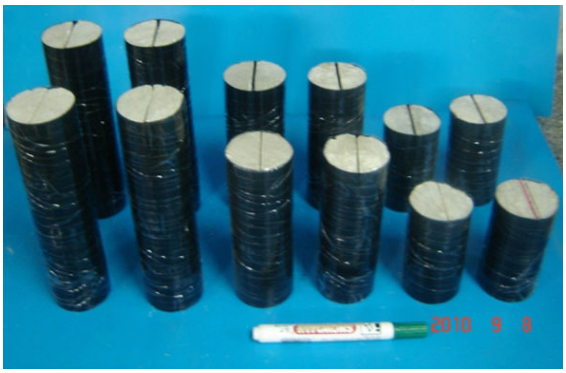
جدول ۲. نتایج تجربی اندازه‌گیری دبی عبوری از درزه‌های ایجاد شده در نمونه‌ها و میزان گسترش درزه‌ها

شمارهٔ نمونه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
طول نمونه (میلی‌متر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
بازشدگی اولیهٔ درزه (میلی‌متر)	۱	۱	۳	۳	۱	۱	۳	۳	۱	۱	۳	۳
زمان از شروع آزمایش (روز)	میزان آبگذری ($Q_{average}$) (cm^3/s)											
۰	۳۷	۲۵	٤۸	٤۸	٤٤	٥۱	۲۲	۲۸	٤۲/٥	۲۰	٥۰	۳۰
۱	۳۷/۲	۲٦/٥	٥۱	٤۹	٤۸	٥۱/۲	۲۸	۳۱	٤۹	۲۱	٥۰/٥	۳۳
۲	۳۸	۲٦	٥٦	٥۰	٥۲	٥۲	۳۱	۳۳	٥۸	۲۲	٥۱	۳٥
۳	٤۰	۳۰	٦٦	٥٦	۷۲	٥٥	٤٥	٤٤	٦۰	۲۸	٦۰	۳۸
٤	٤۹	٤٦	۷۱	٦۸	۷۸	٦۸	٤۹	٤٦	٦٦	۲۹	٦٥	٤۰
٥	٥۰	٤۷	۷۲	۷۳	۸۰	۷۰	٥۰	٤۸	٦۸	۳۰	٦۷	٤۳
٦	٥۲	٤۸	۷۳	۷٤	۸۲	۷۱	٥۱	٥۰	۷۰	۳۳	۷۰	٤٥
۷	٥۳	٥۰	۷٥	۷٦	۸۳	۷۳	٥۲	٥۱	۷۲	۳٥	۷۱	٤۷
$\Delta Q/Q_0$	۰/٤۳	۱	۰/٥٦	۰/٥۸	۰/۸۸	۰/٤۳	۱/۳٦	۰/۸۲	۰/٦۹	۰/۷٥	۰/٤۲	۰/٥٦
Δe(mm)	۰/۱٤	۰/۳۳	۰/٥٦	۰/٥۸	۰/۲۹	۰/۱٤	۱/۳٦	۰/۸۲	۰/۲۳	۰/۲٥	۰/٤۲	۰/٥٦
بازشدگی نهایی به روش تغییرات آب‌گذری درزه‌ها δ_{max}(mm)	۱/۱٤	۱/۳۳	۳/٥٦	۳/٥۸	۱/۲۹	۱/۱٤	٤/۳٦	۳/۸۲	۱/۲۳	۱/۲٥	۳/٤۲	۳/٥٦
بازشدگی نهایی به روش مستقیم (mm)	۳/۹	٥/۲	٦/۷	٦/۸۳	۳/۷	۳/٦۳	٦/٥	٥/۳۷	۳/۲۳	٤/۰٦	٤/۹	٥/٥

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

الف)



ب)



شکل ٤. الف) نمونه‌های استفاده شده قبل از انجام آزمایش، ب) نمونه‌های استفاده شده بعد از انجام آزمایش

جدول ۳. نتایج مربوط به پیش‌بینی گسترش درزه‌ها با استفاده از روش نظری

pH	بازشدگی اولیهٔ δ_0 (میلی‌متر)	ثابت سرعت انحلال K (سانتی‌متر بر ثانیه)	غلظت اشباع C_s (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	زمان t (ثانیه)	میزان خلوص ζ	دانسیته ρ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بازشدگی نهایی δ_x (میلی‌متر)
۷/۲	۱	$۰/۲٤ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/٦۷ \times ۱۰^{-۳}$	٦۹۱۲۰۰	۰/۷٤	۲/۲	٦/٤
۷/۲	۳	$۰/۲٤ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/٦۷ \times ۱۰^{-۳}$	٦۹۱۲۰۰	۰/۷٤	۲/۲	۸/٤

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

جدول ٤. نتایج مربوط به پیش‌بینی مدت زمان لازم برای رسیدن بازشدگی درزه‌ها به عرض ۱۰ سانتی‌متر (برای طول واحد با استفاده از روش نظری)

pH	بازشدگی اولیه δ_0 (سانتی‌متر)	ثابت سرعت انحلال K (سانتی‌متر بر ثانیه)	غلظت اشباع C_s (گرم بر سانتی‌متر	بازشدگی بحرانی δ_x (سانتی‌متر)	میزان خلوص (ζ)	دانسیته ρ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مدت زمان رسیدن به بازشدگی بحرانی t
۷/۸	۰/۵	۰/۲٤ × ۱۰$^{-۳}$	۲/٦۷ × ۱۰$^{-۳}$	۱۰	۰/۷٤	۲/۲	۲۷۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها در نمونه‌های ژیپسیت سازند گچساران بر اثر پدیده انحلال به‌روش‌های نظری و تجربی مقایسه و این نتایج به اختصار حاصل شده است:

– در نمونه‌هایی با بازشدگی دهانهٔ درزه ثابت و طول بزرگ‌تر، میزان درصد آب‌گذری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های با طول کم‌تر در مدت زمان مشابه، کاهش نشان می‌دهد. این امر توسط اندازه‌گیری‌های مستقیم نیز تأیید می‌شود. علت این امر افزایش طول اشباع (X) و زمان اشباع (t) است به‌طوری‌که هر چه طول اشباع افزایش یابد میزان انحلال $(C_s\text{-}C)$ کم‌تر شده و در نتیجه مقدار بازشدگی نهایی کاهش می‌یابد.

– میزان بازشدگی پیش‌بینی شده برای درزه‌ها به‌وسیلهٔ روش نظری نسبت به‌روش تغییرات آب‌گذری درزه‌ها، با مقدار اندازه‌گیری شده به‌روش مستقیم انطباق بیش‌تری دارد. هم‌چنین بازشدگی دهانهٔ درزه‌ها در روش نظری، مقادیر زیادتری را نسبت به دو روش دیگر نشان می‌دهد (حدود ۱/۵ برابر بیش‌تر از روش اندازه‌گیری مستقیم و حدود ۳ تا ۵ برابر بیش‌تر از روش تغییرات آب‌گذری درزه‌ها).

– نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که اگر درزه‌های موجود در ژیپیست‌های محل مخزن سد در مجاورت تراوش آب قرارگیرند، به‌سرعت عریض شده و موجب ایجاد غارهای انحلالی خواهند شد.

– با افزایش میزان بازشدگی اولیه درزه‌ها میزان خطای رابطه در پیش‌بینی مقدار بازشدگی نهایی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

– بررسی‌های انجام شده نشان‌دهندهٔ این مطلب است که چنان‌چه ژیپسیت‌های واقع در مخزن پس از آب‌گیری سد در مجاورت جریان آب قرار گیرند، مقدار بازشدگی درزه‌ای با دهانهٔ اولیه ۰/۵ سانتی‌متر پس از مدت زمان حدود ۲۷۸ روز به ۱۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. این افزایش چشم‌گیر در مدت زمان ناچیز در مقایسه با عمر مفید سد توجه ویژه به موضوع آب‌بندی مخزن سد را الزامی می‌کند.

– نتایج به‌دست آمده از روش نظری برای نمونه‌هایی از توده سنگ‌های ژیپسی قابل قبول است که درجهٔ همگنی بالایی داشته باشند. طبیعتاً اگر نمونه‌های تودهٔ سنگی دارای رگه‌هایی از ژیپس باشند، تمرکز جریان آب از محل رگه‌ها باعث انحلال بیش‌تری در این نواحی می گردد. بنا بر این استفاده از روابط ذکر شده در این پژوهش برای چنین سنگ‌هایی توصیه نمی‌گردد.

منابع

1. Raeisi E., Aghdam J., Zare M, Karimi H., "Study of karst development and possible leakage from the Sazbon Dam", Iran. In: Proceeding of 14th international congress of speleology, Athens (2005).
2. James A. N., Kirkpatrick I. M., "Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils", Quaterly Journal of Engineering Geology 13 (1980) 189-198.
3. James A. N., Lupton A. R. R., "Gypsum and anhydrite in foundation of hydraulic structures", Geotechnique, 28 (1978) 249-272.
4. James A. N., "Soluble material in civil engineering", Ellis Horwood, NewYork (1992).
5. Guzina B., Saric M., Petrovic N., "Seepage and dissolution at foundations of a dam during the first impounding of the reservoir", Congres des Grandes Barages, Q66 Vienne, Austria, 1459 (1991).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]

6. Magomedov K. G., "Forecasting leaching in jointed gypsum-impregnated rocks at the base of the Irganai Hes Dam", Hydrotechnical Construction. Vol. 34, No. 7 (2000).

7. Mancebo-Piqueras J. A., Sanz-Pérez E., Menéndez-Pidal I., "Water seepage beneath dams on soluble evaporite deposits: a laboratory and field study (Caspe Dam, Spain)", Bulletin of Engineering Geology and the Environment DOI 10.1007/s10064-011-0379-2 (2011).

8. Romanov D., Gabrovsek F., Dreybrodt W., "Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam", Engineering Geology 70 (2003) 17-35.

9. Wuzhou H., "A study on the formation of Triassic ‘‘gypsum dissolved-strata’’ in Guizhou province and the seepage prevention for reservoirs", in Proceedings of the IAH 21 Congress. Geological Publishing House, Beijing 1117 (1988).

۱۰. شرکت‌های مهندسین مشاور تهران سحاب– پاراب فارس.، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه سد و تاسیسات وابسته به بدنه سد چم‌شیر*، مطالعات مرحله اول طرح (۱۳۷۷).

۱۱. درویش زاده، ع.، *زمین‌شناسی ایران*، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۵).

12. Setudehnia A., OB-Perry, G. T., "Geological map of Gachsaran", Iranian Oil Operating Companies (IOOC) 1,100,000 (1966).

۱۳. قبادی، م. ح.، *مطالعهٔ پدیده انحلالپذیری و تزریق در توده سنگ‌های آهکی لار*، پایانامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳٦٦).

۱٤. دوستی، م.، *ارزیابی اثر جریان (افقی، قائم) و تغییرات اسیدیته آب در بازشدگی درزه‌های سنگ‌های آهکی (مطالعه موردی)*، ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۸).

۱۵. ترابی کاوه، م.، *مطالعه انحلال‌پذیری سنگ‌های تبخیری سازند گچساران در محل سد چم‌شیر*، پایان نامهٔکارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان (۱۳۸۹).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.4.1]