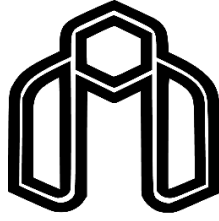


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده علوم زمین

کارشناسی ارشد رشته آبخشناسی

عنوان:

شبیه‌سازی انحلال سنگ‌های کربناته ساختگاه سد کارون ۴
با استفاده از مدل تخلخل دوگانه و انحلالی

نگارش:

شادی حاتم‌زاده

اساتید راهنما:

دکتر جواد اشجاری

دکتر غلامحسین کرمی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۸

تقدیم

ماحصل آموختہ ٹیم را تقدیم می‌کنم بہ خانوادہ ام، بہ آمان کہ مہر آسمانی شان، آرام، بخش آلام زمینی ام است
کہ ہرچہ آموختہ ام در مکتب عشق شا آموختہ ام و ہرچہ بگو شتم تو انم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانان را پاس گویم.

امروز، مستی ام بہ امید شاست و فردا کلید باغ بہ شتم رضای شا

حاصل نامی تلاشم را صمیمانہ تقدیم بہ وجود ارز شمنندان می‌کنم

سپاس

در ابتدا محبت های بی دریغ والدینم را سپاس می دارم که بودنشان تاج افتخاری ست بر سرم و نشان دلیلی است بر وجودم،

چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایع، هستی ام بوده اند و برایم زندگی و انسان بودن را معنا کرده اند.

بسی شایسته است از زحمات استاد راهنمای بزرگوارم جناب دکتر غلامحسین کرمی که در اساتذت تعلیم و تربیت و توسعه علم و دانش

اینجانب از بیچ زحمتی دریغ نکرده اند و بارهمنی های ایشان طی طریق آساتر شد کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

نهایت سپاس و قدردانی خود را از آقای دکتر جوادی شجاری دارم که تا محطت پایانی و تدوین و تنظیم این پژوهش زحمات

بی شائبه ای را متحمل شده اند و انجام این کار بدون راهنمایی های ایشان ناممکن بود.

همچنین از زحمات دلسوزانه اساتید بزرگوار و محترم گروه زمین شناسی به ویژه جناب آقای دکتر جعفری و دکتر باقری که همواره از

راهنمایی های بی دریغشان بهره برده ام نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

با آرزوی سرفرازی و کامیابی برای همه ی این بزرگواران امیدوارم که این بخشش، محبت و بزرگواری را به بهترین شکل

ممکن به جامعه و ایشان جواب گو باشم.

شادی حاتم زاده

تیر ۱۳۹۸

تعمدنامه

اینجانب شادی حاتم‌زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی/آب‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه شبیه‌سازی انحلال سنگ‌های کربناته ساختگاه سد کارون ۴ با استفاده از مدل تخلخل دوگانه و انحلالی تحت راهنمایی دکتر جواد اشجاری و دکتر غلامحسین کرمی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در هنگام احداث و بهره‌برداری سدها حائز اهمیت است مشکل فرار آب از تکیه‌گاه‌ها و پی آن‌ها می‌باشد که به طور معمول از پرده تزریق برای ممانعت یا تقلیل آن استفاده می‌شود. از آنجا که لایه‌های آهکی قابلیت انحلال نسبتاً بالایی را شامل می‌شوند، این امکان وجود دارد که با گذشت زمان مجاری قبلی یا باقی‌مانده از تزریق پرده توسعه یابند. در سدهای احداث شده در گستره‌های کارستی به دلیل حضور دو سیستم مجرایی و ماتریکس، مکانیسم حرکت آب زیرزمینی و نشت پیچیده می‌باشد. سد کارون ۴ بر روی رودخانه کارون در یک گستره کارستی احداث شده است ابتدا پارامترهای هیدرولیکی محیط ماتریکسی آبخوان در نرم افزار MODFLOW مشخص گردید. بدین منظور از داده‌های تراز آب زیرزمینی قبل و بعد از احداث سد، لاگ‌های حفاری، نتایج پرده تزریق، هندسه آبخوان در محل تکیه‌گاه‌ها و اطلاعات دیگر اقدام بده شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی شده است. برای مدل کردن از نرم‌افزار تخلخل دوگانه انحلالی CAVE استفاده شده است. مدل مورد استفاده تخلخل دوگانه به صورت المان محدود بوده، که جریان ماتریکس بر اساس رابطه دارسی و جریان در محیط مجرایی بر اساس روابط جریان‌های آشفته شبیه‌سازی می‌گردد. کالیبراسیون و صحت‌سنجی با در نظر گرفتن تراز سطح گمانه‌ها در حالت پایدار، ناپایدار و هنگام آب‌گیری سد، انجام شده در مرحله بعد با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی حاکم بر منطقه و اعمال شرایط موجود در محل سد برای بازه زمانی ۱۰۰ ساله رفتار آبخوان ارزیابی شد. با اعمال شرایط موجود و پیشنهادی در محل سد نفوذپذیری پرده تاثیر بسزایی در آب‌بندی و توسعه مجاری دارد. توسعه مجاری در یک آبخوان به صورت غیریکنواخت صورت می‌گیرد و مجراهای نزدیک به پرده تزریق بیشترین توسعه را دارند، و همچنین احتمال فرار آب از پی سد در آینده سد کارون ۴ به دلیل انحلال مجاری وجود دارد.

کلمه‌های کلیدی: کارست، فرار آب، مدل، MODFLOW، CAVE، سد کارون ۴

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق ۱

۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه ۳

۳-۱- آب و هوای منطقه ۴

۴-۱- زمین‌شناسی منطقه ۴

۱-۴-۱- چینه‌شناسی منطقه ۵

۲-۴-۱- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه ۱۲

۴-۲-۱- اثر گسلها در جناح چپ ساختگاه سد کارون ۴ ۱۴

۴-۲-۲- کارست و نفوذپذیری سازندها ۱۶

۴-۲-۳- وضعیت آبدهی چشمه‌های دره منج و پایین‌دست ۱۷

۵-۱- ژئومورفولوژی منطقه ۱۸

۶-۱- هیدرولوژی منطقه ۱۸

۷-۱- هیدروژئولوژی منطقه ۱۹

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین درباره شبیه‌سازی انحلال در کارست ۲۱

۱-۲- انحلال‌پذیری سنگ‌های کارستی ۲۱

۲-۲- تاثیر عوامل اقلیمی بر توسعه کارست ۲۲

۲-۲-۱- تاثیر بارندگی ۲۳

۲-۲-۲- اثر دما ۲۳

- ۲۴ ۳-۲-۲- تاثیر فشار جزئی کربن دی اکسید
- ۲۴ ۴-۲-۲- توپوگرافی
- ۲۵ ۳-۲- انحلال در کارست
- ۳۱ ۴-۲- سیستم های جریان در کارست
- ۳۴ ۵-۲- مطالعات انجام شده در خصوص شبیه سازی انحلال در کارست
- ۳۷ ۶-۲- مطالعات انجام شده شبیه سازی انحلال کارست در مجاورت مخازن سدها
- ۳۹ ۷-۲- ضرورت بررسی نشت و فرار آب
- ۴۱ ۱-۷-۲- شواهد زمین شناسی پدیده نشت
- ۴۱ ۸-۲- تأثیر ناپیوستگی ها بر نفوذ پذیری سنگ

فصل سوم: روش انجام کار ۴۵

- ۴۵ ۱-۳- تئوری شبیه سازی انحلال در آبخوان های کارستی
- ۴۶ ۱-۱-۳- معرفی شبیه سازی انحلال در کارست
- ۴۷ ۲-۱-۳- روش های مختلف شبیه سازی انحلال
- ۴۷ ۱-۲-۱-۳- مدل پارامترهای یکجا- روش های جهانی
- ۴۸ ۲-۲-۱-۳- مدل پارامترهای توزیع شده
- ۴۹ ۲-۳- روش انجام کار
- ۴۹ ۱-۲-۳- داده های مورد استفاده
- ۵۰ ۱-۱-۲-۳- ورودی به مدول جریان پیوسته متخلخل
- ۵۱ ۲-۱-۲-۳- ورودی به مدول شبکه لوله
- ۵۴ ۳-۱-۲-۳- ارتباط بین محیط ماتریکسی و مجاری بزرگ
- ۵۵ ۴-۱-۲-۳- ورودی مدول انحلال کربنات
- ۵۶ ۲-۲-۳- سیستم انحلال کلسیت

۳-۲-۳- روش‌های شبیه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق ۶۰

فصل چهارم: نتایج و بحث ۶۱

۱-۴- شبیه‌سازی در شرایط اولیه مدل ۶۱

۱-۱-۴- تعیین هندسه و شبکه‌بندی مکانی محدوده ۶۱

۲-۱-۴- انتخاب دوره‌ی زمانی ۶۳

۳-۱-۴- منبع تغذیه و تخلیه آبخوان ۶۴

۴-۱-۴- هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره ۶۴

۵-۱-۴- پرده‌ی آب‌بند ۶۹

۶-۱-۴- واسنجی مدل در شرایط قبل از آب‌گیری ۶۹

۲-۴- شبیه‌سازی مدل در شرایط بعد از آب‌گیری ۷۰

۱-۲-۴- واسنجی مدل در شرایط بعد از آب‌گیری ۷۲

۳-۴- آنالیز حساسیت ۷۶

۴-۴- خصوصیات شیمیایی و پارامترهای در نظر گرفته شده ۷۷

۵-۴- معرفی سناریوها ۸۰

۱-۵-۴- سناریوی اول: بررسی توسعه کارست در طول عمر مفید سد ۸۰

۱-۱-۵-۴- بررسی تغییرات حجم فرار آب در طول عمر مفید سد کارون ۴ ۸۴

۲-۱-۵-۴- بررسی تغییرات بیلان جرمی در طول عمر مفید سد کارون ۴ ۸۸

۳-۱-۵-۴- بررسی شبکه‌بندی عمودی لوله‌ها ۹۰

۲-۵-۴- سناریو دوم: بررسی رفتار انحلالی هر گسل با فرض آب‌بند شدن سایر گسل‌ها ۹۲

۱-۲-۵-۴- گسل ۱۳ ۹۳

۲-۲-۵-۴- گسل ۱۵ ۹۵

۳-۲-۵-۴- گسل ۲ ۹۷

- ۹۹ ۴-۲-۵-۴ - گسل ۳
- ۱۰۰ ۴-۲-۵-۴ - گسل ۴
- ۱۰۲ ۴-۲-۵-۶ - گسل ۱۱
- ۱۰۳ ۴-۲-۵-۷ - گسل ۶ و ۷
- ۱۰۵ ۴-۲-۵-۸ - بررسی رفتار پیزومترها در پایین دست سد
- ۱۰۵ ۴-۵-۳ - سناریوی سوم: تأثیر PCO_2 بر انحلال پذیری مجاری
- ۱۰۷ ۴-۵-۴ - سناریوی چهارم: بررسی نقش پتانسیل آبندی پرده تزریق در میزان توسعه مجاری

۱۱۱ فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۱۱ ۵-۱ - نتیجه گیری
- ۱۱۲ ۵-۱-۱ - انحلال متفاوت مجاری در طول زمان
- ۱۱۲ ۵-۱-۲ - توسعه متفاوت لوله های عمودی
- ۱۱۲ ۵-۱-۳ - موقعیت کمترین و بیشترین انحلال مجاری
- ۱۱۳ ۵-۱-۴ - بررسی بیان حجمی و جرمی در طول ۱۰۰ سال
- ۱۱۳ ۵-۱-۵ - رفتار انحلالی گسل های ۲، ۳، ۶، ۱۱
- ۱۱۴ ۵-۱-۶ - بررسی تغییرات PCO_2
- ۱۱۴ ۵-۲ - پیشنهادات
- ۱۱۵ منابع مورد استفاده

فهرست شکل ها:

- شکل ۱-۱- محل قرارگیری سد کارون ۴..... ۳
- شکل ۲-۱- نمودار آمپروترمیک منطقه سد کارون ۴..... ۴
- شکل ۳-۱- گسترش و تغییرات رخساره‌ای سازندها در محدوده‌ی مطالعاتی (مه‌اب قدس ۱۳۹۱)..... ۵
- شکل ۴-۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ۱۱
- شکل ۵-۱- موقعیت بعضی از شکستگی‌های مهم در تکیه‌گاه چپ سد (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)..... ۱۴
- شکل ۶-۱- موقعیت بعضی از شکستگی‌های مهم در تکیه‌گاه راست سد (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)..... ۱۴
- شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از فرآیندهای توسعه کارست (Liedl et al.2003)..... ۲۶
- شکل ۲-۲- مدل مفهومی توسعه سیستم کارست (Clemens et al.1996)..... ۲۷
- شکل ۳-۲- شیمی CAVE که در یک سلول و لوله نشان داده شده که آب از طریق تغذیه، سامانه مجاری بزرگ بالادست و جریان تبدالی با غلظت‌های متناظر C_C ، C_{ex} که به صورت آبی ترکیب می‌شوند و با غلظت ورودی C_i به یک لوله مجاری بزرگی داده می‌شود، غلظت ممکن در طول پروفیل لوله نشان داده شده است، که C_s غلظت تعویضی از سینتیک‌های مرتبه اول به بالاتر و C_{eq} غلظت اشباع کلسیت است (Bauer and Liedl 2003)..... ۳۰
- شکل ۴-۲- دوگانگی سامانه‌های کارستی و نحوه اعمال آنها در مدل..... ۳۴
- شکل ۵-۲- شکل ناپیوستگی. الف: اندازه‌ی شکاف واقعی و متغیر (راست) ب: اندازه‌ی شکاف معادل و ثابت (چپ) (Barton & Bandish, 1987)..... ۴۲
- شکل ۱-۳- مقدمه‌ای از رویکرد مدل عددی (Teutsch and Sauter, 1991)..... ۴۸
- شکل ۲-۳- دو مدل مفهومی سیستم افشان و مجرا و بزرگ‌شدگی لوله بر اثر انحلال در دو زمان مختلف (Clemens et al.1996)..... ۵۰
- شکل ۳-۳- نمودار عدد رینولدز و تغییرات جریان (Hornberger et al. 1998)..... ۵۲
- شکل ۴-۳- هیدرولیک CAVE (Bauer and Liedl 2003)..... ۵۳
- شکل ۱-۴- موقعیت مرزها، چاه‌های مشاهده‌ای و رودخانه در لایه ۶..... ۶۲
- شکل ۲-۴- نمودار تغییرات تراز مخزن از ابتدای آبیگیری (مه‌اب قدس ۱۳۹۱)..... ۶۳

- شکل ۳-۴- میزان بارندگی در طی دوره‌ی مدل‌سازی..... ۶۴
- شکل ۴-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه اول..... ۶۵
- شکل ۵-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه دوم..... ۶۵
- شکل ۶-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه سوم..... ۶۶
- شکل ۷-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه چهارم..... ۶۶
- شکل ۸-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه پنجم..... ۶۶
- شکل ۹-۴- زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه ۶ و ۷..... ۶۶
- شکل ۱۰-۴- زون ضریب ذخیره در لایه اول..... ۶۶
- شکل ۱۱-۴- زون ضریب ذخیره در لایه دوم..... ۶۶
- شکل ۱۲-۴- زون‌های ضریب ذخیره در لایه سوم..... ۶۷
- شکل ۱۳-۴- زون‌های ضریب ذخیره در لایه چهارم..... ۶۷
- شکل ۱۴-۴- زون‌های ضریب ذخیره در لایه پنجم..... ۶۷
- شکل ۱۵-۴- زون‌های ضریب ذخیره در لایه ششم..... ۶۷
- شکل ۱۶-۴- نتایج سطح آب حاصل از واسنجی مدل..... ۷۰
- شکل ۱۷-۴- موقعیت لوله‌ها در لایه پنجم..... ۷۱
- شکل ۱۸-۴- تغییرات سطح آب در پیژومتر LG3 SP 5۰..... ۷۴
- شکل ۱۹-۴- تغییرات سطح آب در پیژومتر LG3 SP 1۰۰..... ۷۵
- شکل ۲۰-۴- تغییرات سطح آب در پیژومتر RG4 SP 2۵۰..... ۷۵
- شکل ۲۱-۴- تغییرات سطح آب در پیژومتر LG5 170..... ۷۵
- شکل ۲۲-۴- تغییرات سطح آب در پیژومتر LG5 100..... ۷۶
- شکل ۲۳-۴- آنالیز حساسیت هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره..... ۷۷
- شکل ۲۴-۴- رشد قطر مجاری گسل ۱۳ با گذشت زمان برای لوله انتخابی ۴۳..... ۸۱
- شکل ۲۵-۴- رشد قطر مجاری گسل ۱۵ با گذشت زمان برای ۳ لوله انتخابی..... ۸۱
- شکل ۲۶-۴- رشد قطر مجاری گسل ۳ با گذشت زمان برای ۳ لوله انتخابی..... ۸۲
- شکل ۲۷-۴- محدوده تغییرات داده‌ها..... ۸۴

- شکل ۴-۲۸- آب آزاد شده از ذخیره (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب) ۸۵
- شکل ۴-۲۹- ورودی آب از مرز (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب) ۸۵
- شکل ۴-۳۰- تغذیه (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)..... ۸۶
- شکل ۴-۳۱- آب ورودی از کاندویت‌ها (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)..... ۸۶
- شکل ۴-۳۲- مجموع کل ورودی (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب) ۸۶
- شکل ۴-۳۳- آب ذخیره شده در سیستم (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)..... ۸۷
- شکل ۴-۳۴- خروجی آب از مرزها (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)..... ۸۷
- شکل ۴-۳۵- خروجی آب از مجاری (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)..... ۸۷
- شکل ۴-۳۶- میزان کلسیم حل شده توسط تغذیه با گذشت زمان (واحدها بر حسب مول)..... ۸۹
- شکل ۴-۳۷- میزان کلسیم انحلال یافته در ماتریکس (واحدها بر حسب مول)..... ۸۹
- شکل ۴-۳۸- میزان کلسیم حل شده توسط جریان ورودی (واحدها بر حسب مول)..... ۸۹
- شکل ۴-۳۹- میزان کلسیم خروجی از مرزها (واحدها بر حسب مول)..... ۹۰
- شکل ۴-۴۰- میزان کلسیم خروجی از ماتریکس (واحدها بر حسب مول) ۹۰
- شکل ۴-۴۱- بررسی انحلال لوله‌های عمودی ۲۷۳ و افقی ۲۸۷ در گسل ۳..... ۹۱
- شکل ۴-۴۲- اصول اختلاط خوردگی در محلول اشباع در سیستم های CO₂ و H₂S (Ford 2007) ۹۲
- شکل ۴-۴۳- موقعیت گسل ۳ در محدوده مورد مطالعه و لوله‌های ۱، ۴، ۸، ۱۳ ۹۳
- شکل ۴-۴۴- تغییرات قطر لوله ۱ از گسل ۱۳ در طول عمر مفید سد با بیشترین انحلال..... ۹۴
- شکل ۴-۴۵- تغییرات قطر لوله ۳۱ از گسل ۱۳ در طول عمر مفید سد با بیشترین انحلال..... ۹۴
- شکل ۴-۴۶- تغییرات قطر لوله‌های ۴، ۸، ۱۳..... ۹۵
- شکل ۴-۴۷- موقعیت گسل ۱۵ در محدوده مورد مطالعه و لوله‌های ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۷۹، ۸۱، ۹۲..... ۹۶
- شکل ۴-۴۸- تغییرات قطر لوله‌های ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۷۹..... ۹۶
- شکل ۴-۴۹- تغییرات قطر لوله‌های ۸۱، ۹۲..... ۹۷
- شکل ۴-۵۰- موقعیت گسل ۲ و لوله‌های ۱۸۳، ۱۸۵، ۱۸۷..... ۹۸
- شکل ۴-۵۱- تغییرات قطر لوله‌های ۱۸۳، ۱۸۵، ۱۸۷..... ۹۸
- شکل ۴-۵۲- موقعیت گسل ۳ و لوله‌های ۲۲۳، ۲۲۴، ۲۲۵، ۲۲۷، ۲۲۸، ۲۲۹، ۲۳۱، ۲۳۳..... ۹۹

- شکل ۴-۵۳- تغییرات قطر لوله‌های ۲۳۳، ۲۳۱، ۲۲۹، ۲۲۸ ۱۰۰
- شکل ۴-۵۴- تغییرات قطر لوله‌های ۲۲۷، ۲۲۵، ۲۲۴، ۲۲۳ ۱۰۰
- شکل ۴-۵۵- موقعیت گسل ۴ و لوله‌های ۲۹۹، ۲۹۶، ۲۹۵، ۲۹۳، ۲۹۰ ۱۰۱
- شکل ۴-۵۶- تغییرات قطر لوله‌های ۲۹۹، ۲۹۶، ۲۹۵، ۲۹۳، ۲۹۰ ۱۰۱
- شکل ۴-۵۷- موقعیت گسل ۱۱ و لوله‌های ۳۵۲، ۳۵۵، ۳۵۸، ۳۶۰ ۱۰۲
- شکل ۴-۵۸- خط تقسیم رودخانه ۱۰۲
- شکل ۴-۵۹- تغییرات قطر لوله‌های ۳۵۲، ۳۵۶ ۱۰۳
- شکل ۴-۶۰- موقعیت گسل‌های ۶ و ۷، لوله‌های ۴۰۴، ۴۰۹، ۴۱۱، ۴۵۰، ۴۵۲ ۱۰۳
- شکل ۴-۶۱- تغییرات انحلال لوله‌های ۴۰۷، ۴۰۹، ۴۱۱ در گسل ۶ ۱۰۴
- شکل ۴-۶۲- تغییرات انحلال لوله‌های ۴۵۰ و ۴۵۲ در گسل ۷ ۱۰۴
- شکل ۴-۶۳- سطح آب پیزومترها در سناریو مرجع و گسل‌ها ۱۰۵
- شکل ۴-۶۴- تغییرات قطر لوله ۹۱ در گسل ۱۵ با افزایش PCO_2 ۱۰۶
- شکل ۴-۶۵- تغییرات قطر لوله ۲۷۸ از گسل ۳ با افزایش PCO_2 ۱۰۶
- شکل ۴-۶۶- تغییرات قطر لوله ۴۵۱ از گسل ۷ با افزایش PCO_2 ۱۰۶
- شکل ۴-۶۷- تغییرات انحلال لوله ۲۹۰ با میزان آب‌بندی‌های متفاوت پرده تزریق ۱۰۸
- شکل ۴-۶۸- تغییرات انحلال لوله ۴۵۲ با میزان آب‌بندی‌های متفاوت پرده تزریق ۱۰۸

فهرست جدول ها:

- جدول ۱-۱- سازندهای زمین‌شناسی در ناحیه طرح (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱) ۸
- جدول ۱-۲- توصیف زیر واحدهای واحد AS1، در محدوده‌ی ساختگاه سد (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱) ۱۰
- جدول ۱-۳- دبی چشمه‌های موجود در منطقه سد کارون ۴ بر حسب لیتر بر دقیقه (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱) ۱۷
- جدول ۴-۱- مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی ۶۵
- جدول ۴-۲- مقادیر هدایت هیدرولیکی ورودی مدل در زون‌های مختلف ۶۸
- جدول ۴-۳- مقادیر ضریب ذخیره (تخلخل موثر = n_e) و آبدهی ویژه و دیگر پارامترهای ورودی به مدل در ابتدای واسنجی مدل ۶۸
- جدول ۴-۴- نتایج مدل‌سازی در شرایط قبل از آب‌گیری ۷۰
- جدول ۴-۵- لوله‌ها و نودهای استفاده شده در شبیه‌سازی گسل‌های محدوده سد ۷۲
- جدول ۴-۶- تراز آب اندازه‌گیری شده در پیزومترها ۷۲
- جدول ۴-۷- هدایت هیدرولیکی در انتهای واسنجی مدل ۷۳
- جدول ۴-۸- ضریب ذخیره در انتهای شبیه‌سازی ۷۴
- جدول ۴-۹- پارامترهای ورودی به مدل ۷۹
- جدول ۴-۱۰- بیلان حجمی در سناریو اول در طول ۱۰۰ سال ۸۳
- جدول ۴-۱۱- بیلان جرمی (واحدها بر حسب مول) در ۱۰۰ سال ۸۳
- جدول ۴-۱۲- بیلان (واحدها بر حسب متر مکعب) در طول ۱۰۰ سال ۸۵
- جدول ۴-۱۳- بیلان جرمی کلسیم (بر حسب مول) ۸۸

فصل اول: مقدمه

با توجه به اهمیت مطالعه سازندهای کارستی در مسأله آب‌بندی سدها و گسترش روزافزون سازه‌های آبی در این سازندها و بررسی پتانسیل آب‌بندی این سازندها در قبل از احداث سدها و پس از آبرگیری پتانسیل مخازن لازم و ضروری است. پیدا کردن مسیرهای جریان آب در هر محیطی بسیار با ارزش و نقش بسزایی در ساخت و به‌سازی سازه‌ها در آن محیط‌ها دارد. با توجه به هزینه زیاد اکتشاف میدانی، در دهه‌های اخیر توجه مجامع علمی و صنعتی به این مهم به صورت مدل بیشتر شده است.

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

در حدود ۱۵ درصد از خشکی‌ها از سازندهای کارستی پوشیده شده است. در ایران سهم سازندهای کارستی حدوداً ۱۱ درصد از سطح زمین است (Raeisi and Kowsar 1997). در سنگ‌های کارستی نفوذ آب و حرکت آب زیرزمینی از طریق شکستگی‌ها باعث بزرگ شدن درزه‌ها و حفرات شده و در نتیجه آن فضای خالی و تخلخل ثانویه محیط در زمان نسبتاً کوتاهی در مقیاس زمین‌شناسی افزایش می‌یابد (Kaufmann and Romanov 2016). گستره‌های کارستی از دو محیط کاملاً مجزا تشکیل شده است، محیط اول از منافذ و درزه و شکاف‌های ریز تشکیل شده‌اند که حداکثر اندازه بازشدگی آنها به یک سانتی‌متر می‌رسد و به آن محیط ماتریکسی گفته می‌شود. در محیط دوم اندازه درزه و شکاف‌ها و حفرات انحلالی بیش از یک سانتی‌متر است و به آن محیط مجرا می‌گویند. وجود همین

دوگانگی باعث پیچیدگی شدیدی در رفتار آبخوان‌های کارستی شده است (White 1988, Karami ۲۰۰۲). محیط‌های کارستی به خاطر وجود تخلخل دوگانه و تغییرات شرایط آن‌ها در مکان‌های مختلف، دارای ناهمگنی شدیدی هستند (Ford and Williams 2007). کیفیت بالای آب‌های منابع کارستی و افزایش تقاضا برای آب به منظور استفاده‌های شرب و مصارف کشاورزی و صنعتی، دولت‌ها و سامانه‌های مدیریتی را ناچار به اجرای پروژه‌های سدسازی در نواحی کارستی کرده است. از طرفی به دلیل حجم زیاد آب و گرادیان بالا در نزدیکی ساختگاه سدها، پتانسیل فرآیند انحلال افزایش یافته در نتیجه افزایش نشت را در پی و تکیه‌گاه‌های سد خواهد داشت (Romanov et al. 2011, Hiller et al. 2003). در دو دهه اخیر برای شبیه‌سازی محیط‌های کارستی تلاش‌های قابل توجهی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های عددی مربوط به تکامل یا انحلال آبخوان‌های کارستی اشاره کرد که هم اکنون در کانون توجه مراکز پژوهشی به ویژه دانشگاه‌ها قرار گرفته است. در این مدل‌ها تلاش می‌شود ابتدا شرایط هیدرولیکی حاکم بر آبخوان کارستی شبیه‌سازی شده و سپس به بررسی نقش انحلال پرداخته شود.

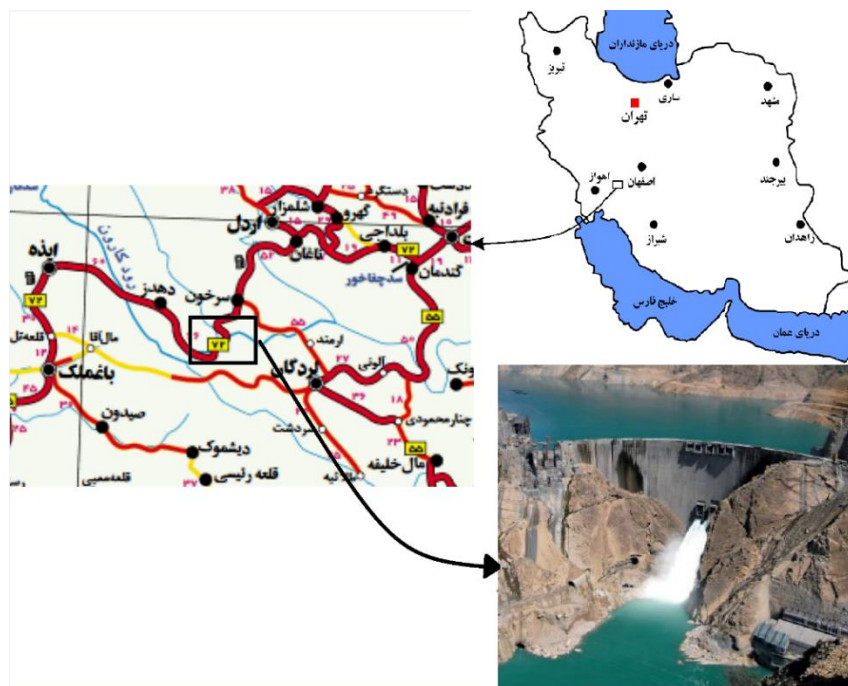
هدف از انجام تحقیق

با توجه به بررسی‌های انجام شده، سد کارون ۴، که دارای تکیه‌گاه کارستی می‌باشد با مسئله نشت و فرار آب از مخزن مواجه است. مسئله فرار آب در مناطق کارستی با توجه به توسعه درزه و شکاف‌ها و مجاری انحلالی دارای پتانسیل بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد. با توجه به گسترش قابل توجه این سازندها با ذخایر آبی مناسب در کشور و توسعه فعالیت‌های سدسازی در آن‌ها، بررسی و ارزیابی پتانسیل نشت و فرار آب از طریق دیواره‌های منتهی به دریاچه سد لازم و ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف اساسی از این تحقیق شبیه‌سازی انحلال در اطراف ساختگاه سد و پرده تزریق، بررسی

اثرات انحلال در طول عمر مفید سد و ارزیابی میزان فرار آب از تکیه‌گاه سد کارستی کارون ۴ می‌باشد.

۱-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه

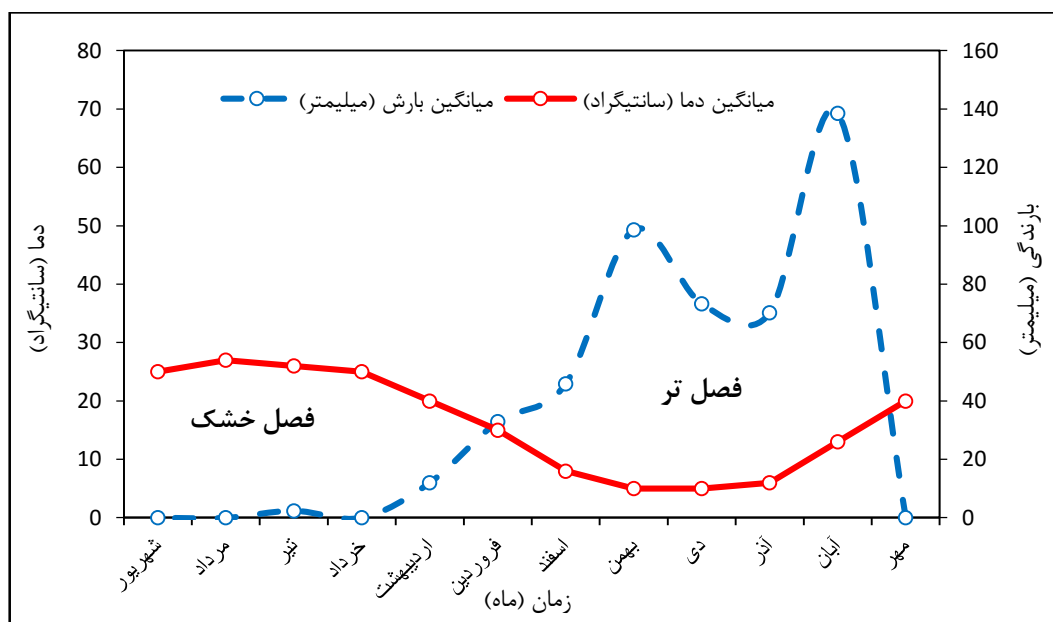
محدوده مورد مطالعه در کمربند کوه‌های زاگرس چین‌خورده بین عرض شمالی ۲۰-۳۱ تا ۴۰-۳۲ و طول شرقی ۳۳-۴۹ تا ۴۵-۵۱ قرار دارد که این کوه‌ها دارای روند شمال غرب-جنوب شرق می‌باشند. سد کارون ۴ در استان چهارمحال بختیاری، در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب و جنوب باختری اردل و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال باختری شهر لردگان قرار دارد مناسب‌ترین راه دسترسی به محل سد، جاده آسفالتی ایذه به شهرکرد می‌باشد که از ایذه تا محل سد حدود ۸۵ کیلومتر طول دارد، این جاده در مسیر خود از روستای دهدز می‌گذرد که تا محل سد ۲۸ کیلومتر فاصله دارد. همچنین از طریق دهدز به ایذه نیز سد قابل دسترسی است.



شکل ۱-۱- محل قرارگیری سد کارون ۴

۱-۳- آب و هوای منطقه

اقلیم حوضه آبخیز سد کارون ۴ در نقاط مختلف بین نیمه خشک سرد تا معتدل مرطوب طبقه‌بندی می‌شود. همچنین توده‌های هوایی که در حوضه آبخیز سد کارون ۴ موثر می‌باشند عبارتند از توده هوای دریایی حاره که بیشتر در زمستان در حوضه آبخیز سد کارون ۴ فعال می‌باشد و توده هوای قاره‌ای حاره که عموماً در تابستان در حوضه آبخیز سد کارون ۴ فعالیت دارد. همچنین توده هوای دریایی قطبی که بیشتر قسمت‌های شمالی حوضه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه نقشه امپروترمیک برای تعیین آب و هوای منطقه ترسیم شد. بر این اساس با توجه به شکل (۱-۲) از مهر تا فروردین فصل تر و بقیه ماه‌ها جز فصل خشک می‌باشند.

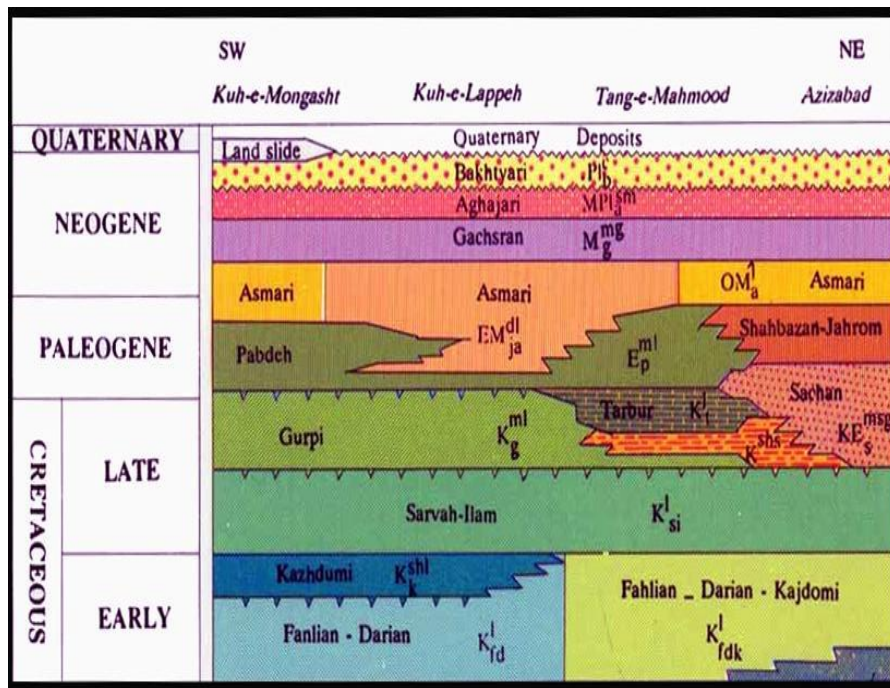


شکل ۱-۲- نمودار امپروترمیک منطقه سد کارون ۴

۱-۴- زمین‌شناسی منطقه

سد و نیروگاه کارون ۴ در کمر بند کوه‌های زاگرس چین‌خورده قرار دارد که این کوه‌ها دارای روند شمال غرب-جنوب شرق می‌باشند. عمده بستر مخزن بر روی مارن، سنگ آهک مارنی و سنگ آهک

کرتاسه تا میوسن قرار دارد. این منطقه در کناره شمالی حوضه زاگرس و در نزدیکی راندگی اصلی زاگرس قرار دارد. تغییرات شدید رخساره در اغلب سازندهای منطقه به ویژه در رسوبهای کرتاسه دیده می‌شود (شکل ۱-۳). در ذیل به تشریح سازندهای رخنمون یافته در منطقه پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۳- گسترش و تغییرات رخساره‌ای سازندها در محدوده‌ی مطالعاتی (مهتاب قدس ۱۳۹۱)

۱-۴-۱- چینه‌شناسی منطقه

در این ناحیه رسوباتی از دوره کرتاسه تا عهد حاضر وجود دارد. سازندهای موجود در ناحیه طرح به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از (جدول ۱-۱):

• سازند ایلام - سروک (Sv - II)

برونزدهای سازندهای ایلام و سروک همانند یکدیگرند و در روی زمین به سختی قابل جدایش هستند. این دو سازند شامل سنگ آهک‌های توده‌ای با میان لایه کرم، قهوه‌ای تا خاکستری همراه با لایه‌های نازک مارن‌های خاکستری تیره است. در کوه گر، در شمال محدوده مطالعاتی، بخش بالایی ایلام - سروک به رنگ کرم روشن است که به آهک‌های کنگلومرای خاکستری رنگ که دارای قلوه‌هایی از ۵

تا ۱۰ سانتی‌متر از خود یا از سازندهای قدیمی‌تر و گاه چرت، تبدیل می‌شود. بر روی این سازند، سازند آواری ساچون به گونه ناپیوسته قرار می‌گیرد. بخش پایینی آن آهک‌های قهوه‌ای تا خاکستری رنگ است و از سازندهای زیرین با شواهد فسیلی جدا می‌شود. در کوه منگشت در جنوب محدوده مطالعاتی بخش پایینی سازند ایلام سروک از کربنات‌های کرم رنگ تشکیل شده است که به سادگی از سازند کژدمی جدا می‌شود و به سمت بخش بالایی سازند به آهک‌های قهوه‌ای تا خاکستری تبدیل می‌شود. این سازند در زیر مارن‌های گورپی قرار دارد. ضخامت سازند ایلام - سروک ۷۰۰ متر و سن آن کرتاسه پیشین تا پسین (آلبین پسین تا سنومانین) است. این سازند در هسته تاقدیس کوه سفید برونزد دارد.

• سازند گورپی (Gr)

این سازند شامل تناوب منظمی از مارن‌های خاکستری مایل به آبی و سنگ‌آهک‌های مارنی نازک لایه است. سازند گورپی با ناپیوستگی هم‌شیب در زیر سازند پابده قرار می‌گیرد. مرز زیرین این سازند با سازند سروک ناپیوستگی هم‌شیب است. ضخامت سازند گورپی در حدود ۳۰۰ متر و سن آن کرتاسه پسین است.

• سازند پابده (Pd)

سازندهای دربرگیرنده سد و نیروگاه کارون ۴، شامل سازند آسماری (As) و پابده (Pd) می‌باشد. سازند پابده شامل: شیل‌ها و مارن‌های ارغوانی رنگ در بخش پایین و بر روی آن تناوبی از شیل‌های آهکی، مارن و سنگ‌آهک‌های مارنی نازک تا متوسط لایه به رنگ کرم تا خاکستری است. در کوه لپه (غرب محدوده مطالعاتی) و در سر تنگ محمود (در شمال محدوده مطالعاتی) بخش بالایی پابده، توسط آهک‌های سازند جهرم جایگزین می‌شود. در جناح چپ سد کارون ۴، با یک بخش انتقالی و کم‌تراوا سازند پابده در زیر سازند آسماری - جهرم به صورت پیوسته و تدریجی قرار می‌گیرد. سن این سازند پالئوسن پسین تا ائوسن پسین است. بیشترین ضخامت این سازند ۷۰۰ متر گزارش شده

است. به لحاظ آب‌گذری، سازند پابده در کل به عنوان یک سازند با نفوذپذیری کم در نظر گرفته می‌شود.

• سازند آسماری – جهرم (As - Ja)

در بررسی‌های صحرایی دو سازند آسماری و جهرم بسیار همانند بوده و از یکدیگر به سختی تفکیک می‌شوند. این دو مجموعه شامل سنگ آهک‌های کرم رنگ با لایه‌بندی ضخیم تا توده‌ای است. این سازند با هم‌پری تدریجی بر روی سازند پابده قرار می‌گیرد و مرز بالایی آن با سازند گچساران پیوسته و مشخص و با نازک شدن لایه‌ها و ظهور لایه‌های گچی مشخص می‌شود. مجموع ضخامت این دو سازند بیش از ۱۰۰۰ متر هست. سن این سازندها ائوسن، الیگوسن تا میوسن است. این سازند اجزاء طرح را در بر می‌گیرد که به چهار واحد As_1 ، As_2 ، As_3 و As_4 تقسیم می‌شود. سازند پابده نیز درست در بالادست سد قرار دارد. ضخامت واحد As_1 در جهت عمود بر لایه‌بندی حدود ۲۰۰ متر می‌باشد که ضخامت لایه‌های آن از ۲ تا ۳۰ متر تغییر می‌کند. از لحاظ لیتولوژیکی، واحد As_1 که سنگ پی ساختگاه سد را تشکیل می‌دهد به ۱۰ زیر واحد از As_1-a تا As_1-j تقسیم شده است (جدول ۱-۲). زیر واحد As_2 دومین بخش از قسمت پایینی سازند آسماری می‌باشد که در محدوده محل نیروگاه و محل نشیب‌بند قرار می‌گیرد این بخش از سنگ‌های آهک متوسط تا ضخیم لایه، سنگ آهک مارنی و سنگ مارن تشکیل یافته پدیده کارستی در آن نسبت به بخش As_1 کمتر هست. زیر واحد As_3 دارای تناوبی از سنگ آهک متوسط تا ضخیم لایه با سنگ آهک مارنی هست. خصوصیات کلی سنگ‌های مطرح شده در بخش‌های اخیر، به استثنای سنگ آهک متخلخل، مشابه سنگ‌هایی است که در بخش As_1 گفته شد. این بخش در محدوده مسیر کانال منج و پایین‌دست نشیب‌بند واقع شده است.

زیر واحد As_4 اساساً توسط مصالح روباره‌ای پوشیده شده است و در محدوده پایین‌دست نشیب‌بند و کانال منج قرار می‌گیرد و دارای سنگ آهک مارنی و سنگ مارن با میان لایه‌های سنگ آهک است.

• سازند گچساران (Gs)

گچ همراه با مارن‌های سبز، خاکستری و قرمز و لایه‌های ماسه سنگی از ویژگی بارز سنگ‌شناسی این سازند است. ضخامت این سازند به واسطه شکل‌پذیری، متغیر و فرسایش آن شدید است. این سازند بیشتر در نقاط پست و در محور ناودیس‌ها دیده می‌شود. مرز زیرین آن با سازند آسماری با نازک شدن کربنات‌ها و گذر تدریجی به رخساره گچی مشخص می‌شود. مرز بالایی آن با سازند آغاچاری تدریجی است. سن این سازند میوسن میانی است.

جدول ۱-۱ سازندهای زمین‌شناسی در ناحیه طرح (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

نام سازند	ویژگی‌های عمومی	سن
بختیاری	کنگومرا دارای قله‌های آهکی، سیلیسی و ماسه سنگی	پلیوسن میانی
گچساران	تناوبی از نمک، انیدریت، ژپس، سنگ مارن، آهک مارنی، ماسه سنگ، سنگ لای به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز و خاکستری	میوسن آغازی
آسماری	تناوبی از سنگ آهک خاکستری مایل به قهوه‌ای روشن، با سنگ آهک مارنی و سنگ مارن که بر روی سنگ آهک ضخیم لایه فسیل‌دار قرار دارد	میوسن آغازی تا الیگوسن
پابده	تناوبی از سنگ آهک مارنی، مارن آهکی و سنگ مارن که بر روی شیل ارغوانی قرار دارد	اتوسن تا پالتوسن
گورپی	سنگ آهک مارنی و سنگ مارن	کرتاسه پایانی
گروه بنگستان (سازندهای ایلام - سروک - کژدمی)	سنگ آهک و آهک مارنی ضخیم لایه خاکستری با بین لایه شیلی که بر روی شیل‌های قیری (سازند کژدمی) قرار دارد	کرتاسه میانی

• سازند آغاچاری (Aj)

این سازند تناوبی از ماسه‌سنگ و شیل قرمز و خاکستری است. ساختارهای رسوبی موج نقش و لایه‌بندی به فراوانی در ماسه‌سنگ‌ها دیده می‌شود. ضخامت این سازند بیش از ۱۵۰۰ متر است. مرز

زیرین آن با سازند گچساران تدریجی و بر روی بالاترین لایه گچی گچساران و مرز بالایی آن با سازند بختیاری ناهمسان است. سن این سازند میوسن میانی تا پلیوسن است.

• سازند بختیاری (Bk)

کنگلومرای چرتی و آهکی شامل قطعات قلوه‌سنگ‌ها و ریگ‌های ائوسن، الیگوسن و سنگ آهک‌ها و چرت‌های کرتاسه به رنگ خاکستری تیره، کرم و قهوه‌ای که در یک زمینه ماسه‌ای با سیمان آهکی و یا سیلیسی و دارای مقادیری اکسید آهن به هم چسبیده‌اند، است. این سازند به گونه ناهمسان بر روی سازندهای قدیمی‌تر قرار می‌گیرد. ضخامت، میزان و نوع سیمان، اندازه و نوع قلوه‌ها و نیز زمان تشکیل آن در نقاط مختلف، متفاوت است

نهبشته‌های عهد حاضر

رسوبات عهد حاضر در ناحیه طرح شامل سنگ ریزه، آبشست‌های دامنه‌ای، خاک‌های برجا، آبرفت‌های قدیم و جدید می‌باشد، ویژگی‌های این مصالح به شرح زیر است:

- مصالح واریزه‌ای (RF): این مصالح بیشتر در پای دامنه‌های با شیب تند قرار دارند. معمولاً از جنس سنگ آهک می‌باشند و غالباً قطعات بزرگ در حد تخته‌سنگ تا بلوک‌های سنگی را تشکیل می‌دهند.

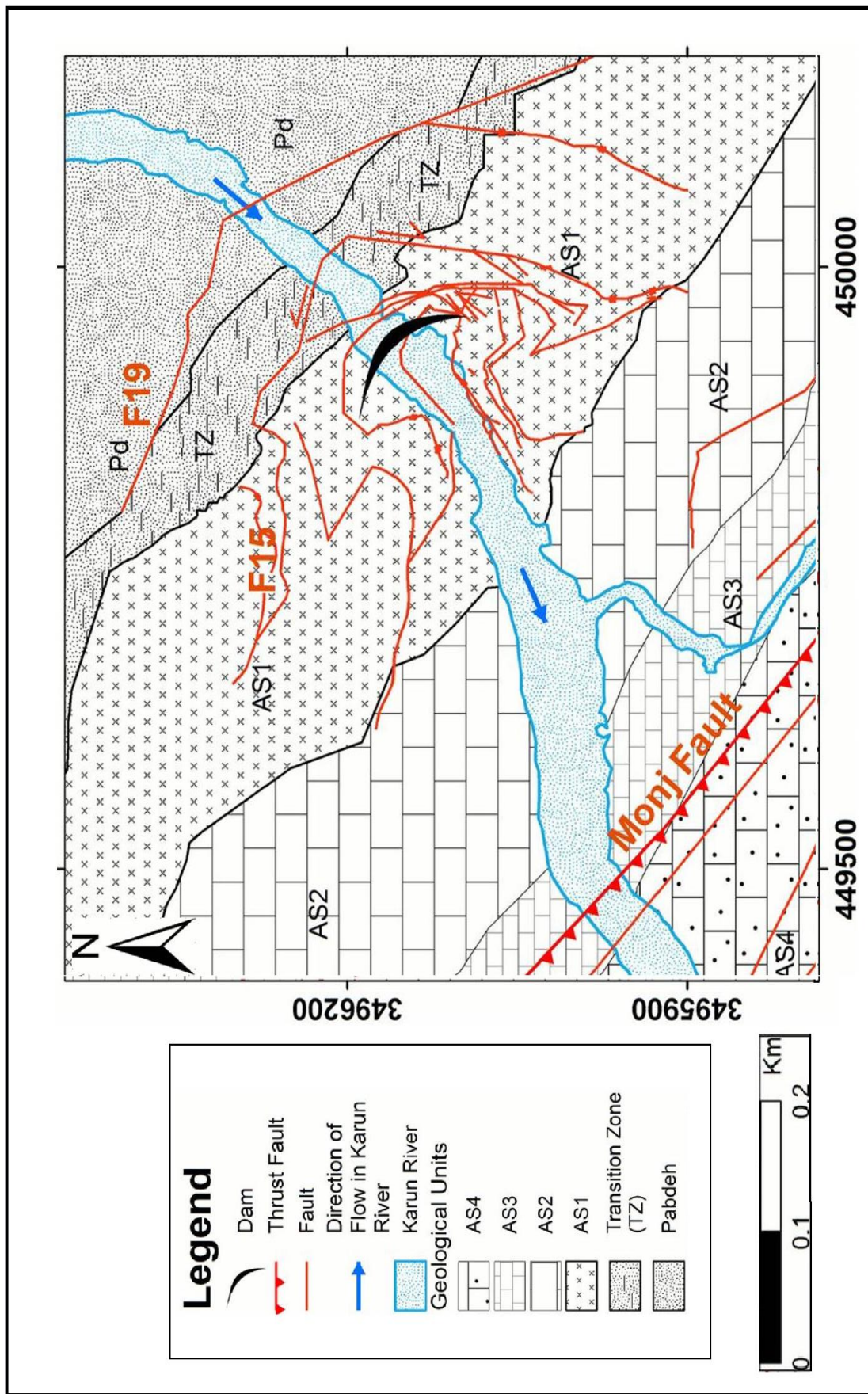
- آبشست‌های دامنه‌ای (RW): این نهبشته‌ها متشکل از تکه‌های سنگی با مصالح ریزدانه است. تکه‌های سنگی در اندازه‌هایی در حد ماسه تا تخته سنگ متغیر بوده و اغلب از جنس سنگ آهک یا سنگ‌های آهک ماری است.

- خاک‌های برجا (RS): این مصالح شامل رس و لای بوده که اغلب حاصل فرسایش مصالح سست می‌باشد و روی آن‌ها را پوشانده است.

آبرفت‌های قدیم و جدید (QT و QA): این مصالح به طور کلی متشکل از شن، ماسه و قلوه سنگ همراه با مصالح ریزدانه بوده و با سیمان‌شدگی به صورت پادگانه‌های آبرفتی در سواحل رودخانه (QT) و در حالت غیرسیمان شده عمدتاً در بستر رودخانه (QA) نهبشته شده‌اند.

جدول ۲-۱ توصیف زیر واحدهای واحد ASI، در محدوده‌ی ساختگاه سد (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد سنگی	توصیف
A S1-a	سنگ آهک (حدود ۹۰٪) خاکستری تا خاکستری مایل به قهوه‌ای، ضخیم تا خیلی ضخیم لایه، مقاوم تا خیلی مقاوم، عوارض کارستی قابل توجهی در آن دیده نمی‌شود. برخی فرسایش‌های سطحی در این واحد دیده می‌شود که مربوط به سنگ آهک مارنی (حدود ۱۰٪) می‌شود
A S1-b	سنگ مارن آهکی که عمدتاً توسط واریزه و آبشست دامنه‌ای پوشیده شده است. رنگ طبیعی، خاکستری مایل به سبز تیره، ضعیف تا نسبتاً مقاوم، بدون عوارض کارستیک
AS1-c	سنگ آهک ضخیم تا خیلی ضخیم لایه، به رنگ خاکستری مایل به قهوه‌ای روشن، بدون عوارض ویژه کارستی
A S1-d	کم و بیش شبیه A S1-b
A S1-e	سنگ آهک با برخی رخنمون‌های (در قسمت‌های غیر هوازده سنگ) به رنگ خاکستری مایل به آبی (سنگ آهک مارنی)، خیلی ضخیم لایه
A S1-f	این واحد از A S1-e شروع و تا اولین لایه راهنمای آهک متخلخل ادامه دارد. غالباً سنگ آهک با عوارض کارستی (حفره) کم تا متوسط برخی (۱۰٪) لایه‌های سنگ آهک حفره‌دار هم دیده می‌شود.
A S1-g	سنگ آهک حفره‌دار که وجود حفره‌های انحلالی از ویژگی‌های این بخش است. رنگ طبیعی سنگ خاکستری تا خاکستری مایل به قهوه‌ای روشن است. در تکیه‌گاه راست در قسمت رخنمون تازه سنگ، رنگ آن خاکستری است. با توجه به ویژگی حفره‌های بودن این لایه، به‌عنوان لایه کلید در نظر گرفته شده است.
A S1-h	سنگ آهک با برخی رخنمون‌های خاکستری مایل به آبی (احتمالاً آهک مارنی)، خیلی ضخیم لایه، در قسمت بالایی این بخش حفرات کارستی کم و بیش دیده می‌شود.
A S1-i	این بخش کم و بیش مشابه بخش A S1-g است و از این جهت نیز به عنوان لایه راهنما انتخاب شده است. وجود حفره‌های به ابعاد نسبتاً بزرگ در این بخش فراوان است.
A S1-j	سنگ آهک و سنگ آهک مارنی که بخش پایینی آن بیشتر سنگ آهک مارنی است. ضخیم تا خیلی ضخیم لایه، عارضه مهم کارستی در این بخش دیده نمی‌شود.



شکل ۴-۱ - نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۱-۴-۲- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه

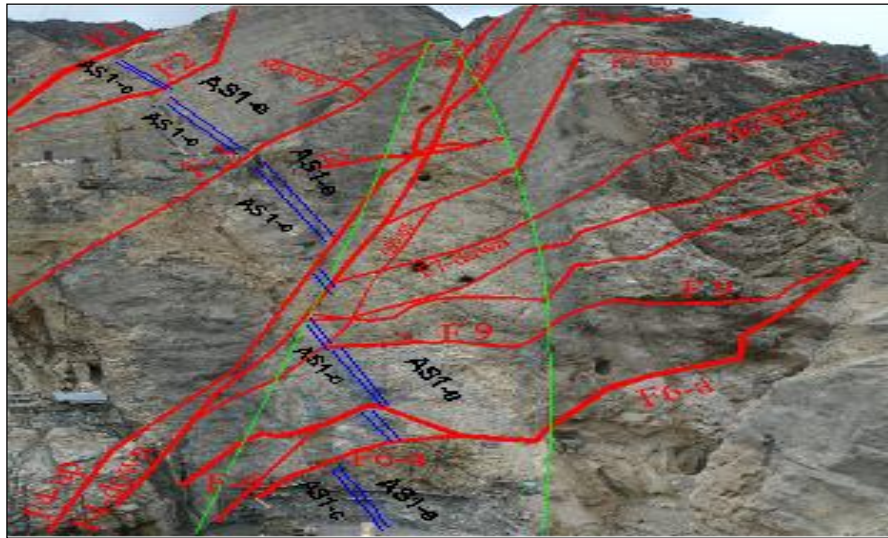
کوه‌های زاگرس به عنوان کمربند چین‌خورده ژئوسینکلینالی در نظر گرفته می‌شود که در اثر کوهزایی آلپی در زمان پلیوسن به شکل چین‌های تاقدیسی و ناودیسی نمایان گردیده‌اند که عموماً دارای روند شمال غرب- جنوب شرق می‌باشند. گودال (Trough) ژئوسینکلینال زاگرس در دوره‌های پرمین و ژوراسیک و کرتاسه میانی شکل گرفته است. به موازات ضخیم شدن گودال آهک‌های ضخیم دریایی مربوط به سازندهای ایلام - سروک در آن جمع شده‌اند.

کمربند چین‌خورده زاگرس تاکنون توسط افراد زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. گستره دهدز در بخش میانی این رشته، در بین دو کمربند ساختاری جای دارد. بخش شمال شرقی در کمربند گسله- های فلسی با زاگرس بلند و بخش جنوب غربی در کمربند چین‌خورده زاگرس قرار دارد و محدوده مورد مطالعه در بخش اخیر قرار می‌گیرد. روند ساختاری گستره از روند عمومی زاگرس پیروی می‌کند. سبک چین‌خوردگی سازندهای مقاوم در زاگرس به طور کلی سبک موازی است و ضخامت بخش‌های ضخیم کربناته که مهم‌ترین سنگ‌های تشکیل‌دهنده گروه مقاوم هستند در لولاه‌ها و در یال‌ها یکسان است. اما ضخامت لایه‌های غیرمقاوم متغیر است و بیشتر به عنوان لایه لغزنده بین لایه‌های مقاوم عمل می‌کنند. یکی از ویژگی‌های سبک موازی تاقدیسی‌های پهن و گسترده این است که به وسیله ناودیس- های باریک و جناغی از یکدیگر جدا می‌شوند.

تاقدیس‌ها اغلب نامتقارن بوده و یال جنوب غربی آن‌ها پرشیب و یا برگشته می‌باشد. تاقدیس‌ها حالت جعبه‌ای داشته و ناودیس‌ها فشرده‌اند و حالت جناغی دارند. تاقدیس دوزنقه‌ای در قسمت جنوبی در میل شرقی خود توسط گسل معکوس منج محدود شده است. فشردگی زیاد در بین دو تاقدیس کوه سفید و بادامستان باعث ایجاد این گسل معکوس شده است. شیب لایه‌ها در محل تکیه‌گاه سد به بیش از ۷۰ درجه می‌رسد.

ساختگاه سد تحت تأثیر ۲۰ گسل، ۱۲۲ درزه اصلی و ۴ دسته ناپیوستگی قرار گرفته است (شکل ۵-۱ و ۱-۶). تعداد ۱۹ عدد گسل در تکیه‌گاه‌های سد شناسایی شده‌اند که از این تعداد ۹ عدد در تکیه‌گاه چپ و ۱۰ عدد در تکیه‌گاه راست دیده می‌شوند. این گسل‌ها از دیدگاه تأثیر منفی فرار آب از مخزن و تأثیر منفی آن بر روی پایداری تکیه‌گاه‌ها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. گسل‌های شناسایی شده اغلب تکیه‌گاه‌های محل سد را تحت تأثیر قرار داده‌اند. گسل‌های F_1, F_2, F_3, F_4 در تکیه‌گاه چپ از جمله گسل‌های مهم در این تکیه‌گاه است. گسل F_{13} در تکیه‌گاه راست در محدوده ترازهای ۸۹۰ تا ۹۸۰ متر و تقریباً از بالادست این تکیه‌گاه تا پایین دست آن تداوم دارد. همچنین گسل F_{19} در منتهی‌الیه تکیه‌گاه راست محل سد قرار دارد حرکت چپ‌گرد این گسل باعث جابجایی در مرز سازندهای پابده و آسماری شده است. در جناح راست به جز گسل F_{13} که لایه‌ها را قطع کرده است، سایر گسل‌ها زاویه کمتری نسبت به لایه‌بندی می‌سازند که باعث گردیده تا در فاصله‌ای دورتر از دره، لایه‌ها را قطع نمایند. درحالی‌که در جناح چپ، گسل F_4 با زاویه‌ی تندتری لایه‌بندی را قطع نموده و به سرعت می‌توانند ارتباط هیدرولیکی را برقرار نمایند.

تعداد بسیار زیادی از ناپیوستگی‌ها و سطوح لایه‌بندی در ساختگاه برداشت شده‌اند. بازشدگی درزه‌ها در امتداد لایه‌بندی در سطح زمین از ۱ تا ۱۰۰ میلی‌متر متغیر بوده که با افزایش عمق کمتر می‌شود. پرشدگی کلیستی و رسی در درزه‌ها وجود دارد که پرشدگی کلیستی بیشتر است. آغشتگی به اکسیدها، همانند اکسید آهن نیز در سطوح برخی درزه‌ها دیده شده است. بررسی‌های صورت گرفته از ۱۳۶۹۸ ناپیوستگی برداشت شده در تکیه‌گاه‌ها و محدوده پیرامونی پرده آب‌بند نشان‌دهنده این است که حدود ۹۳ درصد ناپیوستگی‌ها دارای بازشدگی بیش از ۰/۶ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۱-۵- موقعیت بعضی از شکستگی‌های مهم در تکیه‌گاه چپ سد (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)



شکل ۱-۶- موقعیت بعضی از شکستگی‌های مهم در تکیه‌گاه راست سد (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)

۴-۱-۲-۱- اثر گسل‌ها در جناح چپ ساختگاه سد کارون ۴

گسل‌های F_2 ، F_3 ، F_4 از مهم‌ترین و مؤثرترین شکستگی‌ها در جناح چپ سد می‌باشند:

الف) گسل F_1 در اطراف این گسل فقط در گالری‌های LG_1 و LG_3 عملیات تزریق انجام شده است

که با توجه به اینکه در پایده است نسبتاً بالا بوده و اعداد لوژن گمانه L_3A_{440} در محدوده گسل مذکور

بالا می‌باشد.

ب) گسل F₂: محدوده این گسل در گالری‌های LG₁، LG₂ و LG₃ تزریق شده است. به جز در چند مقطع در گالری LG₁ در سایر مقاطع خوردند نسبتاً زیاد است که البته با توجه به اینکه گمانه‌ها مربوطه در گالری سری A می‌باشد، امری طبیعی است که خوردند زیاد بوده است. خوردند گمانه‌های سری A در مقاطع نزدیک به گسل به طور مشهودی نسبت به مقاطع دیگر اطراف گسل بیشتر است.

ج) گسل F₃: در این گسل نیز در همه گالری‌های مشاهده شده خوردند بالایی دارد و به جز یک مورد در LG₄ در گمانه‌های سری A خوردند بالای داشته است و در دیگر مقاطع اطراف گسل خوردند ناچیزی داشته است و این بدین معناست که بازشدگی گسل باعث شده است تا شعاع تأثیر در امتداد و اطراف گسل نسبت به سایر مناطق زیاد بوده و باعث خوردند بیشتر سایر گمانه‌ها گردد.

د) گسل F₄: این ناپیوستگی در گالری‌های LG₃، LG₄، LG₅ دیده شده است. در بررسی‌های سه بعدی در محل گمانه‌هایی که این گسل وجود دارد نشان می‌دهد که خوردند گمانه‌ها در محل این گسل چندان زیاد نبوده است. مهم‌ترین نکته‌ای که در بررسی این گسل باید مد نظر قرار گیرد این است که گسل مذکور در تلاقی با لایه‌بندی و درون واحد AS_{1-g} ایجاد حفرات کارستی زیادی نموده است که حفره کارستی مورد نظر در گالری LG₄ دیده شده است. در نهایت گسل F₄ ارتباط هیدرولیکی بسیار خوبی با مخزن برقرار کرده و با فاصله گرفتن از گسل (از هر دو سمت) این ارتباط ضعیف‌تر می‌گردد.

در گالری LG₅ در دو سمت گسل F₄ شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه واحد AS₂ (که نفوذپذیری آن پایین است) در پایین دست گالری قرار دارد، باعث شده تا آب در مسیرهای سهل‌تر واحدهایی با نفوذپذیری بالاتر (AS_{1-h}، AS_{1-g}، AS_{1-i}) حرکت کند و خود را به محل خروج در دره برساند.

د) گسل F₇: مهم‌ترین گسل موجود در واحدهای سنگی نیروگاه گسل F₇ است که به صورت عرضی نیروگاه را قطع می‌کند. در هنگام حفاری و بتن‌ریزی نیروگاه، تراوش آب از واحدهای سنگی آن مشاهده نگردید؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که گسل F₇، هیچ‌گونه ارتباط هیدرولیکی بین

بالادست و پایین دست ایجاد نکرده است. در محل تلاقی گسل F7 با سطوح لایه بندی و ناپیوستگی دیگر نیز حفرات کارستی مؤثر مشاهده نمی شود. به دلیل توالی لایه های مارنی و آهکی، سطح آب پستاکها حتی بعد از حفاری گود نیروگاه تا تراز ۸۱۶ تغییری نکرد و همچنان در تراز ۸۵۳ باقی ماند که احتمالاً نشان دهنده آب بند بودن واحد AS2 خصوصاً در جهت عمود بر لایه بندی است.

۱-۴-۲-۲- کارست و نفوذپذیری سازندها

قبل از شروع عملیات اجرایی سطح آب زیرزمینی در هر دو تکیه گاه به میزان ۵ الی ۸ متر بالاتر از سطح رودخانه بوده است که نشان دهنده جریان آب از سمت تکیه گاهها به سمت رودخانه می باشد. تراز آب زیرزمینی در مجاورت رودخانه در تکیه گاه چپ ۸۴۸ متر و در تکیه گاه راست ۸۴۵ متر اندازه گیری شده است.

در سازند آسماری، می توان درجه پایین کارست را در امتداد ناپیوستگیها به صورت حفرات (Vugs) و غارچه های کوچک (Small Cavities) مشاهده نمود که دارای پرشدگی سیلتی - رسی هستند.

تعدادی غارچه بزرگتر نیز با قطر ۱ تا ۲ متر طی حفاری گالریها شناسایی شد. یک لایه سنگ آهک متخلخل به نام AS1-g در ساختگاه سد وجود دارد که دارای اشکال حفره ای می باشد و به عنوان یک لایه کلیدی شناخته می شود. درجه کارست به تدریج با افزایش عمق کمتر می شود. مهم ترین لایه هایی که دارای حفرات کارستی بوده و پتانسیل زیادی در ایجاد این گونه حفرات دارند عمدتاً سه لایه f و g و i می باشند. بقیه واحدها به ویژه a و b و c و d دارای پتانسیل کارستی شدن نمی باشند. این موضوع با مشاهده حفرات فراوان در سطح، غارچه های کارستی در گالری LG4 و همچنین گمانه های اکتشافی قابل اثبات می باشد.

واحد AS2 که نیروگاه کارون ۴ در آن واقع شده است به دلیل توالی لایه های مارنی و آهکی که با ضخامت های کم تکرار شده اند، پتانسیل کارست ندارد و همچنین در ترانشه نیروگاه، حفرات کارستی

مؤثری مشاهده نگردید. مهم‌ترین گسل موجود در واحدهای سنگی نیروگاه گسل F₄ می‌باشد که با توجه به گمانه‌های اکتشافی و گزارش توپوگرافی و همچنین آزمون لوژان‌های انجام شده به نظر نقش مهمی در ایجاد محیط کارستی دارد.

۱-۴-۲-۳- وضعیت آبدهی چشمه‌های دره منج و پایین دست

بررسی‌های صورت گرفته در پایین دست رودخانه حاکی از خشک بودن نسبی چشمه‌های واقع در این بخش بوده است. چشمه‌های مورد نظر بیشتر از نوع فصلی و حتی لحظه‌ای محسوب می‌شوند و بیشتر آن‌ها از منظر دوری مسافت، لیتولوژی و توپوگرافی هیچ‌گونه سنخیتی با مخزن ندارند. لازم به ذکر می‌باشد که این چشمه‌ها در محدوده‌ی مدل قرار نمی‌گیرند و بررسی آن‌ها به منظور پیدا کردن ارتباط هیدرولیکی مخزن با سایر نقاط صورت گرفته شد. آخرین اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها در زیر آورده شده است (جدول ۱-۳):

جدول ۱-۳- دبی چشمه‌های موجود در منطقه سد کارون ۴ بر حسب لیتر بر دقیقه (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

ردیف	چشمه	تاریخ اندازه‌گیری							
		۱۳۸۸/۱۰/۱۲	۱۳۸۸/۱۱/۱۵	۱۳۸۸/۱۲/۱۸	۱۳۸۹/۰۱/۰۹	۱۳۸۹/۰۱/۲۴	۱۳۸۹/۰۱/۳۱	۱۳۸۹/۰۲/۱۶	۱۳۸۹/۰۳/۲۰
۱	چشمه بالای کمپ سپاسد	تر	تر	تر	تر	تر	تر	خشک	خشک
۲	چشمه باتور خیش	تر	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک
۳	چشمه پایین دست باتور خیش	کمتر از ۵	کمتر از ۵	۳	۱۵	۱۷	۱	۱	خشک
۴	چشمه بیار	کمتر از ۵	کمتر از ۵	کمتر از ۵	تر	تر	خشک	خشک	خشک
۵	چشمه طا	کمتر از ۵	کمتر از ۵	کمتر از ۵	تر	تر	خشک	خشک	خشک
۶	چشمه شرق آبادی لیر شیران	کمتر از ۵	کمتر از ۵	کمتر از ۵	تر	۲۰	تر	تر	خشک
۷	چشمه گلخه گچی	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک
۸	چشمه قوله	۴۰	۶۰	۷۰-۹۰	۱۰۰-۱۲۰	۱۲۰-۱۵۰	۵۰-۶۰	۴۰	۳۵
۹	چشمه دارچونه	تر	تر	تر	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک
۱۰	چشمه دره مجاور پل هامون	تر	تر	تر	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک
۱۱	چشمه نی یک	۱	۱	۱	خشک	خشک	خشک	خشک	خشک
۱۲	چشمه بالادست انحراف منج	تر	تر	تر	خشک	تر	تر	تر	خشک
۱۳	چشمه به سمت بیدله	۱۵۰-۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۳۰-۵۰	۵۰-۷۰	۲۵-۳۰	۲۰-۲۵	۱۵
۱۴	چشمه تلخک بعد از بیدله	کمتر از ۵	۱۵-۲۰	۲۵	۲۵	۴۰	۴۰-۴۵	۳۵-۴۰	۲۵

۱-۵- ژئومورفولوژی منطقه

منطقه طرح دارای کوه‌های مرتفع و دره‌های عمیق است. این کوه‌ها دارای چین‌خوردگی‌هایی هستند که منظره جالب تماشایی را ایجاد کرده‌اند. ارتفاع برخی از آن‌ها نزدیک به ۴۰۰۰ متر است. یکی از این کوه‌ها کوه سفید است که ارتفاعی نزدیک به ۳۱۰۰ متر می‌باشد و در محدوده ساختگاه و مخزن سد قرار دارد.

با توجه به عوامل تکتونیکی و نیز فرسایشی، دره‌های وسیع و عمیقی در این ناحیه دیده می‌شود. این دره‌ها در جاهایی که موازی روند عمومی رشته‌کوه‌ها باشند ناودیس‌ها را شکل داده‌اند دره‌هایی عمیقی نیز عمود بر روند عمومی این کوه‌ها وجود دارد که غالباً منطبق بر روند و محل درزه‌های اصلی است که به مرور عریض و عمیق شده‌اند. الگوهای زهکشی در این ناحیه بر حسب جنس مصالح متفاوت است، در سنگ‌های آهکی که عموماً ستیغ‌ساز هستند، الگوی زهکشی از نظم خاصی پیروی می‌نماید. در حالی که در جنس‌های سست با ترکیب مارنی که تپه‌های ملایمی را تشکیل داده‌اند، این الگو شاخه‌ای می‌باشد. رودخانه‌های مهمی چون کارون، ارمند، بازفت، خرسان و تعداد دیگری در این ناحیه جریان دارد. علی‌رغم پیچ‌های موضعی در جریان این رودخانه‌ها، روند عمومی آن‌ها تقریباً منطبق بر روند عمومی کوه‌های زاگرس یعنی شمال غرب- جنوب شرق است. رودخانه کارون از به هم پیوستن دو رودخانه ارمند و بازفت در حدود ۴/۵ کیلومتری بالادست محل سد کارون ۴ شکل می‌گیرد و به طرف دشت خوزستان ادامه می‌یابد.

۱-۶- هیدرولوژی منطقه

حوضه آبرگیر رودخانه کارون در محدوده سد کارون ۴ در قسمت جنوب غربی ایران در محدوده بین عرض شمالی ۲۰-۳۱ تا ۳۲-۴۰ و طول شرقی ۳۳-۴۹ تا ۴۵-۵۱ در منطقه رشته کوه‌های زاگرس واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری به استان‌های چهار محال و بختیاری و اصفهان تعلق دارد.

حوضه آبخیز مذکور تقریباً کوهستانی بوده، ارتفاع متوسط آن ۲۳۵۴ متر و ارتفاع بلندترین نقطه آن ۴۲۰۰ متر می‌باشد. مساحت حوضه آبخیز رودخانه کارون در محدوده سد کارون حدود ۱۲۸۱۳/۴ کیلومترمربع بوده و رشته کوه‌های مرتفع زاگرس شرایط مناسبی را برای بارش در حوضه آبخیز این رودخانه (به ویژه نواحی غربی و شمال غربی) به وجود آورده است، به گونه‌ای که ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه حدود ۶۸۰ میلی‌متر برآورد می‌گردد. همچنین متوسط تبخیر از سطح دریاچه حدود ۱۸۱۱/۲ میلی‌متر برآورد می‌گردد. متوسط آورد سالانه رودخانه حدود ۴/۹ میلیارد متر مکعب بوده و دمای حداقل اقلیم محل سد برابر ۸ درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر در محل سد برابر ۴/۳ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌گردد.

۷-۱- هیدروژئولوژی منطقه

از نظر هیدروژئولوژیکی در این ناحیه طیفی از سازندهای بسیار نفوذپذیر تا سازندهای تقریباً غیرقابل نفوذ گسترش دارند. قابل ذکر است که ساختار منطقه نیز در وضعیت هیدروژئولوژیکی آن تاثیر بسزایی دارد. سازندهای ایلام- سروک و آسماری به عنوان نفوذپذیرترین سازندهای این ناحیه می‌باشند. این سازندها تحت تاثیر عوامل تکتونیکی قرار گرفته و چشمه‌های با دبی بسیار زیاد از آنها جاری می‌گردند. سازند آسماری کارستی و حفره‌دار بوده و عمدتاً از نفوذپذیری نسبتاً بالایی برخوردار است. چشمه‌های با دبی در حد ۰/۱ تا ۳ مترمکعب در دقیقه از سازند آسماری در شاخه بازفت مخزن کارون ۴ جریان دارند. سازندهایی چون کنگلومرای بختیاری دارای نفوذپذیری کم تا متوسط می‌باشند. نوع سیمان موجود در این سازند بر نفوذپذیری آن تاثیر گذاشته است. به نحوی که نوع سیمان رسی باعث نفوذپذیری کم تا متوسط در این سازند شده است. سازندهای با نفوذپذیری کمتر شامل سازندهای گورپی، پابده، گچساران و آغاچاری است که کمتر چشمه‌ای در آنها دیده می‌شود. در سازند گچساران، چنانچه چشمه‌ای بیرون آید دارای املاح بالایی است.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین درباره شبیه‌سازی انحلال در

کارست

محیط‌هایی که پیدا کردن مسیرهای جریان آب در آن مهم است، محیط کارستی است و این محیط به طور کل از دو محیط مجزا مجاری بزرگ و محیط ماتریکسی تشکیل شده است (White 1988, Ford and Williams 1989, 2007, Karami 2002). بازه‌ی زمانی انحلال سنگ‌های کارستی در مقیاس‌های زمین‌شناسی است، ولی در مورد محیط‌های کارستی متاثر از گرادیان‌های هیدرولیکی بالا مانند سازه‌های ساخت دست بشر شبیه سد، این کارستی شدن شتاب می‌گیرد و می‌تواند سازه را در طول زمان عمر مفید آن در بازه‌ی زمانی با مقیاس انسانی با خطر فرار آب مواجه سازد. بنابراین، اهمیت این گونه مدل‌ها دو چندان می‌شود و از طرفی با توجه به دوگانگی این محیط‌ها و تعدد پارامترهای هیدرولیکی و شیمیایی موثر، این مدل‌ها را با پیچیدگی همراه کرده است.

۲-۱- انحلال‌پذیری سنگ‌های کارستی

انحلال‌پذیری فرآیندی است که با جریان یافتن آب در سنگ‌ها با توجه به خصوصیات فیزیکی شیمیایی (آب و سنگ) اتفاق می‌افتد. در طول این فرآیند کانی‌های انحلال‌پذیر به صورت محلول توسط آب حمل شده و به این ترتیب فضاهای خالی در سنگ ایجاد می‌شود. بیشترین کانی‌های

انحلال‌پذیر شامل کلسیت، ژئپس، انیدرید و هالیت می‌باشد یا در این میان به دلیل گسترش زیاد سنگ‌های کربناتی در سطح زمین نسبت به این نوع سنگ توجه فراوانی می‌شود. سنگ‌های کربناتی و خصوصیات انحلال‌پذیری آنها از نظر ساختگاه سد سازی (تعداد زیادی از سدهای مخزنی در جهان در این نوع سنگ‌ها ساخته شده است)، از لحاظ اکتشاف منابع آب (آبخوان بسیار مناسبی هستند)، و با توجه به اهمیت اکتشاف منابع نفت، گاز و ذخایر عظیمی از هیدروکربورها از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در فرآیند انحلال‌پذیری سرعت، نوع، حجم جریان آب عبوری از میان سنگ‌های کارستی می‌باشد. با شناخت نوع جریان می‌توان به میزان انحلال‌پذیری آب پی برد، بر این اساس جریان‌های آشفته انحلال‌پذیری بیشتری نسبت به جریان‌های آرام دارند. البته با تغییر شرایط در نوع فضاهای خالی مرتبط با هم، مدت زمان تماس، مشخصات شیمیایی سنگ‌های کارستی و آب، نوع سرعت جریان و حجم آب عبوری می‌تواند در میزان انحلال‌پذیری تاثیرات مستقیمی داشته باشد.

۲-۲- تاثیر عوامل اقلیمی بر توسعه کارست

برای شناخت عوارض کارستی می‌بایست عوامل تاثیرگذار و اثرات هر کدام از آنها به طور مجزا مورد بررسی قرار گیرد. از عوامل موثر در این رابطه می‌توان به مقدار و نوع بارندگی، دما، فشار گاز کربن‌دی‌اکسید اشاره کرد. از آنجا که این عوامل علاوه بر این که به یکدیگر وابسته هستند، به نوع اقلیم و پوشش گیاهی منطقه نیز وابسته هستند، بهتر است اثر آنها برحسب اقلیم‌ها و آب و هواهای مختلف بررسی گردد. در هر اقلیم آب و هوایی خاص محدوده تغییرات خاصی از دما، فشار گاز کربن‌دی‌اکسید و رطوبت وجود دارد.

۲-۲-۱- تاثیر بارندگی

وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی در توسعه کارست می‌باشد. این عامل اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می‌باشد. به صورت طبیعی، کارست در مناطقی پیشرفت می‌کند که میزان بارندگی بالاتر باشد و مناطق خشک یا بسیار سرد مانع از توسعه کارست می‌گردند. هر دو این شرایط آب و هوایی باعث کم بودن آب به صورت مایع گردیده و بنابراین باعث محدود شدن انحلال می‌گردند. بنابراین، در زمان‌های بسیار طولانی، سنگ بدون انحلال باقی می‌ماند. وجود آب به حد کافی، سایر عوامل آب و هوایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در صورت عدم وجود آب به میزان کافی (به صورت مایع)، اثر سایر عوامل مشهودتر خواهد بود. در مناطق مرطوب افزایش بارندگی باعث افزایش پوشش گیاهی و بالا رفتن فشار جزئی گاز کربن‌دی‌اکسید و در نتیجه ازدیاد خوردندگی آب می‌گردد.

در واقع افزایش بارندگی باعث افزایش توسعه کارست می‌شود. در واقع مقدار بارندگی یک نیروی محرکه مکانیکی برای انحلال کارست است. فرآیند کارستی شدن در شرایط آب و هوای سرد با بارش زیاد برف سریع‌تر از مناطقی است که دارای آب و هوای گرم می‌باشند (Corbel 1959).

۲-۲-۲- اثر دما

کم بودن دما باعث ایجاد پدیده یخ‌زدگی گردیده و در نتیجه جریان آب زیرزمینی، نفوذ و پوشش گیاهی و فشار گاز CO_2 کاهش می‌یابد. بنابراین، در چنین مناطقی سرعت فعل و انفعالات شیمیایی کاهش خواهد یافت. به طور کلی در مناطقی که دما بسیار پایین باشد (زیر صفر) کارستی شدن بسیار کم و نادر است. اثرات تغییر زیاد دما در طی روز و شب موجب یخ‌زدگی و ذوب مکرر و خردشدگی و هوازگی فیزیکی آهک می‌گردد. در مناطقی که بارش برف نسبتاً سنگین بوده و ذوب فصلی، قسمت زیادی از بیلان آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. اثر دیگر دما بر پوشش گیاهی منطقه می‌باشد ولی افزایش دما اثر مستقیم و خطی بر روی پوشش گیاهی ندارد، بلکه در حد خاصی از دما بیشترین پوشش گیاهی را خواهیم داشت. اثر درجه حرارت بر انحلال‌پذیری کانی با یکدیگر متفاوت، به طور

مثال کانی‌های ژئوپس، انیدرید و هالیت با افزایش درجه حرارت حلالیت بیشتری دارند در حالی که کلسیم کربنات با افزایش درجه حرارت حلالیتش کاهش می‌یابد (همایون مقیمی ۱۳۹۱).

۲-۲-۳- تاثیر فشار جزئی کربن دی‌اکسید

به طور کلی یکی از مهم‌ترین عوامل در حل شدن سنگ‌های کربناتی گاز CO₂ موجود در اتمسفر و یا به صورت محلول در آب اقیانوس‌ها است.

در حقیقت، نیروی محرکه شیمیایی فرآیند انحلال گاز کربنیک محلول در آب است. CO₂ طی مراحل اکسیداسیون مواد آلی با کمک میکروارگانیسم‌ها و توسط تنفس ریشه گیاهان تشکیل می‌شود. ورود و یا خارج شدن CO₂ به آب به فشار نسبی و درجه حرارت وابسته است و بنابر قانون هنری حلالیت گازها در آب با فشار رابطه مستقیم و با حرارت رابطه عکس دارد. همه کانی‌ها در آب انحلال‌پذیر هستند ولی کربنات کلسیم حالت ویژه‌ای دارد، به طوری که در حضور CO₂ محلول در آب، سنگ‌های کربناتی انحلال بیشتری دارند (همایون مقیمی ۱۳۹۱).

۲-۲-۴- توپوگرافی

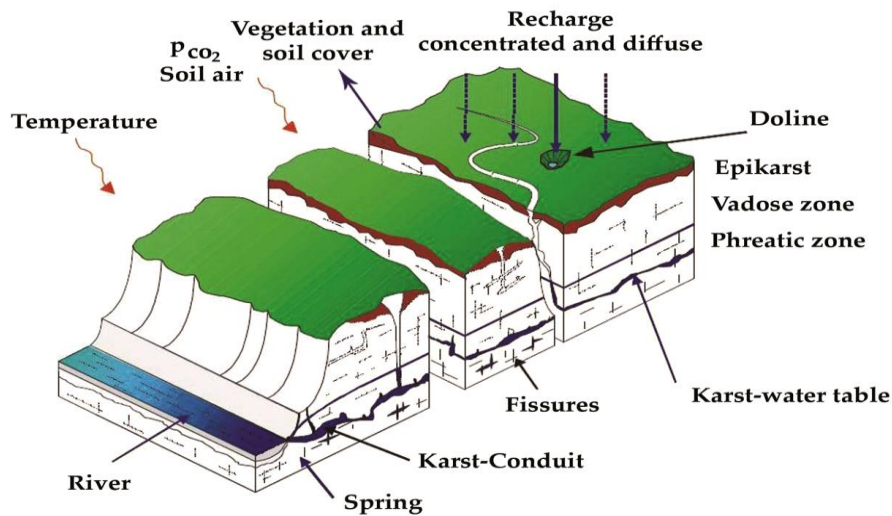
توپوگرافی سطح زمین با ایجاد تغییرات دما، نوع پوشش گیاهی و نیز تبخیر نسبت به ارتفاع و همچنین با ایجاد شیب‌های مختلف و تاثیر آن بر میزان رواناب تولید شده در میزان نفوذپذیری حوضه موثر است. در مناطق مرتفع‌تر، آب و هوا سردتر است و در نتیجه هوازدگی فیزیکی موثرتر است. همچنین آب دریافتی از طریق بارش‌ها نیز بیشتر است. به دلیل سرد بودن رشد گیاهان انبوه و دارای ریشه‌های عمیق محدود می‌گردد و در نتیجه تبخیر و تعرق ناشی از گیاهان کم می‌شود (همایون مقیمی ۱۳۹۱).

۲-۳- انحلال در کارست

۲۵ درصد سطح زمین را سنگ‌های قابل حل و عمدتاً کربناته در بر می‌گیرد (Maksimovich 1۹۶۹). توسعه سیستم‌های کارستی از اواخر قرن نوزدهم از نظر علمی مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند اصلی حاکم بر پیدایش آبخوان‌های کربناته، انحلال کربنات است و شکستگی‌ها یا کانال‌ها در ناحیه اشباع با زمان گسترش می‌یابد (Kaye 1957, Weyl 1958).

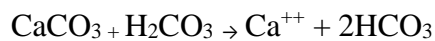
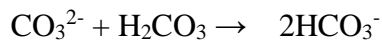
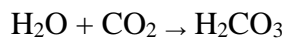
در سنگ‌های کارستی نفوذ آب و حرکت آب زیرزمینی از طریق شکستگی‌ها باعث بزرگ شدن درزه‌ها و حفرات شده و در نتیجه آن فضای خالی و تخلخل ثانویه محیط در زمان نسبتاً کوتاهی در مقیاس زمین‌شناسی افزایش می‌یابد (Kaufmann and Romanov 2016). به این گسترش درزه‌ها و مجراها که توسط انحلال شیمیایی صورت می‌گیرد، کارستی شدن (Karstification) گفته می‌شود (Romanov et al. 2003).

تکامل آبخوان‌های کارستی وابسته به فرآیندهای گوناگون زمین‌شناسی و آب و هوایی موثر بر تکامل آبخوان کارستی، هندسه آبخوان، تراکم درزه، لیتولوژی، درجه حرارت آب، نرخ تغذیه و فشار بخشی CO₂ هستند (Romanov et al. 2003). در شکل ۱-۲ به طور نمونه فرآیندهای موثر بر توسعه کارست نشان داده شده‌اند.



شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از فرآیندهای توسعه کارست (Liedl et al. 2003)

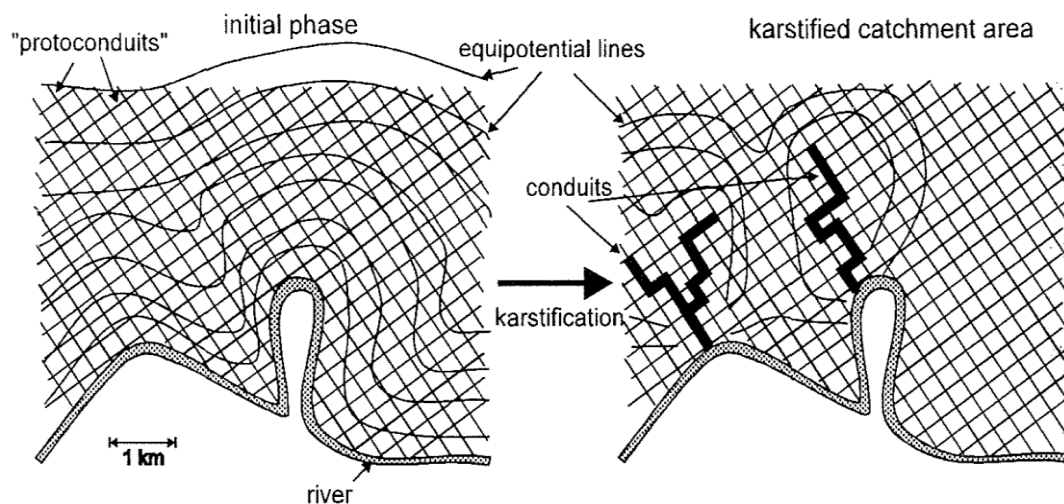
عامل اصلی انحلال پذیری کربنات کلسیم در آب اسید کربنیک است:



مکانیسم تشکیل این آبخوان‌ها به این صورت است که آب باران در عبور از اتمسفر، دی‌اکسید کربن را در خود حل می‌کند و اسید کربنیک ضعیف (H_2CO_3) تشکیل می‌شود. بنابراین برای به وجود آمدن آب اسیدی، انحلال دی‌اکسید کربن در آب ضروری است، با سرد شدن هوا، انحلال CO_2 در آب افزایش می‌یابد، در سازندهای آهکی، با افزایش ارتفاع به دلیل سردتر شدن هوا، امکان تشکیل آبخوان کارستی در صورت وجود بارندگی افزایش می‌یابد. با ورود آب به خاک، آب ممکن است مقادیر بیشتری دی‌اکسید کربن را در خود حل کرده و به این شکل اسید بیشتری در آب تولید شود. وجود

پوشش گیاهی در خاک نیز به دلیل تولید دی‌اکسیدکربن توسط ریشه گیاهان، نقش مهمی در تشکیل آبخوان‌های کارستی دارد.

مدل عددی CAVE (Clemens *et al.* 1998) برای شبیه‌سازی توسعه‌ی آبخوان‌های کارستی ارائه شده است. این یک رویکرد مدل‌سازی بسیار پویاست که قادر به محاسبه‌ی جریان و بزرگ‌شدگی کانال (مجراها) که وابسته به تغذیه آب زیرزمینی است، می‌باشد. در طول مراحل اولیه سیستم جریان بسیار شبیه به آبخوان درزه و شکاف‌دار است که به سیستم بسیار پیچیده و ناهمگن بالغ کارست تغییر می‌کند. سفره‌های آهکی کارست اغلب بسیار فراوان هستند و به علت سرعت جریان بالا یک منبع بسیار آسیب‌پذیر برای آب‌های زیرزمینی است. از این رو در بسیاری از کشورها با جزئیات بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی و انتقال در این سیستم‌ها مدل‌های عددی بسیاری مورد استفاده قرار گرفت (Teutsch 1988, Sauter 1992).
 یک مدل مفهومی از توسعه یک سیستم کارستی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ مدل مفهومی توسعه سیستم کارست (Clemens *et al.* 1996)

یکی از راه‌های توسعه سیستم جریان در ناحیه کارست به دست آوردن اطلاعات مربوط به توسعه آبخوان از مطالعات زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی مانند داده‌های مربوط به توزیع فضایی زون‌های کارستی است. در چند دهه گذشته مقدار داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی مربوط به توسعه کارست

به میزان قابل توجهی افزایش یافته (Courbon and Chabert 1986) و به چندین الگو طبقه‌بندی شده‌اند (Palmer 1991). کنترل فرآیندهای زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی متاثر در انحلال کارست توسط چندین نویسنده ارائه شده است (White 1988, Ford and Williams 1989,) (Ford and Ewers 1978).

نرخ انحلال کلسیت در توابع زمانی و مکانی در طول کانال متغیر است. نرخ انحلال CaCO_3 توسط محلول $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ برای شرایط سیستم بسته در حضور CO_2 توسط (Buhmann and Dreybrodt 1985b) مورد بررسی قرار گرفت. این محققان سرعت‌های انحلالی زیر را به کار گرفتند، برای غلظت $c < 0.9 c_{eq}$ کلسیم، نرخ انحلال را محاسبه کردند:

$$F(c) = \alpha(x) (c_{eq} - c) \quad 1-2$$

$$\alpha(x) = \alpha_{lam} \left[1 + \frac{\alpha_{lam} d(x)}{6D} \right]^{-1} \quad 2-2$$

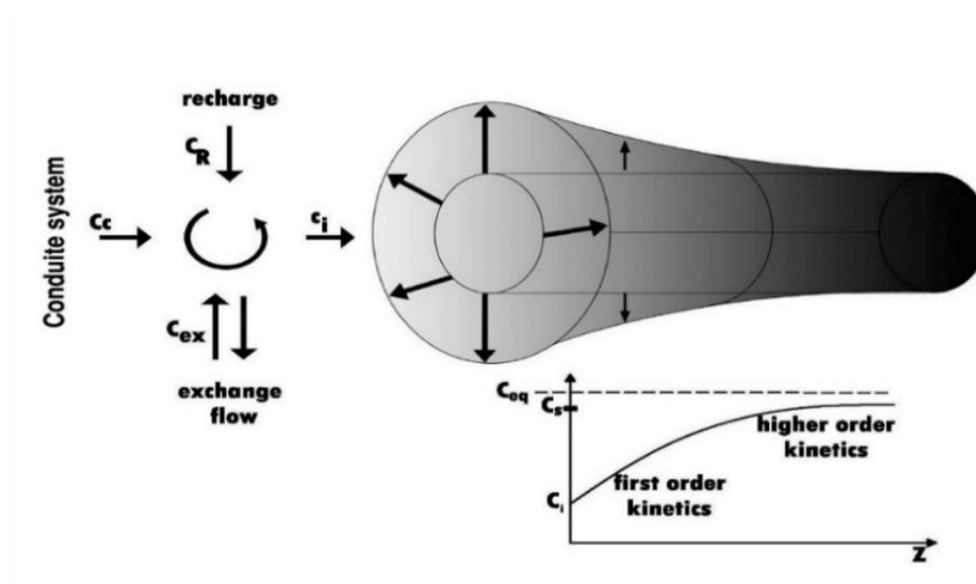
$$\alpha(x) = \alpha_{turb}$$

که c_{eq} غلظت اشباع کلسیم، α_{turb} و α_{lam} ثابت نرخ سینتیک برای جریان‌های آشفته و خطی است به ترتیب، که این مقادیر توسط (Buhmann and Dreybrodt 1985b) ارائه شده است. برای جریان خطی ضریب نرخ $\alpha(x)$ بیان‌کننده‌ی اثر انتقال جرم به وسیله انتشار است و برای قطرهای بزرگ $d(x)$ بستگی به موقعیت x درون مجاری بزرگ دارد. D ضریب انتشار Ca^{2+} در آب می‌باشد. برای غلظت‌های بیش از ۹۰٪، حالت اشباع ($c > 0.9 c_{eq}$)، تغییری در قانون نرخ واکنش مشاهده می‌شود. قانون نرخ مرتبه ۴ که توضیح دهنده تغییرات مشاهده شده در غلظت‌ها است توسط (Plummer and Wigley 1976) ارائه شد.

$$F(c) = \beta(c_{eq} - c)^4 \quad 3-2$$

که در اینجا β ثابت نرخ سینتیک برای واکنش مرتبه چهارم است. با استفاده از معادله‌های ۱-۲ و ۲-۳ مقدار ریزش Ca^{2+} از دیواره‌های یک مجرا (کانال) به درون آب و در نتیجه افزایش قطر لوله را می‌توان محاسبه کرد. ترمودینامیک برای سامانه $CO_2-H_2O-CaCO_3$ به وسیله پلومر و بوزنبرگ (Plummer and Bouzenberg 1982) بررسی شده بود، که آب تغذیه‌ای نفوذ کرده در نزدیک سطح آب زیرزمینی را توضیح می‌دهد، با این وجود یک فرآیند توضیح دهنده این حالت تحت اشباعیت، خوردگی اختلاطی است (Bogli 1964). اثرات سینتیک اولین بار به وسیله ویل (Weyl ۱۹۵۸) بیان شده بود، کسی که جریان آب زیرزمینی خطی در یک درزه را با یک قانون نرخ انتشار محدود شده برای انحلال کلسیت ترکیب کرد. او یک "عمق نفوذ" برای آب وارد شده به درزه‌های اولیه محاسبه کرد. این "عمق نفوذ" فاصله از ورودی یک درزه است که در آن آب به یک درصد معینی از اشباعیت می‌رسد. این فاصله موجود در مقایسه با فاصله بین محل تغذیه آب زیرزمینی و چشمه در یک حوضه طبیعی خیلی کوتاه است. با این حال بررسی نزدیک‌تر فرآیند انحلال کلسیت به وسیله چندین محقق برنر و مورث (Berner and Morse 1974)، پلومر و ویگلی (Plummer and Wigly 1976)، پلومر و همکاران (Plummer et al. 1978)، بوهمان و دربرودت (Buhmann and Drybrodt 1985a, b) نشان دادند که فرآیندهای دیگر جدا از انتشار، انحلال سنگ‌های کربناته را تعیین می‌کند. وایت (White 1979) مفهوم تریگر سینتیک را معرفی کرد، او از داده‌های برنر و مورث (Berner and Morse 1974) نتیجه گرفت که نرخ‌های انحلال هنگامی که واکنش نزدیک اشباع است، به طور معناداری پایین می‌افتد. همانطور که از فرمول‌های (۱-۲) و (۲-۳) بر می‌آید تغییر در نرخ انحلال کربنات می‌تواند به وسیله یک قانون نرخ سینتیک مرتبه اول سریع (تند) برای حالت دور از اشباع و یک نرخ انحلال مرتبه چهارم خیلی آرام‌تر برای حالت نزدیک اشباع بیان شود. به خاطر انحلال مرتبه چهارم آرام، آب بدون آنکه کامل اشباع شود می‌تواند به چشمه برسد، که این حالت به طرف بزرگ‌شدگی مجرا و همچنین محل تغذیه‌ای پیش می‌رود. شرایط نزدیک اشباع و اثرات بازدارنده بر سطح انحلال به وسیله ردی (Reddy

ردی و وانگ (Reddy and Wang 1980)، پالمر (Palmer 1991) و سونسون و دربرودت (Svensson and Dreybrodt 1992) بیشتر بررسی شده بود. در دهه ۹۰، مدل-های جریان یک بعدی برای تعیین حساسیت پارامترهایی مثل نرخ ثابت‌ها، طول مجرا یا گرادیان هیدرولیکی روی فرآیندهای کارستی شدن است استفاده شده است (Dreybrodt 1990, Palmer 1991, Groves and Howard 1994a). این مدل‌ها پتانسیل‌های ثابتی را در ورودی و خروجی مجراها استفاده کرده‌اند. نتایج این مدل‌ها نشان می‌دهد که برای زمان-های بزرگ (طولانی) پهنای درزه‌های باریک به طرف خروجی پایین می‌آید و یک شکل مخروطی به خود می‌گیرد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ شیمی CAVE که در یک سلول و لوله نشان داده شده که آب از طریق تغذیه، سامانه مجاری بزرگ بالادست و جریان تبدلی با غلظت‌های متناظر C_c ، C_R و C_{ex} که به صورت آنی ترکیب می‌شوند و با غلظت ورودی C_i به یک لوله مجاری بزرگی داده می‌شود، غلظت ممکن در طول پروفیل لوله نشان داده شده است، که C_s غلظت تعویضی از سینتیک‌های مرتبه اول به بالاتر و C_{eq} غلظت اشباع کلسیت است (Bauer and Liedl 2003).

همانطور که درزه بزرگ می‌شود، تخلیه افزایش می‌یابد که رابطه مستقیمی بین میزان انحلال و افزایش جریان برقرار است و طول نفوذ سینتیک انحلال سریع از حالت اشباع منطبق به آن افزایش

می‌یابد. سرانجام در زمان گذر (Dreybrodt 1990) انحلال سریع در تمام طول درزه فعال می‌شود و بازشدگی با یک نرخ کم و بیش ثابت به سرعت افزایش می‌یابد.

۴-۲- سیستم‌های جریان در کارست

سازندهای کارستی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند که باعث تمایز آنها از دیگر سازندهای سخت و آبخوان‌های آبرفتی شده‌اند. به طور کلی پنج تعریف متفاوت از کارست در مراجع علمی ذکر شده است (Worthington *et al.* 2017) که به طور اجمالی عبارتند از: ۱- شبکه‌ای به هم پیوسته از مجاری انحلال یافته هستند. ۲- مقدار هدایت هیدرولیکی در آنها بیش از 0.000001 متر بر ثانیه است. ۳- در نواحی قرار دارند که از نظر مورفولوژیکی دارای اشکال انحلالی کارستی هستند. ۴- حتما دارای یک مجرا یا سیستم مجرای می‌باشند. ۵- حضور غاری که توسط انحلال ایجاد شده باشد، مسجل است. با نگاهی به تمامی تعاریف بالا، به جز تعریف دوم، محوریت تعریف کارست بر فرآیند انحلال می‌باشد.

تئوری جریان در محیط متخلخل بیش از ۱۰۰ سال پیش توسط داری در یک کار تجربی ارائه شد، ولی فرموله کردن تئوری حرکت سیال در محیط متخلخل درزه و شکافدار به خاطر محدوده متفاوت اندازه فضای خالی بین ذرات با مشکل‌های زیادی روبرو بوده است. در آبخوان‌های کارستی تقسیم‌بندی که از نظر نوع تخلخل صورت می‌گیرد به قرار زیر است:

۱- تخلخل نوع نخست که در هنگام رسوبگذاری و دیاژنز تشکیل می‌گردد. در سفره‌های کارستی به طور معمول حجم خیلی کم آب را در خود ذخیره می‌کنند.

۲- تخلخل نوع دوم درزه و شکاف‌های ریزی است که توسط نیروهای تکتونیکی تشکیل شده است.

۳- تخلخل نوع سوم که توسط انحلال به وجود آمده است. شکاف‌های کوچک می‌توانند به بالاترین درجه نفوذپذیری برسند و مسیرهای اصلی جریان باشند این سیماهای بزرگ‌شده انحلالی به عنوان تخلخل سوم شناخته شده است (Prof and Liedl 2012).

این چندگانگی تخلخل باعث رژیم پیچیده‌ای از جریان در کارست شده است و نبود اطلاعات دقیق از هندسه فضایی مجاری اصلی این پیچیدگی‌ها را بیشتر کرده است (Mohrlock and Teutsch 1977). وورثینگتون و همکاران (Worthington *et al.* 2000) نیز همین مفهوم تخلخل سه‌گانه را بیان کرده است.

همچنین بعدها برخی از ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی با موقعیت خاص و اهداف مهم انتخاب شده:

- قابلیت نفوذپذیری قابل توجه کانال‌های توسعه یافته توسط انحلال در مقایسه با ماتریکس سنگ سبب ناهمگنی و غیریکنواخت بودن خصوصیات آبخوان‌های کارستی می‌شود که منجر به ایجاد جریان دوگانه در کارست می‌شود (Kiraly 1975, Kiraly 2002, Sauter 1992).
- فرآیندهای تغذیه در سیستم‌های هیدرولیکی کارست بسیار ناهمگن هستند، تغذیه مستقیم ممکن است در کانال‌ها و تغذیه افشان در ماتریکس می‌افتد (Gunn 1986, Geyer *et al.* 2008).
- سرعت‌های آب‌های زیرزمینی در حوضه‌های کارستی می‌توانند فوق‌العاده سریع و به اندازه‌ی چند متر در ثانیه باشند (Gunn 1986, Doerfliger *et al.* 1999).
- علاوه بر این، وجود این خصوصیات حرکت سریع آب‌های زیرزمینی در اثر انحلال منجر به افزایش خطر آلودگی می‌شود در حالی که پتانسیل تصفیه طبیعی آب (فیلتراسیون، جذب و فرآیندهای پاکسازی طبیعی) در این شرایط بسیار محدود است (Lehr 2000).
- خروج آب‌های زیرزمینی به طور محلی در یک یا چند چشمه متمرکز شده است. در حالیکه الگوی تخلیه زمانی چشمه‌ها بسیار متغیر است (Sauter 1992, White 2002, Birk *et al.* 2004, Kiraly) (۲۰۰۲).

- با توجه به ناهمگنی، جهت جریان آب زیرزمینی در طول کانال‌های کارست می‌تواند از مسیر جریان کلی در حوضه خارج شود (Gunn 2008, Huntoon 1995).
- در موارد متعددی، موقعیت دقیق و ویژگی‌های خاصی از سیستم کانال بسیار نفوذپذیر مانند قطر، شکل یا ارتفاع نامشخص می‌باشد (Doerfliger *et al.* 1999, Bakalowicz 2005, Geyer 2008).
- حرکت سریع آلودگی به آبخوان از طریق فروچاله‌ها و عارضه‌های کارستی دیگر، سبب افزایش آسیب‌پذیری آب کارست می‌شود (Katz *et al.* 2009).

کوینلان و اورز (Quinlan and Ewers 1985) آبخوان‌های کارستی را طبق مشخصه هیدرولیکی آن‌ها تقسیم‌بندی نموده‌اند:

- **سامانه‌های بالغ** که حاکم بر مواردی است که سامانه مجرای، هدایت هیدرولیکی بالا دارد (برای مثال سامانه‌های کارست آلیپی) که به خاطر درز و شکافدار بودن و یا انحلال مجاری ایجاد می‌شوند. در این گونه محیط‌ها جریان آب زیرزمینی آشفته است و اندازه منافذ بیشتر از یک سانتی‌متر است.

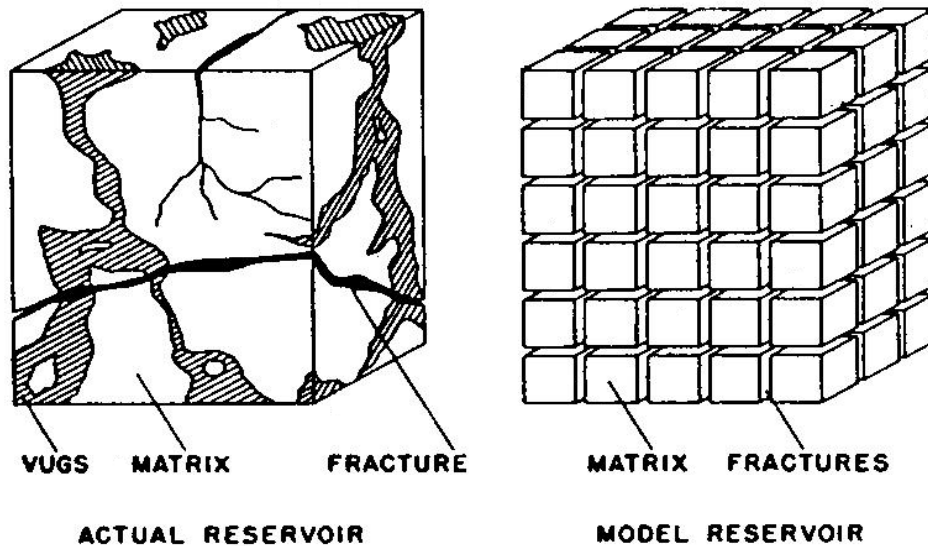
- **سامانه‌های جریان پراکنده** در محیط ماتریکس درز و شکاف‌های ریز با اندازه‌ی بازشدگی کمتر از یک سانتی‌متر مشاهده می‌شود که آب زیرزمینی در آن تمایل به رفتار جریان خطی دارد.

- **سامانه‌های ترکیبی** که ترکیبی از دو مورد بالا است، یعنی جایی که مجرا و سامانه درزه شکافدار ریز هر دو وجود دارند.

بیشتر آبخوان‌های کارستی می‌توانند به عنوان سامانه‌های ترکیبی طبقه بندی شوند، که در آنها سیماهای کارستی نوعی آبخوان با سرعت انتقال بالا و همچنین ذخیره قابل ملاحظه‌ای از آب را فراهم می‌آورند. از این رو هر تلاشی برای مدل کردن آبخوان‌های کارستی در زمره توصیف محیطی با تخلخل دوگانه شمرده می‌شود (شکل ۲-۴). این مفهوم دوگانگی در ابتدا توسط بارنبلات و همکاران

(Barenblatt 1960) ارائه شد و سپس توسط آتکینسون (Atkinson 1977)، گان (Gunn 1985)،

کیرالی (Kiralý 1998) و وایت (White 1999) تکامل یافته و اثبات شد.



شکل ۲-۴ دوگانگی سامانه‌های کارستی و نحوه اعمال آنها در مدل

۲-۵- مطالعات انجام شده در خصوص شبیه‌سازی انحلال در کارست

تا سال ۱۹۸۰ مدل‌های مفهومی برای توسعه آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شد. برای نمونه می‌توان به موارد انجام شده به وسیله مندل (Menndel 1966)، وایت (White 1969)، لگگرنند و استرنفیلد (LegGrand and strinfield 1976)، پالمر (Palmer 1975) و فورد و اورز (Ford and Evers 1978) اشاره کرد. با تعریف سینتیک‌های انحلالی تحولی شگرف در زمینه شبیه‌سازی عددی تکامل کارستی به وجود آمد که سرعت پیشرفت آن را دو چندان کرد. مهم‌ترین جزء مدل‌های جدید کاربرد سینتیک‌های مرتبه بالا برای انحلال کلسیت برای (حالت) آب نزدیک به اشباع است، که به آب زیراشباع اجازه نفوذ عمیق به درون آبخوان کارستی را می‌دهد. این مفهوم اولین بار توسط وایت (White 1977) معرفی شده بود که به نقطه رهایی سینتیکی معروف شده است. بعدها کیفیت سینتیک‌های انحلالی کلسیت تعیین شد (Plummer *et al.* 1978) و بوهمان و دریبرودت

(Buhmann and Drybrodt 1985 a,b)) و مدل‌های عددی یک بعدی به منظور شبیه‌سازی بزرگ-شدگی یک درزه تنها توسعه داده شد. یک بحث مختصر و دقیق‌تر سینتیک‌های انحلالی و فرآیندهای نرخ محدود شده به وسیله دربرودت (Dreybrodt 1998) و دربرودت و آیزنلر (Dreybrodt and Eisenlor 2000) تهیه شده است، آنها نیز نشان داده‌اند که اگر غلظت کلسیم دور از اشباع باشد (برای کلسیت)، سینتیک‌های انحلالی تند هستند که سینتیک‌های مرتبه اول نامیده می‌شوند و بر عکس اگر غلظت نزدیک به اشباع باشد سینتیک‌های انحلالی آهسته (آرام) هستند که سینتیک‌های مرتبه بالا نامیده می‌شوند. نرخ انحلال (F) که به وسیله دربرودت و آیزنلر (Dreybrodt and Eisenlor 2000) برای مدل کردن انحلال کلسیم داده شده بر پایه یافته‌های تجربی به وسیله پلومر و همکاران (Plummer *et al.* 1978)، پالمر (Palmer 1991)، بوهمان و دربرودت (Buhmann and Drybrodt 1985 a,b)، سونسون و دربرودت (Svensson and Dreybrodt 1992) و آیزنلر و همکاران (Eisenlor *et al.* 1999) است.

اولین مدل یک بعدی انحلال سنگ آهک توسط پالمر (Palmer 1988) انجام شد، او مدل یک بعدی انحلال سنگ آهک را پیشنهاد داد و افزایش فرار آب از مخزن سد گریت‌فالرزرویر در ایالات متحده آمریکا را بر اثر بزرگ‌شدگی انحلالی مسیرهای درزه‌ای دانست که کف دریاچه را به پایین دست وصل می‌کنند. او با یک تخمین سرانگشتی، با توجه شرایط هیدرولیکی زیر سد و مسیر آن در سنگ آهک با پهنای بازشدگی در حدود ۰/۰۱ سانتی‌متر، حجم فرار آب را برآورد کرد. این تخمین‌ها بعدها توسط دربرودت (Dreybrodt 1992-1996) تایید شد. اولین مدل روی مجاری بزرگ (مجرا-ها) یک بعدی توسط جیمز (James 1992) با مطرح کردن این پرسش که "انحلال فزاینده به‌ویژه در سنگ‌های ژیبسی می‌تواند باعث شکست سد شود؟" صورت پذیرفت.

مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی جریان در سازندهای کارستی استفاده شده، که بیشتر آنها سازند کارستی را با معادل نمودن پارامترها، شبیه‌سازی کرده‌اند. در دو دهه گذشته مدل‌هایی در سطح دنیا ارائه شده‌اند که می‌تواند به جای معادل‌سازی پارامترها، ابعاد مجاری را در مدل اعمال کند.

گروز و هوارد (Groves and Howard 1994b) مدلی برای شبیه‌سازی تکامل عهد حاضر سامانه‌های کارستی در دو بعد توسعه داده‌اند. این مدل از دو پتانسیل ثابت شده در ورودی و خروجی یا محدوده‌های بیشینه تخلیه در لوله‌ها استفاده کرده است و قطر لوله‌ها را در این مدل با استفاده از توزیع آماری لاگ نرمالی مشخص کرده‌اند. توزیع مسیرهای جریان ترجیحی توسعه یافته در مدل آنها می‌تواند به وسیله توزیع اولیه قطرهای لوله از پیش تعیین شود. در ابتدا برای شبیه‌سازی مجاری بزرگ از یک صفحه درزه‌ای موازی، اشباع یا مجرای استوانه‌ای با شرایط مرزی ساده استفاده می‌شد، پالمر (Palmer 1991, 1988) و دربرودت (Dreybrodt 1990-1996). سپس مدل‌های دو بعدی مستعد شبیه‌سازی توسعه شبکه مجرای تقریباً مشابهی به وسیله لوریتزن و همکاران (Lauritzen *et al.* 1992)، گروز و هووارد (Groves and Howard 1994 a, b)، هووارد و گروز (Howard and Groves 1995) و سایمرزو دربرودت (Siemers and Dreybrodt 1998) ارائه گردید. آنابل و سودکی (Annable and Sudicky 1998) مدلی را استفاده کردند که جریان اشباع شده متغیر در یک سامانه درزه با جریان کانال باز ترکیب شده و هر کدام نیز مشتمل بر تکنیک‌های انحلالی در کانال است. آنها بر توسعه مجرا متمرکز شدند و نتیجه گرفتند که مجراهای باز شده، دره‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. هانا و راجارام (Hanna and Rajaram 1998) و کافمن و برون (Kaufman and Braun 1999) نیز مدل‌های مشابهی ارائه کردند.

کافمن و برون (Kaufman and Braun 2000) یک شبکه لوله‌ای را با یک محیط پیوسته ترکیب کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که کارستی شدن ابتدایی می‌تواند به وسیله حضور یک محیط جریان انتشاری گسترش یابد. گابرووسک و دربرودت (Gabrovsek and Dreybrodt 2001) اثبات کرده‌اند که محیط درزه‌ای شده می‌تواند در اصل به وسیله یک شبکه متراکم درزه و ترک‌های کوچک ایجاد بشود و اخیراً به وسیله بیرک و همکاران (Birk *et al.* 2003) و لیدل و همکاران (Liedl *et al.* 2003) توسعه داده شده است.

کلمنز و همکاران (Clemens *et al.* 1996) کد تکامل حفرات آبخوان کربناته (CAVE) را معرفی کردند، کد مزبور اولین مدل شبیه‌سازی پیدایش آبخوان‌های کارستی با در نظر گرفتن تخلخل دوگانه یا رفتار دوگانه سامانه‌های کارستی بود. این مدل برای بررسی نشست بر اساس فرضیات بوئر و همکاران (Bauer *et al.* 1999) نیز به کار گرفته شد.

۲-۶- مطالعات انجام شده شبیه‌سازی انحلال کارست در مجاورت مخازن سدها

تلاش‌هایی روی مدل دو بعدی به وسیله دربرودت و سیمیرز (Dreybrodt and Siemers 2000) و دربرودت و همکاران (Dreybrodt *et al.* 2001) صورت گرفته است. تکامل پهنای بازشدگی درزه برای محل سدها با فرض گرادیان هیدرولیکی بالا، حضور دو دسته درزه عمود بر هم و تکیه‌گاه‌های نفوذناپذیر سد، توسط دربرودت و گابرووسک و رومانوو (Dreybrodt and Gabrovsek and Romanov 2003, 2007) انجام شده است.

در مطالعه دربرودت و گابرووسک و رومانوو (Dreybrodt and Gabrovsek and Romanov 2003) یک مدل دو بعدی واقع بینانه‌تر از سنگ درزه‌ای قابل انحلال زیر سد برای مطالعه تکامل پهنای درزه بر اثر کنش گرادیان هیدرولیکی بالا که توسط آب ذخیره شده وارد می‌شود ارائه شده است. با تعیین پارامترهای موثر و کالیبره کردن آن و سپس حساسیت سنجی به نتیجه‌های مهمی رسیدند. در این مدل هدایت اولیه به وسیله یک شبکه درزه با متوسط پهنای بازشدگی 10^{-2} سانتی‌متر شبیه‌سازی شده که این رکورد خیلی ایده‌آل است. همه مدل‌های آنان نشان می‌دهد که تحت چنین شرایطی در ساختگاه سدهای بزرگ، افزایش سرعت‌های نشست در زمان عمر آن به صورت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. آنها علاوه بر این ادعای توانایی اعمال شرایط لیتولوژیکی خاص مانند لایه‌های چینه‌شناسی با ویژگی‌های متفاوت با توجه به هدایت هیدرولیکی یا سینتیک‌های انحلالی، همچنین تنظیم‌ها و پدیده‌های پیچیده‌تر زمین‌شناسی مثل فراتیک باز یا مجراهای غاری آبی زیر سد را نیز در مدل خود

دارند. آنها همچنین توانستند نشان دهند که انحلال در سامانه ماتریکسی تنها تحت گرادیان‌های هیدرولیکی بالا مهم است. لازم به ذکر است که داده‌های تغذیه و پارامترهای هیدرولیکی مورد استفاده در مدل مفهومی به کار برده شده و در مدل عددی از یک آبخوان کارستی تیپیک در جنوب‌غربی آلمان به دست آمده است که پیشتر به وسیله دربرودت (Dreybrodt 1996) گردآوری، دسته‌بندی و تعریف شده بود.

کواکس (Kovacs 2003) به کمک آنالیز هیدروگراف چشمه و مشخص کردن هندسه و پارامترهای هیدرولیکی و ساختن یک مدل مفهومی ساده، فرمول ارتباط بین پارامترهای هیدرولیکی و ضریب بازگشت هیدروگراف را استخراج که به منظور به کارگیری نتایج فرموله شده برای ارزیابی پارامترهای ورودی مدل عددی آبخوان بوئر در ناحیه جورا در کشور سوئیس مورد استفاده قرار گرفت. جرومه (Jerome 2003) یک مدل مفهومی جریان و انتقال در آبخوان کارستی ناحیه میلاندر در سوئیس را بر اساس تغییرات فضایی و موقت ردیاب‌های طبیعی ارائه کرده است که در آن با اشاره به روش‌های موجود برای مطالعه جریان و انتقال، نبود جزئیات مطالعات میدانی را در این دو روش زیر سوال برده و بر آن شده که خلا بین داده‌های میدانی و مدل را در تحقیق خود پر کند. وی در مدل خود چهار زیرسامانه و سپس توزیع هر کدام را شرح داده است. با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر وضعیت آینده آبخوان، نقش برجسته دو زیرسامانه‌ی زون خاکی و اپی کارستی را روی انتقال انحلالی در سامانه کارستی را نتیجه می‌گیرد.

امیری (۱۳۸۶) در ایران برای حوضه آبرگیر چشمه‌ی قمپ واقع در ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز که سد تنگ‌آب در آنجا در حال ساخت است مدلی ارائه کرده است. وی با استفاده از داده‌های پیژومتری ۳۰ روزه که بر روی یک بازه زمانی ۴۶ روزه صحت‌سنجی شده بود، به این نتیجه رسید که این مدل بیشتر به ضریب ذخیره و مدت زمان رسیدن آب بارش به سطح ایستابی حساس است و با پیش‌بینی فرار آب از مخزن سد تنگ‌آب تحت شرایط تراز آب نرمال پس از احداث سد نتیجه گرفته‌اند که فرار آب قابل ملاحظه نیست.

در یک نگاه کلی در مطالعات انجام شده توسط دربرودت و گابرووسک و رومانوو (Dreybrodt and Gabrovsek and Romanov 2002, 2003, 2007)، با توجه به پارامترهای به کار برده شده، آنالیز حساسیت این پارامترها و تمرکز بر روی قطر مجراها در مقایسه با دیگر روش‌های ارائه شده در کارهای قبلی، روش قابل قبول‌تر و مناسبی دارد و همچنین به نظر رویه‌ی کاملتری نسبت به سناریوهای قبلی دارد که در این کار مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین کد محاسباتی CAVE که به وسیله کلمنز و همکاران (Clemens et al.1996) تهیه شده است و سپس توسط دربرودت و همکاران ارتقاء یافته است، با توجه به در دسترس بودن آن و قابلیت وارد کردن پارامترهای گوناگون موثر در روند کارستی شدن به صورت مجزا و قابلیت‌های جریانی و انتقالی، محیطی، میزان بارش، نحوه تخصیص بارش در مدل، پارامترهای انحلالی و عوامل کنترل‌کننده‌ی آن و میزان و نحوه تبادل آب در محیط برنامه مناسبی برای ترکیب کردن با روش بالا و کسب نتایج مطلوب است. با توجه به کارهای ارائه شده در این دو مورد اخیر، به نظر روش و ابزار مناسب و قدرتمندی جهت رسیدن به هدف این مطالعه که شبیه سازی نشت ناشی از انحلال در زیر پی سد که از جمله مهمترین دلایل فرار آب در سدهای مناطق کارستی است، به کار گرفته شده است. با توجه به محدوده ساختگاه سد کارون ۴ که دارای ویژگی‌های مناسب برای شبیه سازی است محل این سد به عنوان مورد مطالعاتی در موارد مطرح شده بالا استفاده شده است

۲-۷- ضرورت بررسی نشت و فرار آب

از آنجایی که پس از آب‌گیری سد، بار هیدرولیکی افزایش می‌یابد، فرار آب هرچند به مقدار ناچیز اجتناب‌ناپذیر است و هیچ مخزنی را نمی‌توان آب‌بند کامل در نظر گرفت. مسئله فرار آب در مناطق کارستی با توجه به توسعه درزه و شکاف‌ها و مجاری انحلالی دارای پتانسیل بیش‌تری نسبت به سایر مناطق می‌باشد.

نیل ۱۹۷۲، طرق مختلف فرار آب از سدهای کارستی را به شرح زیر بیان کرده است:

- عبور آب از زیر سد به داخل رودخانه یا عبور آب از داخل سازندهای کارستی به داخل دره

مجاور

- معکوس شدن جریان به داخل چشمه‌ها در نتیجه افزایش تراز آب در مخزن
- فرار آب از طریق فرو چاله که به غارهای زیرزمینی متصل هستند.
- فرار آب از طریق گسل‌ها و مناطق درزه و شکافدار
- فرار آب در نتیجه شستشوی رس و سایر مواد نرم باقیمانده در درزه و شکاف‌ها و مجاری

انحلالی

- فرار آب در نتیجه انحلال ژیپس و سایر کانی‌های تبخیری
- فرار آب در نتیجه عدم تحمل سنگ‌های پی بر اثر آبیگری سد و بار هیدرولیکی وارده

با توجه به حالت‌های مختلف فوق‌الذکر در فرار آب از سدها، بررسی پتانسیل وقوع هر یک از این حالت‌ها ضروری می‌باشد. به طور کلی در پدیده فرار آب از سدها یک یا چند حالت از حالت‌های مذکور می‌تواند به وقوع بپیوندد. به عنوان مثال در بعضی از موارد پس از آب‌گیری مخزن، چشمه‌های جدیدی در مناطق پایین‌دست ظاهر شده است که تغذیه این چشمه‌ها از داخل مخزن به دو طریق عمده بوده است. یکی ورود آب مخزن به داخل گسل‌ها، درزه و شکاف‌ها و کانال‌های انحلالی و خروج آن از چشمه‌ها و دیگری خروج آب از طریق فرو چاله‌ها که در داخل مخزن به وجود آمده‌اند. به این صورت که در مواردی که سازندهای کارستی توسط آبرفت پوشیده شده باشد، پس از آب‌گیری مخزن در اثر افزایش فشار آب این رسوبات سوراخ شده و فروچاله‌ها در کف مخزن به وجود می‌آیند که می‌توانند آب را در داخل کانال‌های انحلالی موجود در آهک‌ها هدایت کرده و از چشمه‌ها خارج نمایند.

۲-۷-۱- شواهد زمین‌شناسی پدیده نشت

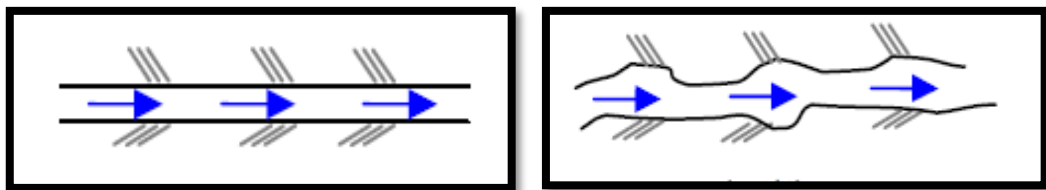
در نواحی پایین‌دست سد که به طور معمول چشمه‌های طبیعی وجود دارند می‌توانند محیط‌های مناسبی برای نشت و فرار آب از سد باشند. جریان از چشمه‌های آب زیرزمینی که از قبل وجود داشته‌اند، احتمالاً به خاطر افزایش ارتفاع سطح آب در پشت سد افزایش می‌یابد. نشت می‌تواند از هرجایی در پایین‌دست، دور از پاشنه سد و یا روی پایین‌دست تکیه‌گاه‌ها در ارتفاعی پایین‌تر از سطح آب در مخزن سد بیرون آید. این پدیده ممکن است به صورت یک منطقه نرم و مرطوب، باتلاق مانند؛ مانند جایی که آب زیرزمینی، به سطح زمین می‌رسد و یا یک چشمه جاری دیده شود. همین‌طور ممکن است که در وهله‌ی اول به صورت یک منطقه با گیاهانی سبز و پرپشت نمایان شود. دیگر شاهد نشت آب، حضور باکتری‌های بارنگ آهن زنگ‌زده می‌باشد. این باکتری‌ها به خاطر ماهیت آن‌ها اغلب در جایی که آب از درون زمین به آب‌های سطحی تخلیه می‌شود، پیدا می‌شوند.

۲-۸- تأثیر ناپیوستگی‌ها بر نفوذپذیری سنگ

به طور معمول توده‌های سنگی از قطعات سنگی هوانزده تشکیل می‌شوند که توسط ناپیوستگی‌ها از هم جدا شده‌اند. سنگ هوانزده، جسم پیوسته و منسجم است که فاقد هرگونه ناپیوستگی مهم است. البته در مقیاس کوچک سنگ بکر می‌تواند حاوی ریزترک‌هایی باشد که در فرایند تشکیل سنگ به وجود آمده‌اند. تراوش از داخل توده سنگ از طریق ناپیوستگی‌ها و ریزترک‌های موجود در سنگ سالم رخ می‌دهد اما معمولاً بیشتر تراوش در توده سنگ از طریق ناپیوستگی‌های آن صورت می‌گیرد (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۷).

همان‌طور که در خاک، رابطه تجربی داری برای بیان شدت جریان و گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل برقرار است، به‌منظور تعیین خصوصیات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها نیز آزمایش‌های بسیار زیادی انجام‌شده تا رابطه‌ای بین شدت جریان و گرادیان هیدرولیکی با استفاده از روش‌های تجربی و

تحلیلی برای این محیط به دست آید. مسئله جریان در درون ناپیوستگی را می‌توان به وسیله معادلات مایعات لزج تراکم‌ناپذیر ناویر استوکس توصیف کرد (Johnson 1987). ناپیوستگی‌های توده سنگ درزه‌دار معمولاً دیواره‌های ناهمواری دارند و اندازه‌ی شکاف اولیه در طول هر ناپیوستگی مقدار ثابتی نیست. در تحلیل مسائل هیدرولیکی و مکانیکی با توجه به نقش اساسی ناپیوستگی‌ها، از اندازه‌ی شکاف متوسط و معادل استفاده می‌شود (۲-۵) (Barton & Bandish, 1987):



شکل ۲-۵ شکل ناپیوستگی. الف: اندازه‌ی شکاف واقعی و متغیر (راست) ب: اندازه‌ی شکاف معادل و ثابت (چپ) (Barton & Bandish, 1987)

در حالتی که ناپیوستگی با مواد سست و ضعیف پر می‌شود، انتخاب صحیح پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی برای ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار مشکل می‌شود. در این حالت خواص هیدرولیکی و مقاومتی ناپیوستگی‌ها، به ویژگی‌های مواد پرکننده، جابجایی برشی ایجادشده، ماهیت سطح درزه و ضخامت مواد پرکننده بستگی دارد. برای مثال، نفوذپذیری ناپیوستگی که با خاک رس پر شده، برابر با نفوذپذیری رس می‌باشد.

یزدانی و همکاران (۱۳۸۷) تأثیر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها، مانند امتداد درزه‌ها و میزان بازشدگی آن‌ها بر رفتار هیدرولیکی و میزان نشت آب از داخل آن‌ها را در تکیه‌گاه‌های سنگی سدهای بتنی- قوسی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها تأثیر فراوان و تعیین‌کننده‌ای بر میزان نشت از توده سنگ تکیه‌گاه‌ها داشته و در مواردی می‌تواند ایمنی تکیه‌گاه‌ها را نیز به خطر بیندازد. در این تحقیق جهت پاسخ هیدرولیکی و میزان نشت آب از تکیه‌گاه سدهای بتنی از نرم‌افزار UDEC؛ که برای مدل‌سازی‌های محیط ناپیوسته بر اساس عناصر مجزا تهیه

شده و به خوبی نقش ناپیوستگی‌ها و اندرکنش هیدرودینامیکی را در محیط‌های توده سنگی لحاظ می‌کند، استفاده شد. از بررسی این تحقیق برمی‌آید که:

- زاویه‌ی امتداد ناپیوستگی‌ها با جهت جریان و همچنین بازشدگی اولیه‌ی آن‌ها اثر فراوانی بر میزان نشست از تکیه‌گاه سدها دارند
- پارامترهای هیدرولیکی تأثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی توده سنگ درزه‌دار دارند. این مطلب به خوبی اهمیت لحاظ کردن اندرکنش هیدرودینامیکی در تحلیل محیط‌های توده سنگی را نشان می‌دهد.
- بر طبق قوانین مکانیک سیالات نشان داده می‌شود که با فرض عبور جریان لایه‌ای، برای سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر از میان صفحات موازی، دبی جریان با توان سوم فاصله‌ی میان صفحات متناسب است. بنابراین اندازه شکاف اولیه هیدرولیکی پارامتری بسیار مهم در بحث تراوش از میان ناپیوستگی‌های سنگی است.

نبود دید دقیق در شرایط کارستی و درزه و شکافدار در ساختگاه سدها به ویژه در مراحل قبل از ساخت سد، فرار آب بزرگی را در سدهای این نواحی کارستی سبب شده است (Mohammadi *et al*, ۲۰۰۶). ضخامت آهک موجود در زیر سدها که در ایران تا ۱۰۰ متر هم می‌رسد، در فرار آب بسیار مؤثر است و هر چقدر ضخامت آن بیشتر باشد نگرانی برای فرار آب از سد بیشتر خواهد بود. علاوه بر این عوامل، ارتفاع آب در سد هم در فرار آب مؤثر است و اغلب اگر ارتفاع آب در سد کم باشد، میزان فرار آب از سد هم کم خواهد بود؛ اما وقتی ارتفاع سد از ۴۰ تا ۵۰ متر بالاتر باشد، خاک‌های رس که اجازه عبور آب را نمی‌داد، تحت فشار ارتفاع آب سد قرار می‌گیرد و شسته می‌شود (باقری ۱۳۸۶). با حرکت این رس‌ها از جای خود مجاری باز می‌شوند و آب از طریق آن‌ها از سد فرار می‌کند. با تأکید بر این موضوع که به هیچ وجه نمی‌توان ارتفاع سد را کم کرد باید متذکر شد که وقتی قرار است سدی بتنی احداث شود، باید ارتفاع آن ۱۵۰ یا ۲۰۰ متر باشد و از ارتفاع ۴۰ متر به بعد به دلیل احتمال شسته شدن خاک‌های رس، فرار آب وجود خواهد داشت اما در صورتی که ارتفاع سد کم باشد، نه آبی در آن جمع می‌شود و نه می‌توان از آن نیروی برق تولید کرد (شباب بروجنی ۱۳۹۱).

از دیگر عوامل مؤثر بر فرار آب از سدها می‌توان به حضور گچ اشاره کرد؛ مکانیسم ایجاد مجاری در زیر زمین توسط گچ متفاوت است و در واقع آب باعث حل شدن گچ می‌شود. بنابراین، احداث سد در داخل سازندهایی که گچ به مقدار زیاد در آنجا وجود دارد، ممکن است سبب خروج آب از سد شود (رئییسی ۱۳۸۹). نواحی کارستی به دلیل دارا بودن محیط‌های درز و شکافدار و انحلالی بزرگ در کنار محیط‌هایی با نفوذپذیری کم از دیدگاه رفتار مهندسی و هیدرولوژیکی، رفتار پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند. مهم‌ترین عاملی که باعث تشدید پیچیدگی گردیده است، حضور مجاری و مسیرهای انحلالی می‌باشد که عرض یا بازشدگی آن‌ها تا چندین متر نیز می‌تواند برسد.

فصل سوم: روش انجام کار

در این فصل، ابتدا تئوری مربوط به شبیه‌سازی انحلال و روش‌های مختلف شبیه‌سازی انحلال در آبخوان‌های کارستی به طور مختصر ارائه خواهد شد. سپس روش انجام این تحقیق شامل، داده‌های مورد استفاده (محیط ماتریکس، محیط مجرای، ارتباط بین محیط ماتریکس و مجاری) و سیستم انحلال کلسیت ارائه می‌گردد.

۳-۱- تئوری شبیه‌سازی انحلال در آبخوان‌های کارستی

برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان‌های کارستی، باید از مدل‌هایی استفاده شود که رفتار دوگانه آن را در نظر می‌گیرند. به طور مفهومی، در محیط کارستی، سامانه جریان از دو بخش جریان افشان در مجاری ریز و ماتریکسی و جریان آشفته در مجاری بزرگ تشکیل شده است. رویکردهای متنوع مدل‌سازی قادر به در نظر گرفتن رفتارهای خاص کارست هستند (Sauter *et al.* 2006). مطالعاتی متعددی مزایای استفاده از مدل‌های عددی را برای بررسی آبخوان‌های کارستی نشان داده است (Liedl and Sauter 2000, Brike *et al.* 2005).

۳-۱-۱- معرفی شبیه‌سازی انحلال در کارست

مدل‌های ترکیبی یک رویکرد عددی امیدوار کننده برای در نظر گرفتن ویژگی‌های کارست است. این مدل‌ها یک مدل پیوسته را که نشان‌دهنده ماتریکس سنگ متخلخل است به یک شبکه لوله مجزا که نشان‌دهنده کانال‌های کارست است، متصل می‌کنند. بنابراین مدل‌های عددی ترکیبی برای نشان دادن جریان دوگانه آبخوان‌های کارستی ابزار مناسبی هستند (Teutsch and Sauter 1998).

مدل ترکیبی تکامل حفرات آبخوان‌های کربناته (CAVE) توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا گسترش یافت و مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW (McDonald and Harbaugh) در دانشگاه توبینگن آلمان گسترش یافت (Clemens 1997, Huckinghaus 1998, Liedl 1998). در ابتدا CAVE برای مطالعه فرآیندهای بلند مدت مانند توسعه آبخوان‌های کربناته استفاده می‌شد. بعدها CAVE به طور پیوسته گسترش یافت. بوئر (Buwer 2001) برای نشان دادن تاثیرات اپی کارست بر تغییرات زمانی شرایط مرزی و پر شدن کانال‌ها و در نظر گرفتن شیمی انحلال کلسیت، روش‌هایی را به مدل اضافه کرد. بریک (Brik 2002) روش‌هایی را برای محاسبه فرآیندهای انتقال گرما و مواد و در نظر گرفتن شیمی انحلال ژئوپس به کار برد. در نتیجه CAVE برای بررسی فرآیندهای کوتاه مدت، به عنوان مثال پاسخ چشمه‌های کارستی به تغذیه (Liedl and Sauter 2000, Brik et al. 2006) یا آزمایش‌های ردیابی (Brik 2005) مورد استفاده قرار گرفت. بعدها سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بخشی از CAVE را در فرآیندهای جریان کانال (CFP) برای MODFLOW-2005 (Shoemaker et al. 2008 b) مورد استفاده قرار داد و به همین دلیل این مدل ترکیبی را به طور گسترده‌ای در دسترس قرار داد.

در این مدل محیط مجاری ریز و ماتریکسی توسط یک محیط پیوسته براساس معادله بوزینسک شبیه‌سازی می‌شود. جریان در مجاری بزرگ به وسیله شبکه‌ای از لوله‌ها که در محل گره‌ها به هم متصل می‌شوند، شبیه‌سازی شده است. در گره‌ها تعادل بین نرخ جریان ورودی و خروجی براساس

قانون کیرشف است. رابطه بین اختلاف بار آبی و میزان دبی جریان، بسته به اینکه جریان آشفته یا خطی باشد تغییر می کند.

$$Q = K\left(\frac{\Delta h}{L}\right)^m \quad ۱-۳$$

اگر جریان خطی باشد $m=1$ است و اگر جریان آشفته باشد $m=2$ محاسبه می گردد. به منظور شناخت نحوه عملکرد نرم افزار، در این فصل به مبنای تئوری و نحوه مدل سازی پرداخته می شود. با توجه به انتخاب مدل عددی CAVE و محل مورد نظر برای مدل کردن، داده های سطح آب در این محل، لزوم معرفی مدل به صورت کامل، معادلات حاکم بر این مدل و نحوه محاسبه و به کارگیری پارامترهای مختلف و همچنین تشریح این معادلات و مدل مفهومی پیشنهادی، در هر قسمت به طور کامل تشریح خواهد شد.

۳-۱-۲- روش های مختلف شبیه سازی انحلال

به طور کلی، رویکردهای مدل ریاضی برای سیستم های هیدرولوژیکی کارست، به دلیل توزیع مکانی ناهمگنی ها به (۱) مدل پارامترهای یکجا و (۲) مدل پارامترهای توزیع شده، طبقه بندی می شوند.

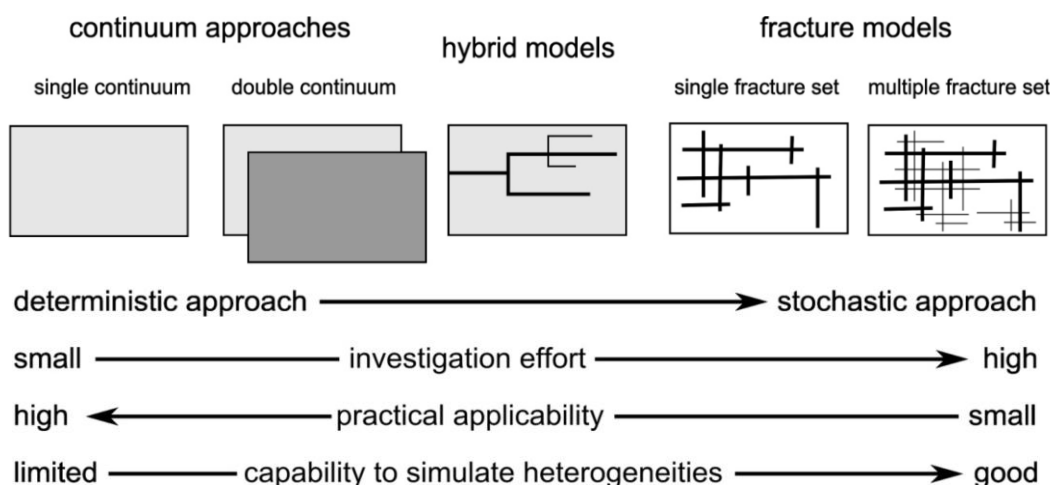
۳-۱-۲-۱- مدل پارامترهای یکجا- روش های جهانی

مدل های پارامترهای یکجا، پاسخ هیدرولیکی سیستم کلی کارست را در نظر می گیرند. تجزیه تحلیل ها، ارتباط سیستماتیک بین جریان ورودی (تغذیه) و پاسخ سیستم (تخلیه چشمه) را، به عنوان مثال رویکرد عمل انتقال، مورد بررسی قرار می دهد (Kiraly 2002, Geyer *et al.* 2008, Maréchal *et al.* 2008). این مدل ها اساس فیزیکی ندارند، و بنابراین اغلب به نام جعبه سیاه (BlackBox) یا مدل های ورودی- خروجی (Input-Output-Models) نامیده می شوند. با توجه به

کاربرد آسان و تقاضای پارامتر کم، این مدل‌ها به طور گسترده استفاده می‌شوند. یک ابزار معمول برای این مدل‌ها، تحلیل هیدروگراف چشمه است.

۳-۱-۲-۲- مدل پارامترهای توزیع شده

مدل پارامترهای توزیع شده، سیستم هیدرولوژیکی کارست را بر اساس خواص مکانی، به عنوان مثال هدایت هیدرولیکی، توصیف می‌کند. برای این منظور سیستم هیدرولوژیکی کارست نیاز به فاصله و مکان مشخص دارد تا جریان آب‌های زیرزمینی را برای هر عنصر با استفاده از معادلات مناسب تعریف کند. برخلاف مدل پارامترهای یکجا، مدل‌های توزیع شده نیاز به داده‌های ورودی مناسب با و مکان مشخص دارند، که کم و بیش کمیاب هستند (Sauter et al. 2006). علاوه بر این مجاری که توسط انحلال بزرگ شدند منجر به ناهمگنی و ناهمسانی شدید می‌شوند. از این رو، رویکردهای مدل‌های توزیع شده نیاز به قابلیت برای در نظر گرفتن ناهمگنی و ناهمسانی دارند. یک طرح طبقه‌بندی شده برای سیستم‌های هیدرولوژیکی کارست پیشنهاد شده است (Teutsch and Sauter, 1991). بر اساس تلاش‌های صورت گرفته در تحقیقات مدل‌های عددی که قابلیت شبیه‌سازی ناهمگنی و ناهمسانی محیط کارستی را دارند، ساخته شد (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳ مقدمه‌ای از رویکرد مدل عددی (Teutsch and Sauter, 1991)

۳-۲- روش انجام کار

به منظور شبیه‌سازی انحلال سنگ‌های کربناته محدوده سد کارون ۴ با استفاده از مدل، داده‌ها به شرح زیر ارائه شده است.

۳-۲-۱- داده‌های مورد استفاده

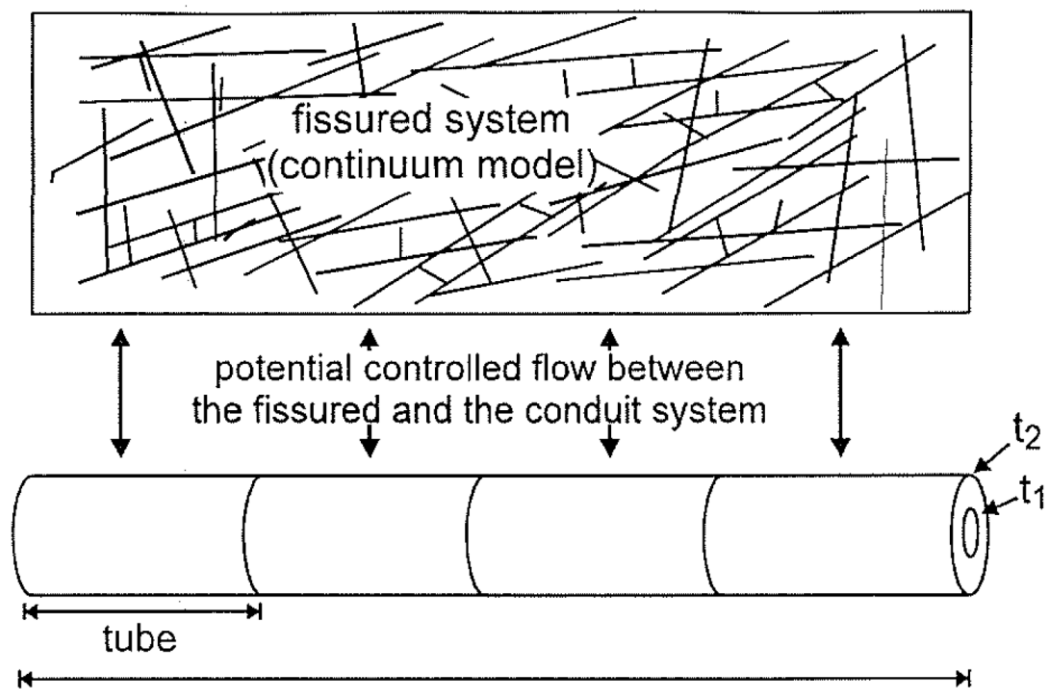
مدل‌های کارستی ژنز و نحوه توسعه مجرا در آبخوان را در نظر می‌گیرند، همین‌طور باید انتقال یون‌ها در مجاری بزرگ، انحلال در دیواره‌های مجاری و بزرگ‌شدگی مجاری را نیز در بر بگیرند. مدل CAVE در سال ۱۹۹۶ توسط کلمنز و همکاران توسعه داده شد که موارد ذکر شده در آن، به منظور تعیین توسعه کارست لحاظ شده است. در این راستا مدل‌های عددی ابزار مناسبی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی هستند، به عنوان مثال در جریان‌های ورودی یا خروجی به آبخوان‌ها. مدل CAVE دارای سه جزء است:

(الف) مدول جریان پیوسته متخلخل (ماتریکس)

(ب) مدول شبکه‌ی لوله‌ی گسسته جریان و انتقال

(ج) مدول انحلال کربنات که در یک رویه دوگامی، بزرگ‌شدگی مجاری را محاسبه می‌کند.

زمینه تئوری برای مدل توسعه یافته که شامل مدول شبکه لوله و انحلال کربنات می‌باشد در زیر به صورت یک طرح توضیح داده شده است. در این برنامه محاسبه بارهای آبی در در تمامی نقاط سامانه ماتریکسی با استفاده از Modflow آغاز می‌شود (Mc Donald and Harbaugh 1984). پس از همگرایی سیستم افشان (مدل Modflow) و شبکه لوله (مدل CAVE)، مدول شیمیایی نرخ انحلال کربنات در داخل لوله‌ها را محاسبه می‌کند (شکل ۳-۲). تغییر در قطر مجاری کربنات طبق جرم کربنات حل شده تعیین می‌شود. این روش برای هر گام زمانی (time step) در طول دوره شبیه‌سازی تکرار می‌شود.



شکل ۲-۳ دو مدل مفهومی سیستم افشان و مجرا و بزرگ‌شدگی لوله بر اثر انحلال در دو زمان مختلف (Clemens *et al.* 1996) با توجه به شکل ۲-۳، سیستم افشان یا ماتریکسی در ابتدا توسط مدل مادفلو شبیه‌سازی می‌شود، مدول شبکه لوله که نشان‌دهنده مجاری موجود در مناطق کارستی است با استفاده از ند و لوله در مدل CAVE شبیه‌سازی شده و بعد از همگرایی این دو سیستم در مدل CAVE نرخ انحلال در لوله‌ها با توجه به تغییر قطر مجاری در اثر انحلال محاسبه می‌شود.

۳-۲-۱-۱- ورودی به مدول جریان پیوسته متخلخل

جریان آب‌زیرزمینی در سامانه ماتریکسی و درزه‌های ریز به وسیله یک رویه پیوسته سه بعدی برای جریان ناهمگن و ناهمسانگرد بیان شده است (Bear 1972).

$$\vec{\nabla} = (K_F \vec{\nabla} h_F) + R_F - q_{ex} = S \frac{\partial h_F}{\partial t} \quad 2-3$$

K_F تنسور هدایت هیدرولیکی [$L.T^{-1}$]

h_F بارآبی پیزومتری در سامانه ماتریکسی [L]

Rf تغذیه به سامانه ماتریکسی در واحد حجم $[T^{-1}]$

q_{ex} نرخ جریان تبدالی بین سامانه ماتریکسی و مجاری بزرگ (لوله) بر واحد حجم

S ضریب ذخیره ویژه سامانه ماتریکسی $[L^{-1}]$

و t زمان [T] است.

۲-۱-۲-۲- ورودی به مدول شبکه لوله

برای شبکه لوله‌ای، قطرهای اولیه، توزیع فضایی، ضرایب تبادل لوله‌ها علاوه بر بارآبی ثابت یا مرزهای جریانی باید مشخص شود. به علاوه نسبت تغذیه مستقیم نفوذ کرده، با توجه به جنس سازندها، به درون مجراها می‌تواند مشخص شود. این مدول سامانه جریان سریع آبخوان کارستی را ارائه می‌دهد. مجراهای بزرگ به صورت استوانه‌هایی فرض شده است که همدیگر را در محل گره‌ها (node) قطع کرده‌اند.

در اولین گام روابط هیدرولیکی برای یک تک لوله توضیح داده شده است. مقدار مطلق تلفات بارآبی Δh ناشی از جریان لوله به وسیله رابطه داری-وایسباخ به دست می‌آید که به شکل زیر بیان می‌شود (Clements *et al.* 1996).

$$\Delta h = \lambda \frac{L u^2}{d^5 g} \quad 3-3$$

که در اینجا λ فاکتور اصطکاک، d قطر لوله، u متوسط سرعت جریان، g ثابت گرانش زمین و L طول لوله است.

فاکتور اصطکاک λ به سرعت در لوله وابسته است، برای سرعت‌های پایین که جریان خطی است و عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ است (شکل ۳-۳)، از رابطه جریان هاگن-پویزل استفاده می‌شود (White ۱۹۸۸). این فاکتور اصطکاکی به این صورت محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{64 v}{du} \quad 4-3$$

ν گرانی سیماتیک است. که با جایگزینی در معادله ۳-۳ میزان نرخ تخلیه (Q) سراسر یک قسمت لوله قابل محاسبه است:

$$Q_{ij} = \frac{\pi a_{ij}^4 g (h_{cji} - h_{cij})}{128 \nu L_{ij}} \quad ۵-۳$$

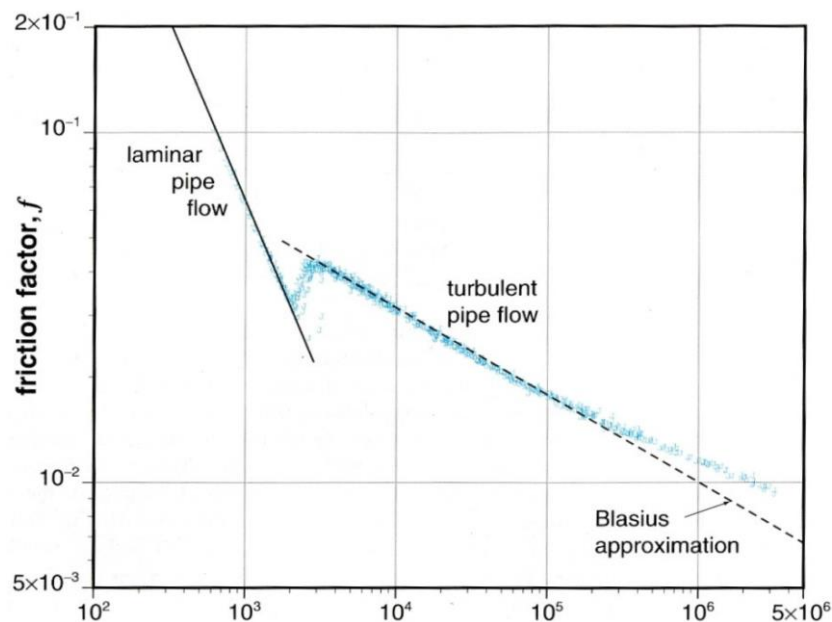
که در اینجا

g شتاب جاذبه $[L.T^{-2}]$

L_{ij} و a_{ij} طول و قطر مجاری بزرگ در گره i و j $[L]$

ν گرانی سیماتیک آب $[L^2.T^{-1}]$

$h_{c,i} - h_{c,j}$ بار آبی که در طول مجاری بزرگ به خاطر تلفات انرژی، از بین رفته است $[L]$



شکل ۳-۳ نمودار عدد رینولدز و تغییرات جریان (Hornberger et al. 1998)

اگر جریان آشفته باشد و عدد رینولدز بیش از ۲۳۰۰ گردد معادله کلبروک-وایت استفاده می شود (Horlacher and Ludecke 1992):

$$f(x) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k_c}{2.71 a_{ij}} \right] \quad ۶-۳$$

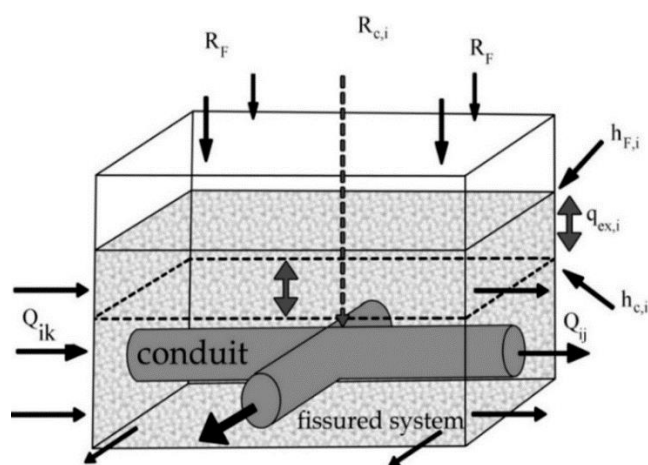
که در آن k_c زبری لوله، Re عدد رینولدز ($Re=ud/\nu$) است. برای شرایط جریان آشفته میزان نرخ حجم خروجی به وسیله معادله زیر معلوم می شود.

$$Q_{ij} = -\gamma Y \log\left(\frac{k_c}{\gamma \gamma_1 a_{ij}} + \frac{\gamma \gamma_1 \pi v a_{ij}}{4 Y}\right) \quad \gamma-3$$

که k_c زبری دیواره‌های مجاری بزرگ است [L] و

$$Y^\gamma = \frac{\Delta h g a_{ij}^\gamma \pi^\gamma}{\gamma L_{ij}} \quad \gamma-3$$

سامانه اتصال لوله‌ها با n گره بیان می‌شود و به وسیله قانون کیرشف بیان می‌شود که بر اساس آن کل جریان ورودی و خروجی در هر گره در تعادل بوده و مجموع آنها در هر گره صفر است. در شکل ۳-۴ به طور مفهومی معادله عمومی جریان در مدل CAVE نشان داده شده است که برای حجم دربردارنده یک سلول متصل به مجاری بزرگ که به وسیله یک بلوک سامانه ماتریکسی در بر گرفته شده است. R_F و R_C تغذیه به سامانه ماتریکسی و مجرا، h_F و h_C میزان بارآبی در سامانه ماتریکسی و مجاری بزرگ است، Q_{ij} نرخ‌های جریان به سلول‌های کناری و $q_{ex, i}$ نرخ جریان تبدالی است (Bauer and Liedl ۲۰۰۳).



شکل ۳-۴ هیدرولیک CAVE (Bauer and Liedl 2003)

بنابراین برای هر گره مانند i

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} + R_{C,i} + q_{ex,i} = 0 \quad 9-3$$

n_i بیانگر تعداد گره‌های متصل شونده به i

Q_{ij} [L³. T⁻¹] نرخ جریان تبادل شده بین گره i و j

$R_{c,i} [L^3 \cdot T^{-1}]$ تغذیه به گره i توسط مجاری بزرگ

$q_{ex,i} [L^3 \cdot T^{-1}]$ نرخ تبادل حجمی بین سامانه مجاری بزرگ و سامانه ماتریکسی در گره i است.

در حالت عمومی لوله‌هایی که دارای جریان خطی هستند ممکن است در یک لحظه به جریان آشفته تبدیل شوند، بنابراین از ترکیب معادله‌های ۳-۵، ۳-۷ و ۳-۹ داریم:

$$\sum_{j=1}^{n_i^{turb}} (-\gamma_{ij}) \log \left[\frac{\gamma_{\Delta 1} \pi d_{ij}^2}{4 \gamma_{ij}} + \frac{k_{ij}}{3.71 d_{ij}} \right] + \sum_{j=1}^{n_i^{lam}} \frac{\pi d_{ij}^5 \Delta h_{ij} g v}{128 L_{ij}} + R_i + q_{ex,i} = 0 \quad 10-3$$

که در آن n_i^{turb} و n_i^{lam} تعداد لوله‌های با جریان خطی و آشفته متصل به گره i است ($n_i^{lam} + n_i^{turb} = n_i$). برای هر گره در سامانه مجاری بزرگ با بار آبی نا معلوم یک معادله به شکل ۳-۱۰ به دست می‌آید. به این ترتیب یک شبکه با n گره که دارای بار آبی نامعلوم هست می‌تواند به عنوان یک سامانه n معادله غیرخطی با n مجهول بیان شود. این سامانه به وسیله روش تکرار نیوتن-راوسن حل می‌شود (Press et al. 1986).

۳-۲-۱-۳- ارتباط بین محیط ماتریکسی و مجاری بزرگ

نرخ جریانی تبادل شده بین دو محیط با اختلاف بار آبی بین دو محیط و ضریب تبادل بین دو محیط ماتریکس و شبکه لوله متناسب است. با در نظر گرفتن حالت پایدار تبادل آب زیرزمینی بین محیط ماتریکسی و مجاری بزرگ طبق مطالعات بارنبلانت و همکاران (۱۹۶۰) خطی بیان شده است.

$$q_{ex,i} = \alpha_{ex,i} (h_{F,i} - h_{C,i}) \quad 11-3$$

که در اینجا $\alpha_{ex} [T^{-1}]$ ضریب تبادل است. در این رویه مدل کردن α_{ex} پارامتر مدلی جریان تبادل است و مستقل از هر پارامتر دیگر است. اگر بار آبی محیط ماتریکس بیش از محیط مجاری بزرگ باشد، آب از ماتریکس وارد مجاری می‌شود و برعکس.

۳-۲-۱-۴- ورودی مدول انحلال کربنات

نرخ انحلال کربنات کلسیم در توابع زمانی و مکانی در طول مجاری مختلف است و تغییر می‌کند. مدول شیمیایی، نرخ‌های انحلال کربنات را درون لوله‌ها محاسبه می‌کند. تغییر در قطر مجرا طبق جرم کربنات کلسیم حل شده تعیین می‌شود. این رویه برای هر گام زمانی درون دوره شبیه‌سازی تکرار می‌شود. مدول شیمیایی نیازمند وارد کردن غلظت اشباع کلسیم (Ca^{2+}) در آب، دما و ثابت‌های نرخ سینتیک برای سینتیک‌های سریع مرتبه اول و آهسته مرتبه چهارم است. نرخ انحلال $CaCO_3$ به وسیله محلول H_2O-CO_2 در شرایط سیستم بسته، با توجه به فشار CO_2 به وسیله بوهمان و دربرودت (۱۹۸۵) بررسی شده است. برای غلظت‌های Ca^{2+} ، اگر غلظت نهایی کلسیم آن ۹۰٪ غلظت کلسیم در حالت اشباع باشد ($C < 0.9 C_{eq}$)، نرخ انحلال (F) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F(C) = \alpha(x)(C_{eq}-C) \quad ۱۲-۳$$

ضریب $\alpha(x)$ بستگی به نوع جریان دارد، اگر جریان به صورت خطی باشد از معادله ۳-۱۳ استفاده می‌شود و در صورتی که آشفته باشد، معادله ۳-۱۵ به کار گرفته می‌شود.

$$\alpha(x) = \alpha_{lam} \left[1 + \frac{\alpha_{lam} d(x)}{1 D} \right] \quad \text{اگر} \quad Re \leq 2300 \quad ۱۳-۳$$

$$\alpha(x) = \alpha_{turb} \quad \text{اگر} \quad Re \geq 2300 \quad ۱۴-۳$$

C_{eq} غلظت یون کلسیم در حالت اشباع و α_{lam} و α_{turb} به ترتیب ثابت‌های نرخ سینتیک برای جریان خطی و آشفته است. مقادیر α_{lam} و α_{turb} به وسیله بوهمان و دربرودت (۱۹۸۵) ارائه شد. ضریب $\alpha(x)$ برای جریان خطی بیان‌کننده اثر انتقال جرم به وسیله انتشار است. در قطرهای بزرگ $d(x)$ به موقعیت x درون مجاری بزرگ بستگی دارد. D ضریب انتشار کلسیم در آب می‌باشد. برای غلظت کلسیم بیش از ۹۰٪ حالت اشباع ($C > 0.9 C_{eq}$)، در قانون نرخ واکنش تغییری مشاهده می‌شود (Plummer and Wigley 1976) و در این جا قانون نرخ مرتبه چهارم توضیح‌دهنده تغییر مشاهده شده است.

$$F(C) = \beta(C_{eq}-C)^4 \quad ۱۵-۳$$

β ثابت نرخ سینتیک برای واکنش مرتبه چهارم است. که با استفاده از معادله‌های ۱۲-۳ و ۱۵-۳ افزایش قطر لوله از طریق محاسبه ریزش کلسیم از دیواره‌های یک لوله به درون آب امکان‌پذیر است. در این صورت نرخ سینتیک‌های انحلالی به صورت زیر است:

$$F(c) = \begin{cases} k_1(1 - c/c_{eq}) & c \leq c_s \\ k_n(1 - c/c_{eq})^n & c > c_s \end{cases} \quad ۱۶-۳$$

که در اینجا C_{eq} غلظت اشباع کلسیم [Mol.L^{-3}]

n مرتبه واکنش

k_1 نرخ ثابت برای مرتبه اول [$\text{Mol.L}^{-2}\text{T}^{-1}$]

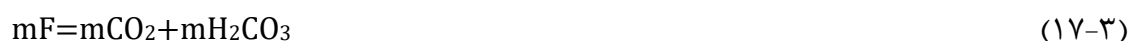
k_n برای مرتبه بالاتر انحلال [$\text{Mol.L}^{-2}\text{T}^{-1}$] است.

۳-۲-۲- سیستم انحلال کلسیت

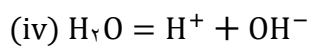
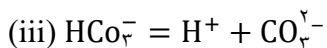
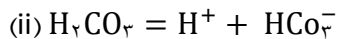
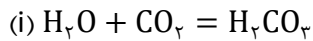
پلومر و همکاران (۱۹۷۵)، به بررسی انحلال کلسیت خالص در محلول اشباع CO_2 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار کل ۱ اتمسفر با اندازه‌گیری pH به عنوان تابعی از زمان پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که انحلال کلسیت تحت شرایط آزمایشگاهی به وسیله سینتیک واکنش‌های سطح کنترل می‌شود. در این روش میزان انحلال کلسیم را در شرایط $\text{pH} = 3.91$ تا $\text{pH} = 5.9$ بررسی کردند. در pH بیش از ۵/۹، سرعت انحلال بسیار کاهش می‌یابد و میزان انحلال کلسیت در محیط طبیعی ممکن است تحت تاثیر فرآیندهای حمل و نقل و فرآیندهای واکنش‌های سطح قرار بگیرد. در تعدادی از تحقیقات از نمونه آب‌های طبیعی در آبخوان‌های کربناته شناسایی شدند که نسبت به کلسیت غیراشباع شده‌اند (Drake and Harmon 1973). این خاصیت تحت اشباع نشان می‌دهد که سینتیک‌های (سرعت) انحلال کلسیت در محیط طبیعی ممکن است نسبتاً کند باشد و نقش مهمی در تکامل شیمیایی سیستم‌های آب زیرزمینی در سنگ‌های کربناته داشته باشد. پلامر و همکاران (۱۹۷۵) برای اولین بار

به پیش‌بینی میزان انحلال کلسیت در سیستم‌های طبیعی پرداختند. میزان انحلال هر ماده معدنی به نرخ انتقال واکنش‌دهنده‌ها و محصولات بین مواد معدنی جامد و محلول، میزان ناهمگنی واکنش‌ها و نرخ واکنش‌های همگن در داخل حلال بستگی دارد. که بسته به مشخصات هیدرودینامیکی و شیمیایی محیط، یک یا همه‌ی این فرآیندها در تعیین میزان انحلال ممکن است مهم باشد. اگر سرعت واکنش بسیار بیشتر از نرخ حمل و نقل باشد، نرخ انحلال عمدتاً توسط فرآیندهای انتشار و همرفت کنترل می‌شود. اگر سرعت واکنش نسبت به فرآیندهای انتقال آهسته‌تر باشد، میزان انحلال مشاهده شده اساساً توسط واکنش کنترل می‌شود. در برخی موارد انحلال مشاهده شده را میتوان متوسطی از هر دو فرآیند نامید. به منظور پیش‌بینی نرخ تکامل شیمیایی سیستم‌های کربناته در تماس با آب، تعیین شرایطی که انحلال کلسیت تحت کنترل حمل و نقل است یا تحت کنترل واکنش‌دهنده می‌باشد، مهم است. برای شرایطی که در آن انحلال متوسط و یا تحت کنترل واکنش‌دهنده‌است، دانستن سینتیک‌های هر دو واکنش همگن و ناهمگن برای تعیین میزان انحلال لازم است (Neirode and Williams 1971). به طور کلی فرآیندهای حمل و نقل نقش مهمی در سرعت حلالیت کلسیت در محلول‌های اسید رقیق شده که pH کمتر از 4 دارند ایفا می‌کنند. در pH بالاتر از 4، انحلال به طور قابل ملاحظه‌ای کندتر از آنچه که توسط مدل‌های فرآیند انتقال پیش‌بینی شده است، به نظر می‌رسد که توسط سینتیک واکنش‌های سطحی تعیین می‌شود (Terjesen *et al.* 1961). هدف این است که تحت چه شرایطی نرخ انحلال کلسیت توسط واکنش سطحی اندازه‌گیری می‌شود. برای بررسی این سوال لازم است که قادر باشیم غلظت سطحی تمام گونه‌ها را اندازه‌گیری کنیم. به دلیل اینکه سیستم کلسیت، کربن‌دی‌اکسید و آب یک سیستم چند جزئی با واکنش‌های همگن است، انجام این کار دشوار است.

با صرف نظر از جفت‌های یونی، گونه‌های H^+ ، Ca^{2+} ، CO_3^{2-} ، HCO_3^- ، OH^- ، CO_2 ، H_2CO_3 ، CO_3^{2-} در این واکنش‌ها موجود هستند. که کربن‌دی‌اکسید توسط معادله (3-17) تعریف می‌شود.



که در آن m نشان دهنده مولالیته است (به منظور سادگی، ادامه حذف شده است). و F غلظت CO_2 آزاد می‌باشد. تمام گونه های حاضر به جز Ca^{2+} می توانند در واکنش های همگن سیال شرکت کنند:



انحلال یک ماده معدنی لزوماً شامل انتقال جرم از فاز جامد به حلال می‌باشد. به عنوان تخمین اولیه می‌توان میزان انتقال جرم کلسیم را با استفاده از معادله (۳-۱۸) محاسبه کرد.

$$j = k_t(C' - C) \quad (۳-۱۸)$$

که در اینجا j مول بر واحد سطح بر زمان، C غلظت کلسیم در سیال و C' غلظت کلسیم جامد k_t ضریب انتقال جرم که دارای بعد سرعت می‌باشد که توسط خصوصیات سیال و هندسه سطح تعیین می‌شود. برای انحلال از سطح مقطع A و حجم مایع V ، نرخ تغییر غلظت در محلول به صورت معادله (۴-۱۹):

$$\frac{dc}{dt} = \frac{A}{V} \quad (۳-۱۹)$$

از آنجایی که Ca^{2+} به طور همگن واکنش نمی‌دهد، غلظت سطحی آن می‌تواند با استفاده از معادله‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) اندازه‌گیری شود.

$$\frac{d\text{Ca}^{2+}}{dt} = \frac{A}{V} j \text{Ca}^{2+} = \frac{A}{V} k_t (\text{Ca}^{2+'} - \text{Ca}^{2+}) \quad (۳-۲۰)$$

در دمای ثابت، غلظت تعادلی (اشباع) Ca^{2+} را می‌توان از pH یا از غلظت اسید کربنیک تفکیک نشده محاسبه کرد. اگر واکنش (i) در تعادل باشد، دانستن غلظت کربن دی‌اکسید آزاد، شرایط تعادلی را برای Ca^{2+} مشخص می‌کند. پس ما به به اندازه گیری غلظت کربن دی‌اکسید آزاد سطح (F') نیاز

داریم (با معادل آن، فشار جزئی CO_2 ، PCO_2). برنر و مورث (۱۹۷۴) در مدل انحلال کلسیت خود که مستقل از H_2CO_3 است، فرض کردند که $F'=F$. هیچ دلیلی برای آن وجود ندارد (به ویژه در سیستم واکنشی همگن) اما می توان نشان داد که تقریب خوبی است. برای انجام آن، تعادل جریان جرمی گونه های متنوع باید در نظر گرفته شود. از آنجایی که تمام واکنش های همگن دارای جریان جرمی هستند، رابطه تعادلی جریان به شکل زیر باید برقرار باشد:

$$2jCa^{2+} - jHCO_3^- - jCO_3^{2-} + jH^+ - jOH^- = 0 \quad (21-3)$$

همچنین به دلیل اینکه در واکنش های همگن، مولالیتته کل گونه های حامل کربن را حفظ می کند و انحلال یک مول از Ca^{2+} را برای هر مول کربن شرکت می دهند، ما داریم:

$$jCa^{2+} = jF + jHCO_3^- + jCO_3^{2-} \quad (22-3)$$

معادله ۳-۱۷ از تعادل گونه های حامل کربن در لایه مرزی پیروی می کند. یک تعادل مشابه در سیال نشان می دهد که:

$$\frac{dCa^{2+}}{dt} = \frac{d}{dt}(F + HCO_3^- + CO_3^{2-}) - Q \quad (23-3)$$

که در آن Q نرخ تولید کربن دی اکسید است. در حجم ثابت سیال، فشار دی اکسید کربن (PCO_2)، $=0$

$$\frac{dc}{dt} \text{ می باشد. بنابراین از آنجایی که } mCO_3^{2-} \ll mHCO_3^-$$

$$Q = \frac{d}{dt}(HCO_3^- - Ca^{2+}) \quad (24-3)$$

از آنجایی که $MHCO_3^- \approx 2M Ca^{2+}$ ، می توان با استفاده از معادله (۳-۲۰) چنین نوشت:

$$Q \approx \frac{dCa^{2+}}{dt} = \frac{A}{V} jCa^{2+} \quad (25-3)$$

با توجه به معادله (۳-۲۱)، اگر $jH^+ - jOH^-$ نسبت به jCa^{2+} کوچک باشد، که در مورد حاضر یک

فرض منطقی است، پس معادله (۳-۲۱) و (۳-۲۴) نشان می دهد که:

$$\frac{V}{A}Q \approx -jF + jCO_3^{2-} \quad (26-3)$$

اگر $jF \ll jCO_3^{2-}$ ، پس خواهیم داشت:

$$Q \approx -\frac{A}{V}jF \quad (27-3)$$

که نشان می‌دهد یک جریان کربن‌دی‌اکسید آزاد از محلول به داخل لایه مرزی وجود دارد. اگرچه تفسیرهای دیگری نیز ممکن است، منطقی است که فرض کنیم جریان CO_3^{2-} کوچک است. این فرض بر اساس این حقیقت است که CO_3^{2-} همیشه در سیال و در لایه مرزی کوچک است (به دلیل پروتون دار شدن CO_3^{2-}) معادله (27-3) نشان می‌دهد که باید شبیهی از F در طول لایه مرزی وجود داشته باشد. همچنین فشار کربن‌دی‌اکسید در سطح انحلال کمتر از سیال می‌باشد. فقط به تغییر نسبی در PCO_2 بین سیال و سطح انحلال لازم است تا به یک تساوی در مقدار جریان کربن‌دی‌اکسید آزاد و جریان Ca^{2+} برسیم. مقادیر PCO_2 سطحی را می‌توان با استفاده از معادله (25-3) تخمین زد تا Q و بنابراین jF از معادله (27-3) به دست می‌آید. سپس F' توسط معادله (28-3) اندازه‌گیری می‌شود.

$$jF = K_t(F' - F) \quad (28-3)$$

3-2-3- روش‌های شبیه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق

در گام اول این مطالعه بار آبی محیط ماتریکسی با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW 1995

۱۹۹۷ (Mc Donald and Harbaugh 1984) محاسبه و شبیه‌سازی شد. در گام بعدی از مدل

CAVE برای شبیه‌سازی سیستم کانال و ادغام دو محیط ماتریکسی و کانال استفاده شد.

فصل چهارم: نتایج و بحث

مدل‌های عددی ابزار قدرتمندی هستند که در کمی کردن فرآیندهای انحلال و جریان‌های پیچیده که در محیط‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بخش، واسنجی (کالیبراسیون)، صحت سنجی و نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، رفتار مدل شبیه‌سازی شده در گزینه‌های مختلف سناریوهای پیشنهادی از منظر نقش آنها در توسعه مجاری کارستی و هم‌چنین میزان فرار آب و تشریح نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

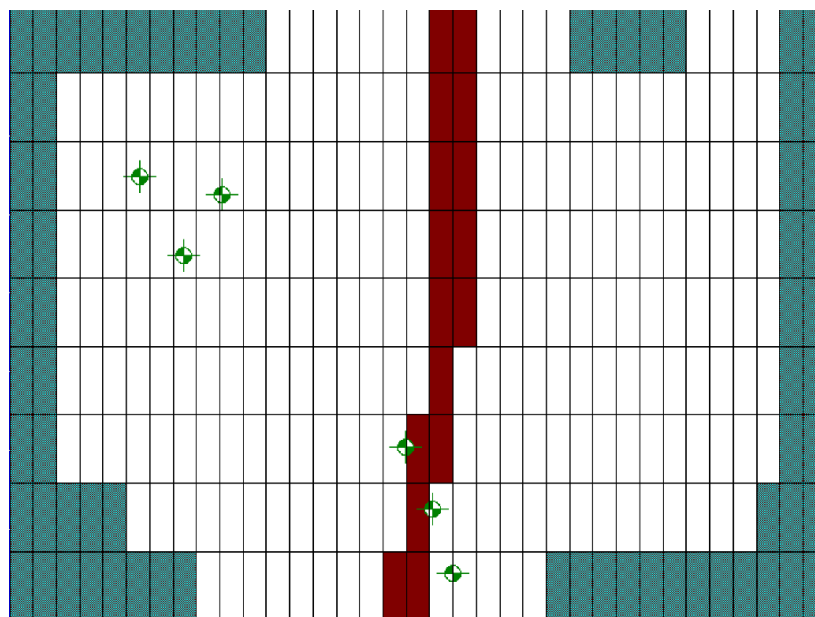
۴-۱- شبیه‌سازی در شرایط اولیه مدل

اطلاعات مربوط به سد کارون ۴ که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است که شامل داده‌های اصلی اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی در پیژومترها و داده‌های لوژان برگرفته از برداشت‌های گروه مستقر در محل سد از طرف شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس می‌باشد.

۴-۱-۱- تعیین هندسه و شبکه‌بندی مکانی محدوده

بر اساس بررسی‌های سطحی و زیرسطحی، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر هوایی و بازدید میدانی، هندسه مدل مشخص شد. محدوده مورد مطالعه در ساختگاه سد شامل مساحت محدوده سد با ابعاد ۹۳۵ متر در ۷۰۴ متر است که در مدل به ۲۲۰۵ سلول تقسیم شد. با توجه به محدوده مورد مطالعه و جایگاه گالری‌ها و سنگ کف سد، مدل به ۳۵ ستون و ۹ ردیف و ۷ لایه تقسیم‌بندی شده است. در

این مرحله چاه‌های مشاهده‌ای با توجه به شکل (۴-۱) توسط نقاط سبز رنگ و موقعیت پدیده‌های مهم بر مدل نظیر رودخانه، برای مدل تعریف شد. بعد از تعریف ساختار هندسه مدل، شبکه و یا المان‌بندی توسط نرم‌افزار در درون آن صورت گرفت. قسمتی از ضلع شمالی که ضلع منتهی به مخزن سد می‌باشد و قسمتی از ضلع جنوبی در هر ۷ لایه به دلیل متغیر بودن تراز به عنوان مرزهای باز در نظر گرفته شدند. قسمت‌هایی دیگر از مدل که در تماس با سازند پاینده بوده، به عنوان مرز بسته در نظر گرفته شده است؛ زیرا بر اساس خصوصیات لیتولوژیکی و آزمون‌های لوژان در منطقه میزان نفوذ-پذیری این واحد کمتر از پنج لوژان می‌باشد. رودخانه نیز به ویژه در شرایط قبل از آب‌گیری به عنوان زهکش آبخوان بوده و به صورت مرزی با بار ثابت به مدل معرفی شده است (شکل ۴-۱).



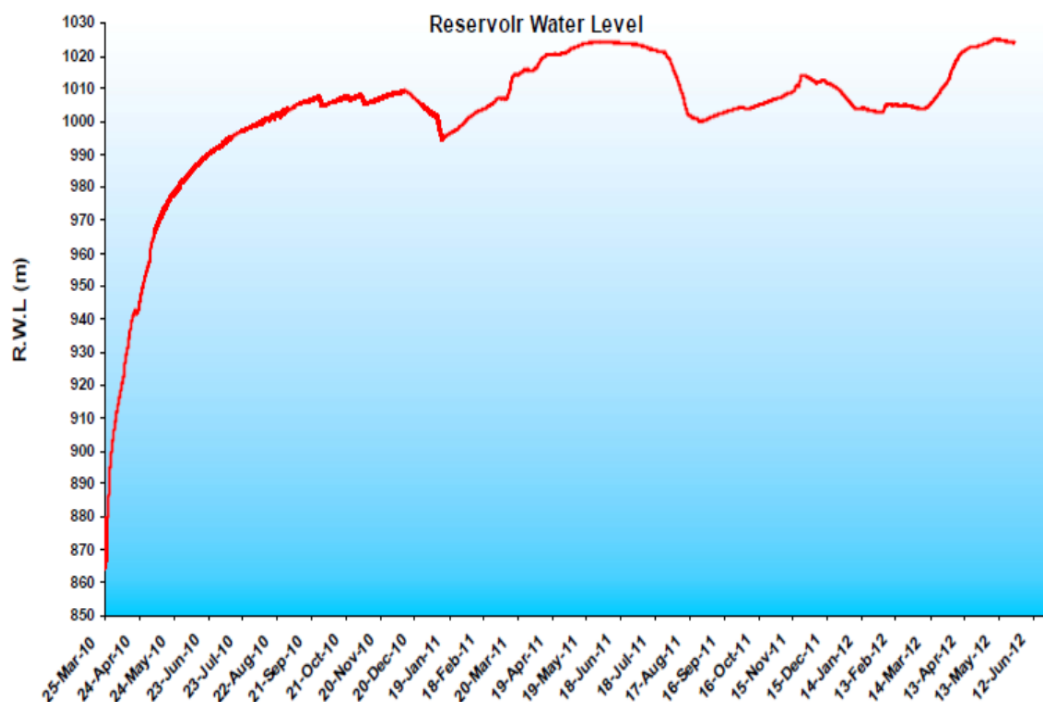
شکل ۴-۱ موقعیت مرزها، چاه‌های مشاهده‌ای و رودخانه در لایه ۶

ضخامت آهک موجود در زیر سدها که در ایران تا ۳۰۰ متر هم می‌رسد، در فرار آب بسیار مؤثر است و هر چقدر ضخامت آن بیشتر باشد، نگرانی برای فرار آب از سد بیشتر خواهد بود. در این راستا سعی شده که تراز کف را همانند تغییرات سطح سازند پاینده به مدل اعمال کرد. بر اساس مطالعات زیرسطحی صورت گرفته، تراز سنگ کف، به صورت افقی نبوده، بلکه با توجه به فاصله از رودخانه این مقدار متفاوت بوده است. به گونه‌ای که در نزدیک بستر رودخانه بیشترین عمق و در انتهای گالری‌ها

عمق کمتری برای آن مشخص شده است. این اطلاعات با استفاده از ترکیب داده‌های حاصل از لاگ-های حفاری و آزمون لوژان و نیز نیم‌رخ زمین‌شناسی منطقه به دست آمده است و بنابراین تراز کف در عمق ۶۴۰ متری طراحی گردید.

۴-۱-۲- انتخاب دوره‌ی زمانی

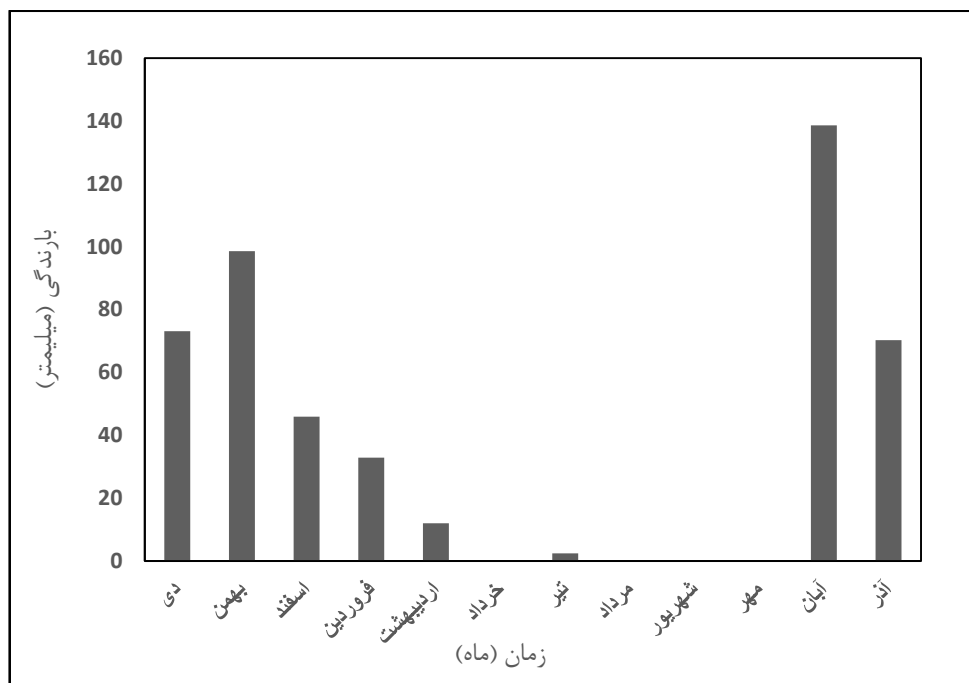
جهت تعریف رفتار آبخوان در شرایط متفاوت، از داده‌های تراز آب در زمان‌های مختلف استفاده شد. اولین بازه‌ی زمانی، برای شرایط پایدار، مربوط به دو ماه قبل از آبیگری بود. در این حالت مدل در حالت اولیه کالیبره شد و برای شبیه‌سازی جریان پس از آبیگری آماده شد. بازه‌ی بعدی مربوط به یک سال پس از آبیگری می‌باشد که تراز آب تا حدود ۱۰۲۵ متر بالا آمده بود (شکل ۴-۲). از آنجاکه داده‌های اندازه‌گیری شده بیشتر در فاصله‌ی ۵ روز بوده بنابراین از یک پله‌ی زمانی ۵ روزه جهت شبیه‌سازی استفاده شد.



شکل ۴-۲ نمودار تغییرات تراز مخزن از ابتدای آبیگری (مهاب قدس ۱۳۹۱)

۴-۱-۳- منبع تغذیه و تخلیه آبخوان

در آبخوان مورد مطالعه، نزولات جوی منبع اصلی تغذیه و رودخانه کارون منبع اصلی تخلیه آبخوان می‌باشد. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و همچنین اندازه‌گیری‌های مربوط به نفوذ آب در سازندهای آهکی، میزان نفوذ آب باران در واحد سطح ۵۰٪ در نظر گرفته شد و میزان تغذیه آبخوان از بارش در هر بازه‌ی زمانی مربوط نیز محاسبه و به مدل اعمال شد. میزان بارندگی انجام‌شده در طی دوره مدل‌سازی با استفاده از ایستگاه‌های باران‌سنجی خود سد به دست آمد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۳ میزان بارندگی در طی دوره مدل‌سازی

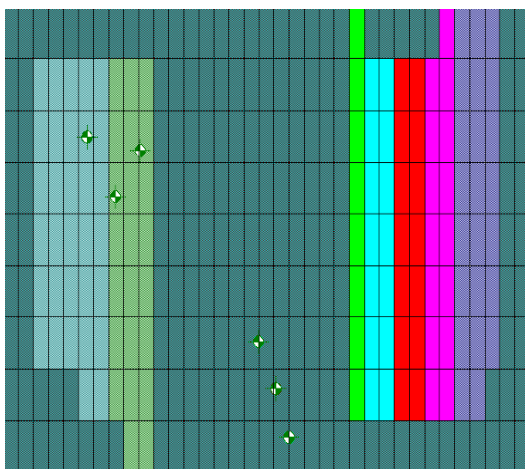
۴-۱-۴- هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره

در این مدل پارامترهای ورودی به کاربر اجازه انتخاب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آغازین مدل را می‌دهد که هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره و دیگر پارامترهای ورودی به سامانه ماتریکسی به صورت یک مقدار حدسی اولیه (با توجه به جنس سازندهای منطقه) به مدل اعمال شده است. جدول ۴-۱ این مقادیر اولیه آورده شده است.

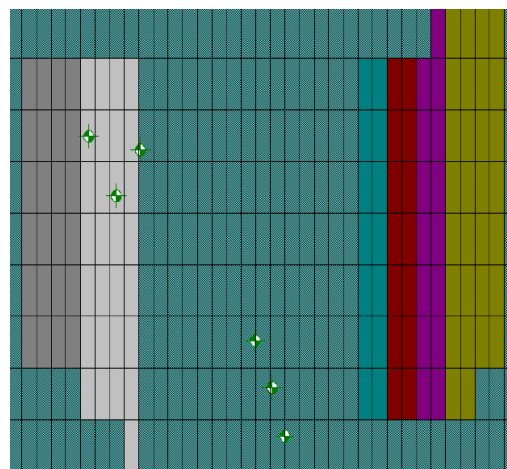
جدول ۴-۱ مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی

قبل از تثبیت و واسنجی					
لایه	K(m/day)	Ss	Sy	Effective porosity	Total porosity
هر ۷ لایه	1	0/001	0/1	0/1	0/2

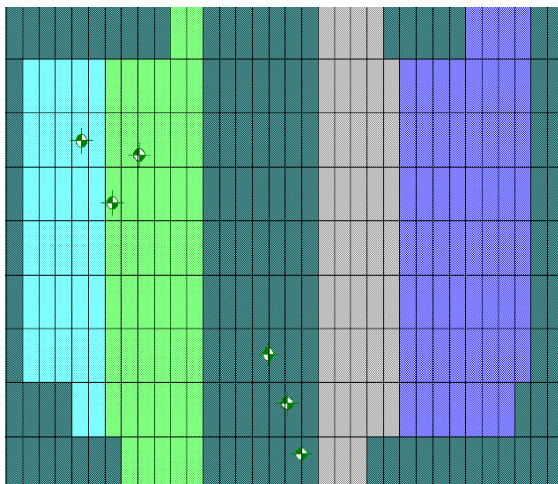
آبخوان تکیه‌گاه‌های سد، یک آبخوان نسبتاً بزرگ و ناهمگن می‌باشد، بنابراین نمی‌توان آبخوان را به صورت همگن معرفی کرد. به منظور بررسی ویژگی‌های زیرسطحی تعداد حدود ۸۶ حلقه گمانه اکتشافی در سمت چپ سد و حدود ۵۲ حلقه گمانه در سمت راست سد حفر شده است. بر مبنای نتایج حاصل از آزمون‌های لوژان صورت گرفته و همچنین شرایط متفاوت ساختاری (وجود گسل در تکیه‌گاه‌های سد) در منطقه و نقشه‌های زمین‌شناسی، آبخوان به ۳۱ زون هدایت هیدرولیکی (شکل ۴-۴ تا شکل ۴-۸) و ۱۹ زون ضریب ذخیره مختلف تقسیم شد (شکل ۴-۹ تا شکل ۴-۱۶). این دسته‌بندی بیشتر بر اساس هدایت هیدرولیکی صورت گرفته و شامل، مناطق با نفوذپذیری خیلی زیاد تا نفوذپذیری خیلی کم می‌باشد. مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از مدل با مقادیر موجود در واقعیت مقایسه شد. از آنجا که در محدوده مورد مطالعه آزمایش پمپاژ صورت نگرفته بود از مقادیر لوژان استفاده شد. پرده‌ی آب‌بند نیز با کمترین نفوذپذیری منطقه در نظر گرفته شده است.



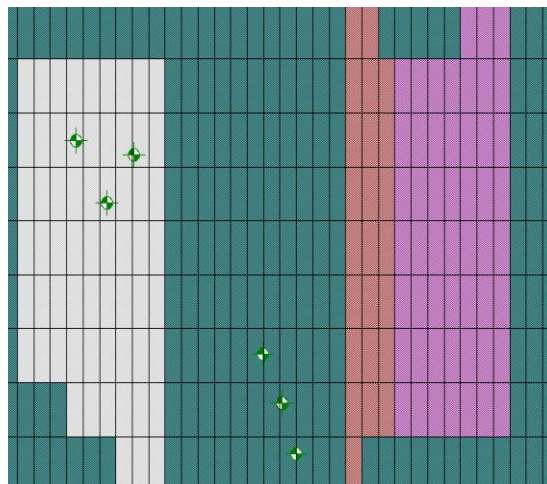
شکل ۴-۵ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه دوم



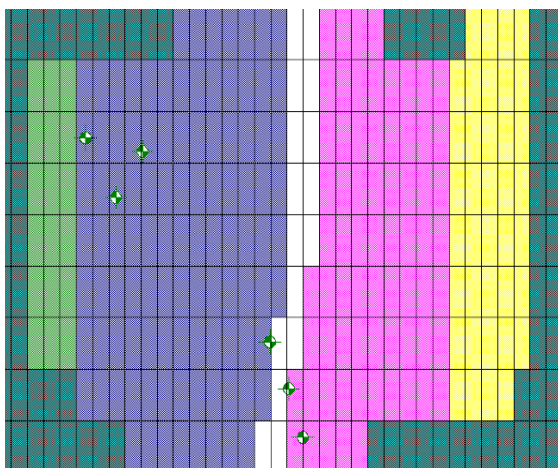
شکل ۴-۴ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه اول



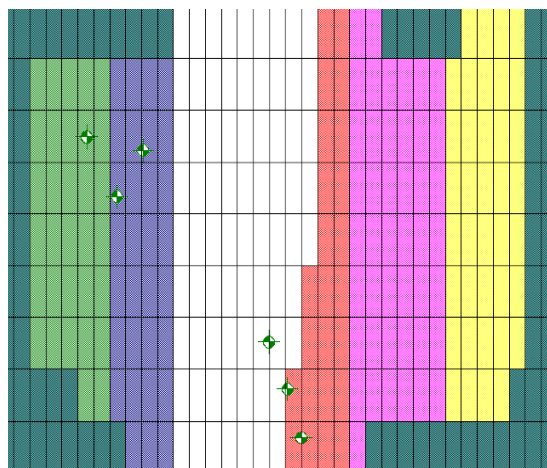
شکل ۴-۷ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه چهارم



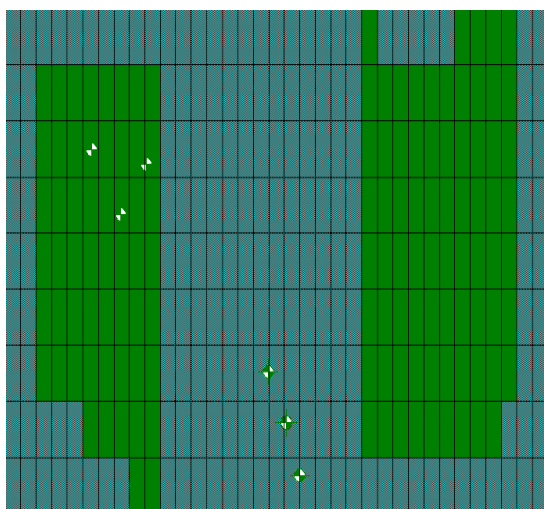
شکل ۴-۶ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه سوم



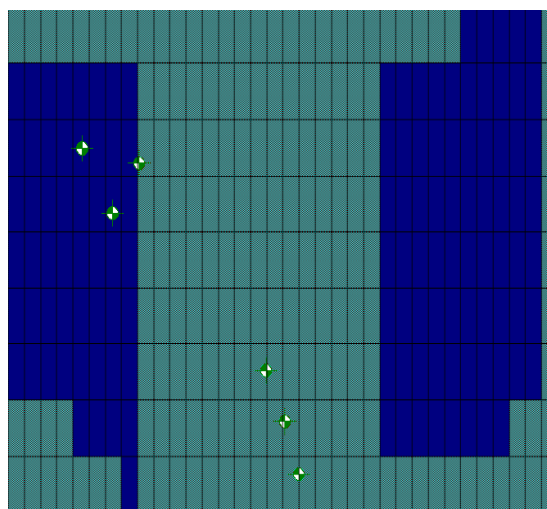
شکل ۴-۹ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه ۶ و ۷



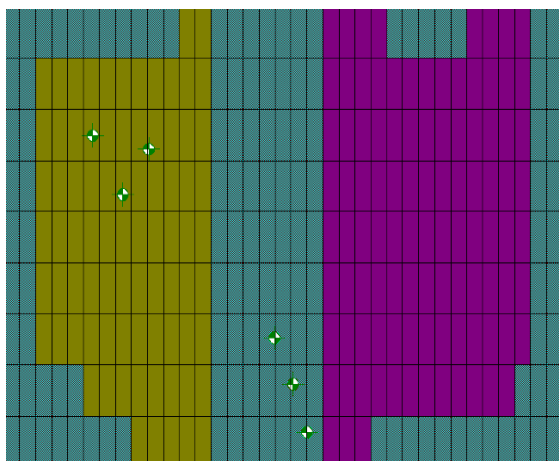
شکل ۴-۸ زون‌های هدایت هیدرولیکی در لایه پنجم



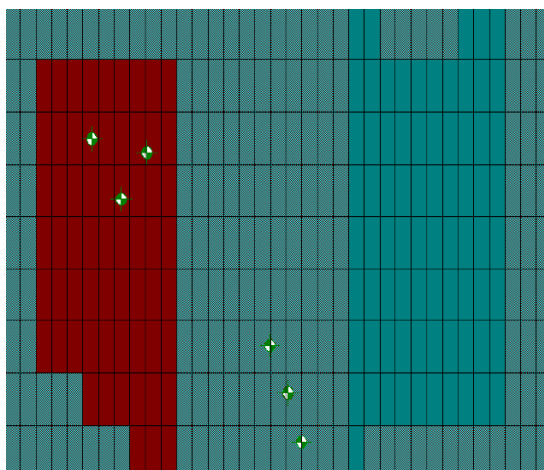
شکل ۴-۱۱ زون ضریب ذخیره در لایه دوم



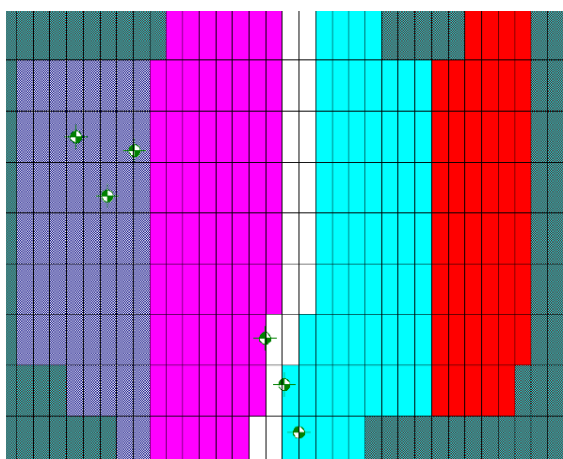
شکل ۴-۱۰ زون ضریب ذخیره در لایه اول



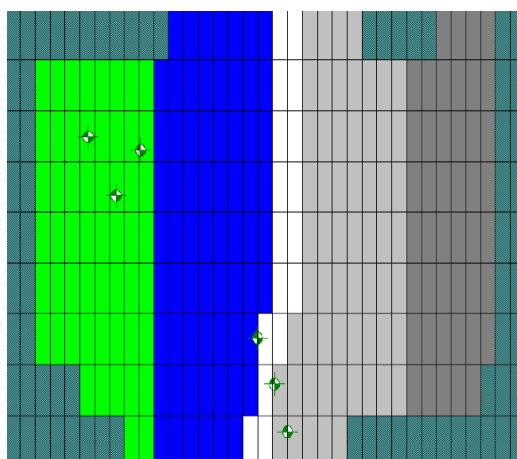
شکل ۴-۱۳ زون‌های ضریب ذخیره در لایه چهارم



شکل ۴-۱۲ زون‌های ضریب ذخیره در لایه سوم



شکل ۴-۱۵ زون‌های ضریب ذخیره در لایه شش و هفت



شکل ۴-۱۴ زون‌های ضریب ذخیره در لایه پنجم

یکی از مزایای این تقسیم‌بندی کمک به انجام سریع‌تر واسنجی بود. از آنجا که واسنجی به طور مؤثری از تغییر میزان هدایت هیدرولیکی تأثیر می‌پذیرد، بنابراین با تقسیم کردن منطقه به چند بخش راحت‌تر می‌توان سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای را کالیبره کرد. مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف (Kxyz) در جدول (۴-۲) و مقادیر ضریب ذخیره (Ss) و دیگر پارامترها در هر زون همسو در نظر گرفته شده است و در جدول (۴-۳) ارائه شده است.

جدول ۴-۲ مقادیر هدایت هیدرولیکی (m/day) ورودی مدل در زون‌های مختلف

K_x, K_y, K_z	زون	K_x, K_y, K_z	زون	K_x, K_y, K_z	زون
۸۳/۳۶	۲۳	۱۵/۸۵	۱۲	۰/۶۱	۱
۱۶/۲۳	۲۴	۱۳/۶۱	۱۳	۲۰/۰۰	۲
۲/۱۵	۲۵	۲۴/۰۰	۱۴	۳۰/۰۵	۳
۲/۵۱	۲۶	۱۵/۲۶	۱۵	۳۹/۷۵	۴
۰/۷۸	۲۷	۱۰۰/۰۰	۱۶	۳۵/۴۵	۵
۹۷/۰۰	۲۸	۵۵/۸۲	۱۷	۶۵/۹۵	۶
۱۱۵/۰۰	۲۹	۲۵/۰۱	۱۸	۱۴/۴۱	۷
۹۰/۰۰	۳۰	۱۵/۸۳	۱۹	۷۰/۴۲	۸
۰/۱۴۹	۳۱	۱۱۶/۹۴	۲۰	۳۰/۰۶	۹
		۱۸/۴۵	۲۱	۲۷/۰۰	۱۰
		۱۱۷/۰۱	۲۲	۴۲/۰۰	۱۱

جدول ۴-۳ مقادیر ضریب ذخیره (تخلخل موثر = n_e)، آبدهی ویژه و دیگر پارامترهای ورودی به مدل در واسنجی مدل

Tot.pro	n_e	S_y	S_s	زون	Tot.pro	n_e	S_y	S_s	زون
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۵۸	۱۱	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۱	۱
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۲۵	۱۲	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۱	۲
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۷	۱۳	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۱۹	۳
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۵	۱۴	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۲۵	۴
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۱۵	۱۵	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۹	۵
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۳۳	۱۶	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۲۵	۶
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۲۴	۱۷	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۳۷	۷
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۸	۱۸	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴	۸
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۰۱۳	۱۹	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۵	۹
					۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۶	۱۰

۴-۱-۵- پرده‌ی آب‌بند

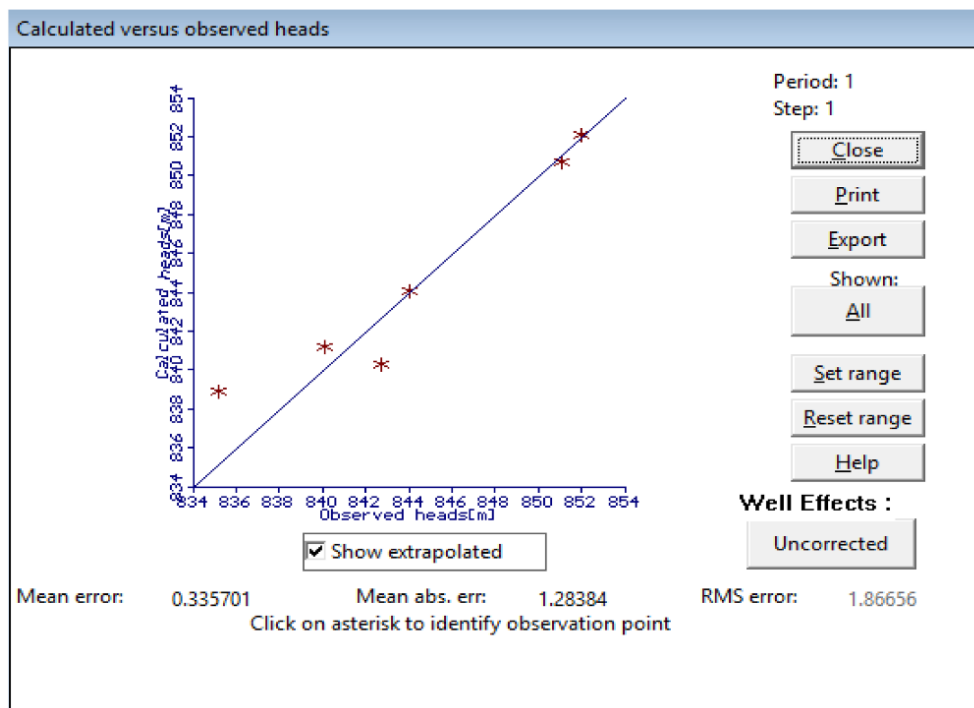
با توجه به نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و با در نظر داشتن بار سنگین هیدرولیکی القاء شده از مخزن به توده سنگ و مشخصات سازه، برای به حداقل رساندن نشست و آثار منفی فشار برکنش و تراوش بر روی تکیه‌گاه‌ها و بلوک‌های سنگی، تقویت سنگ و یکپارچه کردن رفتار بدنه با تکیه‌گاه‌ها از پرده‌ی آب‌بند استفاده شد. بنا به دلایل ذیل اجرای پرده آب‌بندی کارآمد برای پی و تکیه‌گاه‌های سد کارون ۴ امری کاملاً ضروری و غیرقابل اجتناب می‌نماید. با توجه به وجود سازند تقریباً نفوذناپذیر پابده در فاصله نسبتاً کم از بدنه سد، طراحی پرده و گالری‌ها به نحوی انجام گرفته است که با لحاظ کردن توپوگرافی ساختگاه و انطباق با موقعیت سازه‌ها نه تنها ناپیوستگی‌های سازند آسماری به ویژه لایه‌بندی و گسل‌ها را آب‌بند نماید بلکه به سازند پابده نیز متصل گردد. پرده آب‌بند سد کارون ۴ دارای مساحت ۲۷۰۰۰۰ مترمربع بوده و آخرین برآورد حفاری و تزریق آن حدود ۴۰۴۰۰۰ متر می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون لوژان انجام شده در گمانه‌های گالری-های بدنه‌ی سد، میزان نفوذپذیری پرده محاسبه شد و در نتایج کالیبره کردن مدل میزان نفوذپذیری پرده بسیار نزدیک به نفوذپذیری محاسبه شده از آزمون لوژان می‌باشد.

۴-۱-۶- واسنجی مدل در شرایط قبل از آب‌گیری

بر اساس دوره‌ی زمانی انتخاب شده، واسنجی نیز در هر مرحله از دوره‌ی زمانی انجام شد. این مراحل شامل واسنجی مدل قبل از آب‌گیری (شرایط اولیه) و واسنجی مدل بعد از آب‌گیری است، که این مراحل در ادامه تشریح می‌شود.

جهت انجام واسنجی در شرایط اولیه با توجه به اینکه داده‌های تراز آب در چاه‌های مشاهده‌ای در دو ماه قبل از آب‌گیری به عنوان مبنا به مدل وارد شد، در نهایت در زمان قبل از آب‌گیری توزیع اولیه‌ی سطح ایستابی در تمام نقاط مدل مفهومی محاسبه شد. با توجه به مغایرت داده‌های مشاهده‌ای و مدل، با تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره، سطح ایستابی مدل با مقادیر واقعی بار

هیدرولیکی (چاه‌های مشاهده‌ای) واسنجی شد (شکل ۴-۱۶) و به عنوان ورودی به مدل CAVE وارد شد.



شکل ۴-۱۶ نتایج سطح آب حاصل از واسنجی مدل

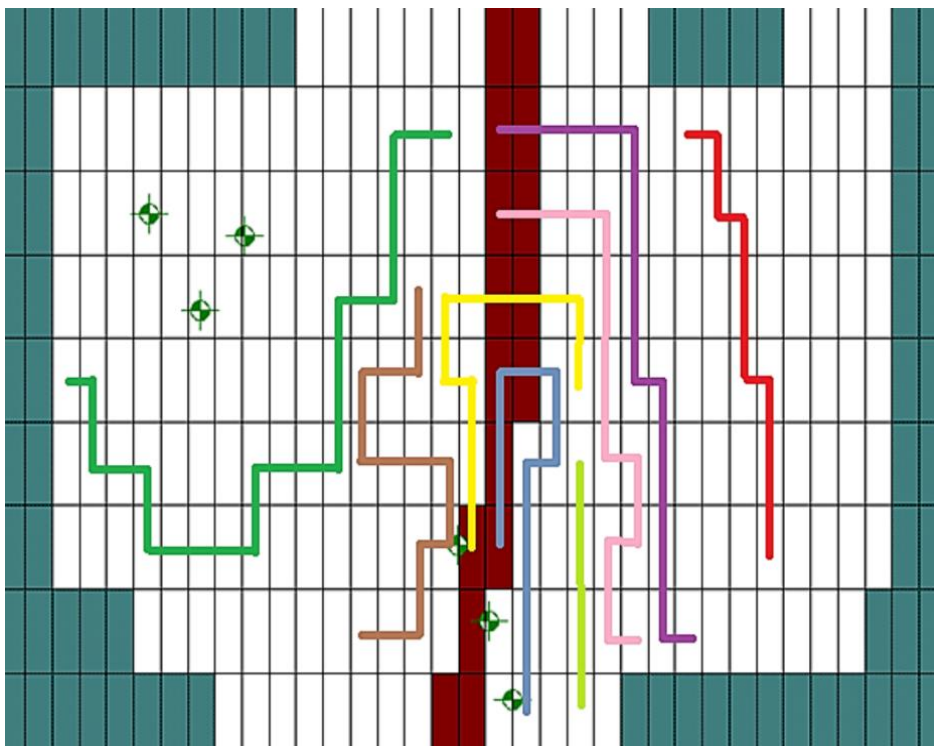
جدول ۴-۴ نتایج مدل‌سازی در شرایط قبل از آب‌گیری

۶	۵	۴	۳	۲	۱	چاه‌های مشاهده‌ای
۸۵۲/۰۰	۸۵۱/۱	۸۴۴	۸۴۲/۷۱	۸۴۰/۱۲	۸۳۵/۲۲	بار آبی مشاهده‌ای
۸۵۲/۰۷	۸۵۰/۶۹	۸۴۴	۸۴۰/۲۷	۸۴۱/۲۵	۸۳۸/۸۸	بار آبی به دست آمده از مدل

۴-۲- شبیه‌سازی مدل در شرایط بعد از آب‌گیری

هیدرولیک آب‌های زیرزمینی و لایه‌های کارستی از دو محیط کاملاً متفاوت تشکیل شده‌اند، محیط اول از منافذ ریز و درز و شکاف‌هایی تشکیل شده‌اند که حداکثر اندازه بازشدگی آنها به یک سانتی‌متر می‌رسد و به آن محیط ماتریکسی گفته می‌شود. در محیط دوم اندازه درزه و شکاف‌ها و حفرات انحلالی بیش از یک سانتی‌متر است و به آن محیط مجرا می‌گویند. وجود همین دو گانگی باعث

پیچیدگی شدیدی در رفتار آبخوان‌های کارستی شده است. عامل اصلی مشکلات ساختگاه سازه‌ها عبور آب زیرزمینی از حفره‌ها و غارهایی که به صورت سفره‌های با پرشدگی یا بدون پرشدگی هستند، است. پس از آب‌گیری در نزدیکی ساختگاه سدها گرادیان هیدرولیکی بالایی وجود دارد که باعث می‌شود آب ذخیره شده در دریاچه سد از زیر بدنه سد و از میان شکستگی‌ها به طرف پایین‌دست فرار کند و در نتیجه افزایش نشت را در پی خواهد داشت و سازه‌های هیدرولیکی را به خطر خواهد می‌اندازد. از طرفی به دلیل حجم زیاد آب، پتانسیل انحلال لایه کارستی نیز افزایش می‌یابد. از این رو با توجه به موقعیت ۸ گسل موجود در بدنه سد (شکل ۱-۳) برای شبیه‌سازی مجراهای موجود از لوله‌گذاری استفاده شده است



شکل ۴-۱۷ موقعیت لوله‌ها در لایه پنجم

شبکه‌بندی لوله‌ها توسط ۲۹۴ ند و تعداد ۴۶۶ لوله در محدوده سد به صورت آرایشی که در شکل (۴-۱۷) می‌باشد به مدل وارد شد. بیشترین تراکم لوله‌ها با توجه به موقعیت گسل‌ها در جناح چپ سد می‌باشد.

جدول ۴-۵ لوله‌ها و ندهای استفاده شده در شبیه‌سازی گسل‌های محدوده سد

گسل	node	tube
۱۳	۴۵ تا ۱	۷۲ تا ۱
۱۵	۱۱۱ تا ۴۶	۱۷۹ تا ۷۳
۲	۱۱۲ تا ۱۳۸	۲۲۱ تا ۱۸۰
۳	۱۳۹ تا ۱۸۰	۲۸۸ تا ۲۲۲
۴	۱۸۱ تا ۲۱۹	۳۵۰ تا ۲۸۹
۱۱	۲۲۰ تا ۲۵۲	۴۰۲ تا ۳۵۱
۶	۲۵۳ تا ۲۸۲	۴۴۹ تا ۴۰۳
۷	۲۸۳ تا ۲۹۴	۴۶۶ تا ۴۵۰

۴-۲-۱- واسنجی مدل در شرایط بعد از آب‌گیری

با توجه به اندازه‌گیری تراز واقعی آب به مدت یکسال (۱۳۹۰) در محدوده سد که داده‌های آن در جدول ۴-۶ آورده شده است و مقدار اولیه و آرایش لایه‌بندی‌ها از نظر نفوذپذیری و ضریب ذخیره موجود که منطبق بر شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۱۵ است، مقدارهای عددی آن به ترتیب در جدول ۴-۲ و ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۶ تراز آب اندازه‌گیری شده در پیزومترها (سال ۱۳۹۰)

زمان												شماره
اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	
۹۶۹/۸	۹۷۱/۹	۹۷۱/۸ ۸	۹۷۰/۹	۹۶۶/۵ ۴	۹۶۷/۷ ۲	۹۶۸/۸ ۲	۹۷۲/۹ ۴	۹۷۲/۹ ۴	۹۶۹/۸ ۴	۹۶۹/۸۴	۹۷۱/۸ ۸	۱
۹۷۳۶	۹۷۵/۷	۹۷۴/۶ ۶	۹۷۳/۶	۹۶۷/۳ ۸	۹۶۸/۴ ۲	۹۶۶/۴ ۶	۹۷۰/۵ ۴	۹۷۱/۵ ۶	۹۶۶/۴ ۶	۹۶۷/۴۸	۹۶۹/۵ ۲	۲
۹۵۸/۸	۹۶۱/۹	۹۶۱/۸ ۹	۹۶۱/۹	۹۵۵/۶ ۹	۹۵۶/۷ ۳	۹۵۶/۷ ۳	۹۵۷/۸ ۱	۹۵۹/۸ ۵	۹۵۵/۷ ۷	۹۵۷/۸۱	۹۵۸/۸ ۳	۳
۹۷۰/۰ ۰	۹۷۲/۰ ۰	۹۷۳/۰ ۱	۹۷۱/۰ ۰	۹۶۶/۵ ۳	۹۶۶/۶ ۳	۹۶۷/۸ ۵	۹۶۷/۹ ۱	۹۶۹/۹ ۵	۹۶۶/۸ ۷	۹۶۷/۰۰	۹۶۸/۹ ۳	۴
۹۵۳/۸	۹۵۶/۷	۹۵۷/۷ ۷	۹۵۶/۷	۹۵۳/۵ ۷	۹۵۴/۶ ۳	۹۵۵/۶ ۹	۹۵۶/۷ ۱	۹۵۴/۶ ۷	۹۵۴/۶ ۷	۹۵۶/۷۱	۹۵۲/۶ ۳	۵

داده‌های تراز آب پیزومترها برای مدت یک سال بررسی شد و پس از اجرا، تراز آب برای تمام نقاط ماتریکسی تعیین شد و با توجه به نوسانات آب در خروجی مدل که اختلاف هایی با نتایج اندازه‌گیری شده داشت، کالیبراسیون تا حصول نتیجه مناسب و منطبق بر تراز آب در واقعیت (اندازه‌گیری صحرائی) ادامه یافت و منجر به تغییر نفوذپذیری و ضریب ذخیره شد و مقادیرهای عددی آن در جدول (۷-۴) و (۸-۴) ارائه شده است. از روش سعی و خطای به کار رفته در تخمین پارامترهای مناسب، به منظور به دست آوردن بهترین حالت ممکن تطابق داده‌های اندازه‌گیری شده در مدل و اندازه‌گیری صحرائی استفاده شده است.

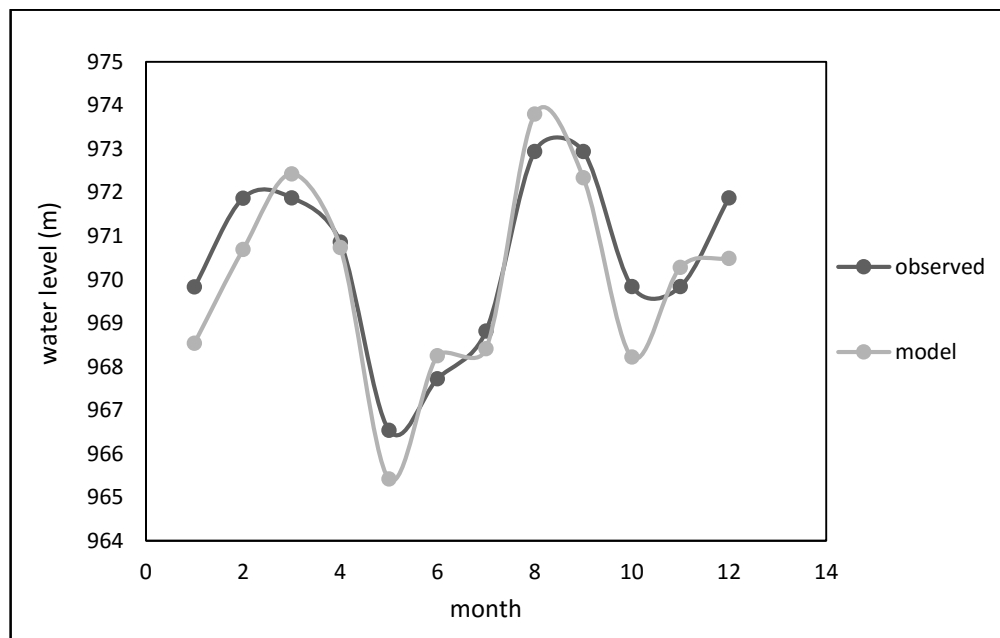
جدول ۷-۴ هدایت هیدرولیکی بر حسب متر بر روز در انتهای واسنجی مدل

K_x, K_y, K_z	زون	K_x, K_y, K_z	زون	K_x, K_y, K_z	زون
۸۳/۰۰	۲۳	۱۵/۸۵	۱۲	۱	۱
۱۶/۲۵	۲۴	۱۳/۶۱	۱۳	۲۰/۰۰	۲
۴/۰۰	۲۵	۲۴/۲۳	۱۴	۳۰/۰۵	۳
۴/۵۲	۲۶	۱۵/۲۶	۱۵	۳۹/۷۵	۴
۱/۵۱	۲۷	۱۰۰/۰۰	۱۶	۳۵/۴۵	۵
۹۸/۰۰	۲۸	۵۵/۸۲	۱۷	۶۵/۴۵	۶
۱۱۷/۰۰	۲۹	۲۵/۰۰	۱۸	۱۴/۴۱	۷
۹۰/۰۰	۳۰	۱۵/۸۳	۱۹	۷۰/۴۲	۸
۰/۱۴۹	۳۱	۱۱۶/۹۴	۲۰	۳۰/۶۱	۹
		۱۸/۸۷	۲۱	۲۷/۰۰	۱۰
		۱۱۷/۰۰	۲۲	۴۲/۰۰	۱۱

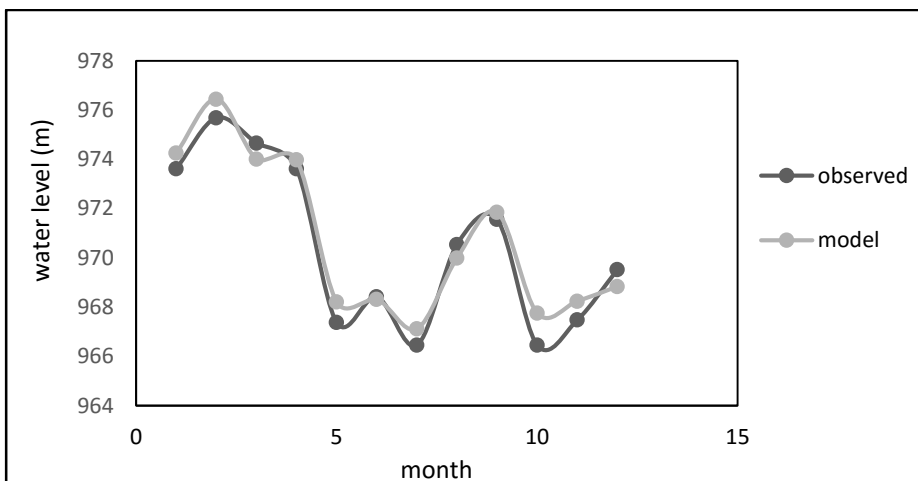
جدول ۴-۸ ضریب ذخیره در انتهای شبیه سازی

Tot.pro	n _e	S _y	S _s	زون	Tot.pro	n _e	S _y	S _s	زون
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۵۶	۱۱	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۹۹	1
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۲۴	۱۲	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۹۹	2
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۵	۱۳	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۱۸	3
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۴۹	۱۴	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۲۴	4
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۱۴	۱۵	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۸۹	5
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۳۲	۱۶	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۲۴	6
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۲۳	۱۷	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۳۶	7
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۴۶	۱۸	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۳۹	8
۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۰۰۱۲	۱۹	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۴۴	9
					۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۰۰۴۵	10

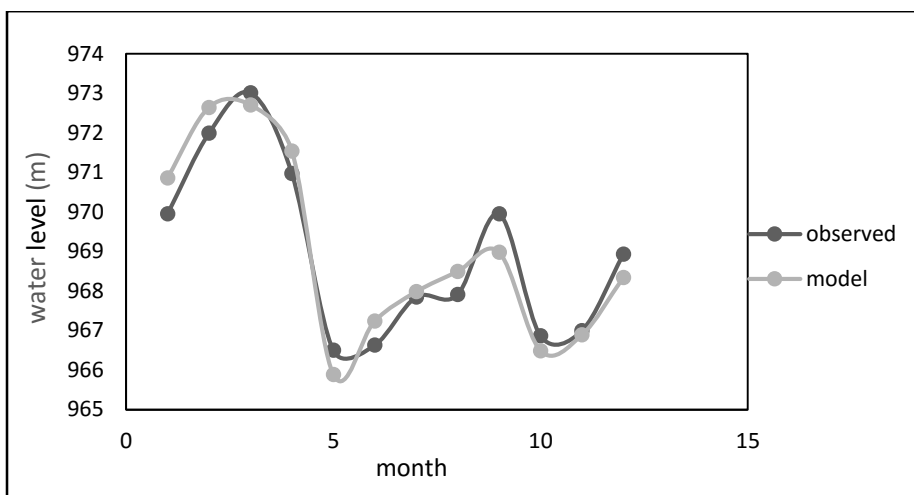
در نهایت بهترین حالت تطابق به دست آمد و نتایج آن به صورت نوسانهای تراز آب در واقعیت و مدل در شکل (۴-۱۸) تا (۴-۲۲) ارائه شده است.



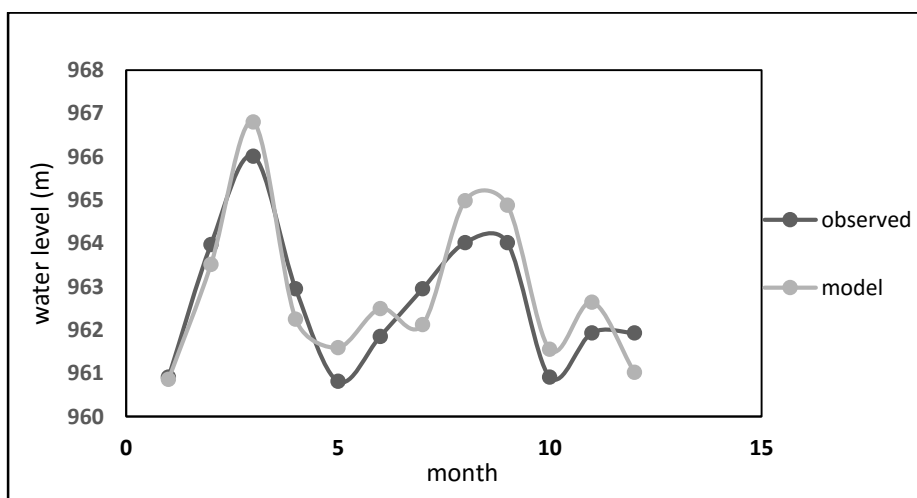
شکل ۴-۱۸ تغییرات سطح آب در پیزومتر LG3 SP 50



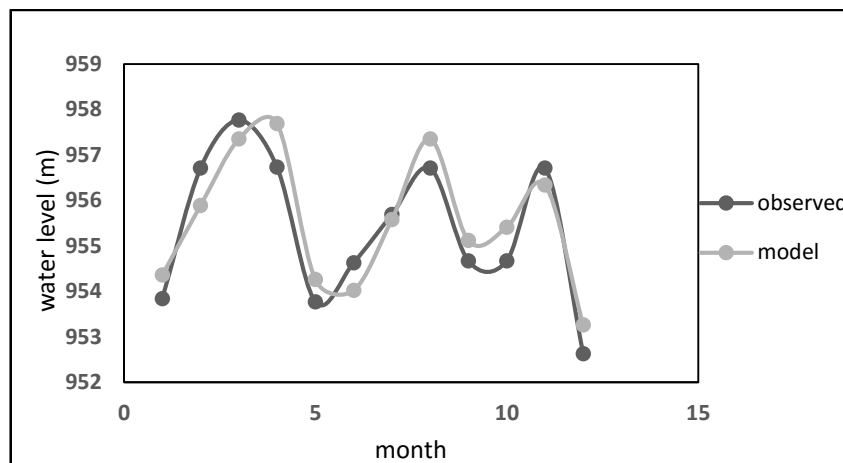
شکل ۴-۱۹ تغییرات سطح آب در پیزومتر LG3 SP 100



شکل ۴-۲۰ تغییرات سطح آب در پیزومتر RG4 SP 250



شکل ۴-۲۱ تغییرات سطح آب در پیزومتر LG5 170



شکل ۴-۲۲ تغییرات سطح آب در پیزومتر LG5 100

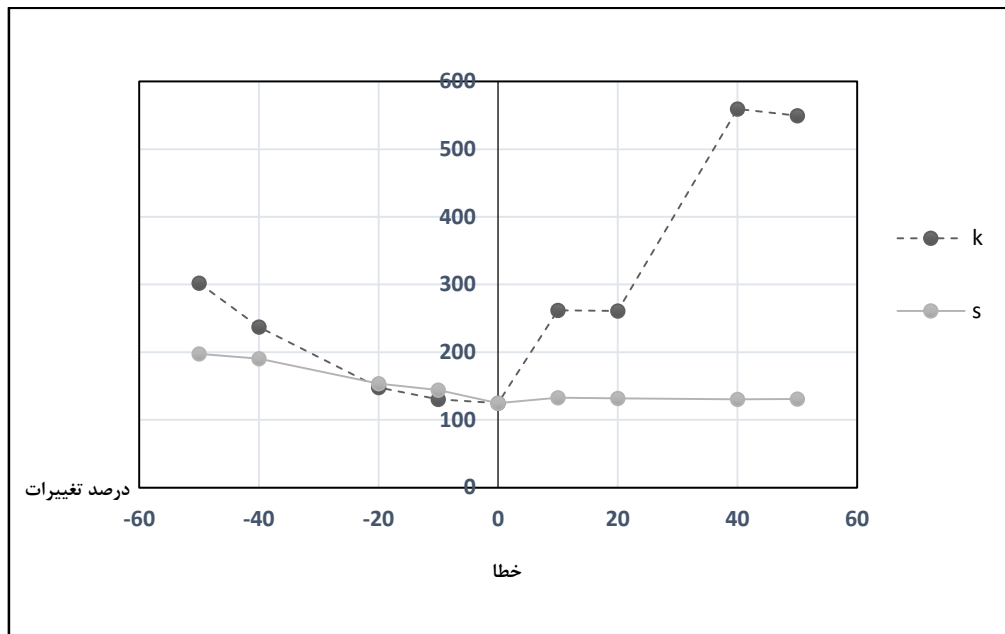
۴-۳- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت عبارت است از فرایند تغییر پارامترهای ورودی به مدل در یک محدوده قابل قبول و مشاهده تغییر نسبی در حساسیت مدل است، به طور مثال تغییر مشاهده شده در میزان نشت آب، و تراز آب، سرعت جریان، سرعت انتقال آلودگی و غیره می باشد. هدف از انجام آنالیز حساسیت، تعیین حساسیت مدل به پارامترهای ورودی است. این کار در تعیین مسیر آینده و جمع آوری داده ها نیز مؤثر است، به طوری که داده هایی که مدل حساسیت بیشتری نسبت به آنها دارد در آینده نسبت به جمع آوری آنها دقت بیشتری خواهد شد.

برای تعیین حساسیت مدل، پارامترهای هیدرولیکی، با کاهش و افزایش ۵۰ درصدی هریک از پارامترها با پله های مختلف در مدل وارد شدند. در این حالت هر بار اجرای مدل تنها یک پارامتر به عنوان متغیر بود و سایر پارامترها ثابت بودند.

در نتیجه مقادیر خروجی های مدل بر روی نمودار نشان داده و با یکدیگر مقایسه شدند. پارامترهایی که به عنوان متغیر وابسته قرار گرفتند میزان دبی خروجی (Q) و بار آبی (Head) بودند و پارامترهای هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب ذخیره (S) به عنوان متغیرهای مستقل به مدل وارد شدند. نتایج نشان

داد که دبی خروجی و بار آبی به دست آمده در نقاط مشاهده‌ای بیشتر به هدایت هیدرولیکی محیط ماتریکس حساس است (شکل ۴-۲۳).



شکل ۴-۲۳ آنالیز حساسیت هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره

۴-۴- خصوصیات شیمیایی و پارامترهای در نظر گرفته شده

با توجه به مطالعات کیفیت آب انجام شده در منطقه و با در نظر گرفتن مقادیر به دست آمده توسط دربرودت ۱۹۹۶ در منطقه‌ای در جنوب غرب آلمان، مقدار اولیه‌ای برای پارامترهای ورودی انتخاب شد.

پارامترهای ورودی به محیط ماتریکسی: ضریب ذخیره، مقدار نفوذپذیری، تغذیه نفوذ کرده به درون محیط ماتریکسی، تخلخل کل و موثر و همچنین مقدار بارآبی اولیه در محل پیزومترها با اعمال مقدار اندازه‌گیری شده در پیزومترها وارد شده است.

پارامترهای ورودی محیط مجرای بزرگ: قطر مجاری بزرگ، زبری مجراها، ضریب پیچ و خم مجراها، ضریب تبادل بین محیط ماتریکس و مجاری بزرگ که (برابر با $0/0001$ متر مکعب بر ثانیه) از جمله مهم‌ترین پارامترهای ورودی لازم برای این محیط هستند.

خصوصیات شیمیایی: غلظت اشباع کلسیت برابر $1/6 \times 10^{-1}$ مول بر متر مکعب است که مربوط به فشار بخشی کربن‌دی‌اکسید در حدود 1×10^{-2} اتمسفر برای شرایط سامانه بسته در جریان مستقیم به لوله و 1×10^{-4} اتمسفر برای جریان به سامانه ماتریکسی است. هنگامی که آبی از محیط ماتریکسی وارد مجاری بزرگ می‌شود، غلظت اشباع دارد. ثابت‌های نرخ سینتیک‌های مرحله اول برای جریان خطی و آشفته به ترتیب برابر با $4/0 \times 10^{-7} \text{ mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ و $4/0 \times 10^{-6} \text{ mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. ثابت سینتیک بالاتر، مرحله چهارم انحلال، اگر غلظت کلسیم بیش‌تر از $0,9$ غلظت اشباع باشد فعال و برابر با $4/0 \times 10^{-4} \text{ mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ برای هر دو جریان خطی و آشفته است. پارامترهای سینتیک از تحقیقات دریبرودت و آیزنلر (۲۰۰۰) گرفته شده است و مربوط به مطالعات پیدایش کارست‌های اخیر است، به عنوان مثال، رومانوو و همکاران (۲۰۰۲)، گابروسک و دریبرودت (۲۰۰۱)، است. درجه حرارت در این مطالعه 20°C تنظیم شده است.

توضیح کامل پارامترهای ورودی در جدول ۴-۹ آمده است.

جدول ۹-۴ پارامترهای ورودی به مدل

شماره	پارامتر	نشان	واحد	مقدار نرمال	مقدار پیشینه
۱	قطر مجرا	a ⁰	m	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۲	پیچ و خم	Tr	-	۱	۱
۳	زبری	kc	-	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
۴	شرط تبادل	ex	L ³ T ⁻¹	۰/۰۰۰۱	۱
۵	غلظت اشباع	c _{eq}	mol/m ³	۱۶	۱۶
۶	غلظت اشباع در سنگ	Ecr	mol/m ³	۲۶۴۳۶/۲۱	۲۶۴۳۶/۲۱
۷	ضریب انتشار کاتیون (CA ²⁺)	DcK	[Mol ² /S]	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶
۸	مرتبه پایین واکنش	N1	molm ⁻² s ⁻¹	۱	۱
۹	مرتبه بالای واکنش	N2	molm ⁻² s ⁻¹	۴	۴
۱۰	ثابت مرتبه پایین واکنش برای جریان خطی	K1_LAM	molm ⁻² s ⁻²	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴
۱۱	ثابت مرتبه پایین واکنش برای جریان آشفته	K1_TURB	molm ⁻² s ⁻³	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴
۱۲	ثابت مرتبه بالای واکنش	K2	molm ⁻² s ⁻³	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴
۱۳	مقدار تعویضی (= c _s /c _{eq})	KSW(csw)	-	۰/۹ c _{eq}	۰/۹ c
۱۴	غلظت کلسیم در تغذیه مستقیم	-	mol/m ³	۰	۰
۱۵	فشار بخشی دی اکسید کربن در تغذیه مستقیم	-	Atm	۰/۰۱	۰/۰۵
۱۶	غلظت کلسیم در جریان	-	mol/m ³	۰/۰۰۱	۰
۱۷	فشار بخشی دی اکسید کربن در جریان ماتریکسی	-	Atm	۰/۰۰۰۱	۰/۰۵
۱۸	تغذیه به کاندویت	CRh	-	۰/۰۳	۱
۱۹	بارآبی اولیه	H	m	↑↓	↑↓
۲۰	نفوذپذیری	K	m/d	↑↓	↑↓
۲۱	ضریب ذخیره	S	1/m	↑↓	↑↓
۲۲	تخلخل کلی	-	-	↑↓	↑↓
۲۳	تخلخل موثر	-	-	۰/۱	۰/۱
۲۴	بارش	-	mm/y	↑↓	↑↓
۲۵	دما	T	°C	۲۰	۲۵
۲۶	آب گذشت	-	m ² /d	↑↓	↑↓
۲۷	زمان	t	day	↑↓	↑↓

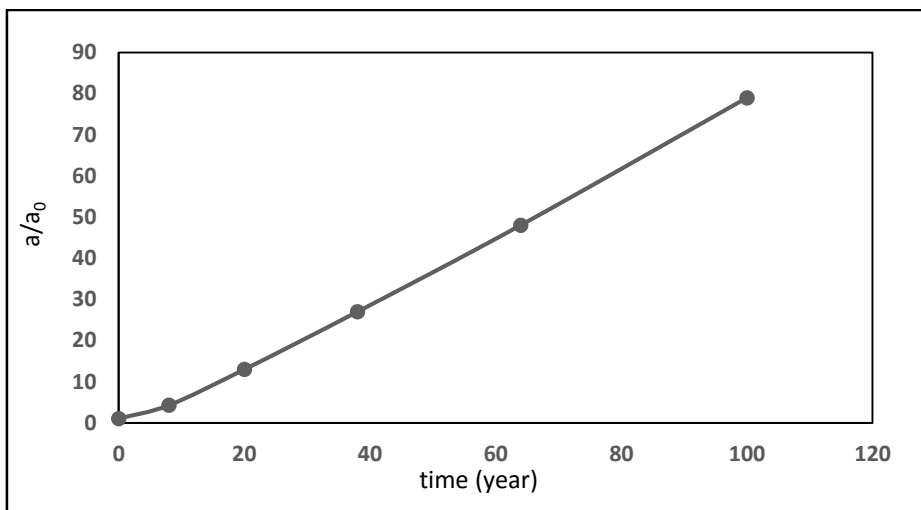
متغیر ↑↓

۴-۵- معرفی سناریوها

پارامترهای هیدرولیکی و نوسان‌های تراز آب و شرایط اعمال شده در مدل برای کالیبراسیون پس از زمان یک سال و حصول نتایج مطلوب برای زمان ۱۰۰ سال در مدل اعمال شد. مدل برای آزمودن بزرگ‌شدگی انحلال فزاینده مجاری بزرگ تحت گرادین‌های هیدرولیکی بالا طراحی شده است. محدوده سطحی مدل در برگیرنده سد دارای ۹۳۵ متر طول و ۷۰۴ متر عرض می‌باشد که در بخش قبل در مورد نحوه آماده سازی و کالیبراسیون توضیح داده شده است. در این بخش به بحث و بررسی- های رفتار مدل شبیه سازی شده در گزینه‌های مختلفی که در سناریوهای پیشنهادی از منظر نقش آنها در توسعه مجاری کارستی و میزان نشت آب از پرده تزریق و تشریح نتایج حاصل از شبیه‌سازی- های انجام شده پرداخته می‌شود. به منظور بررسی رفتار مدل نسبت به تغییراتی که ممکن است در مدل ایجاد شود، تعدادی سناریو طراحی شد که در ادامه به شرح این سناریوها می‌پردازیم.

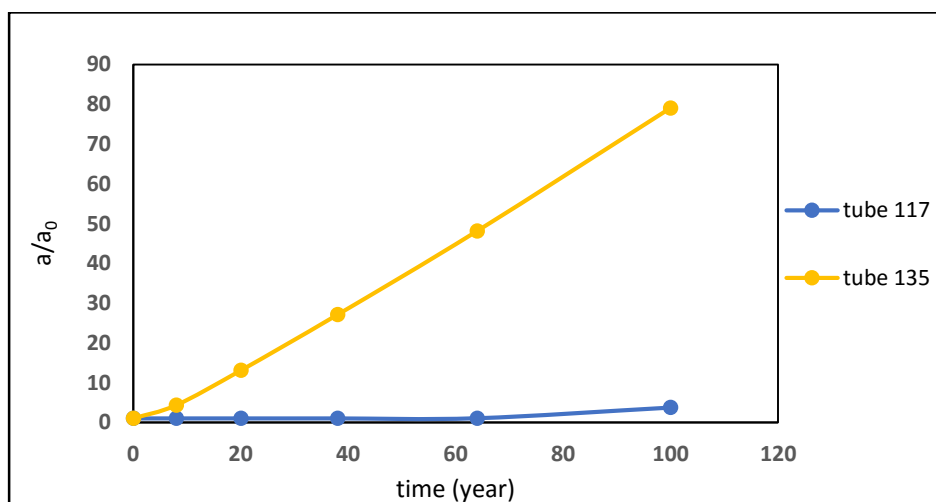
۴-۵-۱- سناریوی اول: بررسی توسعه کارست در طول عمر مفید سد

در این سناریو رشد قطری تعدادی لوله که به طور تصادفی از گسل‌های ۱۳ و ۱۵ و ۳ انتخاب شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴-۵ محدوده ندها و لوله‌های استفاده شده در شبیه‌سازی هر گسل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در منحنی نرخ رشد مجاری با زمان روند افزایشی داشته، به گونه‌ای که در مراحل اولیه، نرخ رشد و انحلال آن کم بوده و سپس شدت آن افزایش یافته است. وقتی که لوله‌ها کوچک هستند، حجم ورودی به مجرا خیلی کم است، بنابراین، قدرت انحلال آن کم است، اما با گذشت زمان انحلال صورت گرفته در طول مجاری سبب افزایش قطر مجاری شده، بنابراین آب ورودی به لوله بیشتر شده و قدرت انحلالی آن نیز بیشتر می‌شود. که در واقع یک اثر بازخورد مثبت (Positive Feedback) را به وجود می‌آورد که نتیجه آن باعث افزایش نرخ رشد قطر مجاری با زمان خواهد شد.



شکل ۴-۲۴ رشد قطر مجاری گسل ۱۳ با گذشت زمان برای لوله انتخابی ۴۳

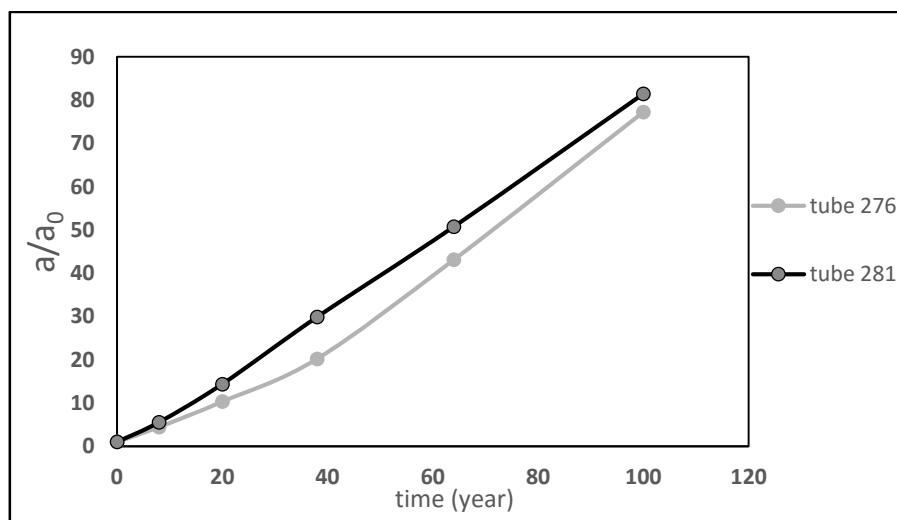
با توجه به شکل (۴-۲۴)، لوله انتخابی ۴۳ که در که در ردیف ۸، ستون ۱۲ و لایه هفتم گسل ۱۳ قرار گرفته است، در انتهای گسل ۱۳ و در فاصله دوری نسبت به دریاچه سد می‌باشد. این لوله بعد از گذشت ۱۰۰ سال حدود ۷۸ برابر افزایش قطر داشته است.



شکل ۴-۲۵ رشد قطر مجاری گسل ۱۵ با گذشت زمان برای لوله انتخابی ۳

لوله‌های انتخابی ۱۱۷ و ۱۳۵ در گسل ۱۵ نیز توسعه متفاوتی را نشان می‌دهند. لوله ۱۱۷ که در ردیف ۲ ستون ۱۶ و لایه ۶ قرار دارد در محدوده دریاچه سد قرار گرفته است. در این منطقه به دلیل کم بودن گرادیان هیدرولیکی جریان از نوع خطی بوده و در نتیجه انحلال کمی بعد از گذشت ۱۰۰

سال ایجاد شده است. لوله ۱۳۵ که در ردیف ۵، ستون ۳، لایه ۶ و انتهای گسل ۱۵ قرار گرفته است، با توجه به اینکه در فاصله دوری نسبت به دریاچه و رودخانه قرار گرفته است انحلال کمتری را نسبت به لوله‌هایی که در نزدیکی پرده آب‌بند قرار دارند نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶ رشد قطر مجاری گسل ۳ با گذشت زمان برای ۳ لوله انتخابی

لوله ۲۷۶ در انتهای گسل ۳ و در فاصله دورتری نسبت به دریاچه قرار دارد و موقعیت قرارگیری آن در لایه ۷ می‌باشد. قطر این لوله بعد از گذشت ۱۰۰ سال حدود ۷۸ برابر افزایش یافته است. لازم به ذکر است که نباید توقع داشت که در تمامی مجاری نرخ رشد یکسان باشد، اگر به شکل‌های (۴-۲۴) تا (۴-۲۶) توجه شود، نرخ رشد لوله‌ها بسیار متفاوت است، به طوری که بعضی از آنها به هیچ‌وجه رشدی نداشته‌اند و با نگاهی دقیق‌تر به نمودارها، فقط در معدودی لوله، نرخ رشد بسیار زیاد است. پس نباید توقع داشت که تمامی مجاری یک آبخوان توسعه یابند بلکه، تعدادی از آنها هستند که فرصت رشد می‌یابند. با توجه به موقعیت لوله‌ها در منطقه و فاصله آنها نسبت به دریاچه، نوع جریان (خطی و آشفته)، موقعیت نسبت به رودخانه، هدایت هیدرولیکی زون، انحلال‌پذیری در لوله‌ها متفاوت می‌باشد.

بررسی بیلان حجمی در این سناریو در طول ۱۰۰ سال نشان می‌دهد که حدود ۲۰ میلیارد متر مکعب آب از سد فرار کرده و وارد آبخوان شده است (جدول ۴-۱۰). در سال‌های ابتدایی حجم فرار آب کم بوده ولی در سال‌های انتهایی به دلیل مسئله انحلال مجاری، فرار آب افزایش یافته است.

جدول ۴-۱۰ بیلان حجمی در سناریو اول در طول ۱۰۰ سال

۳۶۱۸۲۸/۶۵۲۶	آب آزاد شده از ذخیره	حجم آب‌های ورودی (m ³)
۲۰۱۲۶۴۵۴۳۶۱/۲۷۱۳	آب ورودی از مرز	
۲۳۹۵۹۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰	آب تغذیه شده از سطح	
۶۱۱۶۹۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰	آب ورودی از ماتریکس به مجاری	حجم آب‌های خروجی (m ³)
۳۸۸۸۱۷۷۷۹۱/۹۱۵۲	آب ذخیره شده در سیستم	
۳۰۰۷۶۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰	آب خارج شده از مرز	
۲۰۱۲۶۴۵۴۳۶۱/۲۷۱۳	آب خارج شده از مجاری	

همچنین در بررسی بیلان جرمی این سناریو نشان می‌دهد که به دلیل انحلال در مجاری و توسعه آبخوان کارستی در طول ۱۰۰ سال به میزان ۲,۷۱ میلیون مول کلسیم از محیط خارج شده است (جدول ۴-۱۱).

جدول ۴-۱۱ بیلان جرمی (واحدها بر حسب مول) در ۱۰۰ سال

۶۱۱۶۹۰۰۰۰۰۰	کلسیم حل شده توسط تغذیه	کلسیم حل شده در جریان ورودی (mol)
۲۰۱۲۶۰۰۰۰۰۰	میزان کلسیم حل شده در ماتریکس	
۲۷۱۴۴۰۰	میزان کلسیم حل شده در جریان ورودی	کلسیم حل شده در جریان خروجی (mol)
۲۰۱۲۶۰۰۰۰۰۰	میزان کلسیم خارج شده از مرز	
۶۱۱۷۲۰۰۰۰۰۰	میزان کلسیم حل شده در ماتریکس	

در بررسی آماری انحلال و بزرگ‌شدگی لوله‌ها در سناریوی اول مشخص شده که حدود نیمی از لوله‌ها دارای بیشترین توسعه کارست بوده‌اند، و حدود ۲۳ درصد از لوله‌ها معادل ۱۰۶ لوله کمترین انحلال را داشته‌اند (شکل ۴-۲۷).



شکل ۴-۲۷ محدوده تغییرات داده‌ها

با توجه به اینکه حدود ۴۷ درصد لوله‌ها حداکثر انحلال را نشان می‌دهند، موقعیت این لوله‌ها بیشتر در محدوده اطراف پرده آب‌بند و در نزدیکی رودخانه می‌باشد. در مناطقی که شیب هیدرولیکی پایین بوده و جریان از نوع خطی می‌باشد، لوله‌ها کمترین انحلال را نشان می‌دهند.

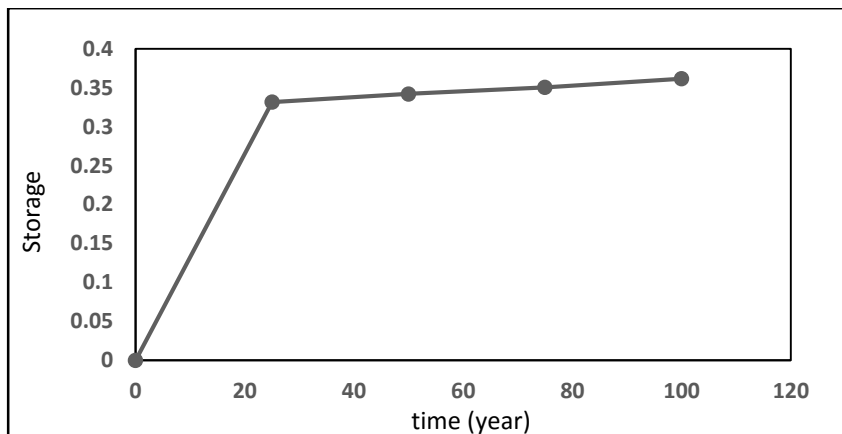
۴-۱-۱-۵-۴ بررسی تغییرات حجم فرار آب در طول عمر مفید سد کارون ۴

ارزیابی کمی آب زیرزمینی یکی از اهداف مطالعات هیدروژئولوژیکی می‌باشد. برآورد پتانسیل کمی یکی از اقدامات مهم برای اعمال مدیریت مناسب آب زیرزمینی است. در این مطالعه مهم‌ترین مولفه ورودی در منطقه تغذیه، و مهم‌ترین مولفه خروجی نشت و فرار آب از مرزها می‌باشد (جدول ۴-۱۲).

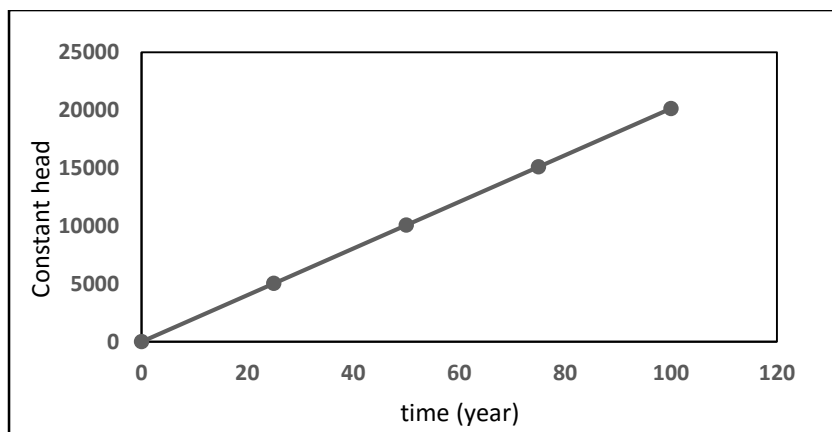
جدول ۴-۱۲ بیلان (واحدها بر حسب متر مکعب) در طول ۱۰۰ سال

۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵		
۳۶۱۸۲۸.۶۵۳	۳۵۰۷۱۹.۷۱۶۶	۳۴۲۲۶۱.۶۴۶	۳۳۱۷۶۹.۱۲۸۹	آب آزاد شده از ذخیره	ورودی
$۲.۰۱۲۶E+۱۰$	۱۵.۰۹۳۳۹۵۶۰۳	$۱.۰۰۶۱E+۱۰$	۵.۰۲۹۷۵۷۶۹۳	مرز	
$۲.۴۰E+۱۶$	$۱.۸۰E+۱۶$	$۱.۲۰E+۱۶$	$۵.۹۹E+۱۵$	تغذیه	
$۶.۱۲E+۱۵$	$۴.۵۹E+۱۵$	$۳.۰۶E+۱۵$	$۱.۵۳E+۱۵$	آب ورودی از کاندوبیت	
۳۸۸۸۱۷۷۷۹۲	۳۸۸۸۱۷۶۴۳۷	۳۸۸۸۱۷۳۸۵۷	۳۸۸۸۱۶۶۱۲۷	آب ذخیره شده در سیستم	خروجی
$۳.۰۱E+۱۶$	$۲.۲۶E+۱۶$	$۱.۵۰E+۱۶$	$۷.۵۲E+۱۵$	مرز	
۲۰۱۲۶۴۵۴۳۶۱	۱۵۰۹۳۳۹۵۶۰۳	۱۰۰۶۰۶۵۰۳۸۹	۵۰۲۹۷۵۷۶۹۳	آب وارد شده به کاندوبیت	

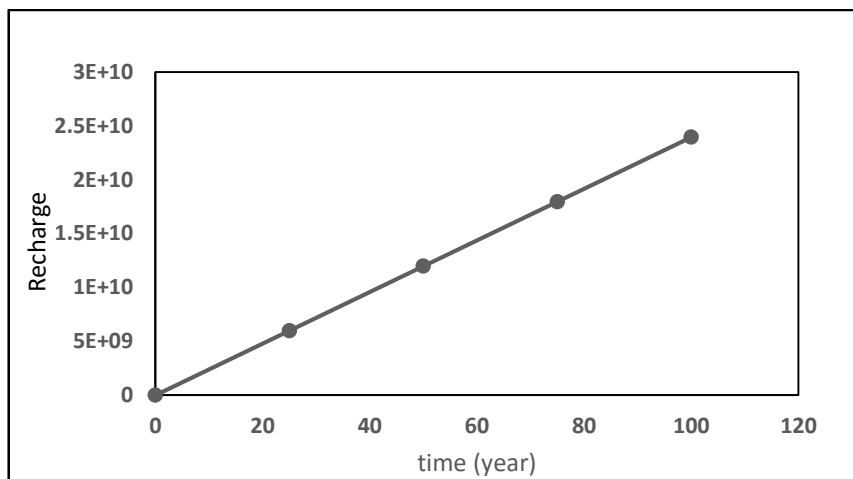
با گذشت زمان و در طول عمر مفید سد همانطور که از داده‌ها مشخص است حجم ورودی و خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به گراف‌های زیر تمامی مولفه‌های ورودی و خروجی مدل با گذشت زمان روند افزایشی دارند.



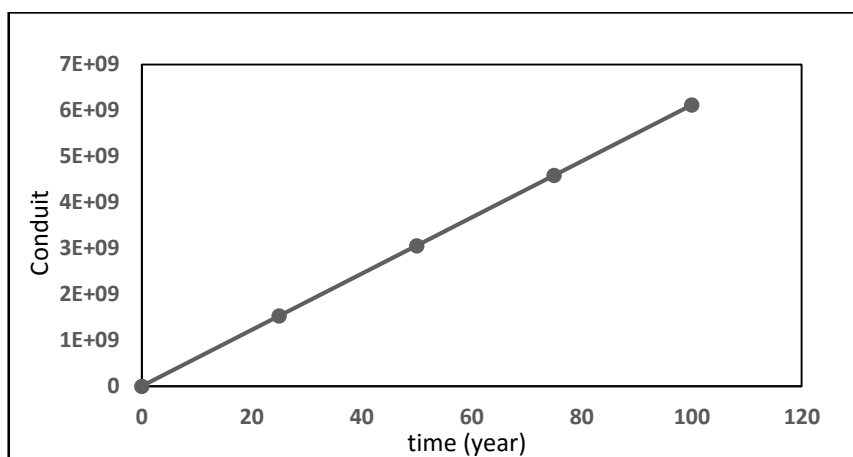
شکل ۴-۲۸ آب آزاد شده از ذخیره (داده‌ها بر حسب میلیون متر مکعب)



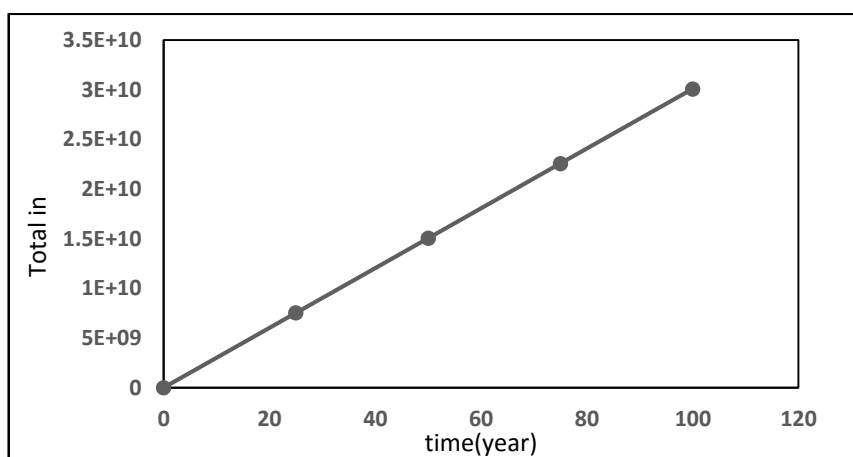
شکل ۴-۲۹ ورودی آب از مرز (داده‌ها بر حسب میلیون متر مکعب)



شکل ۴-۳۰ تغذیه (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)



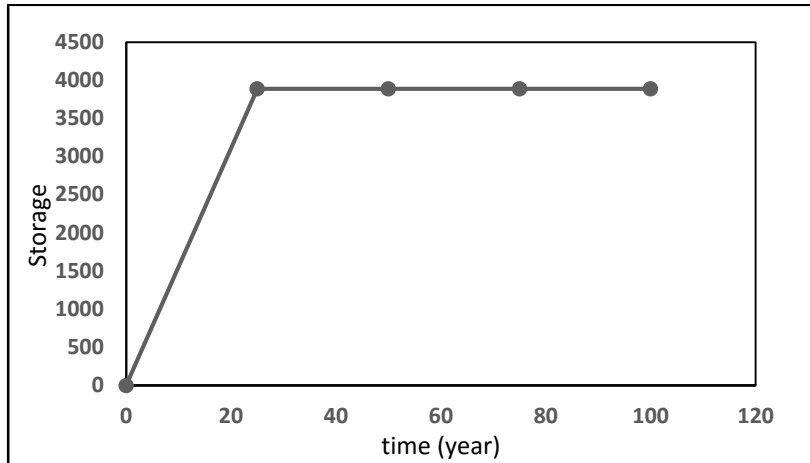
شکل ۴-۳۱ آب ورودی از کاندویبیت‌ها (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)



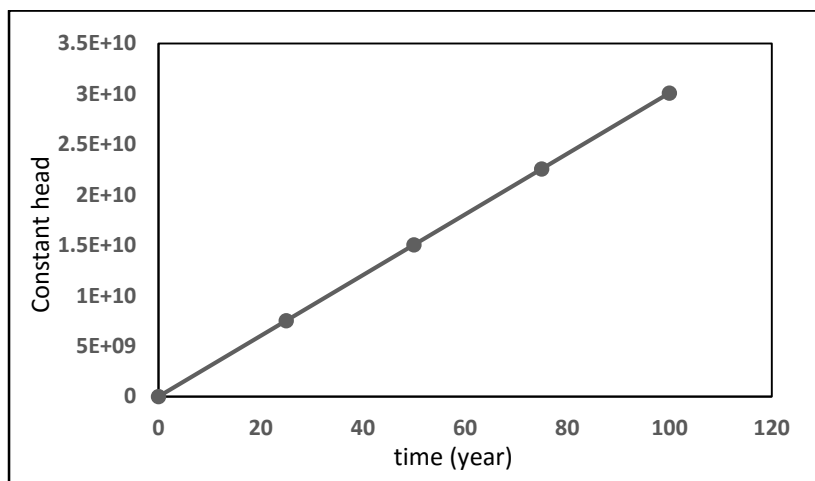
شکل ۴-۳۲ مجموع کل ورودی (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)

با توجه به شکل‌های ۴-۳۴ و ۴-۳۵ که بیان‌کننده‌ی میزان نشت می‌باشند، و حجم اصلی خروجی از مدل به خاطر نشت است بعد از گذشت ۵۰ سال میزان نشت و یا فرار آب از طریق سیستم مجاری

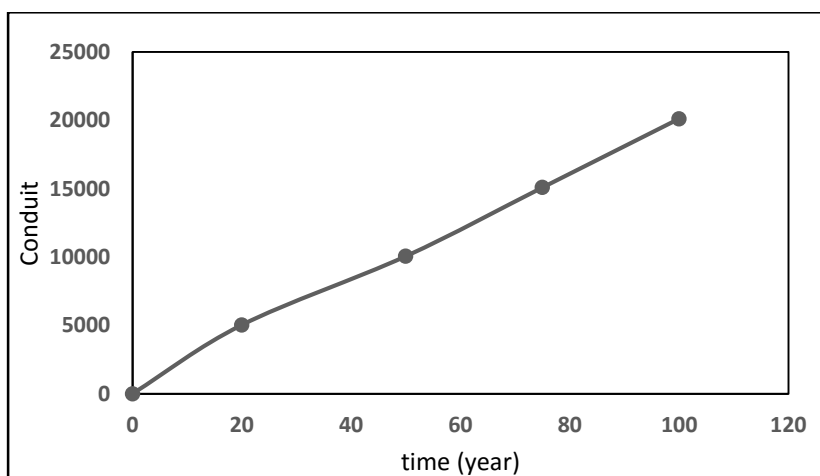
منتهی به مرزها و مرزهای خروجی حدود دو برابر ۲۵ سال گذشته افزایش یافته و بعد از حدود ۱۰۰ سال به میزان قابل توجهی فرار آب افزایش یافته و به حدود ۳ برابر ۲۵ سال گذشته رسیده است.



شکل ۴-۳۳ آب ذخیره شده در سیستم (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)



شکل ۴-۳۴ خروجی آب از مرزها (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)



شکل ۴-۳۵ خروجی آب از مجاری (داده‌ها برحسب میلیون متر مکعب)

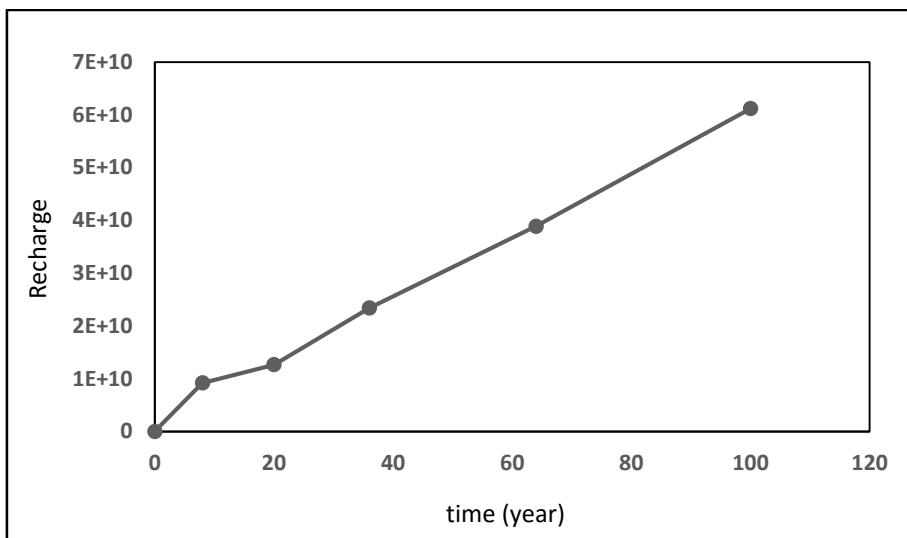
همانطور که در شکل‌های ۴-۳۳ تا ۴-۳۵ مشخص است با عبور آب از منافذ، درزه‌ها و شکاف‌ها انحلال صورت گرفته و سبب بزرگ‌شدگی مجاری می‌شود. هر چه زمان می‌گذرد در طول عمر مفید سد انحلال صورت گرفته در طول مجاری سبب افزایش قطر مجاری شده، بنابراین، آب ورودی به لوله بیشتر شده و قدرت انحلالی آن نیز بیشتر می‌شود که سبب حجم زیاد فرار آب از مرزها می‌شود.

۴-۵-۱-۲- بررسی تغییرات بیلان جرمی در طول عمر مفید سد کارون ۴

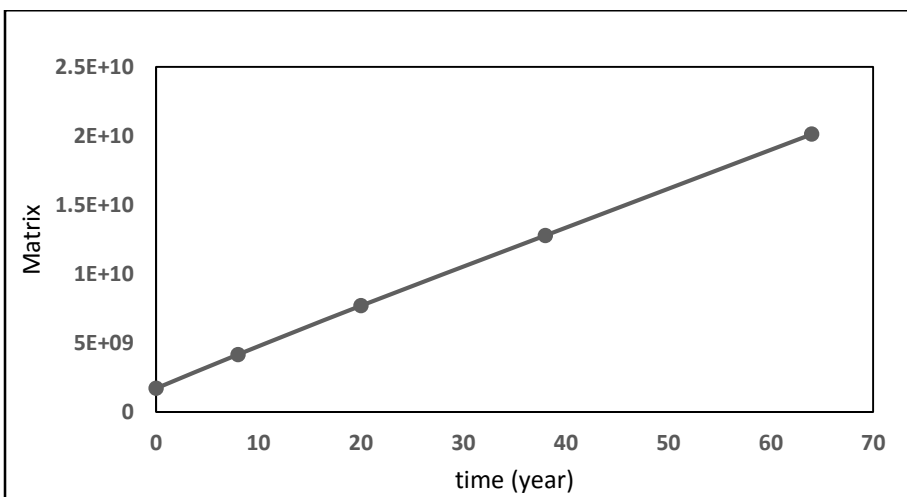
فرآیند اصلی حاکم بر پیدایش آبخوان‌های کربناته، انحلال کربنات کلسیم است که درزه‌ها، شکستگی‌ها و کانال‌ها با گذشت زمان به دلیل انحلال بزرگ‌تر می‌شوند. همانطور که در جدول ۴-۱۳ مشاهده می‌شود میزان کلسیم حل شده توسط تغذیه با گذشت زمان افزایش یافته است. هر چه میزان تغذیه بیشتر شود میزان جریان ورودی به ماتریکس (غیرمستقیم) و مجاری (مستقیم) افزایش یافته در نتیجه با بالا رفتن تغذیه جریان از حالت آرام به آشفته تبدیل شده که باعث افزایش انحلال می‌شود.

جدول ۴-۱۳ بیلان جرمی کلسیم (بر حسب مول)

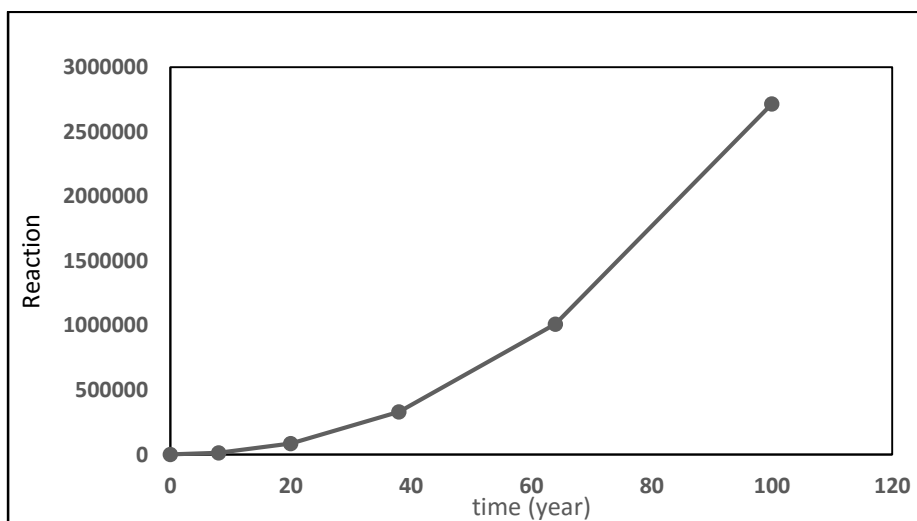
۱۰۰	۶۴	۳۸	۲۰	۸	زمان	
$6.12E+10$	$3.89E+10$	$2.34E+10$	$1.26E+10$	$5.18E+09$	تغذیه	ورودی
$2.01E+10$	$1.28E+10$	$7.70E+09$	$4.16E+09$	$1.71E+09$	ماتریکس	
$2.71E+06$	$1.01E+06$	$3.30E+05$	$8.41E+04$	$1.20E+04$	واکنش	
$2.01E+10$	$1.28E+10$	$7.70E+09$	$4.16E+09$	$1.71E+09$	مرزها	خروجی
$6.12E+10$	$3.89E+10$	$2.34E+10$	$1.26E+10$	$5.18E+09$	ماتریکس	



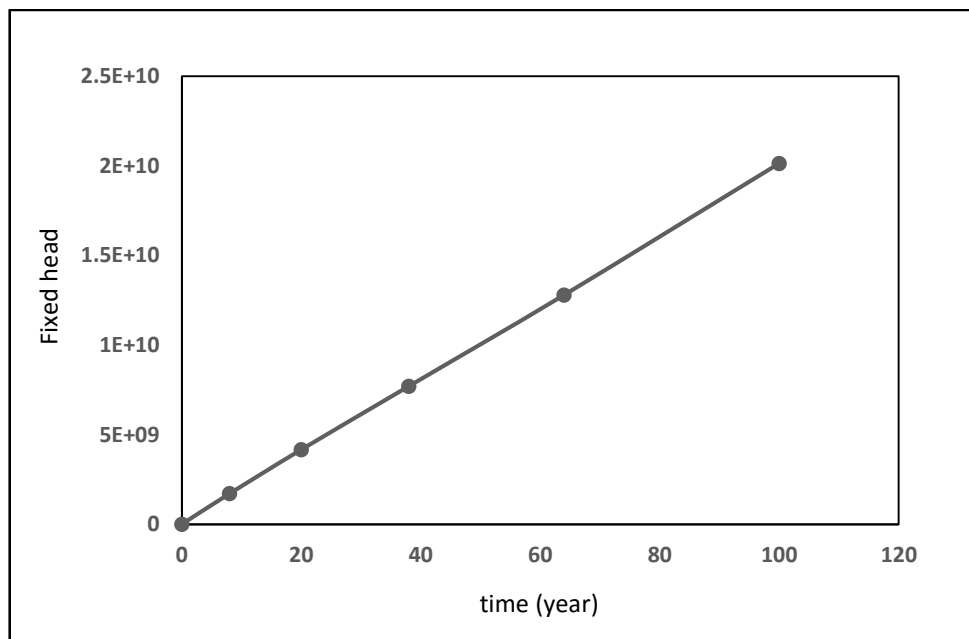
شکل ۴-۳۶ میزان کلسیم حل شده توسط تغذیه با گذشت زمان (واحدها بر حسب مول)



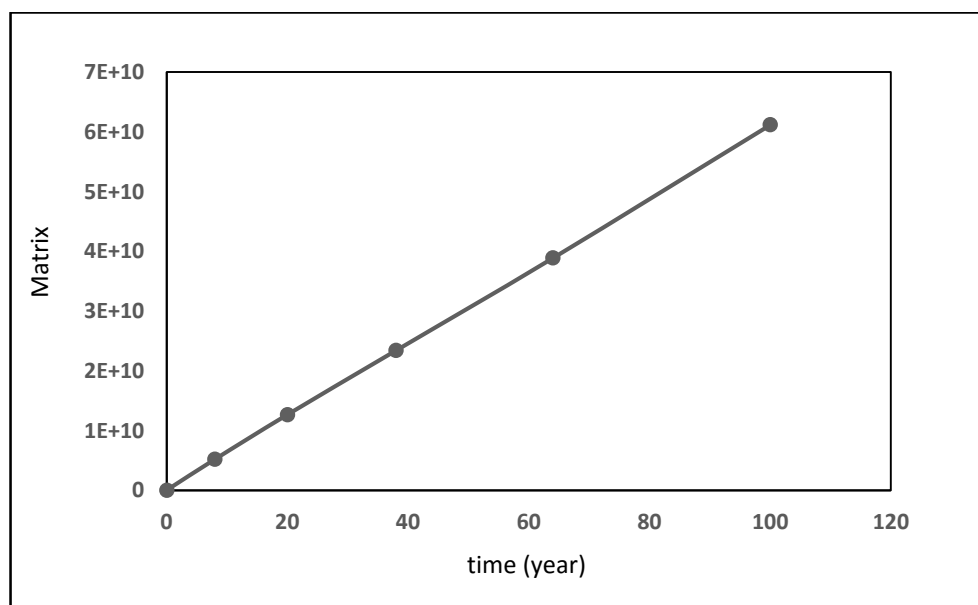
شکل ۴-۳۷ میزان کلسیم انحلال یافته در ماتریکس (واحدها بر حسب مول)



شکل ۴-۳۸ میزان کلسیم حل شده توسط جریان ورودی (واحدها بر حسب مول)



شکل ۴-۳۹ میزان کلسیم خروجی از مرزها (واحدها بر حسب مول)

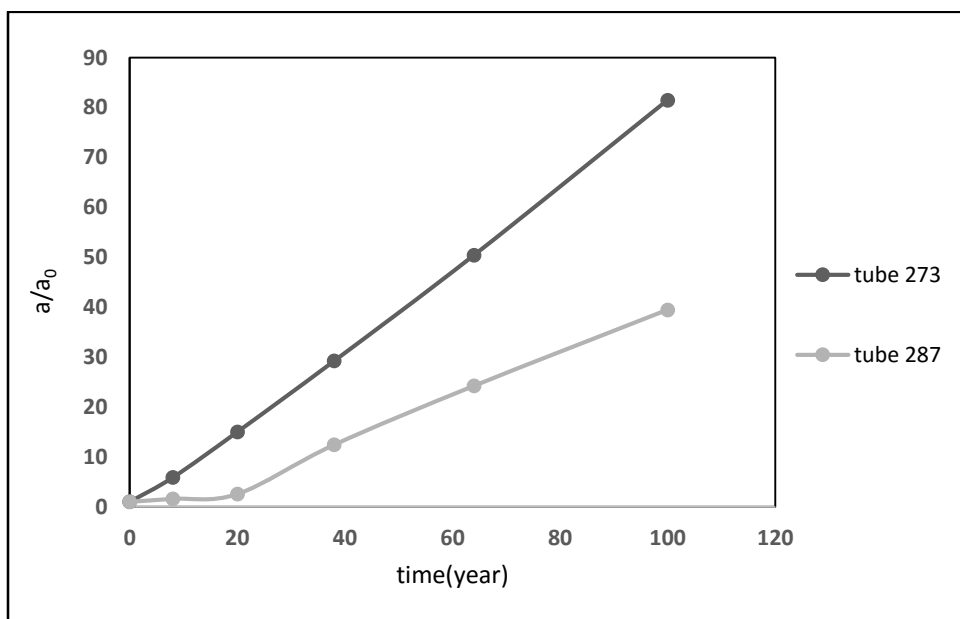


شکل ۴-۴۰ میزان کلسیم خروجی از ماتریکس (واحدها بر حسب مول)

۴-۵-۱-۳- بررسی شبکه‌بندی عمودی لوله‌ها

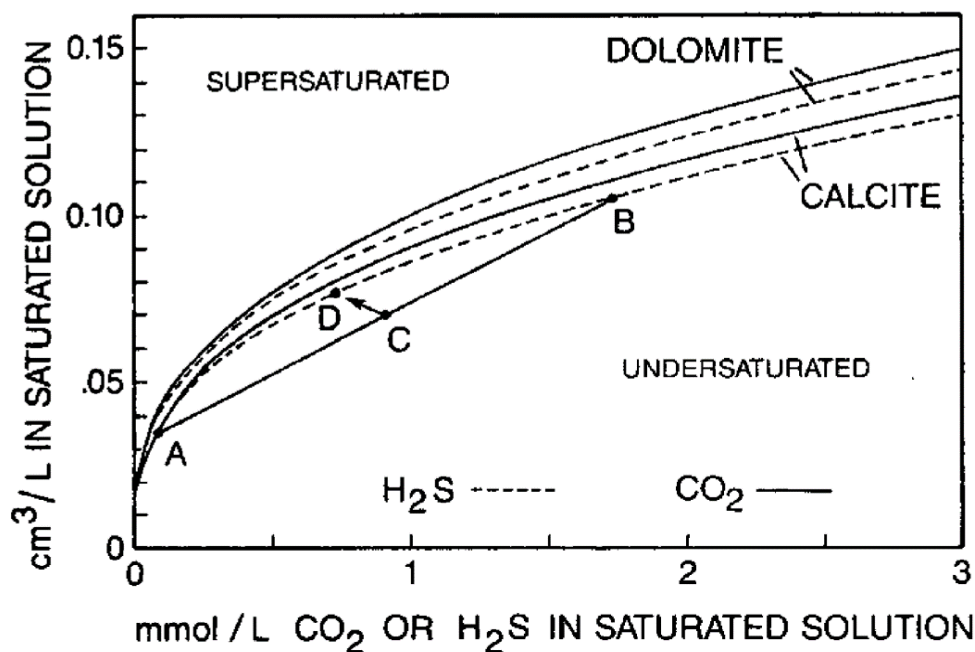
در بررسی شبکه‌بندی لوله‌ها مشخص شد که لوله‌های عمودی دارای انحلال‌پذیری بیشتری نسبت به لوله‌های افقی در مدل هستند. به عنوان مثال در بررسی لوله‌های عمودی که منطبق بر راستای گسل ۳ هستند بیشترین انحلال را نسبت به لوله‌های افقی در این گسل دارند. همانطور که در شکل ۴-۴۱

مشاهده می‌شود لوله ۲۷۳ که به صورت عمودی بین دو لایه ۶ و ۷ قرار گرفته بیشترین انحلال را نشان می‌دهد و لوله ۲۸۷ که به صورت افقی در پایین دست گسل قرار گرفته کمترین انحلال را دارد. به طور کلی در مکان‌های با بیشترین تراکم لوله، رشد قطر بیشتر بوده و لوله‌های عمودی رشد بیشتری نسبت به لوله‌های افقی کناری خود دارند.



شکل ۴-۴۱ بررسی انحلال لوله‌های عمودی ۲۷۳ و افقی ۲۸۷ در گسل ۳

مفهوم مهم اختلاط خوردگی در آب توسط مطالعات بوگلی ۱۹۶۴ معرفی شد، که اثر خوردگی مکانیکی سیستم CO₂ از دو منبع آب مختلف که از کلسیت اشباع هستند و قابلیت انحلال ندارند را بیان می‌کند. به طور کلی، در چنین مواردی مخلوط این دو آب که از دو منبع متفاوت آمده‌اند و اشباع هستند قابلیت انحلال خواهد داشت. به عنوان مثال همانطور که در شکل ۴-۴۲ مشاهده می‌شود آب‌های زیرزمینی A که حاوی H₂S و آب زیرزمینی B که سرشار از CO₂ در امتداد خط AB به هم می‌رسند و اگر حجم برابری داشته باشند مخلوط حاصل از آن‌ها در محدوده زیر خط اشباع می‌باشد و یون‌ها می‌تواند با کلسیت و دولومیت واکنش نشان دهند تا در نقطه‌ی D به تعادل برسند.



شکل ۴-۴- اصول اختلاط خوردگی در محلول اشباع در سیستم های CO_2 و H_2S (Ford 2007)

مدل دارای ۷ لایه با لیتولوژی و ترکیب شیمیایی متفاوت می‌باشد وقتی آب تغذیه در طول لوله‌های افقی به جریان می‌افتد و انحلال سبب اشباع‌شدگی آن می‌شود دیگر قابلیت انحلال ندارد. وقتی دو منبع متفاوت آب در طول لوله‌های افقی به هم می‌رسند و وارد لوله عمودی می‌شود، این مخلوط حاصل دارای قابلیت انحلال می‌شود. بنابراین، به همین دلیل است که لوله‌های عمودی دارای انحلال بیشتری نسبت به لوله‌های افقی هستند. در مدل، تقریباً در تمامی لوله‌های عمودی انحلال بیشتری نسبت به لوله‌های افقی ایجاد شده است.

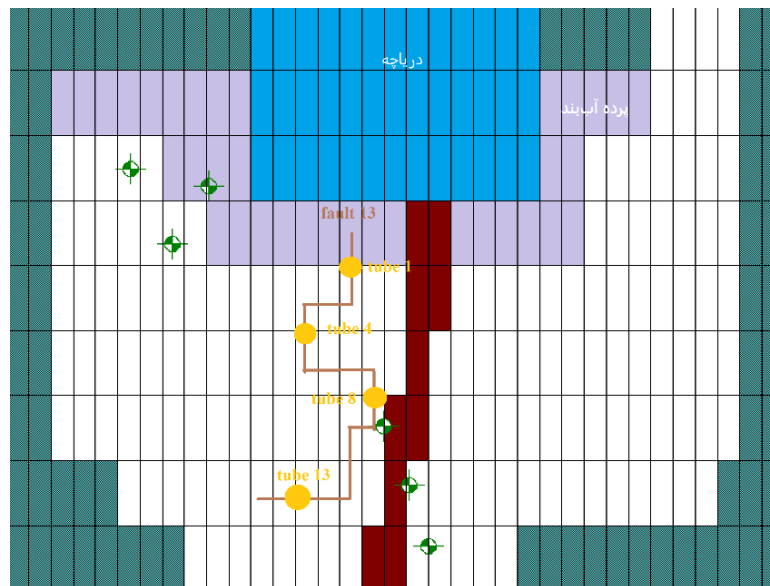
۴-۵-۲- سناریو دوم: بررسی رفتار انحلالی هر گسل با فرض آب‌بند شدن سایر گسل‌ها

در این سناریو به بررسی رفتار انحلالی هر گسل با فرض آب‌بند بودن سایر گسل‌ها پرداخته شده که در این قسمت با مشخص کردن بیشترین تغییر قطر مجاری به دلیل انحلال، زون‌های انحلالی در هر گسل مشخص شده، که بیان‌کننده مناطق با بیشترین پتانسیل انحلال و فرار آب در اطراف پی و بدنه

سد می‌باشد. که در اینجا با استفاده از نسبت قطر حاصل از انحلال (a) به قطر اولیه (a_0) تغییرات انحلالی لوله‌ها بررسی شد.

۱۳-۵-۲-۱- گسل ۱۳

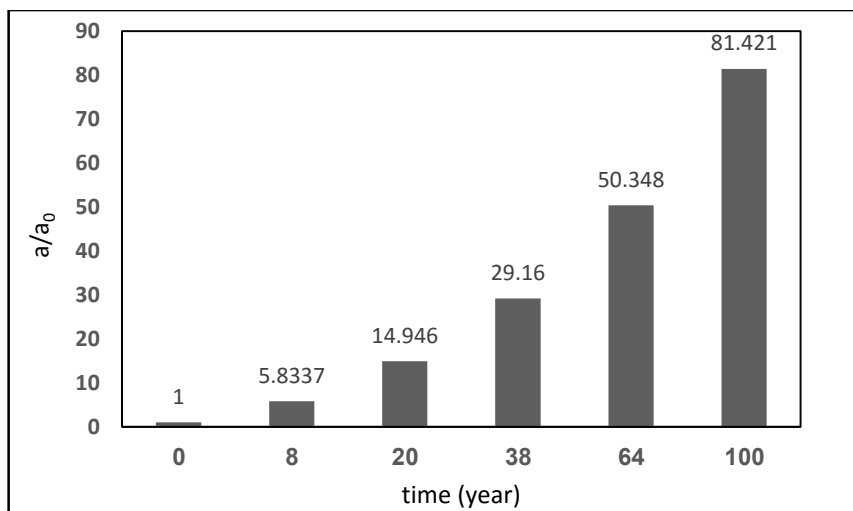
گسل ۱۳ که در محدوده ۸۹۰ تا ۹۸۰ متر و تقریباً از بالادست تکیه‌گاه راست سد تا پایین دست آن تداوم دارد (شکل ۴-۴۳). با توجه به موقعیت بیشترین انحلال که در تعدادی از لوله این گسل مشاهده شده زون‌های انحلالی در طول گسل مشخص شده است. در این جا به صورت تصادفی به بررسی لوله‌های ۱، ۴، ۸، ۱۲، ۱۴ از گسل ۱۳ که موقعیت‌های متفاوتی در گسل دارند پرداخته می‌شود.



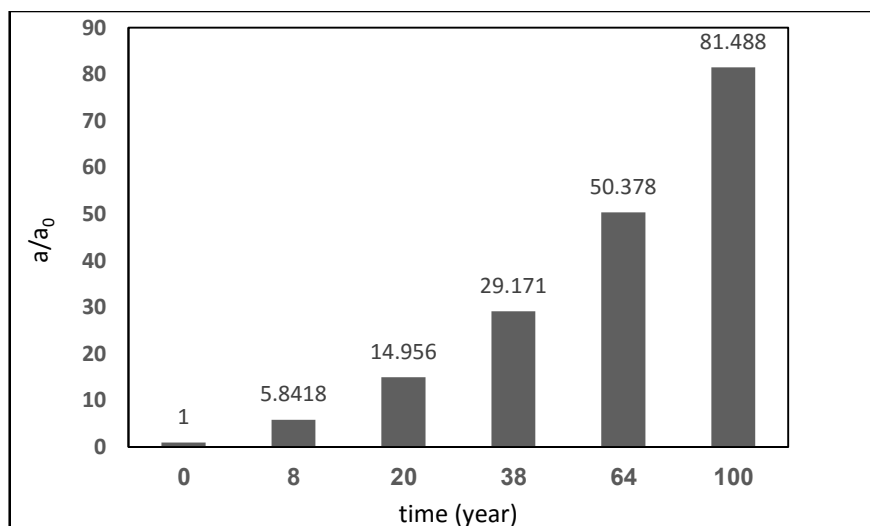
۴-۴۳ موقعیت گسل ۳ در محدوده مورد مطالعه و لوله‌های ۱، ۴، ۸، ۱۳

لوله ۱ در لایه پنجم، ستون ۱۶ و در حد فاصل بین پرده آب‌بند و پایین دست سد قرار گرفته است. با توجه به اینکه این نقطه به دلیل تراز بالای دریاچه و تراز پایین آب در پایین دست، دارای شیب هیدرولیکی زیادی می‌باشد، موجب ورود حجم زیاد آب به گسل شده که سبب تشدید انحلال و بزرگ‌شدگی مجاری در این قسمت می‌شود. لوله‌های ۱، ۱۶ و ۳۱ که به ترتیب در لایه های ۵، ۶، ۷، در موقعیت مشابه قرار گرفته‌اند، بیشترین انحلال در این گسل را نشان می‌دهند. در این موقعیت هر

چه عمق افزایش می‌یابد، لوله‌های ۱۶ و ۳۱ به دلیل اینکه در زون با نفوذپذیری بیشتری نسبت به لوله ۱ قرار دارند، افزایش قطر بیشتری را نشان می‌دهند. مدل افزایش قطر ۸۱ برابری این لوله‌ها را بعد از گذشت ۱۰۰ سال پیش‌بینی کرده است.



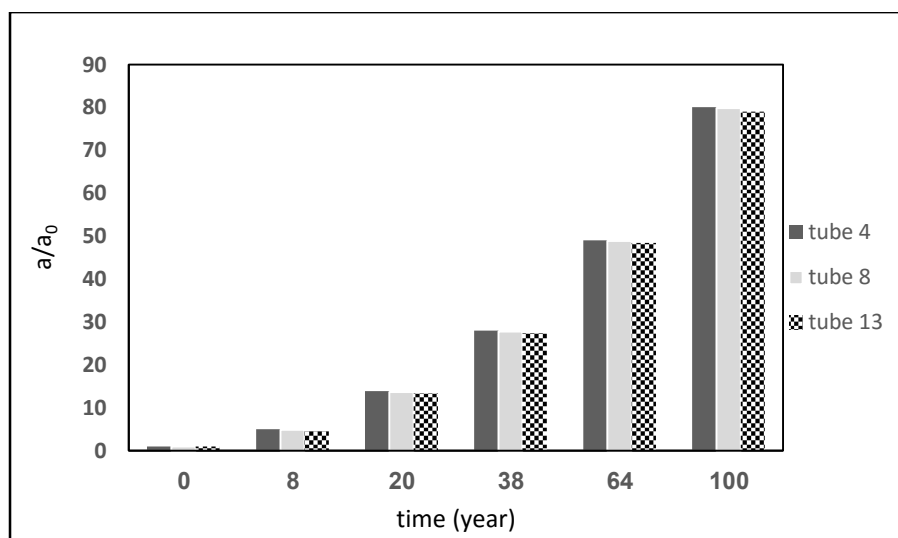
شکل ۴-۴ تغییرات قطر لوله ۱ از گسل ۱۳ در طول عمر مفید سد با بیشترین انحلال



شکل ۴-۵ تغییرات قطر لوله ۳۱ از گسل ۱۳ در طول عمر مفید سد با بیشترین انحلال

با توجه به اینکه این گسل در زون هدایت هیدرولیکی با نفوذپذیری بالا قرار گرفته و با توجه گرادیان هیدرولیکی بالا در نزدیکی سد، لوله‌های ۴، ۸، ۱۳ که دارای موقعیت متفاوتی نسبت به دریاچه هستند انتخاب و بررسی شدند. همانطور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود، لوله ۴ که در فاصله

نزدیک‌تری نسبت به سد قرار گرفته، افزایش قطر ۸۰ برابری بعد از ۱۰۰ سال داشته است. لوله ۸ که در نزدیکی رودخانه قرار گرفته و از رودخانه تغذیه می‌کند دچار انحلال بیشتری نسبت به سایر لوله‌های پایین دست می‌شود. هر چه موقعیت لوله‌ها از مخزن سد دورتر می‌شود به دلیل گرادیان هیدرولیکی پایین جریان به آهستگی حرکت می‌کند و در نتیجه انحلال کمتری مشاهده می‌شود. انحلال لوله ۴ حدود ۸۰ برابر، لوله ۸ حدود ۷۸ برابر و لوله ۱۳ که در پایین دست قرار گرفته حدود ۷۷ برابر در ۱۰۰ افزایش یافته است.

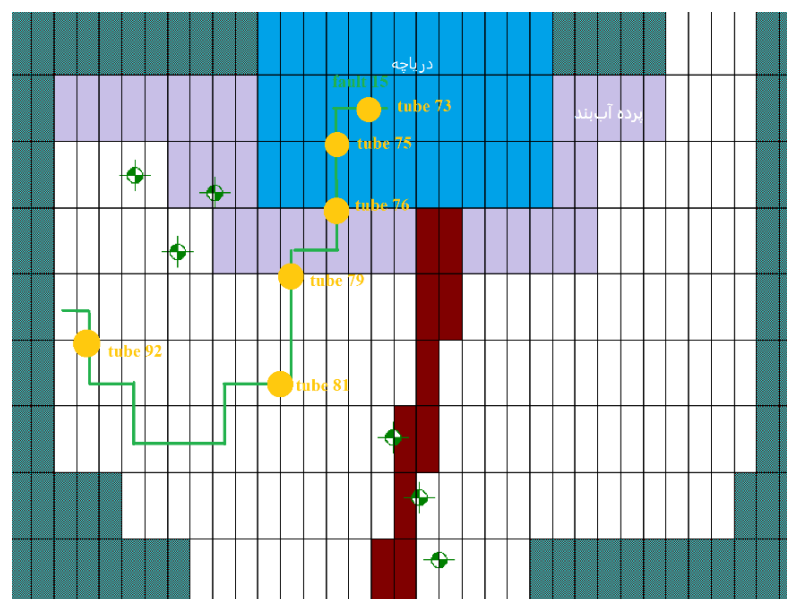


شکل ۴-۴۶ تغییرات قطر لوله‌های ۴، ۸، ۱۳

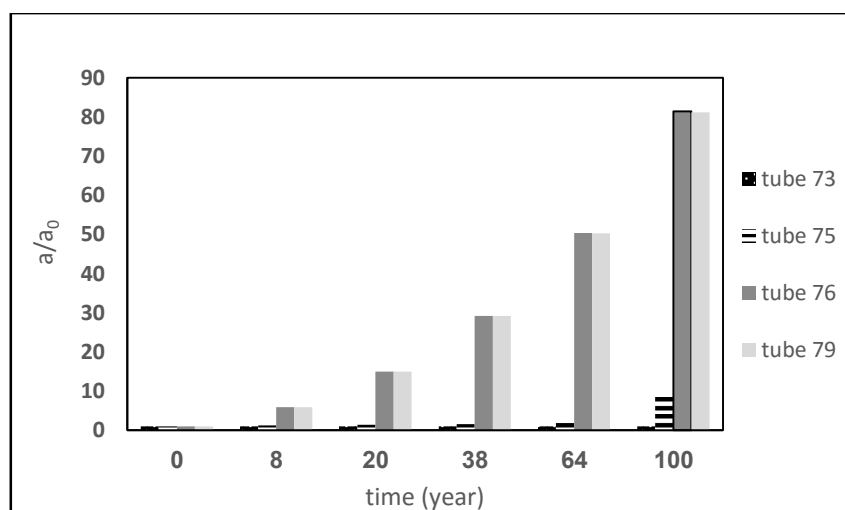
۱۵-۲-۲-۵-۴- گسل ۱۵

گسل ۱۵ در جناح راست و در فاصله دورتری از رودخانه نسبت به گسل ۱۳ قرار دارد. این گسل به صورت عرضی از سمت شرق تا غرب جناح راست سد کشیده شده است. ابتدای این گسل در شبکه لوله‌بندی از قسمت پایین پرده آب‌بند آغاز شده و تا سمت جنوب غربی سد امتداد دارد (شکل ۴-۴۷). لوله‌های مشخص شده در شکل ۴-۴۸ همگی در لایه ۵ قرار دارند. با توجه به موقعیت قرارگیری این لوله‌ها نسبت به پرده آب‌بند و زون‌های هدایت هیدرولیکی، انحلال و توسعه متفاوتی دارند. همانطور که در شکل (۴-۴۸) نشان داده شده است، موقعیت لوله‌های ۷۳ و ۷۵ در زیر دریاچه سد

قرار دارد. تراز آب پس از آب‌گیری در مخزن نسبتاً ثابت بوده و حدود ۱۰۲۵ متر می‌باشد. ثابت بودن تراز آب، جریان خطی را ایجاد می‌کند که با سرعت بسیار پایین در حرکت است، در نتیجه در این منطقه به دلیل جریان آهسته انحلال در لوله‌ها بسیار کم و در حد صفر می‌باشد. بنابراین جریان در لوله‌های ۷۳ و ۷۵ از نوع خطی (Laminar) می‌باشد. لوله ۷۶ و ۷۹ در منطقه‌ای با گرادیان هیدرولیکی بالا قرار دارند در نتیجه جریان در این لوله‌ها از نوع آشفته (Turbulent) می‌باشد. بیشترین انحلال و بزرگ‌شدگی قطر در لوله‌های ۷۶ و ۷۹ مشاهده می‌شود (شکل ۴-۴۸).

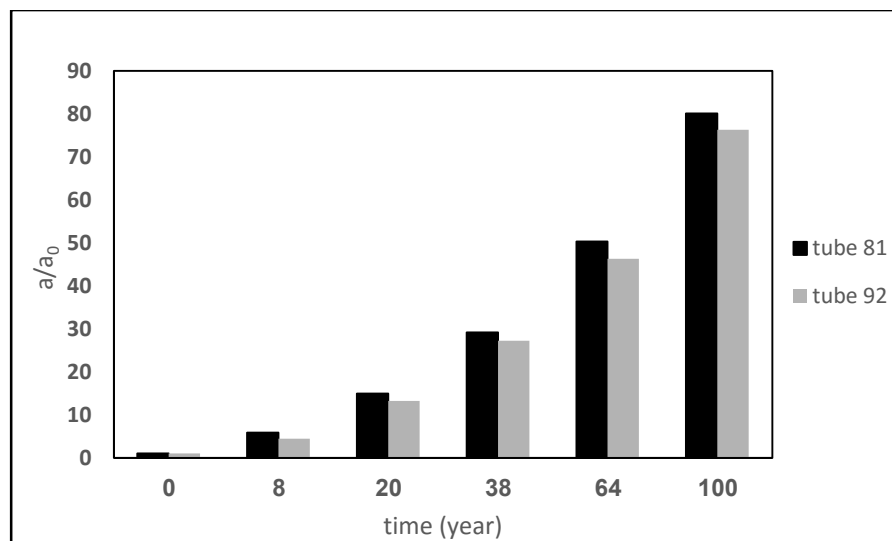


شکل ۴-۴۷ موقعیت گسل ۱۵ در محدوده مورد مطالعه و لوله‌های ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۷۹، ۸۱، ۹۲



شکل ۴-۴۸ تغییرات قطر لوله‌های ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۷۹

با توجه به شکل ۴-۴۹، لوله‌ی ۸۱ در نزدیکی دریاچه سد و لوله‌ی ۹۲ در فاصله دورتری نسبت سد و رودخانه قرار گرفته است. با توجه به اینکه نرخ جریان ورودی در لوله‌های نزدیک به دریاچه زیاد است و متاثر از گرادیان‌های هیدرولیکی بالا هستند، انتظار می‌رود که کارستی شدن و انحلال لوله‌های نزدیک به دریاچه در طول عمر سد افزایش یابد. علاوه بر موارد ذکر شده لوله‌ی ۸۱ در زون هدایت هیدرولیکی ۳۰ که دارای نفوذپذیری بالاست قرار دارند و قسمت غربی گسل که شامل لوله ۹۲ می‌باشد در زون هدایت هیدرولیکی ۳۱ که دارای نفوذپذیری پایینی هست، قرار دارد. که سبب کاهش جریان آب به این زون شده و در نتیجه انحلال کاهش یافته است. قطر لوله‌ی ۹۲، ۳۸ سال بعد از آب‌گیری افزایش قابل توجهی نداشته ولی با گذشت ۱۰۰ سال، انحلال در این لوله افزایش یافته و حدود ۷۶ برابر شده است. بزرگ‌شدگی این مجاری از جهت فرار آب باید مورد توجه قرار بگیرد. قطر لوله ۸۱ نیز بعد از گذشت ۱۰۰ سال حدود ۸۰ برابر افزایش یافته است.

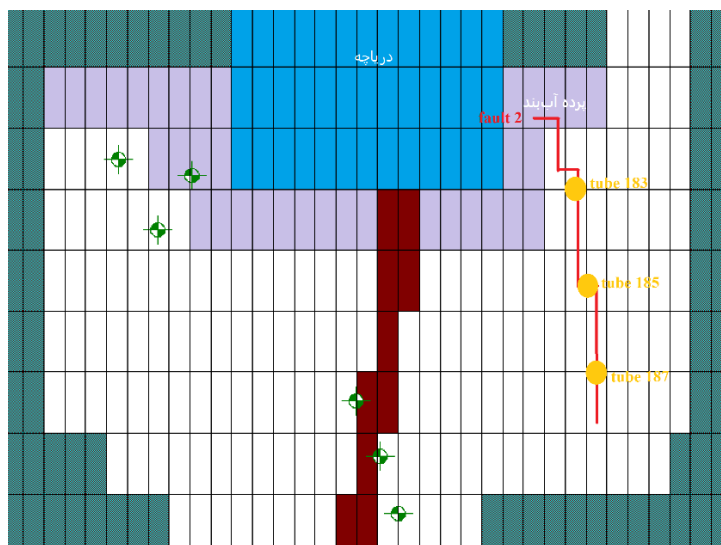


شکل ۴-۴۹ تغییرات قطر لوله‌های ۸۱، ۹۲

۴-۵-۲-۳- گسل ۲

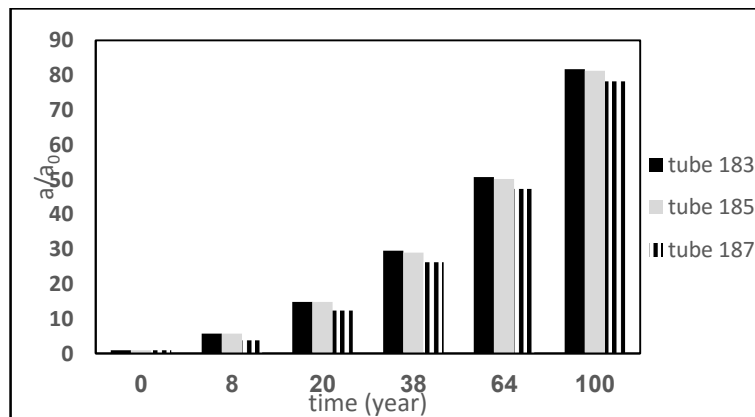
این گسل در تکیه‌گاه چپ سد قرار دارد راست‌گرد می‌باشد و حدود ۵ تا ۷ متر جابه‌جایی دارد و تقریباً از بالادست جناح چپ سد تا پایین دست آن کشیده شده است. با توجه به موقعیت این گسل

در شکل ۴-۵۰ به صورت تصادفی تعدادی لوله برای بررسی تغییرات قطر و انحلال شده‌اند. قسمت ابتدایی یا بالایی گسل در زون هدایت هیدرولیکی با نفوذپذیری پایین قرار گرفته و قسمت انتهایی آن که شامل لوله‌ی ۱۸۷ می‌باشد در منطقه با نفوذپذیری بالا قرار دارد.



شکل ۴-۵۰ موقعیت گسل ۲ و لوله‌های ۱۸۳، ۱۸۵، ۱۸۷

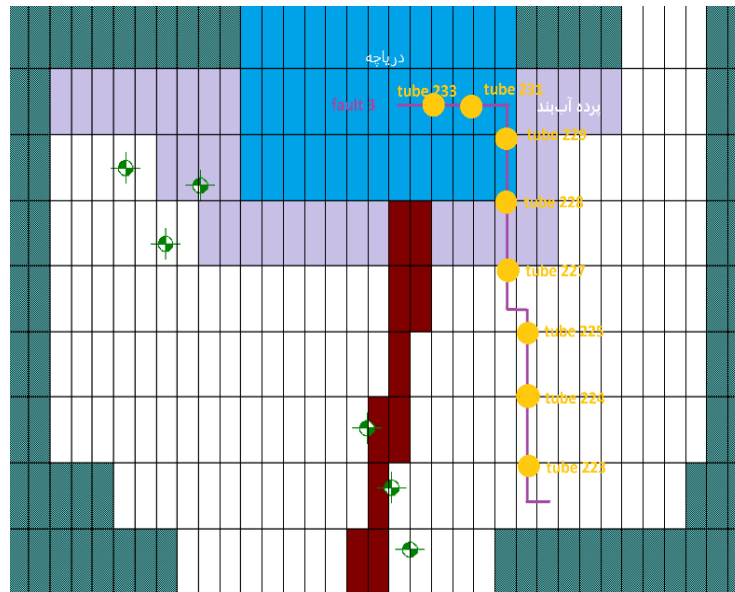
نوع جریان در این لوله‌ها آشفته می‌باشد. با توجه به اینکه لوله‌های ۱۸۳ و ۱۸۵ متاثر از گرادیان‌های هیدرولیکی زیاد اطراف سد هستند، نفوذپذیری کم در این زون‌ها نمی‌تواند مانع انحلال در این قسمت شود. انتهای گسل ۲ که در زون با هدایت هیدرولیکی بالا قرار دارد باعث هدایت جریان به این قسمت شده و در نتیجه افزایش انحلال (۷۸ برابر) در لوله ۱۸۷ شده است و در این قسمت خطر فرار آب در دراز مدت وجود دارد (۴-۵۱).



شکل ۴-۵۱ تغییرات قطر لوله‌های ۱۸۳، ۱۸۵، ۱۸۷

۳-۵-۲-۴- گسل ۳

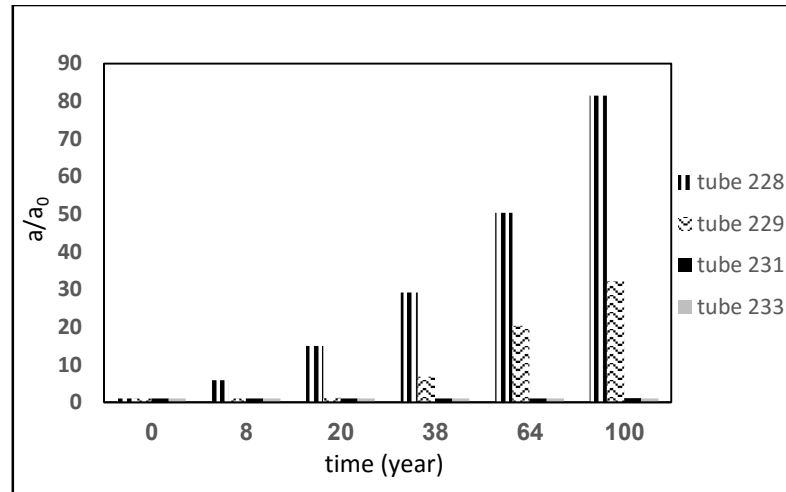
موقعیت این گسل در زیر تکیه‌گاه چپ قرار دارد (شکل ۴-۵۲) و یکی از گسل‌های مهم منطقه می‌باشد. این گسل راست‌گرد است و دارای شیب ۳۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد که حدود ۸ تا ۱۰ متر جابه‌جایی داشته است.



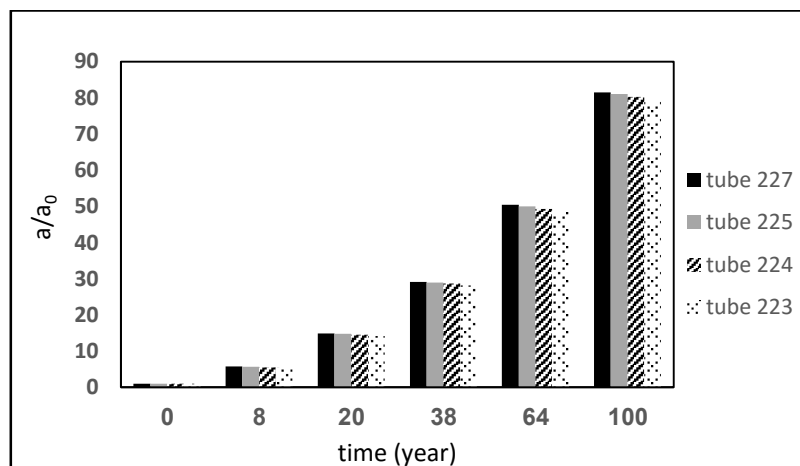
شکل ۴-۵۲ موقعیت گسل ۳ و لوله‌های ۲۳۳، ۲۳۱، ۲۲۹، ۲۲۸، ۲۲۷، ۲۲۵، ۲۲۴، ۲۲۳

با توجه به شکل ۴-۵۲، قسمتی از این گسل در زیر دریاچه سد و قسمتی روی پرده آب‌بند قرار گرفته و تا پایین دست رودخانه امتداد پیدا کرده است. لوله‌های ۲۳۰ تا ۲۳۴ در قسمت دریاچه قرار دارند، تراز آب مخزن ثابت بوده و بعد از آب‌گیری به ۱۰۲۵ متر رسیده است، با توجه به اینکه تراز آب در دریاچه سد ثابت بوده شیب هیدرولیکی تقریباً صفر است و نوع جریان خطی (Laminar) در لوله‌های این قسمت بیانگر نبود جریان در این منطقه است. در نتیجه در این لوله انحلال در حد صفر و یا خیلی کم بوده است. لوله‌ی ۲۲۸ که در حد فاصل بین دریاچه و پرده آب‌بند قرار گرفته است، با توجه به اینکه ارتفاع آب یکباره از ۱۰۲۵ در مخزن به سطح آب زیرزمینی رسیده، باعث ایجاد شیب هیدرولیکی زیادی می‌شود که جریان آشفته را در این لوله ایجاد می‌کند. بیشترین انحلال در این قسمت از گسل مشاهده می‌شود. با ورود حجم زیاد آب به این لوله که دارای جریان آشفته است سبب انحلال این مجاری شده که موجب بزرگ‌شدگی قطر لوله ۲۲۸ حدود ۸۱ برابر بعد ۱۰۰

سال می‌شود. با توجه به شکل ۴-۵۳ انحلال تا قسمت زیر پرده افزایش یافته و هر چه به سمت پایین دست می‌رود انحلال کمتر می‌شود. انحلال در لوله ۲۲۳ که در پایین دست قرار دارد، حدود ۷۹ برابر افزایش یافته است.



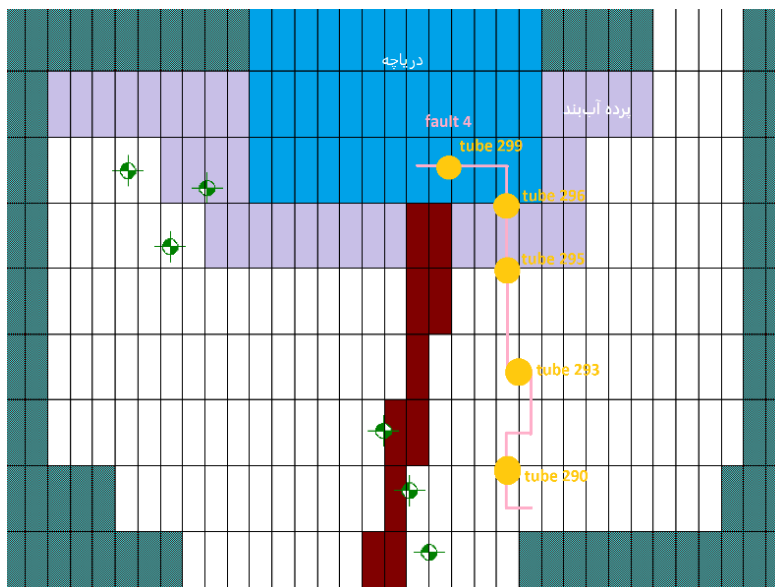
شکل ۴-۵۳ تغییرات قطر لوله‌های ۲۲۸، ۲۲۹، ۲۳۱، ۲۳۳



شکل ۴-۵۴ تغییرات قطر لوله‌های ۲۲۳، ۲۲۴، ۲۲۵، ۲۲۷

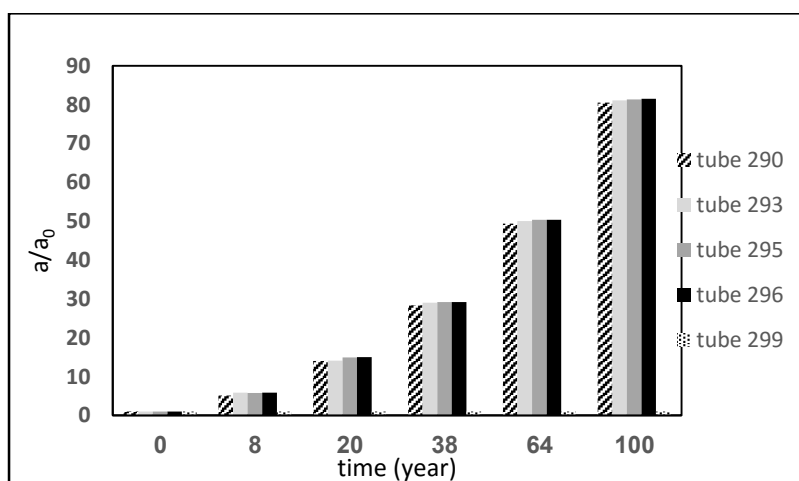
۴-۵-۲-۵-۴ گسل

گسل ۴ از گسل‌های مهم تکیه‌گاه چپ می‌باشد (شکل ۴-۵۵). این گسل راست‌گرد است که دارای شیب ۶۵ تا ۸۰ درجه و جابه‌جایی ۴ تا ۵ متر می‌باشد. انحلال در مجاری این گسل هم بیشتر در مناطق نزدیک به سد دیده می‌شود که شیب هیدرولیکی زیاد است و جریان از نوع آشفته می‌باشد.



شکل ۴-۵۵ موقعیت گسل ۴ و لوله‌های ۲۹۰، ۲۹۳، ۲۹۵، ۲۹۶، ۲۹۹

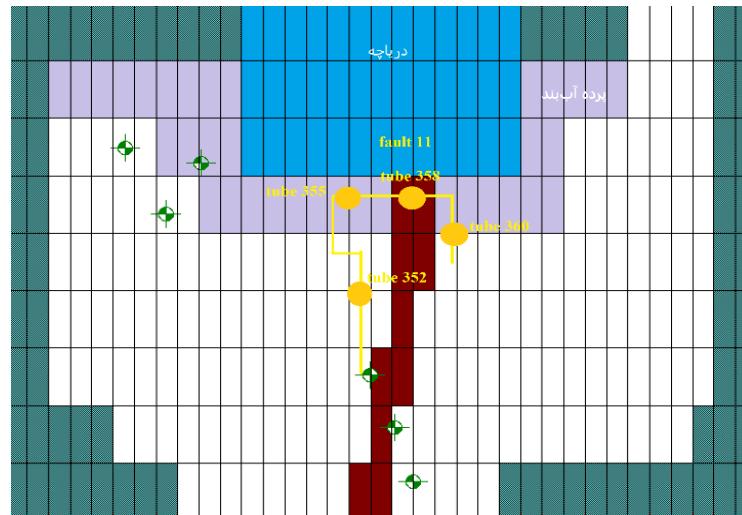
جریان در لوله‌های ۲۹۷ تا ۳۰۰ که در زیر دریاچه قرار دارند، از نوع خطی می‌باشد. زیرا در این منطقه به دلیل ثابت بود ارتفاع آب، جریانی وجود ندارد. بنابراین انحلال در لوله‌های این قسمت ناچیز و در حد صفر است. لوله ۲۹۶ که در حد فاصل سد و پرده آب‌بند قرار دارد، بیشترین توسعه کارست را داشته است. تبادل آب بین محیط ماتریکسی و شبکه مجاری بزرگ، به‌خاطر اختلاف بار آبی بین این دو سیستم است که در مجاری بالادست پرده تزریق و نزدیک به آن مقدار تبادل آب بیشتری مشاهده می‌شود، و در آنها (مجاری بالادست و نزدیک به پرده تزریق) آب از ماتریکس به مجرا انتقال می‌یابد و سبب توسعه کارست می‌شود.



شکل ۴-۵۶ تغییرات قطر لوله‌های ۲۹۰، ۲۹۳، ۲۹۵، ۲۹۶، ۲۹۹

۴-۵-۲-۶- گسل ۱۱

این گسل که در تکیه‌گاه راست قرار دارد ولی تا کمی از تکیه‌گاه چپ نیز امتداد پیدا کرده است (شکل ۴-۵۷)، چپ‌گرد است و دارای شیب ۲۵ تا ۴۰ درجه می‌باشد و جابه‌جایی حدود ۲ تا ۳ متر دارد.

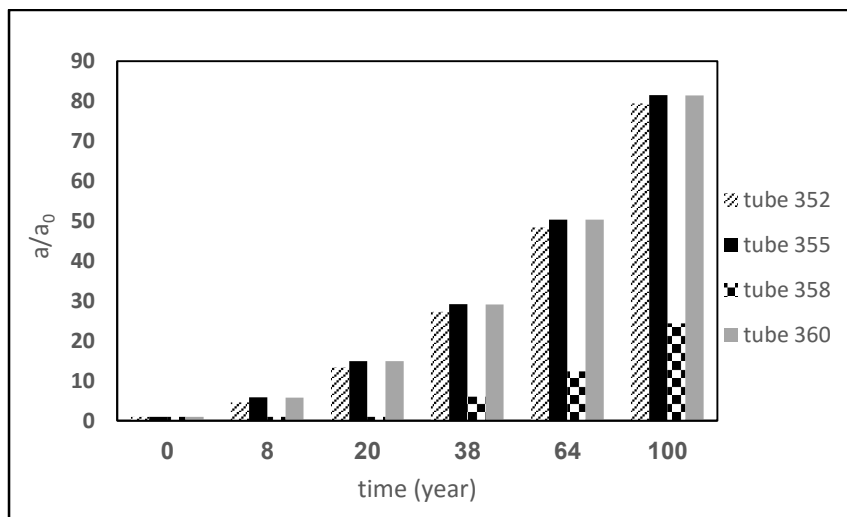


شکل ۴-۵۷ موقعیت گسل ۱۱ و لوله‌های ۳۵۲، ۳۵۵، ۳۵۸، ۳۶۰

همانطور که در شکل ۴-۵۷ مشاهده می‌شود، که رشد لوله‌ها در نزدیکی پرده آب‌بند در بالا دست بیشترین مقدار رشد خود را نشان می‌دهد ولی در پایین دست پرده تزریق لوله‌ها رشد کمتری دارند. بعد از گذشت ۱۰۰ سال قطر مجاری در لوله‌های ۳۵۵ و ۳۶۰ رشد ۸۱ برابری داشته است. لوله ۳۵۲ که در تکیه‌گاه راست قرار دارد حدود ۷۹ برابر افزایش قطر ناشی از انحلال داشته و لوله ۳۵۸ نیز که در بستر رودخانه قرار دارد به دلیل آنکه خط تقسیم رودخانه وجود دارد و یک بخش کم جریان یا بدون جریان شکل می‌گیرد، مقدار انحلال حداقل ممکن می‌باشد (شکل ۴-۵۸). بیشترین توسعه کارست در این گسل در لوله‌های ۳۵۵ و ۳۶۰ می‌گیرد.



شکل ۴-۵۸ خط تقسیم رودخانه

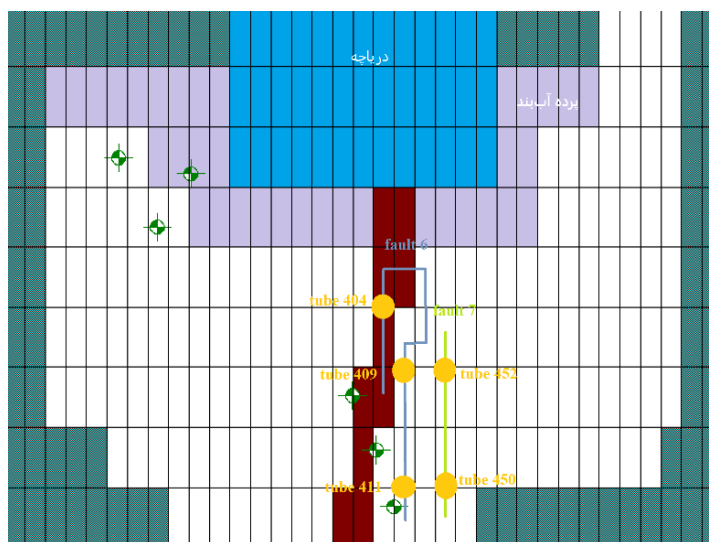


شکل ۴-۵۹ تغییرات قطر لوله‌های ۳۵۲، ۳۵۶

۴-۵-۲-۷- گسل ۶ و ۷

این دو گسل هر دو در تکیه‌گاه چپ سد قرار دارند. جابه‌جایی آن‌ها حدود ۴ تا ۵ متر می‌باشد.

موقعیت قرارگیری آن‌ها را در شکل ۴-۶۰ نشان داده شده است.

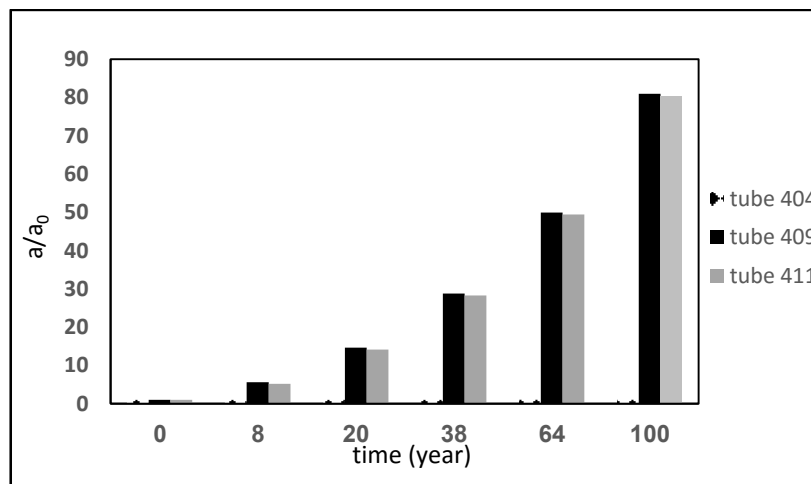


شکل ۴-۶۰ موقعیت گسل‌های ۶ و ۷، لوله‌های ۴۰۴، ۴۰۹، ۴۱۱، ۴۵۰، ۴۵۲

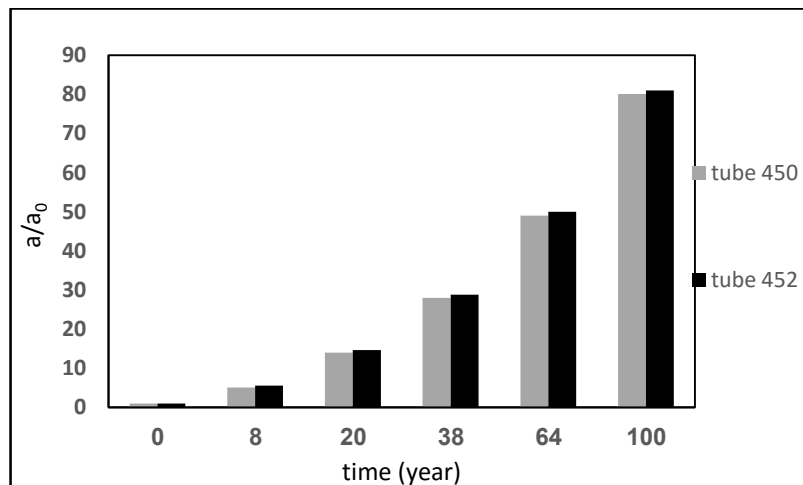
در گسل ۶ لوله‌ی ۴۰۹ بیشترین توسعه کارست را در بین لوله‌های دیگر نشان می‌دهد، که بیشترین نرخ جریان ورودی را نسبت به بقیه دارد. در گسل‌های قبلی مشاهده شد که رشد قطر لوله‌ها در نزدیکی پرده آببند در بالا دست بیشترین مقدار خود را داشته ولی هر چه به سمت پایین دست

پیش می‌رود لوله‌ها نرخ رشد چندانی نداشتند. در گسل ۶ هر چه به سمت انتهایی که در نزدیکی رودخانه قرار دارد پیش می‌رویم، نرخ رشد لوله فرق چندانی نداشته و در لوله ۴۱۱ هم شدت رشد قطر مجاری هم بالا می‌باشد. به طوری که بعد از گذشت ۱۰۰ سال ۸۰ برابر افزایش قطر را نشان می‌دهد. طبق داده‌های حاصل از گمانه‌ها سطح آب زیرزمینی در اطراف رودخانه بالاتر از سطح آب رودخانه است، و در واقع آب زیرزمینی رودخانه را تغذیه می‌کند. با گذشت زمان و افزایش قطر مجاری نزدیک به رودخانه، این مجاری از رودخانه تغذیه کرده و شدت رشد در این لوله‌ها افزایش یافته است. مدل شدت رشد قطر و توسعه کارست بالا را در طول گسل ۶ پیش‌بینی می‌کند.

با توجه به شکل ۴-۶۲، موقعیت لوله ۴۵۲ در گسل ۷ بیشترین نرخ رشد مجرا را داشته است.



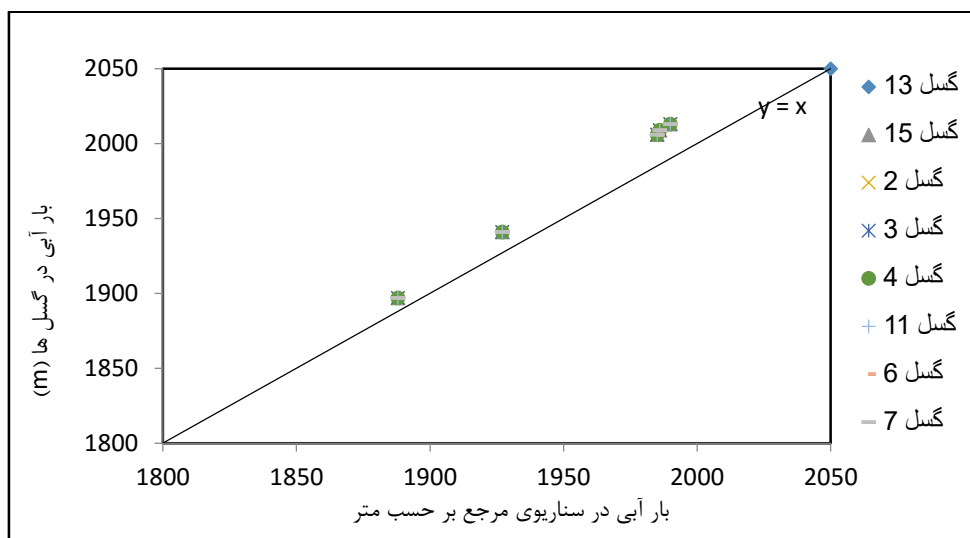
شکل ۴-۶۱ تغییرات انحلال لوله‌های ۴۰۷، ۴۰۹، ۴۱۱ در گسل ۶



شکل ۴-۶۲ تغییرات انحلال لوله‌های ۴۵۰ و ۴۵۲ در گسل ۷

۴-۵-۲-۸- بررسی رفتار پیزومترها در پایین دست سد

با توجه به شکل (۴-۶۳)، شبکه پیزومترها فرار آب را در محدوده مورد مطالعاتی نشان نمی‌دهد و معرف مناسبی نیست. بنابراین برای نمایش فرار آب در سناریوی اول و دوم باید شبکه جدیدی طراحی شود.

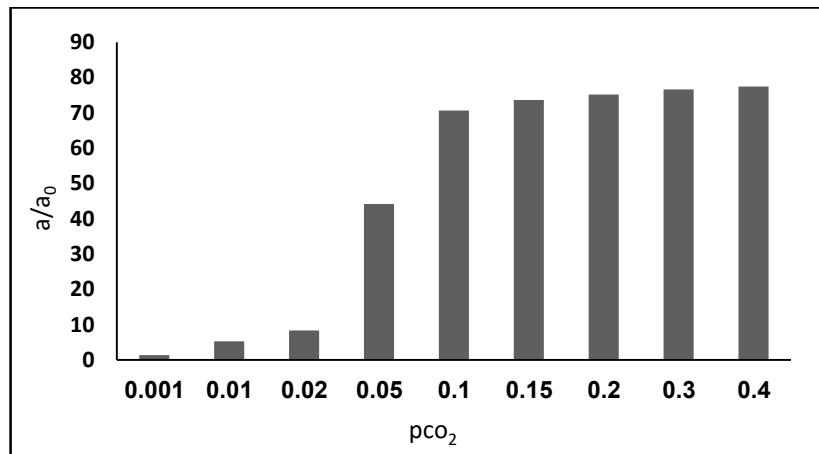


شکل ۴-۶۳ سطح آب پیزومترها در سناریو مرجع و گسل‌ها

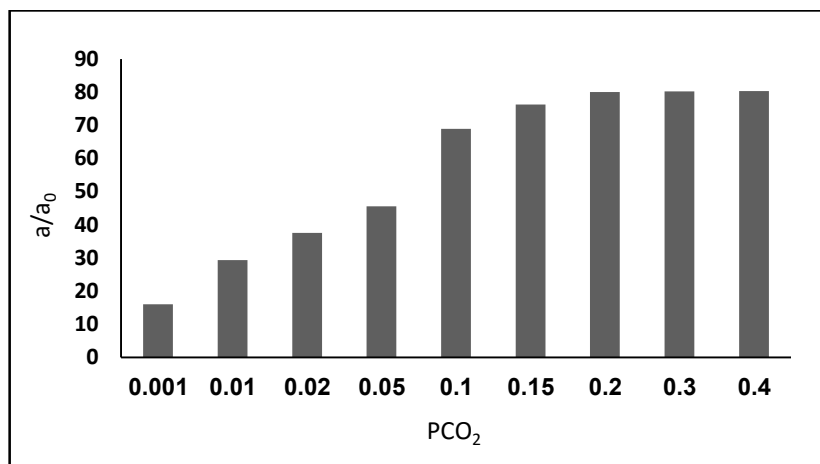
۴-۵-۳- سناریوی سوم: تأثیر PCO_2 بر انحلال‌پذیری مجاری

یکی از مهم‌ترین عوامل در حل شدن سنگ‌های کربناتی حضور CO_2 محلول در آب می‌باشد. که هرچه دی‌اکسید کربن محلول در آب بیشتر باشد خاصیت انحلالی آب بیشتر شده و آب با عبور از مجاری سبب انحلال هر چه بیشتر این مناطق می‌شود. در این سناریو به بررسی تأثیر فشار گاز کربن‌دی‌اکسید بر روی تعدادی از لوله‌ها که بیشترین انحلال را دارند، پرداخته شده است. در این جا با توجه به اینکه میزان فشار گاز کربن‌دی‌اکسید متاثر از دما، حرارت، توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه می‌باشد. تغییرات انحلالی این مجاری در فشار کربن‌دی‌اکسید 0.02 (اتمسفرد)، 0.04 (پوشش گیاهی انبوه)، 0.02 ، 0.03 مورد بررسی قرار گرفت. نرخ انحلال کلسیت تابع زمان و مکان می‌باشد و در طول

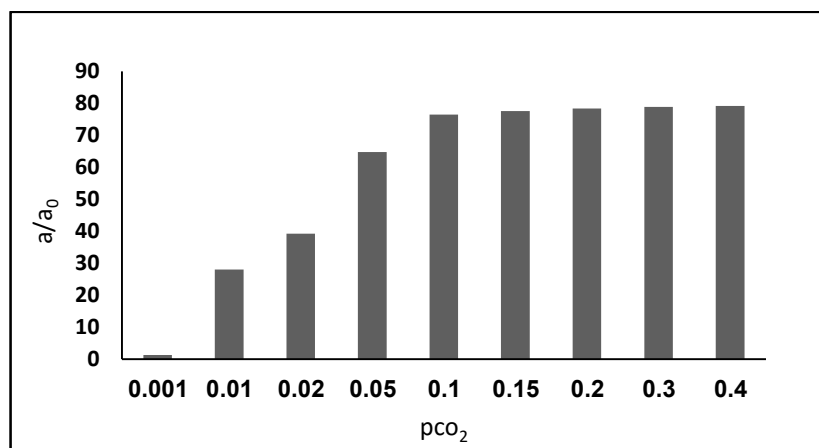
مجارى بزرگ متغير است. در اين سناريو تعدادى از لوله‌ها از هر گسل انتخاب شدند و تاثير فشار کربن‌دى اکسيد بر روى اين لوله‌ها در طول ۱۰۰ سال عمر مفيد سد مورد بررسى قرار گرفت.



شکل ۴-۶۴ تغييرات قطر لوله ۹۱ در گسل ۱۵ با افزايش PCO₂



شکل ۴-۶۵ تغييرات قطر لوله ۲۷۸ از گسل ۳ با افزايش PCO₂



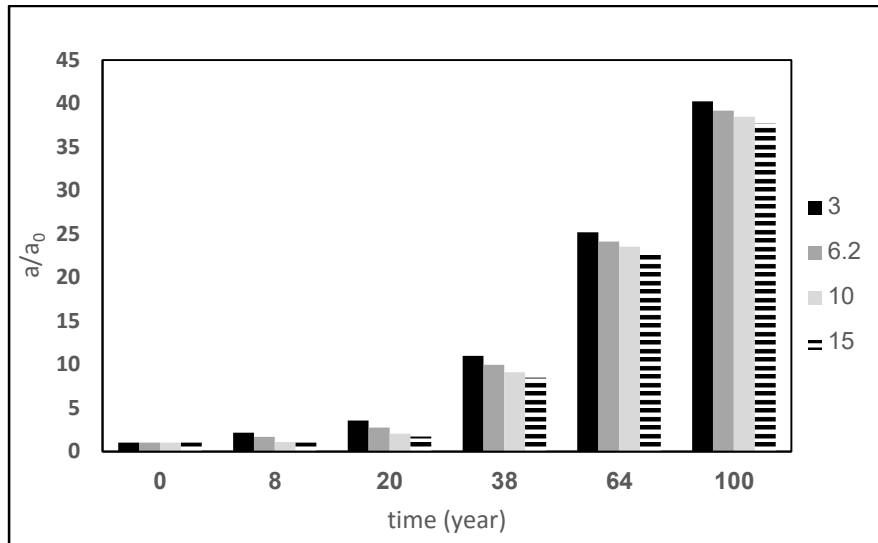
شکل ۴-۶۶ تغييرات قطر لوله ۴۵۱ از گسل ۷ با افزايش PCO₂

همانطور که در شکل‌های (۴-۶۴) تا (۴-۶۶) مشاهده می‌شود، هر چه فشار PCO_2 بیشتر می‌شود، محیط اسیدی‌تر می‌شود و در نتیجه قدرت انحلالی افزایش می‌یابد. در فشار کربن‌دی‌اکسید بالا (۰/۱ تا ۰/۴) این اسیدی شدن پارامتر دوم می‌شود و محیط توان انحلال بیشتر را ندارد بنابراین انحلال در فشار کربن‌دی‌اکسید بالا نزدیک به هم می‌باشد و تغییر زیادی نمی‌کند.

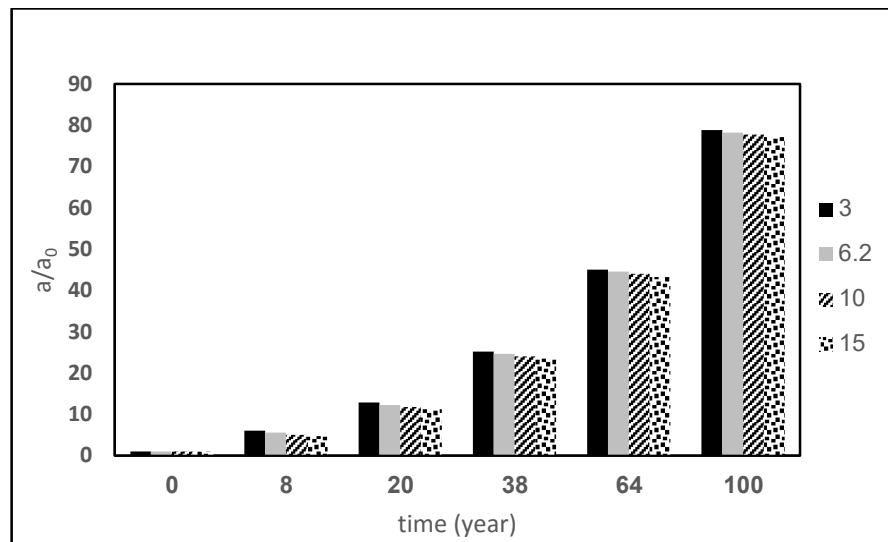
۴-۵-۴- سناریوی چهارم: بررسی نقش پتانسیل آب‌بندی پرده تزریق در میزان توسعه

مجاری

در بخش‌های قبلی به بررسی اثر توسعه مجاری و در نتیجه رفتار آبخوان پرداخته شد. اما در یک آبخوان توسعه مجاری با یک نرخ ثابت در همه نقاط وجود ندارد. معمولاً بعضی مجاری اصلاً توسعه پیدا نمی‌کنند و در حد همان بازشدگی اولیه که به خاطر فعالیت‌های تکتونیکی است باقی می‌مانند، اما بعضی دیگر با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی حاکم از سایر مجاری در بحث انحلال فعال‌تر شده و شروع به توسعه یافتن می‌کنند. با افزایش عمق پرده تزریق میزان نشت به تدریج کاهش می‌یابد و به کمینه خود می‌رسد. بررسی میزان نشت‌ها نشان می‌دهد که وقتی پرده تزریق تا سنگ کف آبخوان رسیده است و با وجود توسعه مجاری، حجم فرار آب کاهش یافته است. در نتیجه در این مطالعه پرده تزریق به سنگ کف آبخوان سازند نفوذناپذیر سد دوخته شده است. در این بخش، به بررسی مکانی مجاری که فاقد توسعه بوده‌اند و مجاری که دارای توسعه زیادی هستند نسبت به محل پرده تزریق پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه تعداد لوله‌ها بسیار زیاد است و از طرفی تعداد سناریوهای مختلف معرفی شده دارای تنوع بوده‌اند، و نفوذپذیری پرده تزریق نیز یکی از عوامل تاثیر گذار در توسعه مجاری در اطراف آن است با سه نفوذپذیری ۳، ۱۰، ۱۵ متر بر روز نیز ارزیابی صورت گرفته است.



شکل ۴-۶۷ تغییرات انحلال لوله ۲۹۰ با میزان آب‌بندی‌های متفاوت پرده تزریق



شکل ۴-۶۸ تغییرات انحلال لوله ۴۵۲ با میزان آب‌بندی‌های متفاوت پرده تزریق

در این سناریو با توجه به شکل (۴-۶۷) و (۴-۶۸) وقتی که نفوذپذیری پرده تزریق کم می‌شود، افزایش قطر مجاری مشاهده می‌گردد، اما با افزایش نفوذپذیری، اندازه قطر مجرا نسبت به حالت قبل که نفوذپذیری کمتری داشته کاهش می‌یابد با توجه به قطر انتخاب شده مکانیسم انتشار، بحرانی‌ترین مکانیسم در این مطالعه انتخاب شده است، بنابراین زمانی که پرده تزریق نفوذپذیری خیلی کمی دارد، آب در پشت پرده جمع شده، و به مرور زمان شروع به انحلال می‌کند که باعث افزایش قطر مجاری می‌شود، اما زمانی که نفوذپذیری پرده زیاد است، آب به راحتی از آن عبور می‌کند و دیگر این

مکانسیم تأثیری بر توسعه مجاری ندارد. در نتیجه هر چه پرده نفوذپذیری کمی داشته باشد، تعداد محدودی مجرا برای انتقال جرم و آب وجود خواهد داشت اما وقتی که نفوذپذیری آن زیاد باشد، مجاری بسیار زیادی در این جابجایی نقش ایفا می‌کنند.

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادها

نشت آب یک مسئله معمول در ساختگاه اغلب سدها است که آب جمع شده، مسیرهای با مقاومت پایین را در میان بدنه، پی و تکیه‌گاه‌های سد دنبال می‌کند. در مواقعی که بعد از ساخت سد نشت اتفاق می‌افتد کنترل آن مشکل و بسیار هزینه‌بر است. روش‌های اساسی و مناسب، مانند حفاری مواد نفوذپذیر پی، استفاده از پتوی نفوذناپذیر در بالادست، اجرای دیوار آب‌بند یا پرده‌ی تزریق برای کنترل میزان نشت استفاده می‌شوند. در تحقیق حاضر به بررسی پتانسیل نشت به دلیل انحلال در تکیه‌گاه‌های سد کارون ۴ با استفاده از روش‌های عددی و همچنین به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شد. در این راستا از داده‌های موجود در طی مطالعات کتابخانه‌ای و مطالعات صحرایی استفاده شد. این بررسی‌ها بیشتر بر ساختارهای زمین‌شناسی و شرایط تکتونیکی معطوف بوده و در این راستا درزه و گسل‌ها در تحلیل نشت و فرار آب بسیار حائز اهمیت بودند.

۵-۱- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی انحلال سنگ‌های کربناته ساختگاه سد کارون ۴ در طول ۱۰۰ سال به صورت زیر ارائه شده است.

۵-۱-۱- انحلال متفاوت مجاری در طول زمان

بررسی شبکه انحلال لوله‌ها نشان می‌دهد که انحلال به طور ناهمگن می‌باشد، به طوری که حتی مجاری که در مرحله شبیه‌سازی و زمان شروع انحلال قطر یکسانی داشته‌اند، در انتهای شبیه‌سازی مقدار انحلال و توسعه کارست متفاوتی را نشان می‌دهند. به این ترتیب که در بعضی مجاری توسعه آن بسیار ناچیز است و در بعضی دیگر شدید است. بررسی روند تغییرات زمان انحلال نشان می‌دهد که با گذر زمان میزان انحلال کلسیم به صورت نمائی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سرعت آب، کاهش زمان تماس، سبب کاهش نسبی قدرت انحلال آب در طول مسیر می‌شود.

۵-۱-۲- توسعه متفاوت لوله‌های عمودی

در بررسی شبکه‌بندی لوله‌ها مشخص شد که به طور عمومی توسعه لوله‌های عمودی بیش از لوله‌های افقی می‌باشد، که این امر می‌تواند به خاطر اثر تداخل شیمیایی (Mixing) ایجاد شده باشد. وقتی دو منبع متفاوت آب در طول لوله‌های افقی به می‌رسند و وارد لوله عمودی می‌شود، این مخلوط ایجاد شده به دلیل خاصیت غیراشباع بودن نسبت به کلسیم دارای قابلیت انحلال بالاتری می‌شود. بنابراین، به همین دلیل است که لوله‌های عمودی دارای انحلال بیشتری نسبت به لوله‌های افقی هستند. در مدل، تقریباً در تمامی لوله‌های عمودی انحلال بیشتری نسبت به لوله‌های افقی ایجاد شده است.

۵-۱-۳- موقعیت کمترین و بیشترین انحلال مجاری

بررسی‌ها نشان داد که چون در مرحله آبگیری، مجاری دارای قطر اندکی بوده و از طرفی آب با قدرت انحلال بالا در تماس با درزه‌ها و شکستگی‌ها می‌باشد، در درزه‌هایی که ارتباط هیدرولیکی به طور مناسب با مخزن برقرار شده، انحلال با حداکثر سرعت رخ می‌دهد و بر این اساس ۶۸٪ درصد از لوله‌ها حداکثر افزایش را به طور همزمان نشان می‌دهند. در بررسی موقعیت لوله‌ها و میزان انحلال مشخص گردید که لوله‌های داخل مخزن سد کمترین میزان انحلال را نشان می‌دهند، علت این مسئله به خاطر سکون آب در پشت پرده تزریق و نبود جریان آب به دلیل شیب هیدرولیکی پایین می‌باشد.

۵-۱-۴- بررسی بیلان حجمی و جرمی در طول ۱۰۰ سال

بررسی بیلان حجمی نشان می‌دهد که در یک بازه ۱۰۰ ساله در حدود ۲۰ میلیارد متر مکعب آب از سد فرار نموده و به آبخوان وارد شده است. به این ترتیب که حجم فرار آب از سد به طور متوسط سالانه حدود ۲۰۰ میلیون مترمکعب یا معادل ۹٪ حجم مخزن سد می‌باشد. در سال‌های انتهایی به دلیل انحلال مجاری، فرار آب افزایش یافته است.

همچنین بررسی بیلان جرمی نشان می‌دهد که در مجموع به خاطر انحلال در مجاری و توسعه آن‌ها در طول ۱۰۰ سال ۲/۷۱ میلیون مول معادل ۱۰۸۶۱۱/۳۸ میلیون کیلوگرم کلسیم از محیط خارج شده است که نشان‌دهنده بحث انحلال ذکر شده می‌باشد.

۵-۱-۵- رفتار انحلالی گسل‌های ۲، ۳، ۶، ۱۱

بررسی مقدار انحلال در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که گسل F₆ بیشترین توسعه کارستی را نشان می‌دهد که تقریباً سرتاسر گسل را در بر می‌گیرد. علت آن به خاطر آن است که مجل گسل در مجاورت رودخانه قرار دارد و تمرکز جریان آب باعث انحلال سرتاسری شده است.

در بررسی گسل F₃ مشخص شد که در نزدیکی پرده تزریق و در بالا دست آن، میزان انحلال کم بوده است اما در محدوده پرده تزریق میزان انحلال به حداکثر مقدار رسیده است که این امر متاثر از گرادبان هیدرولیکی شدید در این قسمت بوده است، به طوری که سرعت جریان بسیار زیاد شده و قدرت انحلال بالا بوده است. همچنین مشخص گردید که به سمت پایین دست پرده قدرت انحلال با شیب کمی تقلیل می‌یابد. رفتار گسل‌های F₂ و F₃ در انحلال مشابه می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد گسل‌های F₆ و F₁₁ که در بستر رودخانه به دلیل آنکه خط تقسیم وجود دارد و یک بخش کم جریان یا بدون جریان شکل می‌گیرد، میزان انحلال حداقل ممکن می‌باشد.

۵-۱-۶- بررسی تغییرات PCO_2

بررسی تغییرات فشار دی‌اکسیدکربن نشان می‌دهد که در فشارهای پایین، افزایش PCO_2 باعث افزایش انحلال به صورت چند برابری می‌شود. اما در فشارهای بالا و با فرض حضور یک استخر آب غنی از دی‌اکسیدکربن تغییرات قطر زیاد نمی‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که فشار دی‌اکسیدکربن در غلظت‌های پایین نقش اساسی را ایفا می‌نماید ولی در فشارهای بالا آن نقش تصاعدی را از دست می‌دهد و عامل اصلی انحلال نمی‌باشد.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به مطالعه انجام شده در خصوص مدل‌سازی سد کارون ۴، پیشنهادهایی جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر ارائه می‌شود:

- با توجه به اینکه شبکه پیزومتری موجود در سد معرف خوبی برای نمایش فرار آب نمی‌باشد، پیشنهاد می‌شود شبکه پیزومتری جدیدی در محدوده سد طراحی شود.

- با توجه به اینکه آنالیز حساسیت برای داده‌های هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در مدل انجام شد، و مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی بسیار حساس می‌باشد، پیشنهاد می‌شود در برداشت داده‌های لوژان دقت بیشتری شود.

- با توجه به اینکه بحرانی‌ترین پارامتر، بازشدگی یا همان قطر اولیه مجراها است، پیشنهاد می‌شود که مدل‌سازی در گستره‌ای از قطرهای متفاوت اجرا شود.

منابع مورد استفاده

- ۱- آقائباتی، علی، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- ۲- امیری، هاله، ۱۳۸۶، شبیه‌سازی جریان آب در لایه آبدار کارستی با استفاده از Double continuum pipe networks. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
- ۳- باقری ششده، ر.، ۱۳۸۶. پتانسیل فرار آب در ساختگاه سد سیمره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز. بخش علوم زمین. ۱۴۶ص.
- ۴- رئیسی، ع.، ۱۳۸۹. «عوامل مؤثر بر بهینه‌سازی سدها»، روزنامه خراسان، شماره ۱۷۷۶۹.
- ۵- راه‌انجام، م.، ۱۳۸۸، مدل‌کردن پتانسیل فرار آب در آینده‌ی سد تنگ‌دوک به خاطر انحلال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، علوم زمین.
- ۶- سلطانی، ف.، ۱۳۹۳، مطالعه پتانسیل و امکان افزایش فرار آب از تکیه‌گاه سد کارستی کارون ۴، دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین
- ۷- مه‌اب قدس. ۱۳۹۱. «بررسی عملکرد پرده‌ی آب‌بند سد کارون ۴»، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.
- ۸- معاونت امور آب وزارت، ۱۳۷۷، نیرو سدسازی معاصر ایران، کمیته سدهای بزرگ ایران.
- ۹- وزارت نیرو، نشریه شماره ۵۶۱-الف. ۱۳۹۱. «راهنمای کاربرد ردیاب‌ها در بررسی و نشت فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد».
- 10- Annable, W. K., and E. A. Sudicky, (1988) Simulation of karst genesis: Hydrodynamic and geochemical rock-water interactions in partially.
- 11- Ashjari, J., Raeisi, E., (2006) Influences of Anticlinal Structure on Regional Flow, Zagros, Iran, Journal of Cave and Karst Studies, v. 68, no. 3, p. 118–129.

12- Atkinson, T. C., (1977) Diffuse flow and conduit flow in a limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset, *J. Hydrol.*, 19, 323– 349.

13- Barenblatt, G. K., I. P. Zheltov, and N. Kochina (1960) Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, *Prikl. Mat. Mekh.*, 24(5), 852– 864.

14- Bakalowicz, M. (2005), Karst groundwater: a challenge for new resources, *Hydrogeology Journal*, 13 (1), 148-160.

15- Bauer, S., S. Birk, R. Liedl, and M. Suter, (1999) Solutionally enhanced leakage rate of dams in karst regions, in karst modeling, *Karst Waters Inst.Spec. Publi.*, vol. 5, edited by A. N. Palmer, M. V. Palmer, and I. D. Sasowsky, pp. 158-162. Karst Water Inst., Charles town, W. Va.

16- Bauer, S. (2001), Simulation of the genesis of karst aquifers in carbonate rocks, Dissertation, Universität Tübingen, Tübingen (Germany).

17- Bauer, S., Liedl, R., (2003) Modeling of karst aquifer genesis: influence of exchange flow, *Water Resour Res.*, VOL 39, NO 10, 1285, SBH.

18- Bear, J. (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company, New York, 764 p.

19- Berner, R. A., and J. W. Morse, (1974) Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water, IV, Theory of calcite dissolution, *Am. J. Sci.*, 274, 108-134.

20- Birk, S., R. Liedl, M. Sauter, and G. Teustch, (2003) Hydraulic boundary conditions as a controlling factor in karst genesis: A numerical modeling study on artesian conduit development in gypsum, *Water Resour: Res.*, 39(1),1004, doi: 10.1029/2002WR001308.

21- Birk, S., R. Liedl, and M. Sauter, (2004) Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany), *Journal of Hydrology*, 286 (1-4), 179- 193.

22- Birk, S., T. Geyer, R. Liedl, and M. Sauter (2005), Process-based interpretation of tracer tests in carbonate aquifers, *Ground Water*, 43 (3), 381-388.

23- Bogli, A.,(1964a) Mischungskorrosion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. *Erdkunde* 18/2, 83-92.

- 24- Buhmann, D., Dreybrodt, W., (1985) The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas; closed system.
- 25- Clemens, T., Huckinghaus, D., Sauter, M., Liedl, R., and Teusch, G., (1996) A combined continuum and discrete network reactive transport model for simulation of karst development, in Kovar, K. and van der Heijde, P., eds., calibration and reliability in groundwater modeling: IAHS Publication, v.237, p.306-318.
- 26- Clemens, T., Huckinghaus, M., Liedl, R., Sauter, D., (1998) Simulation of the development of karst aquifers: role of the epikarst, *Int Journ Earth Sciences* (1999) 88 :157–162.
- 27- Clemens, T., D. Hu'ckinghaus, M. Sauter, R. Liedl, and G. Teutsch, (1998) mulation of the evolution of maze caves, *Bull. Hydroge'ol.*, 16, 201 – 209.
- 28- Corbel, J., 1959, Vitesse de L'erosion. *Zeitschrift fu'r Geomorphologie*, pp. 31-28.
- 29- Courbon, P. & Chabert, C. (1986) *Atlas des Grandes Cavités Mondiales (Atlas of the world's big caves)*. Union Internationale de Spéléologie, Fédération Française de Spéléologie.
- 30- Dörfliger, N., P. Y. Jeannin, and F. Zwahlen (1999), Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multiattribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environmental geology*, 39 (2), 165-176.
- 31- Dreybrodt, W., (1988) *Processes in karst systems physics, chemistry and geology*. Springer Series in Physical Environments, vol. 4. Springer, Berlin. 188 pp.
- 32- Dreybrodt, W., (1990) The role of dissolution kinetics in the development of karstification in limestone: a model simulation of karst evolution. *J. Geol.* 98, 639– 655.
- 33- Dreybrodt, W., 1992. Dynamics of karstification: a model applied to hydraulic structures in karst terranes. *Appl. Hydrogeol.* 1, 20–32.
- 34- Dreybrodt, W., (1996) Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models. *Water Resour. Res.* 32, 2923–2935.
- 35- Dreybrodt, W., Eisenlohr, L., (2000) Limestone dissolution rates in karst environments. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Nat. Speleol. Soc., USA, pp. 136– 148.
- 36- Eisenlohr L, Meteva K, Gabrovsek F, Dreybrodt W (1999) The inhibiting action of intrinsic impurities in natural calcium carbonate minerals to their dissolution inetics in aqueous H₂O–CO₂ solutions. *Geochim Cosmochim Acta* 63:989–1002.
- 37- Ford, D. C. & Ewers, R. O. (1978) The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Can. J. Earth Sci.* IS, 1783-1798.

- 38- Ford, D.C., Williams, P.W., (1989) Karst Geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman, London.
- 39- Ford, D.C., Williams, P.W., (2007) Karst Geomorphology and Hydrology. WILEY, London.
- 40- Gabrovšček, F., and W. Dreybrodt, A model of the early evolution of karst aquifers in limestone in the dimensions of length and depth, *J. Hydrol.*, 240, 206–224, 2001.
- 41- Geyer, T. (2008), Process-based characterisation of flow and transport in karst aquifers at catchment scale, Dissertation, Georg-August-Universität, Göttingen (Germany).
- 42- Gunn, J. (1986), A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers, in *Karst Water Resources: IAHS Publication 161. Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985*, edited by G. Günay, and A. I. Johnson, pp. 587-596.
- 43- Hanna, R. B. and Rajaram, H.: (1998) Influence of aperture variability on dissolutional growth of fissures in karst formations, *Water Resour. Res.*, 34, 2843–2853.
- 44- Hiller, T., G. Kaufmann, and D. Romanov (2011), Karstification beneath dam-sites: From conceptual models to realistic scenarios, *Journal of Hydrology*, 398 (3-4), 202-211.
- 45- Horlacher, H.-B., and H.-J. Lu²decke, (1992) Stro²mungsberechnung fu²r Rohrsysteme, Expert Verlag, Ehningen b. Bo²blingen, Germany.
- 46- Hornberger, G. M., Raffensperger, J. P., Wiberg, P. L., & Eshleman, K. N. (1998). *Elements of physical hydrology*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- 47- Huntoon, P. W. (1995), Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers?, in *Groundwater models for resources analysis and management*, edited by A. I. El-Kadi, pp. 339-358, CRC Lewis Publ., Boca Raton, Florida (USA).
- 48- Groves, C. G., and A. D. Howard, (1994a) Minimum hydrochemical conditions allowing limestone cave development, *Water Resour. Res.*, 30(3), 607–615.
- 49- Howard AD, Groves CG (1995) Early development of karst systems. 2. Turbulent flow. *Water Resour Res* 31 : 19–26.
- 50- Hückinghaus, D. (1998), Simulation der Aquifergenese und des Wärmetransports in Karstaquiferen, Dissertation, Universität Tübingen, Tübingen (Germany).
- 51- James, A.N., (1992) Soluble materials in civil engineering. Ellis Horwood Series in Civil Engineering. Ellis Horwood, Chichester, England. 434 pp.

- 52- Jerome Perrin, (2003) A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers, Phd thesis, University of Neuchatel.
- 53- Kaufmann, G., and J. Braun, (1999) Karst aquifer evolution in fractured rocks, *Water Resour. Res.*, 35(11), 3023– 3238.
- 54- Kaufmann, G., and J. Braun, (2000) Karst aquifer evolution in fractured, porous rocks, *Water Resour. Res.*, 36(6), 1381–139.
- 55- Kaufmann, G, (2016) Modeling karst aquifer evolution in fractured, porous rocks, Institute of Geological Sciences, Geophysics Section, Freie Universita`t Berlin, Malteserstr. , 74-100 Haus D, 12249 Berlin, Germany.
- 56- Katz, B., W. McBride, A. Hunt, C. Crandall, P. Metz, S. Eberts, and M. Berndt (2009), Vulnerability of a public supply well in a karstic aquifer to contamination, *Ground Water*, 47 (3), 438-452.
- 57- Kaye, C. A., The effect of solvent motion on limestone solution, *J. Geol.*, 65, 35–46, 1957.
- 56- Kiraly, L. (1975), Rapport sur l'état actuel des connaissances dans les domaines des caractères physiques des roches karstiques., in *Hydrogeology of karstic terrains : with a multilingual glossary of specific terms*, International Union of Geological Sciences / B, vol.3, edited by A. Burger, and L. Dubertret, pp. 53-67, International Association of Hydrogeologists, Paris (France).
- 58- Kiraly, L. (2002), Karstification and groundwater flow, in *Evolution of Karst. From prekarst to cessation*, edited by F. Gabrovšek, Inštitut za Raziskovanje Krasa. Postojna (Slovenia).
- 59- Kovacs, M. Attila, (2003) Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers : a hydrodynamics modeling approach, Phd thesis, University of Neuchatel.
- 60- Lehr, J. H., and J. K. Lehr (2000), *Standard handbook of environmental science, health, and technology*, 1200 pp., McGraw-Hill, New York, NY (USA).
- 61- Maréchal, J. C., B. Ladouche, N. Dörfliger, and P. Lachassagne (2008), Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system, *Water Resources Research*, 44, W05401, doi:10.1029/2007WR006288.
- 62- Mandel, S. (1966) A conceptual model of karstic erosion by ground water. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 11(1), 5-7.
- 63- Marinos, Paul G., (2001) Tunnelling and mining in karstic terrane; an engineering challenge, *Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hydrology*, Beck & Herring(eds), Balkema publ.

- 64- mohrlock, U., & G. Teutsch, (1977 /1988), ' Double Continuum Porous Equivalent (DCPE) Versus Discrete modelling in karst terranes.' karst waters & Environmental impacts, Gunay & johnson (eds).
- 65- Milanovic', P.T., (2000) Geological Engineering in Karst. Zebra Publishing, Belgrade, Yugoslavia.
- 66- Palmer, A. (1991). Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, 103(1), 1-21.
- 67- Palmer, A.N., (1988) Solutional enlargement of openings in the vicinity of hydraulic structures in karst regions. 2nd Conference on Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions. Assoc. of Groundwater Scientists and Engineers Proceedings, USA, pp.3-15.
- 68- Plummer, L., & Wigley, T. (1976). Dissolution of calcite in CO₂ saturated solutions at 25 degrees C and 1 Atmosphere total pressure. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*,40(2), 191-202.
- 69-Plummer, L., Wigley, T., & Parkhurst, D. (1978). Kinetics of calcite dissolution in CO₂ water systems at 5 degrees C to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 ATM CO₂. *American Journal of Science*, 278(2), 179-216.
- 70- Plummer, L. N. & Busenberg, E. (1982) The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 1011-1040.
- 71- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky.S. A. & Vetterling, W. T. (1986) *Numerical Recipes*. Cambridge Univ. Press, New York.
- 72- Quinlan, J.F., and Ewers, R.O., (1985) Groundwater flow in limestone terranes: Strategy rationale and procedure for reliable and efficient monitoring of groundwater quality in karst areas:5th national symposium and Exp. on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring, Columbus, p.197-243.
- 73- Raeisi, E., and Kowsar, N., (1997) Development of Shahpour Cave, southern Iran: *Cave and Karst Science*, v. 24, no. 1, p. 27–34.
- 74-Romanov D, Gabrovsek F, Dreybrodt W.,(2003) Dam sites in soluble rock: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Eng Geol*70(12):17–35.
- 75- Romanov D., (2003) Evolution of karst aquifers in natural and man made environments: a modeling approach, Bremen.

76- Romanov D, Gabrovsek F, Dreybrodt W., (2007) Leakage below dam sites in limestone terrains by enhanced karstification: a modeling approach. *Environ Geol* (2007) 51: 775-779, DOI 10.1007/s00254-006-0394-y.

77- Sauter, M., (1992) Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst quifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany): *Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten, ser. C, v. 13, p. 1-150.*

78- Sauter, M., and R. Liedl, (2000) Modeling karst aquifer genesis using a coupled continuum-pipe flow model, in *Speleogenesis—Evolution of Karst Aquifers*, edited by A. B. Klimchouk et al., pp. 212– 219, *Natl. Speleol. Soc.*, Huntsville, Ala.

79- Shoemaker, W. B., E. L. Kuniatsky, S. Birk, S. Bauer, and E. D. Swain (2008 b), Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005, U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A24, 50 pp, Reston, Virginia (USA).

80- Reddy, M. M. & Wang, K. K. (1980) Crystallization of calcium carbonate in the presence of metal ions. *J. Crystal Growth* 50, 470-480.

81- Weyl, P. K., (1958) The solution kinetics of calcite, *J. Geol.*, 66, 163– 176,.

82- White, W.B., (1999) Conceptual models for karstic aquifers, in *karst modeling, Karst Waters Inst. Spec. Publ.*, vol.5, edited by A. N. Palmer, M. V. Palmer, and I. D. Sasowsky, pp. 11-16, *Karst Waters Inst.*, Charles Town, W. Va.

83- White, W.B., (1988) *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains.* Oxford Univ. Press, New York.

84- White, W.B., (1977) Role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers, *Mem. Int. Assoc. Hydrogeol.*, 12, 503-517.

85- White, W. B. (2002), *Karst hydrology: recent developments and open questions*, *Engineering Geology*, 65, 85-105.

86- Worthington, S. R. H., D. C. Ford, and P. A. Beddows, (2000) Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution, in *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*, edited by A. B. Klimchouk et al., pp. 463-472, *Natl. Speleologic Soc.*, Huntsville, Ala.

Abstract

One of the most important issues when constructing and operating dams is the problem of water leakage from the supports and their supports, which are commonly used to prevent or reduce the injection curtain. Because calcareous layers contain relatively high solubility, it is possible that the previous or residual duct injection may develop over time. In dams built in karstic areas due to the presence of two conduit and matrix systems, the mechanism of groundwater movement and leakage is complex. Karun 4 Dam is built on Karun River in a karstic range. First, hydraulic parameters of aquifer matrix environment were determined in MODFLOW software. For this purpose, groundwater level data before and after dam construction, drilling logs, injection curtain results, aquifer geometry, and other information have been used to simulate groundwater flow. CAVE dual solubility porosity software was used to model. The model used is dual finite element porosity, which simulates the matrix flow based on the Darcy relation and the flow in the conduit environment based on the turbulent flow relationships. Calibration and validation taking into account the level of boreholes in steady state, unstable and during dam construction, carried out in the next step taking into account the hydrological conditions prevailing in the area and applying the conditions existing at the dam site for a period of time. 100 years of aquifer behavior was evaluated. Applying the existing and proposed conditions at the site of permeability barrier of the curtain has a great impact on the sealing and development of ducts. The duct development in aquifer is non-uniform and the ducts near the injection curtain are most developed, as well as the possibility of water escaping from the dam in future Karun 4 dam due to duct dissolution.

Keywords: Karst, Water Leakage, Model, CAVE, MODFLOW, Karun 4 Dam



Shahrood University of
Technology

Faculty of Earth Sciences
M.Sc. Thesis in hydrogeology

**Simulation of the dissolution of carbonate rocks in Karoon 4 Dam site
by using dual porosity and dissolution model**

By:

Shadi hatamzadeh

Supervisor:

Dr. Gholamhossein Karami

Dr. Javad Ashjari

June 2019