



## بررسی قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آببند سد سیمره در استان ایلام

همایون مقیمی<sup>۱\*</sup>، فرتاش راوش<sup>۲</sup>، محمد کشاورز بخشایش<sup>۳</sup>

۱- دکترای هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ایران

۲- کارشناس ارشد آب زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ایران

۳- دکترای زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ایران

\* نویسنده مسئول: [homayounmoghimi@pnu.ac.ir](mailto:homayounmoghimi@pnu.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

### چکیده

بررسی قابلیت نتایج آزمون فشار آب (لوژن) به منظور ارزیابی و محاسبه میزان نشت از پرده آببند سد سیمره، هدف اصلی مقاله حاضر است. این سد در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دره شهر در استان ایلام احداث شده است. وجود سنگ‌های کربناتی و تخییری در محدوده ساختگاه سد، اجرای تمهیدات مناسب و ارزیابی خطر فرار آب در این پروژه را ضروری ساخته است. بدین منظور برآورد هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری) سنگ‌های ساختگاه با استفاده از آزمون فشار آب موضوع تحقیق این مطالعه قرار گرفته است. این آزمایش‌ها در مقاطع گمانه‌های اکتشافی قبل از اجرای پرده آببند و گمانه‌های کنترلی بعد از اجرای پرده آببند، به انجام رسیده و مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی برای هر گالری تزریق محاسبه گردیده است. با مشخص شدن هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی، مقدار نشت از پرده آببند، در دو بعد محاسبه گردیده است که بیانگر میزان نشت قابل توجه از پرده آببند است. مقدار نشت محاسبه شده در آزمایش‌ها با دبی گمانه‌های زهکشی مقایسه و مشخص گردید که این دو مقدار تا حد زیادی با هم انطباق دارند (حدود ۹۵ درصد). از این رو مشخص گردید که با استفاده از نتایج آزمون فشار آب، می‌توان نفوذپذیری ذاتی واحدهای سنگی ساختگاه را با دقت مناسب اندازه‌گیری نمود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که رابطه تعریف شده جهت تبدیل عدد لوژن به هدایت هیدرولیکی، رابطه‌ای مناسب برای سنگ‌های مشابه در زاگرس چین‌خورده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون فشار آب، نفوذپذیری ذاتی، هدایت هیدرولیکی، سد سیمره، لوژن.

### مقدمه

گمانه‌های با قطرهای کوچک از ویژگی‌های دیگر این آزمون است (پالمر و همکاران، ۲۰۱۵). این روش به مرور زمان، توسط فن‌آوری و تفسیر و ارزیابی داده‌ها تکمیل شده و پیشرفت‌های قابل توجهی در درک رفتار نفوذپذیری توده سنگ در پروژه‌های مختلف حاصل گردیده است (اورت، ۱۹۸۵). هدایت هیدرولیکی در سنگ‌های درز و شکافدار به خصوصیات هندسی و درجه هوازدگی مسیرهای جریان وابسته است (سام و همکاران، ۲۰۰۷). قریشی و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس نتایج ۳۶۷ آزمون لوژن و شاخص کیفیت سنگ ( $RQD$ ) در ۳۳ گمانه، نمودارهای نفوذپذیری ( $k$ ) به  $RQD$  نسبت به عمق را ترسیم

از زمانی که موریس لوژن زمین‌شناس سوئیسی در سال ۱۹۳۳ آزمون فشار آب را ابداع و رابطه‌ای برای آن تعریف کرد، تا به امروز این آزمون به‌عنوان بهترین روش ارزیابی وضعیت هیدرولیکی یا نفوذپذیری یک مقطع شناخته می‌شود. از مزایای اصلی این آزمون، سادگی در اجرا، اندازه‌گیری آسان پارامترهای موردنیاز، عدم وجود محاسبات پیچیده و سادگی تفسیر آن است. علاوه بر آن، نتایج به دست آمده بیانگر شدت نفوذپذیری در مقیاس لوژن و رفتار هیدرولیکی توده سنگ موجود در برابر جریان آب است (کربلا و همکاران، ۱۳۸۸). قابلیت اجرا در

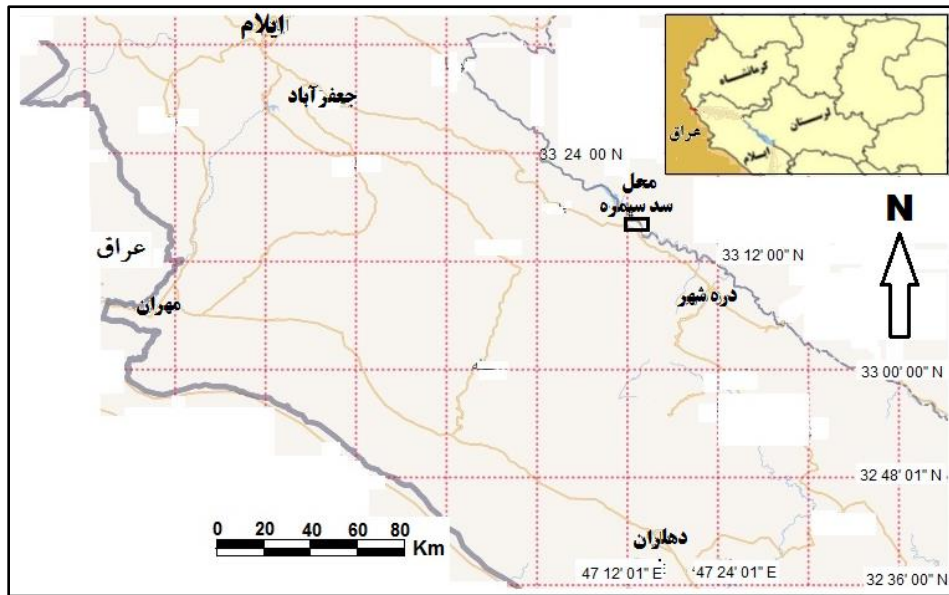
و نفوذپذیری قسمت‌های مختلف تکیه‌گاه‌ها و پی سد مشخص و در نهایت نفوذپذیری محدوده پی و تکیه‌گاه‌های سد داریان بر اساس هر دو روش پهنه‌بندی شده و نتایج حاصل از پهنه‌بندی‌ها با گسلش‌ها و لایه‌های زمین‌شناسی تفسیر کردند. بر اساس نتایج و تجربیات واقعی نشت در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که میزان واقعی نفوذپذیری معمولاً بسیار بیشتر از آزمایش محلی لوژن است. رضی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از نتایج آزمون لوژن در ۸ گمانه در سد سیمره، مقدار هدایت هیدرولیکی مقاطع آزمون را با روابط مختلف محاسبه و نتیجه گرفتند که مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با روابط بارتون-کوادروس و فرانسون با مقدار لوژن دارای ضریب همبستگی بالای است. سلگی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نرم‌افزار *SEEP/W* تراوش در حالت مخزن پر (سطح آب در تراز نرمال)،  $(m.a.s.l.)$  ۷۲۰ متر در سد سیمره را محاسبه کردند. با استفاده از این نرم‌افزار مقدار نشت بدون پرده آب‌بند و با پرده آب‌بند را به ترتیب معادل  $۱/۵۵$  و  $۰/۲۸$  متر مکعب بر ثانیه برآورد کردند و همچنین با استفاده از معادله قانون توان سوم مقادیر نشت را حدود  $۱۰/۵$  مترمکعب بر ثانیه برآورد کرده‌اند. نتیجه به دست آمده در این طرح که با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده که عدد لوژن شاخص مناسبی برای برآورد میزان نفوذپذیری توده‌های سنگی کارستی با نفوذپذیری بالا نیست و بهتر است از روش‌هایی مانند ردیابی یا آزمون پمپاژ استفاده گردد، زیرا این روش‌ها تخمین بهتری از میزان نفوذپذیری به دست خواهد داد. با در نظر گرفتن مطالعات انجام یافته برای محاسبه میزان نشت از سدهای احداث شده در سنگ‌های درزه‌دار، مطالعه حاضر برای ارزیابی میزان نشت از پرده آب‌بند سد سیمره ضروری بوده است. بدین منظور با استفاده از نتایج آزمون فشار آب میزان نفوذپذیری سنگ‌ها محاسبه گردیده است. نتایج به دست آمده از میزان هدایت هیدرولیکی سنگ‌ها با این روش، با میزان دبی گالری‌های زهکشی احداث شده در بدنه و پی سد، مقایسه شده است که بیانگر قابلیت روش آزمون فشار آب در ارزیابی مناسب میزان نشت در این‌گونه ساخت گاه‌ها است.

## ۲- مواد و روش‌ها:

کردند که رابطه معناداری بین نفوذپذیری و *RQD* را نشان می‌دهد. النقا (۲۰۰۰) رفتار هیدرولیکی سیستم درزه‌های زیرزمینی را به‌وسیله آزمون لوژن و آنالیز درزه‌ها تخمین زد. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از نرم‌افزار *Seep/W* به بررسی میزان نشت در سد در دست ساخت شورجیج در دو حالت با و بدون پرده آب‌بند پرداختند و با مقایسه نشت محاسبه شده برای دو حالت، اجرای پرده آب‌بند را ضروری دانستند. فخری و همکاران (۲۰۱۳) رابطه جدیدی برای محاسبه نشت از بدنه سدهای خاکی با هسته رسی ارائه کردند. ایرزوکی (۲۰۱۶) رابطه جدیدی برای محاسبه نشت از سدهای خاکی همگن با نشت افقی در پنجه سد ارائه کرد. وی با مقایسه نتایج به دست آمده از رابطه جدید با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار *Seep/W* به این نتیجه رسید که نتایج به دست آمده از هر دو روش از انطباق خوبی برخوردارند. امامعلی زاده قناتی و همکاران (۱۳۹۵) در تحلیل عمق بهینه دیواره آب‌بند سد گردیان جلغا تلاش کردند طراحی دیواره آب‌بند سد به‌گونه‌ای باشد که میزان نشت آب به کمتر از  $۱۰\%$  کاهش یابد. نتایج تحلیل با نرم‌افزار *Seep/W* نشان می‌دهد که عمق بهینه دیوار آب‌بند در بخش‌های مختلف پی با توجه به بار آبی و شرایط زیرسطحی ۵ تا ۱۲ متر است. بر اساس تحلیل‌ها میزان نشت آب در شرایط بدون دیوار آب‌بند، می‌توان سالانه نشت آب را از  $۱/۹$  MCM به  $۰/۲$  MCM کاهش دهد. بر اساس تحلیل نشت آب با نرم‌افزار *Seep/W* حبیبی و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی نفوذپذیری سد جامیشان با تأکید بر زمین‌شناسی مهندسی پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توجه به نفوذپذیری و تزریق پذیری توده سنگ به علت پیچیدگی توده سنگ، ارزیابی نفوذپذیری تنها با انجام آزمایش لوژن امکان‌پذیر نیست. در نتیجه برای غلبه بر این مشکل از روش شاخص نفوذپذیری ثانویه، بازشدگی هیدرولیکی درزه‌ها و درجه درزه‌داری توده سنگ استفاده کردند. رحمانی و همکاران (۱۳۹۴) به مقایسه توزیع نفوذپذیری معادل به روش قانون مکعب و روش آزمایش لوژن در پی و تکیه‌گاه‌های سد داریان پرداختند. نتایج نفوذپذیری معادل بر اساس روش‌های قانون مکعب و آزمایش لوژن در گمانه‌های اکتشافی با هم مقایسه

سیمره در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دره شهر و در ۹۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام واقع شده است. مختصات جغرافیایی سد سیمره به طول  $۱۲^{\circ} ۱۷'$  و  $۴۷^{\circ}$  شرقی و عرض  $۳۳^{\circ} ۱۷'$  شمالی قرار گرفته است. ساختگاه نیروگاه سد سیمره به فاصله ۱/۵ کیلومتری از ساختگاه سد قرار گرفته است (شکل ۱).

موقعیت جغرافیایی و مشخصات سد سیمره رودخانه‌های سیمره و کشکان سرشاخه‌های رود کرخه بوده و حوضه آبریز بالای آن ۳۸۰۰۰ کیلومترمربع مساحت دارد. رود سیمره به طول ۴۱۷ کیلومتر و شیب ۰/۳ درصد از به هم پیوستن رودخانه‌های قره‌سو و گاماسیاب تشکیل شده و مهم‌ترین سرشاخه‌های فرعی آن چرداول و شیروان می‌باشد. ساختگاه سد



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در استان ایلام.

سازند آسماری (الیگوسن- میوسن) می‌باشند که سه واحد این سازند به شرح زیر قابل شناسایی است (شکل ۲):  
**آسماری بالایی؛** این واحد در قسمت‌های مرتفع تاقدیس راوندی و ورودی دره رخنمون دارد. لیتولوژی غالب این واحد از آهک متبلور و بیوکلاسیک به رنگ خاکستری روشن تا تیره متوسط لایه و در قسمت‌های فوقانی بیشتر به صورت آهک مارنی (دولومیتی) و آهک متخلخل تشکیل شده است. وجود یک میان لایه مارنی به ضخامت حدود ده متر، مرز بین واحد آسماری بالایی و میانی را تعیین می‌کند. در بخش‌هایی که پدیده‌های فرسایشی عمل ننموده است، ضخامت این واحد به ۵۰ تا ۵۵ متر می‌رسد (شرکت مهندسی مهتاب قدس، ۱۳۷۸).  
**آسماری میانی؛** لیتولوژی غالب این واحد از سه بخش عمده ذیل تشکیل می‌گردد:  
الف- بخش آهک متبلور، به رنگ خاکستری روشن با میان لایه-هایی از آهک بیوکلاسیک می‌باشد.

این سد از نوع بتنی دوقوسی به ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر فعلی رودخانه و حدود ۱۸۰ متر از سنگ بستر ساخته شده است. رقوم تاج سد در تراز ۷۳۰ متری از سطح دریاهای آزاد قرار داشته و طول تاج سد ۲۰۲ متر و حجم مخزن سد ۳/۲ میلیارد متر مکعب می‌باشد. ترازهای حداکثر سیلاب احتمالی (PMF)، تراز نرمال آب مخزن و تراز سنگ پی به ترتیب برابر ۷۳۰، ۷۲۰ و ۵۵۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است.

#### ویژگی‌های زمین‌شناسی

محدوده مورد مطالعه از دیدگاه زمین‌شناسی در بخش جنوب غربی زاگرس چین خورده و از رشته کوه‌های نسبتاً مرتفع با روند کلی شمال غرب- جنوب شرق تشکیل شده است (شکل ۲ و جدول ۱). وجود تنگه‌های کم عرض که رودخانه سیمره در طول دوران فرسایشی خود آن‌ها را ایجاد نموده است، یکی از اشکال ریخت‌شناسی ویژه این مناطق می‌باشد. توده سنگ‌های ساختگاه سد و نیروگاه و کلیه سازه‌های وابسته به سد سیمره متعلق به

کوچک و ناقص کاملاً آشکار می‌باشد (شرکت مهندسی مه‌باب قدس، ۱۳۷۸).

**آسماری پایینی؛** این واحد در پایین دست محل خروجی تونل‌های انحراف و در نزدیکی محور تاق‌دیس راوندی رخنمون اندکی دارد. ضخامت این واحد از بستر رودخانه حدود ۱۲ متر بوده که به صورت آهک مارنی، خاکستری تیره و متوسط لایه می‌باشد. این واحد به‌طور محلی از آهک مارنی فسیل دار با میان لایه‌هایی از آهک متبلور به رنگ خاکستری روشن تشکیل شده که با افزایش عمق مارنهای آهکی به رنگ خاکستری تیره تبدیل می‌شود (شرکت مهندسی مه‌باب قدس، ۱۳۷۸).

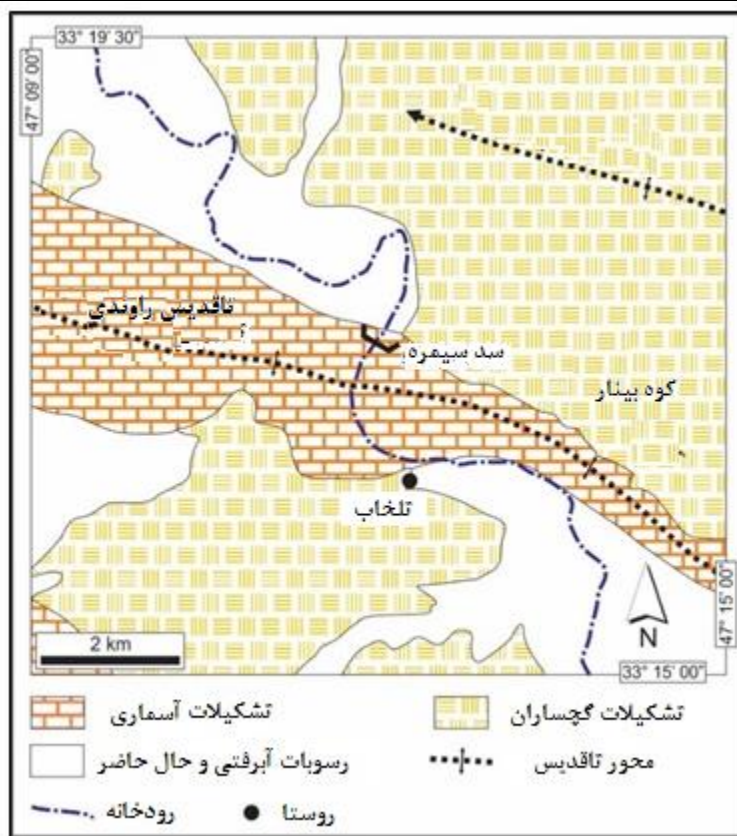
ب- بخش آهک‌های بیوکلاسیک، به رنگ خاکستری روشن با میان لایه‌هایی از آهک متبلور و دولومیتی است. این بخش بیشتر به‌صورت توده‌ای و ضخیم لایه بوده و به‌صورت محلی به آهک مارنی تبدیل شده است. وجود حفرات زیاد در این بخش باعث به وجود آمدن یک بافت متخلخل گاهی ماسه‌ای گردیده است.

ج- بخش آهک‌های فسیلی به رنگ خاکستری تیره، میکروکریستالین و پرفسیل می‌باشد.

ضخامت لایه‌ها در این بخش نازک تا متوسط بوده و گاهی به آهک مارنی تبدیل می‌گردد. به‌طور کلی ضخامت واحد آسماری میانی حدود ۲۲۰ متر بوده و در سرتاسر آن حفرات کارستی‌های

جدول ۱- توالی سازندهای ناحیه مورد مطالعه.

لینتولوژی	ضخامت (متر)	سن سازند	نام سازند
رسوبات آبرفتی	متغیر	کواترنر	رسوبات عهد حاضر
ژئپس و مارلستون	۱۰۰۰	میوسن	گچساران
آهک بلوری و آهک مارنی	۳۸۰	آسماری	



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه سد سیمره.

بارد (آب‌های نفوذی خودزا). همچنین با توجه به نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب اخذ شده از جناح چپ سد، می‌توان دریافت که ارتفاع ریزش آب تغذیه کننده آبخوان جناح چپ ساختگاه سد، بیشتر از حداکثر ارتفاع تاقدیس راوندی است. لذا می‌توان دریافت که احتمالاً مقداری از تغذیه تاقدیس راوندی از طریق نفوذ آب از آبخوان سازند آسماری تاقدیس ویزنه‌هار که در شمال تاقدیس راوندی می‌باشد تحت سیستم دگرزا روی می‌دهد (اسپن‌دار و همکاران، ۱۳۸۷). فعال بودن پدیده کارستی یکی از مشخصه‌های بارز هیدروژئولوژی محدوده سد سیمره است. بخش‌های کارستی در سنگ‌های آهکی، دولومیتی و ژیبسی مشاهده می‌شود. آثار کارست در سطح به صورت چاه‌های کارستی و حفراتی با اندازه متوسط و کوچک مشاهده می‌شوند. پدیده‌های کارستی عمدتاً کارن، گرایک، غارچه‌های کوچک و آبراهه‌های کارستی و چشمه می‌باشند. کارن با شکل تپیک در محدوده مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود بلکه به صورت برجستگی‌هایی در سطح سازند آسماری رخنمون دارند. چشمه‌ها یکی از مهم‌ترین پدیده‌های کارستی در این محدوده می‌باشد. وجود تعداد زیادی چشمه که اکثراً در انتهای یک گرایک رخنمون دارند نشانگر این است که توسعه کارست در امتداد درزه‌ها و شکاف‌های تکتونیکی بوده است (دانشگاه شیراز، ۱۳۸۶). در گمانه‌های اکتشافی وجود این حفرات در مغزه‌های به دست آمده از واحدهای زمین‌شناسی در رقوم ارتفاعی ۵۵۰ تا ۶۵۰ متری دیده می‌شود. این رقوم ۵۰ متر بالاتر و پایین‌تر از سطح رودخانه با تراز ۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا را نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مه‌باب قدس، ۱۳۷۸). وجود چشمه‌های متعدد کارستی به‌ویژه در پائین دست محل سد از نشانه‌های بارز عملکرد انحلال‌های کارستی در واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه است. بیشتر این چشمه‌ها با سیستم گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی مرتبط بوده و در مواردی نیز در امتداد لایه‌بندی واحدهای رسوبی دیده می‌شوند. میزان آبدی این چشمه‌ها قبل از آگیری از کمتر از یک لیتر بر ثانیه (غالباً چشمه‌های کوچک فصلی) تا حداکثر ۱۴۰ لیتر بر ثانیه (اولین چشمه واقع در جناح راست) متغیر بوده است (شرکت مهندسی مه‌باب قدس، ۱۳۷۸). ولی پس

در بالای سازند آسماری، سازند گچساران با سن میو- پلیوسن قرار گرفته است. این سازند متشکل از لای سنگ و مارن‌های قرمز و سبز زیتونی، ژیبس و بین لایه‌های نازک آهک فسیل دار است. در مقاطع سالم ژیبس به‌وسیله انیدریت جایگزین شد و گاه لایه‌های ضخیم نمک نیز در آن‌ها دیده می‌شود. رسوبات عصر حاضر در گستره مورد مطالعه شامل رسوبات آبرفتی درشت دانه، رسوبات دریاچه‌ای ریزدانه، رسوبات واریزه‌ای (سنگ‌ریزش‌ها) و رسوبات آبرفت قدیمی رودخانه سیمره می‌باشد که در چند افق در طول مسیر رودخانه به ضخامت‌های متغیر تشکیل یافته‌اند. تاقدیس راوندی مهم‌ترین عارضه زمین‌شناسی محدوده پروژه سد سیمره بوده و با سطح محوری قائم، از نوع چین‌های راست است. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی و موقعیت محور تاقدیس در محدوده سد را نشان می‌دهد. بر اساس درزه‌نگاری تفصیلی و دقیق سطحی و غیرسطحی که طی فاز مطالعات انجام شد، مشخص گردید که دو دسته درزه اصلی و یک دسته درزه فرعی همراه با سیستم لایه‌بندی، مجموعه ناپیوستگی‌های توده سنگ سد سیمره را تشکیل می‌دهند. با توجه به روند چین خوردگی‌های اصلی منطقه و آنالیز آماری انجام شده مشخص گردید که دسته درزه‌های اصلی این منطقه عموماً به موازات و عمود بر محور چین خوردگی شکل گرفته‌اند و می‌توانند معرف سیستم درزه‌های کششی باشند (شرکت مهندسی مه‌باب قدس، ۱۳۷۸).

#### هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

کوهزایی زاگرس باعث به وجود آمدن آبخوان‌های کارستی و آبرفتی متفاوتی در منطقه مورد مطالعه شده است. نزولات جوی و آب‌های سطحی از طریق حفره‌ها، درز و شکستگی‌ها وارد توده‌های آهکی- دولومیتی الیگومیوسن شده و باعث ایجاد مخازن کارستی در این منطقه شده است. آب‌های ورودی به کارست آسماری تحت سیستم مختلط خودزا - دگرزا می‌باشند. نفوذ آب از طریق درز و شکاف‌های آهک برهنه آسماری تاقدیس راوندی تحت سیستم خودزا می‌باشد. اما بر اساس بیلان آب این تاقدیس، میزان آب خروجی از یال جنوبی این تاقدیس بسیار بیشتر از میزان نزولات جوی است که مستقیماً روی تاقدیس می

تعریف، یک لوژن معادل خوردن یک لیتر آب در مدت زمان یک دقیقه در یک متر از طول گمانه تحت فشار ۱۰ اتمسفر می‌باشد (جان اوگلو و همکاران، ۲۰۱۷). تعریف لوژن به صورت فرمول زیر نمایش داده می‌شود:

$$1Lu = \frac{1 \text{ Lmin-1}}{1(m) \times 10(atm)} \quad (1)$$

با تبدیل واحدها و با ساده کردن کسر خواهیم داشت:

$$1atm = 1.01325bar \rightarrow 1bar = 10^6 \text{ dyne.s cm}^2 - 1 \\ 1Lu = 1.6448 \times 10^{-8} \text{ cm}^2[(\text{dyne.s} - 1)(\text{cm}^2 - 1)] \quad (2)$$

در رابطه ۲ واحد (cm<sup>2</sup>) در صورت کسر نشان دهنده نفوذپذیری ذاتی محیط (K<sub>i</sub>) و واحد (dyne.s (cm<sup>2</sup>-1)) در مخرج کسر نشان دهنده ویسکوزیته دینامیک سیال (μ) می‌باشد. چنانچه سمت راست معادله ۲، در ویسکوزیته دینامیک سیال ضرب شود، بدین ترتیب نفوذپذیری ذاتی محیط برای مقدار عددی یک لوژن به دست می‌آید (رابطه ۳) (ویسکوزیته دینامیک آب تقریباً معادل ۰/۰۱ (dyne.s (cm<sup>2</sup>-1)) و N عدد لوژن می‌باشد).

$$K_i = 1.6448 \times 10^{-10} \times N \text{ (cm}^2) \quad (3)$$

همان‌گونه که در رابطه ۳ دیده می‌شود با انجام آزمایش لوژن، مستقیماً نفوذپذیری ذاتی محیط قابل اندازه‌گیری است. نفوذپذیری ذاتی نشان دهنده خواص محیط متخلخل می‌باشد و اساساً تابع اندازه منافذی است که سیال از آن‌ها عبور می‌کند. نفوذپذیری ذاتی سنگ‌ها ناشی از فضاهای اولیه که همراه سنگ تشکیل می‌شود و نیز فضاهای ثانویه‌ای است که در اثر شکستگی در سنگ به وجود می‌آید، می‌باشد. اندازه بازشدگی، ارتباط آن‌ها با هم و مقدار فضای خالی در نفوذپذیری ذاتی مؤثرند(فتر، ۲۰۱۵). در واقع تمامی پارامترها از قبیل بازشدگی هیدرولیکی درزه‌ها و درجه درزه‌داری توده سنگ، ضریب زبری درزه‌ها، طول درزه‌ها و ... که در نفوذپذیری توده سنگ مؤثرند، در نفوذپذیری ذاتی مستتر است.

بر اساس تعریف، نفوذپذیری ذاتی ( $k_i = \frac{\beta_1^2 \beta_2^2 \beta_3 n d m^2}{32}$ )، با تخلخل، متوسط اندازه‌های خلل و فرج در خاک و یا متوسط بازشدگی درزه‌ها در سنگ و ضرایبی مربوط به جزئیات هندسی خلل و فرج و یا درزه‌ها، شکل ذرات، ضریب پیچاپیچی که جریان

از آگیری سد میزان تخلیه آن‌ها عموماً بیشتر شده و در موردی به ۷۸۰ لیتر بر ثانیه در چشمه‌ای واقع در جناح چپ سد رسیده است. نتایج آزمایش ردیابی، هم جریان مجرای و هم جریان افشان را نشان داده است (دانشگاه شیراز، ۱۳۸۶). بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها در قبل از آگیری نشان می‌دهد، چشمه‌های واقع در جناح راست سد از نوع سولفات کلسیک هستند در حالی که چشمه‌های ساحل چپ از نوع کلرور سدیک می‌باشند. تیپ کلرور می‌تواند از تأثیر لایه های نمک سازند گچساران و همچنین طی کردن مسافت طولانی آب از تاقدیس ویزنهار به تاقدیس راوندی باشد. اما تیپ و رخساره نمونه‌های آب برداشت شده از جناح راست به علت رخنمون کم سازند گچساران و همچنین جوان بودن آب (زمان ماندگاری کم) سولفات کلسیک می‌باشد. تیپ و رخساره نمونه‌های برداشت شده از آب رودخانه سیمره نیز به دلیل تأثیر لایه های ژیبس و انیدریت سازند گچساران واقع در مسیر حرکت آب، سولفات کلسیک می‌باشد. (اسپنار و همکاران، ۱۳۸۷).

بررسی هدایت هیدرولیکی توده سنگ و برآورد مقدار نشت به منظور محاسبه میزان هیدرولیکی سازندهای محدوده ساختگاه سد سیمره و ارزیابی مقدار نشت از پرده آب‌بند اجرا شده در این سد، مراحل مختلفی به انجام رسیده است که شرح این مراحل به ترتیب به شرح زیر است.

#### تبدیل عدد لوژن به هدایت هیدرولیکی

در چند دهه گذشته، تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های محاسبه تراوش در توده‌های سنگی انجام شده که بیشتر آن‌ها مبتنی بر محاسبه جریان آب در درزه‌های کاملاً باز با استفاده از قوانین هیدرولیک و سپس مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مدل‌های ریاضی هستند. از نقطه نظر مکانیک سنگ، تراوش در سنگ می‌تواند بر اساس محاسبات روش‌های تئوریک تخمین زده شود و دقت آن‌ها نیز در تجربیات مدل تأیید شده باشد. روش لوژن به عنوان پرکاربردترین آزمون برجا به منظور ارزیابی وضعیت هیدرولیکی توده سنگ در مطالعات ژئوتکنیکی به خصوص مطالعات هیدرولوژیکی و مطالعات تزریق پذیری سنگ، شناخته می‌شود (کربلا و همکاران، ۱۳۸۸). بر اساس

که  $\rho$  جرم مخصوص سیال (در این شرایط منظور وزن مخصوص آب است که یک  $1\text{-gr cm}^3$  است) و  $g$  شتاب جاذبه معادل  $(\text{Cm S}^{-2})$   $980$  می‌باشد. ویسکوزیته دینامیک آب ( $\mu$ ) تقریباً معادل  $(1\text{-dyne.S cm}^{-2})$   $0.01$  می‌باشد. اگر به جای  $K_i$  (نفوذپذیری ذاتی) مقدار عددی  $1.6448 \times 10^{-10}$  را در رابطه ۴ قرار دهیم، مقدار هدایت هیدرولیکی برای یک لوژن مطابق رابطه ۵ به دست می‌آید (راوش، ۱۳۹۸):

$$k = 1.612 \times 10^{-5} \text{ cm S}^{-1} \quad (5)$$

$$k = 1.612 \times 10^{-7} \times N \text{ (m S}^{-1}) \quad N = \text{عدد لوژن} \quad (6)$$

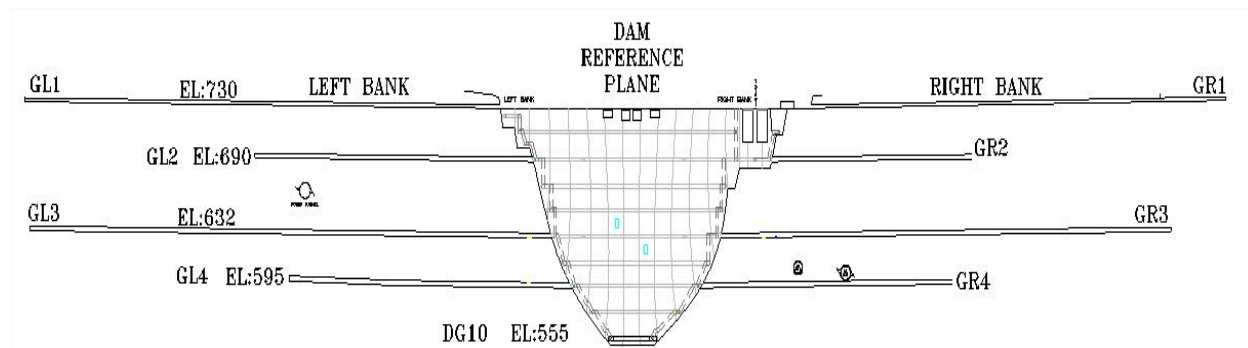
#### گالری‌های پرده آب‌بند سیمره

گالری‌های پرده آب سد سیمره در دو جناح چپ و راست، مطابق با طراحی جهت انجام تزریقات پرده آب‌بند در چهار تراز متوالی ۷۳۰، ۶۹۰، ۶۳۲، ۵۹۵ متر و یک گالری نیز در پی سد در تراز ۵۵۵ متر احداث شده است (شکل ۳).

آب را تحت لایه‌بندی می‌دهد، لایه‌بندی، دانه‌بندی و آرایش درزه‌ها رابطه مستقیم دارد (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۹). لذا با محاسبه نفوذپذیری ذاتی، دیگر نیازی به تعیین بازشدگی درزه‌ها و درجه درزه‌داری توده سنگ از روی مغزه‌های حفاری نیست. به طور مثال در صنعت نفت در محیط آزمایشگاه و از روی مغزه‌های حفاری، نفوذپذیری ذاتی را محاسبه می‌کنند و سپس بر اساس آن هدایت هیدرولیکی و یا ضریب نفوذپذیری نفت خام و آب را در منطقه مورد مطالعه خود تخمین می‌زنند. هدایت هیدرولیکی تابعی از خواص محیط متخلخل و سیالی است که از آن عبور می‌کند (فتر، ۲۰۱۵).

بین هدایت هیدرولیکی ( $k$ ) و نفوذپذیری ذاتی ( $K_i$ ) رابطه ۴ برقرار است:

$$k = \frac{\rho g K_i}{\mu} \quad (4)$$



شکل ۳ مقطعی از بدنه ساختگاه سد به همراه گالری‌های تزریق (راوش، ۱۳۹۸).

این گالری‌ها به منظور دسترسی مناسب به بخش‌های مختلف سد جهت تزریق دوغاب سیمان برای ایجاد پرده آب‌بند و تخمین اندازه‌گیری‌های مورد نیاز پس از ایجاد این پرده در دو طرف و پی سد احداث شده است. مشخصات و ابعاد این گالری‌ها که از نقشه‌های چون ساخت کارگاهی گالری‌های تزریق استخراج شده، در جدول ۱ ارائه شده است.

محاسبه هدایت هیدرولیکی و نشت آب از پرده آب‌بند به منظور تخمین هدایت هیدرولیکی سد سیمره، نتایج آزمون آب در ۲۴۴ گمانه به تعداد ۴۳۳۱ مقطع مورد تحلیل قرار گرفته است. از این تعداد ۱۲۳ عدد لوژن مربوط به گمانه‌های کنترلی بوده که پس از اجرای پرده آب‌بند در ۲۲۵۴ مقطع صورت گرفته

$$k_x = \frac{(k_1 z_1 \times k_2 z_2 \times \dots \times k_n z_n)}{z} \quad (7)$$

$$k_z = \frac{z}{\left(\frac{z_1}{k_1}\right) + \left(\frac{z_2}{k_2}\right) + \dots + \left(\frac{z_n}{k_n}\right)} \quad (8)$$

در معادلات ۷ و ۸،  $k_1$  نشان دهنده هدایت هیدرولیکی مقطع اول و  $z_1$  نشان دهنده طول همان مقطع و  $z$  نشان دهنده طول کل گمانه است.

یکی از مسائل اساسی در پروژه‌های سدسازی وجود نشت از پرده آببند می‌باشد. پرده آببند محاسبه می‌شود. مجموع این دو مقدار، میزان نشت از پرده آببند را مشخص می‌نماید. با مشخص شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی، به دلیل متفاوت بودن طول گمانه‌های پرده آببند، برای محاسبه نشت گالری‌های مذکور به گرمخانه‌های مختلف تقسیم شده‌اند (جدول ۲) و نشت از پرده آببند در هر زون به طور جداگانه محاسبه شده است. طولی پرده آببند ضرب و مقدار نشت افقی و عمودی از صفحه

جدول ۱: موقعیت و ویژگی‌های گالری‌های تزریق در ساختگاه سد سیمره (راوش، ۱۳۹۸).

نام گالری	محل اجرا	تراز اجرا (متر)	طول گالری (متر)	عمق پرده آببند (متر)
GL1	جناح چپ سد	۷۳۰	۲۸۴ (زون ۱)	۳۰ (زون ۱)
			۲۲۳ (زون ۲)	۸۸ (زون ۲)
			۲۹۴ (زون ۳)	۸۰ (زون ۳)
GL2	جناح چپ سد	۶۹۰	۳۷۳	۵۸
GL3	جناح چپ سد	۶۳۲	۲۸۴ (زون ۱)	۳۷ (زون ۱)
			۲۶۸ (زون ۲)	۱۲۰ (زون ۲)
			۳۱۰ (زون ۳)	۱۶۷ (زون ۳)
GL4	جناح چپ سد	۵۹۵	۳۰۲	۱۳۵
DG10	پی	۵۵۵	۸۵	۹۸
GR1	جناح راست سد	۷۳۰	۱۹۲ (زون ۱)	۳۰ (زون ۱)
			۲۸۹ (زون ۲)	۸۸ (زون ۲)
GR2	جناح راست سد	۶۹۰	۳۱۴	۵۸
GR3	جناح راست سد	۶۳۲	۲۵۸ (زون ۱)	۳۷ (زون ۱)
			۲۴۳ (زون ۲)	۱۱۵ (زون ۲)
GR4	جناح راست سد	۵۹۵	۲۶۷	۱۳۵

جدول ۲- نمونه‌ای از مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی افقی و قائم گمانه P10 در گالری GL2 (جناح چپ).

نام گمانه	طول مقطع از (متر)	طول مقطع (تا) (متر)	رفتار هیدرولیکی سنگ	عدد لوژن	k (mS-1)	زاویه گمانه (درجه)	تراز ابتدای مقطع (masl)	تراز کف مقطع (masl)	طول مقطع Z(m)	$kz = \frac{z}{\bar{k}}$	$kx = \frac{(k \times z)}{z}$
GL2-P10	۰	۵	نفوذناپذیر	۰/۰۰۱	$1/612 \times 10^{-10}$	۲۰	۶۹۰	۶۸۵/۳	۴/۷	$7/280 \times 10^{-10}$	$2/662 \times 10^{-7}$
	۵	۱۰	نفوذناپذیر	۰/۰۰۱	$1/612 \times 10^{-10}$	۲۰	۶۸۵/۳	۶۸۰/۶	۴/۷		
	۱۰	۱۵	اتساع	۵/۳۰	$8/544 \times 10^{-7}$	۲۰	۶۸۰/۶	۶۷۵/۹	۴/۷		
	۱۵	۲۰	نفوذناپذیر	۰/۳۳	$5/314 \times 10^{-8}$	۲۰	۶۷۵/۹	۶۷۱/۲۱	۴/۷		
	۲۰	۲۵	خطی	۲/۲۰	$3/546 \times 10^{-7}$	۲۰	۶۷۱/۲۱	۶۶۶/۵۱	۴/۷		
	۲۵	۳۰	نفوذناپذیر	۰/۳۳	$5/261 \times 10^{-8}$	۲۰	۶۶۶/۵۱	۶۶۱/۸۱	۴/۷		
	۳۰	۳۵	آب شستگی	۱/۳۰	$2/097 \times 10^{-7}$	۲۰	۶۶۱/۸۱	۶۵۷/۱۱	۴/۷		
	۳۵	۴۰	نفوذناپذیر	۰/۶۵	$1/045 \times 10^{-7}$	۲۰	۶۵۷/۱۱	۶۵۲/۴۱	۴/۷		
	۴۰	۴۵	انسداد	۱/۲۷	$2/051 \times 10^{-7}$	۲۰	۶۵۲/۴۱	۶۴۷/۷۱	۴/۷		



۴/۷	۶۴۳/۰۲	۶۴۷/۷۱	۲۰	$۶/۹۴۸ \times 10^{-۷}$	۴/۳۱	اتساع	۵۰	۴۵	
۴/۷	۶۳۸/۳۲	۶۴۳/۰۲	۲۰	$۲/۱۲۲ \times 10^{-۷}$	۱/۳۲	انسداد	۵۵	۵۰	
۴/۷	۶۳۳/۶۲	۶۳۸/۳۲	۲۰	$۱/۶۱۲ \times 10^{-۱۰}$	۰/۰۰۱	نفوذناپذیر	۶۰	۵۵	
۴/۷	۶۲۸/۹۲	۶۳۳/۶۲	۲۰	$۵/۲۱۱ \times 10^{-۷}$	۳/۲۳	انسداد	۶۵	۶۰	
۲/۸۲	۶۲۶/۱	۶۲۸/۹۲	۲۰	$۵/۹۶۴ \times 10^{-۷}$	۳/۷۰	خطی	۶۸	۶۵	
								مجموع	۶۳/۹

با توجه به اینکه تراز نرمال آب مخزن ۷۲۰ است، لذا تمامی نتایج و قائم گمانه‌های اکتشافی گالری GL2 و در جدول ۴ محاسبه نشد از گالری GL2 قبل از اجرای پرده آب‌بند نمایش داده شده است. به عنوان نمونه در جدول ۲، مقادیر عدد لوژن و هدایت هیدرولیکی محاسبه شده مقاطع گمانه اکتشافی P10 در گالری GL2، در جدول ۳، مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی افقی

جدول ۳ - مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی افقی و قائم گمانه‌های اکتشافی (قبل از اجرای پرده آب‌بند) گالری GL2 (جناح چپ).

گالری	نوع گمانه	نام گمانه	$K_x (ms^{-1})$	$K_z (ms^{-1})$
GL2	اکتشافی	P10	$۲/۶۶ \times 10^{-۷}$	$۷/۲۸ \times 10^{-۱۰}$
GL2	اکتشافی	P11	$۷/۶۲ \times 10^{-۷}$	$۷/۳۳ \times 10^{-۱۰}$
GL2	اکتشافی	P20	$۶/۹۴ \times 10^{-۷}$	$۳/۱۹ \times 10^{-۷}$
GL2	اکتشافی	P25	$۹/۵۷ \times 10^{-۷}$	$۳/۲۹ \times 10^{-۷}$
GL2	اکتشافی	S14	$۸/۱۹ \times 10^{-۷}$	$۱/۰۲ \times 10^{-۷}$
GL2	اکتشافی	S15	$۹/۹۹ \times 10^{-۷}$	$۲/۱۷ \times 10^{-۷}$
GL2	اکتشافی	T122	$۴/۷۶ \times 10^{-۷}$	$۳/۹۸ \times 10^{-۷}$
متوسط هندسی			$۶/۵۶ \times 10^{-۷}$	$۴/۶۹ \times 10^{-۸}$

جدول ۴ - محاسبه نشد از گالری GL2 (جناح چپ) قبل از اجرای پرده آب‌بند.

پارامترها	متوسط k	عمق پرده آب‌بند	آبگذری	طول گالری	نشست
جهت نشست	(ms <sup>-1</sup> )	(m)	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	(m)	(Ls <sup>-1</sup> )
افقی (x)	$۶/۵۶ \times 10^{-۷}$	۵۸	$۳/۸ \times 10^{-۵}$	۳۷۳	۱۴
عمودی (z)	$۴/۶۹ \times 10^{-۸}$	۵۸	$۲/۷ \times 10^{-۶}$	۳۷۳	۱
مجموع نشست					۱۵

چشمه‌ها و گالری‌های کنترل، مهم‌ترین هدف این مطالعه بوده است. بدین منظور محدوده پرده آب‌بند به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و پس از به دست آوردن عمق متوسط پرده آب‌بند و محاسبه هدایت هیدرولیکی گمانه‌های اکتشافی و کنترلی در هر بخش، مقدار نشست قبل و بعد از اجرای پرده آب‌بند

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری:

ارزیابی و مقایسه میزان نشست از پرده آب‌بند سیمه با روش محاسباتی از هدایت هیدرولیکی به دست آمده از آزمون فشار آب (آزمایش لوژن) و اندازه‌گیری مستقیم میزان نشست از

محاسبه شده است. مجموع نشت از بخش‌های مختلف گالری‌ها، بیانگر نشت کل از پرده آب‌بند اجرا شده در ساختگاه سد است. با مشخص شدن متوسط هدایت هیدرولیکی ( $k$ ) و عمق متوسط گمانه‌های پرده آب‌بند ( $b$ ) در هر زون، آب‌گذری ( $T$ ) برای هر زون محاسبه شده و با در دست داشتن طول گالری در هر زون، مقدار کل نشت ( $Q$ ) هر زون برآورد شده است. خلاصه محاسبه نشت از پرده آب‌بند سد سیمره بر مبنای آزمون‌های انجام گرفته، برای حالتی که تراز آب مخزن در تراز ( $m.a.s.l$ ) ۷۲۰ متر باشد، در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است.

جدول ۵ - خلاصه محاسبه نشت در سد سیمره در تراز نرمال ۷۲۰ متر.

نشت ( $Ls-I$ )	نشت ( $Ls-I$ )	نشت ( $Ls-I$ )	گالری
۱۱۷	۳۳۲	افقی	جناح چپ
۲۶	۳۸	عمودی	
۵۸	۱۶۲	افقی	جناح راست
۹	۱۴	عمودی	
۲	۱۲	افقی	پی
۰	۲	عمودی	
۱۷۶	۵۰۶	افقی	کل
۳۶	۵۴	عمودی	
۲۱۲	۵۶۰		کل

جدول ۶ - خلاصه محاسبه کاهش نشت در سد سیمره در تراز نرمال ۷۲۰ متر.

کاهش نشت %	نشت ( $Ls-I$ )	نشت ( $Ls-I$ )	گالری
۷۴	۳۹	۱۵۲	GL1
۲۲	۱۲	۱۵	GL2
۵۴	۷۵	۱۶۳	GL3
۵۸	۱۷	۴۰	GL4
۵۲	۲۵	۵۱	GR1
۵۶	۶	۱۴	GR2
۷۲	۱۸	۶۳	GR3
۶۱	۱۸	۴۷	GR4
۸۶	۲	۱۴	DG10
۶۲	۲۱۲	۵۵۹	کل

قبل از اجرای پرده آب‌بند مقدار نشت محاسبه شده از پرده مشخص گردید که اجرای پرده آب‌بند باعث کاهش ۶۲ درصدی آب‌بند، ۵۶۰ لیتر بر ثانیه بوده است که این مقدار پس از اجرای مقدار نشت آب در سد سیمره شده است. پرده آب‌بند به ۲۱۲ لیتر بر ثانیه تقلیل یافته است. از این‌رو رفتار هیدرولیکی سنگ:

مقاطع رفتار آب شستگی از خود نشان داده‌اند. این رفتار نشان می‌دهد که نشت، معمولاً به دلیل شستشوی پرشدگی‌های درزه‌ها و یا حرکات دائمی سنگ باعث آسیب دائمی و غیرقابل جبرانی بر روی توده سنگ می‌شود (کوئینون روزو، ۲۰۱۰). افزایش رفتار آب شستگی پس از اجرای پرده آب‌بند، احتمالاً مرتبط با شسته شدن دوغاب سیمانی در درزه‌ها بوده است. با توجه به سیمان رسی واحدهای آهکی موجود در ساختگاه، به نظر می‌رسد که آبشستگی این رس‌ها دلیل اصلی رفتار آب شستگی درزه‌های واحدهای کربناته است (شکل ۴).

۵- قبل از اجرای پرده آب‌بند ۴٪ از مقاطع دارای رفتار انسدادی<sup>۴</sup> (پرشدگی درزه‌ها) بودند که پس از اجرای پرده آب‌بند، ۵٪ مقاطع رفتار انسدادی از خود نشان داده‌اند. این رفتار نشان می‌دهد که یا: (۱) آب به تدریج ناپیوستگی‌های جدا شده / غیر مداوم را پر می‌کند، (۲) تورم در ناپیوستگی‌ها اتفاق می‌افتد، یا (۳) جریان آرام آب به درون ناپیوستگی‌ها باعث ایجاد یک لایه کیک<sup>۵</sup> که آن‌ها را مسدود می‌کند، می‌شود (کوئینون روزو، ۲۰۱۰).

۶- قبل از اجرای پرده آب‌بند ۱۵٪ از مقاطع رفتار اتساع<sup>۶</sup> دارند که پس از اجرای پرده آب‌بند، ۱۲٪ مقاطع اتساع از خود نشان داده‌اند. این رفتار هنگامی اتفاق می‌افتد که فشار آب اعمال شده از حداقل تنش اصلی توده سنگ، بیشتر باشد، در نتیجه باعث ایجاد یک اتساع موقت<sup>۷</sup> در شکاف‌های موجود توده سنگ می‌شود. اتساع باعث افزایش سطح مقطع در دسترس برای جریان آب می‌شود و در نتیجه هدایت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد (کوئینون روزو، ۲۰۱۰).

رفتار هیدرولیکی شکستگی‌ها و درزه‌ها در یک توده سنگ را می‌توان به وسیله آزمون فشار آب که در آن یک سری از فشارهای مؤثر به مقاطع گمانه اعمال می‌شود را تعیین کرد. اعداد لوژن به دست آمده برای پله‌های فشار یک مقطع آزمون، در مجموع می‌تواند تعداد و اندازه نسبی درزه و شکستگی‌ها، مناسب بودن حداکثر فشار طراحی و تمایل مواد پرکننده درزه‌ها به شسته شدن به وسیله فشار جریان را نمایان سازد (پیسلی و همکاران، ۲۰۱۷). از آنجایی که عملیات تزریق باعث تغییر در رفتار هیدرولیکی توده سنگ می‌گردد، رفتار هیدرولیکی کلیه مقاطع قبل و بعد از اجرای پرده آب‌بند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی‌ها در جداول ۷ و ۸ به صورت آماری و در شکل ۴ به صورت تصویری ارائه شده است. به این اساس:

۱- قبل از اجرای پرده آب‌بند ۱۸٪ از مقاطع رفتار نفوذناپذیر (عدد لوژن کوچک‌تر از یک) دارند که پس از اجرای پرده آب‌بند، ۳۱٪ مقاطع رفتار نفوذناپذیر از خود نشان داده‌اند (شکل ۴).

۲- نه درصد از مقاطع، قبل و پس از اجرای پرده آب‌بند رفتار خطی<sup>۱</sup> دارند. این رفتار ویژگی سنگ‌های با هدایت هیدرولیکی پایین و نشان دهنده سرعت نشت پایین است (شکل ۴).

۳- قبل از اجرای پرده آب‌بند حدود ۴۰٪ از مقاطع رفتار آشفته<sup>۲</sup> دارند که پس از اجرای پرده آب‌بند، به حدود ۳۲٪ کاهش می‌یابد (شکل ۴). این رفتار ویژگی سنگ‌های با درزه‌های باز است. عدم وجود مجاری بزرگ می‌تواند نشانگر آن باشد که درزه‌های اصلی کنترل‌کننده مسیر جریان بوده و هیدرولیک نقشی در توسعه کارست در محدوده مورد مطالعه نداشته است (دانشگاه شیراز، ۱۳۸۶).

۴- قبل از اجرای پرده آب‌بند ۸٪ از مقاطع رفتار آب شستگی<sup>۳</sup> دارند که پس از اجرای پرده آب‌بند، ۱۰٪

5 - Cake Layer  
6 - Dilation  
7 - Hydro- Jacking

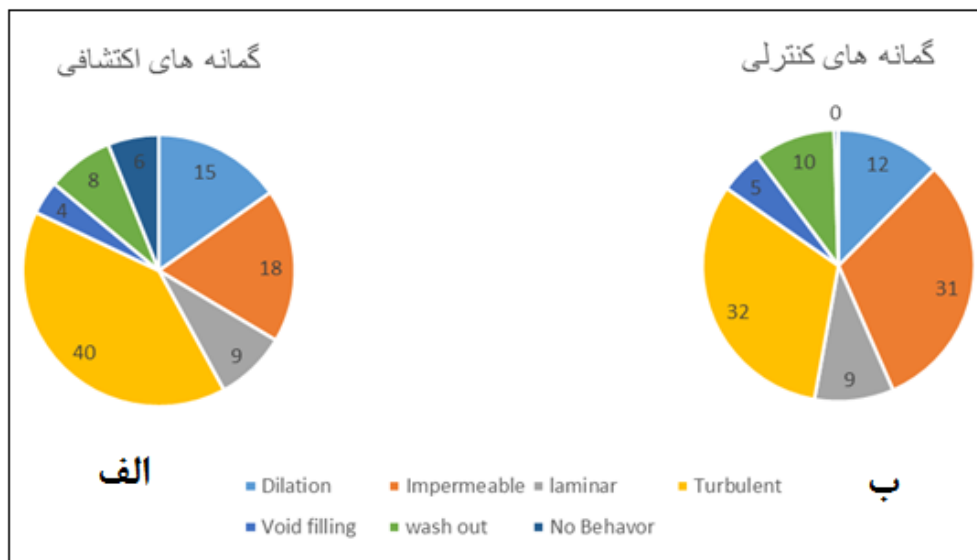
1 - Laminar  
2 - Turbulent  
3 - Wash-out  
4 - Void filling

جدول ۷- آمار رفتار هیدرولیکی توده سنگ قبل از اجرای پرده آب‌بند.

اکتشافی	گمانه‌ها	اتساع	نفوذناپذیر	خطی	آشفته	انسداد	آب شستگی	بدون رفتار	مجموع
جناح چپ	تعداد	۲۰۲	۲۰۸	۱۳۷	۵۱۲	۶۳	۸۷	۷۱	۱۲۸۰
جناح راست	تعداد	۱۱۱	۱۶۸	۳۸	۳۰۴	۱۷	۷۶	۵۴	۷۶۸
پی	تعداد	۴	۴	۲	۱۴	۳	۱	۱	۲۹
مجموع	تعداد	۳۱۷	۳۸۰	۱۷۷	۸۳۰	۸۳	۱۶۴	۱۲۶	۲۰۷۷
	%	۱۵	۱۸	۹	۴۰	۴	۸	۶	۱۰۰

جدول ۸- آمار رفتار هیدرولیکی توده سنگ بعد از اجرای پرده آب‌بند.

اکتشافی	گمانه‌ها	اتساع	نفوذناپذیر	خطی	آشفته	انسداد	آب شستگی	بدون رفتار	مجموع
جناح چپ	تعداد	۱۳۶	۳۳۸	۱۱۷	۴۰۱	۷۰	۱۱۲	۳	۱۱۷۷
جناح راست	تعداد	۱۳۰	۳۳۶	۹۴	۳۱۴	۴۵	۱۰۶	۸	۱۰۳۳
پی	تعداد	۱۴	۲۵	۱	۲	۱	۱	۰	۴۴
مجموع	تعداد	۲۸۰	۶۹۹	۲۱۲	۷۱۷	۱۱۶	۲۱۹	۱۱	۲۲۵۴
	%	۱۲	۳۱	۹	۳۲	۵	۱۰	۰	۱۰۰



شکل ۴- دیاگرام دایره‌ای رفتار هیدرولیکی سنگ قبل از اجرای پرده آب‌بند (الف) و بعد از پرده آب‌بند (ب)

اینکه همیشه شیر گمانه‌های زهکش به طور کامل باز نیست و بر اساس نیاز به حالت کامل باز، نیمه باز و بسته می‌باشند. مجموع دبی زهکش‌ها بر اساس گزارش‌ها روزانه کارگاهی شرکت مهندسی مه‌اب قدس و دبی سنجی‌های ثبت شده، در حالت شیر کامل باز برابر با ۲۱۱ لیتر بر ثانیه بوده است (راوش، ۱۳۹۸).

صحت سنجی محاسبه نشت : جهت صحت سنجی عدد محاسبه شده با نشت واقعی، اطلاعات دبی سنجی گمانه‌های زهکشی برآورد شده است. آگیری سد سیمره در تاریخ ۱۳۹۰/۰۱/۲۶ آغاز و از تاریخ ۱۳۹۰/۰۲/۰۲، دبی سنجی گمانه‌های زهکش صورت گرفته است. نکته قابل توجه

آنجایی که در زمان انجام دبی سنجی زهکش‌ها در حالت شیر کاملاً باز، آب مخزن در تراز ۶۹۸ متر قرار داشته است جهت صحت سنجی، محاسبه نشت انجام گرفته بر مبنای تراز ۷۲۰ (جدول ۵)، مجدداً بر اساس تراز ۶۹۸ متر انجام گرفت که خلاصه آن در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ - خلاصه محاسبه نشت در سد سیمره در تراز ۶۹۸ متر.

نشت (Ls-I)	نشت (Ls-I)		
بعد از اجرای پرده آببند	قبل از اجرای پرده آببند	هدایت هیدرولیکی	گالری
۱۰۳	۲۴۶	افقی	جناح چپ
۲۶	۳۶	عمودی	
۵۲	۱۳۳	افقی	جناح راست
۱۰	۱۲	عمودی	
۲	۱۲	افقی	پی
۰	۲	عمودی	
۱۵۸	۳۹۱	افقی	کل
۳۶	۵۰	عمودی	
۱۹۳	۴۴۱		کل

شد. همچنین بر اساس تحلیل نتایج آزمون لوژن قبل از اجرای پرده آببند، هشت درصد مقاطع قبل از اجرای پرده آببند، رفتار آب شستگی از خود نشان می‌دهند که به لحاظ تئوری در گذر زمان باعث افزایش ۸ درصدی نشت خواهند شد. همچنین ۴ درصد مقاطع رفتار انسدادی از خود نشان می‌دهند که به لحاظ تئوری در گذر زمان باعث کاهش ۴ درصدی نشت خواهند شد. با تفاضل این دو می‌توان افزایش ۴ درصدی نشت در گذر زمان را پیش‌بینی کرد. مقدار دبی زهکش‌ها در سد سیمره وقتی که تراز مخزن ۶۹۸ متر است بر اساس محاسبات به قرار زیر خواهد بود (راوش، ۱۳۹۸):

دبی زهکش‌ها = مقدار نشت از پرده آببند + (مقدار افزایش ۵ درصدی نشت) + مقدار نشت از زیر پرده آببند + مقدار افزایش ۴ درصدی نشت

$$\text{دبی زهکش‌ها} = (\text{تراز مخزن } 698) = 211 + (1/0.5 \times 193) + (1/0.4 \times 8) + 202/65 = 210/97 + 8/32 + 202/65 = 211$$

Ls-I

مقدار محاسبه شده با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده منطبق است که این نشان از دقت بالای مدل دارد. این امر به دو دلیل اتفاق افتاده:

معمولاً خروجی از دبی زهکش‌ها متأثر از دو عامل اساسی است:

- ۱- مقدار آبی که از پرده آببند عبور می‌کند و ۲- مقدار آبی که از پشت پرده آببند به سمت پایین حرکت کرده و از زیر پرده آببند نشت می‌کند. در خصوص نشت از زیر پرده آببند تنها هدایت هیدرولیکی عمودی ( $k_z$ ) گالری‌های تراز تحتانی سد مؤثرند. چرا که هدایت هیدرولیکی عمودی ترازهای بالایی هر چه که باشد، نشت آب از زیر پرده آببند، متناسب با پتانسیل آب‌گذری عمودی از تراز تحتانی است. گالری‌های تحتانی سد سیمره عبارت‌اند از: گالری GL4 در جناح چپ، گالری GR4 در جناح راست و گالری پی DG10. بر اساس محاسبات نشت انجام گرفته گمانه‌های اکتشافی (قبل از اجرای پرده آببند)، مجموع نشت عمودی گالری‌های مذکور معادل ۸ لیتر بر ثانیه می‌باشد. همان‌گونه که ذکر شد بر اساس تحلیل نتایج آزمون لوژن بعد از اجرای پرده آببند، ده درصد مقاطع رفتار آب شستگی از خود نشان می‌دهند که به لحاظ تئوری در گذر زمان باعث افزایش ده درصدی نشت خواهند شد (۱۰٪+). همچنین ۵ درصد مقاطع رفتار انسداد از خود نشان می‌دهند که به لحاظ تئوری در گذر زمان باعث کاهش ۵ درصدی نشت خواهند شد (۵٪-). با تفاضل این دو می‌توان افزایش ۵ درصدی نشت را در گذر زمان متصور

۵- از آنجا که افزایش تعداد آزمایش‌های فشار آب در برآورد دقیق تر خصوصیات هیدرولیکی و ارزیابی بهتر رفتار توده سنگ در برابر جریان آب نقش مهمی را ایفا می‌کند، پیشنهاد می‌گردد در هر گالری تزریق، حداقل در فواصل ۳۲ متری آزمون لوژن در گمانه‌های اکتشافی و کنترلی انجام گردد.

#### منابع

اسپندار پ، ر، ایل‌بیگی، م، سیاری نژاد، م، ۱۳۸۷. مطالعه هیدروژئولوژی ساختگاه سد سیمره با استفاده از داده‌های هیدروژئوشیمی، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی، ۱۱ ص.

امامعلی زاده قناتی، ا، اصغری کلجاهی، ا، گنبدی، م، ب، ۱۳۹۵. تعیین عمق بهینه دیواره آب‌بند سد گردیان جلفا بر اساس تحلیل نشت آب با نرم‌افزار Seep/W، مجله هیدروژئولوژی، سال اول، شماره ۱، ص، ۱۰۶-۹۳.

دانشگاه شیراز، ۱۳۸۶. آزمایش ردیابی مواد رنگی در ساختگاه سد سیمره (مرحله سوم)، ۲۳۰ ص.

راوش، ف، ۱۳۹۸. تخمین هدایت هیدرولیکی از طریق نتایج آزمون فشار آب در پی و تکیه‌گاه‌های سد سیمره (استان ایلام)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، ۱۴۵ ص.

رحمانی، ا؛ ارومیه‌ای، ع؛ گنجعلی پور، ک، ۱۳۹۳. مقایسه توزیع نفوذپذیری معادل به روش قانون مکعب (cubic law) و روش آزمایش لوژن در پی و تکیه‌گاه‌های سد داریان، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، ۸ ص.

رضی، پ؛ مسعودی، م؛ سلطانی محمدی، س، ۱۳۹۲. انتخاب رابطه بهینه عدد لوژن و مقدار نفوذپذیری معادل در عملیات تزریق پی سد سیمره، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، ۱۳ ص.

سلگی، خ؛ نجمی، ع؛ میرقاسمی، ع، ۱۳۹۰. برآورد میزان تراوایی و مقدار تراوش در ساختگاه سد سیمره، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی، ۱۰ ص.

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۷۸. گزارش زمین‌شناسی مهندسی فاز دوم طرح سد و نیروگاه سیمره، ۲۲۱ ص.

محمودیان شوشتری، م، ۱۳۸۹. هیدرولیک آب‌های زیرزمینی، انتشارات دانشگاه شهید چمران، ۵۷۷ ص.

۱- شرایط مرزی در مدل به درستی لحاظ شده است. ۲- رابطه ارائه شده در این پژوهش جهت تبدیل عدد لوژن به هدایت هیدرولیکی از دقت خوبی برخوردار است. بر همین اساس می‌توان دبی زهکش‌ها را وقتی تراز مخزن در تراز نرمال آبیگری (۷۲۰) باشد، محاسبه کرد:

$$(8 \times 1/0.4) + (212 \times 1/0.5) = \text{دبی زهکش‌ها (تراز مخزن } 720) \\ = 222/6 + 8/32 = 230/92 = 231 \text{ } Ls^{-1}$$

#### ۴- نتیجه‌گیری:

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته با آزمون فشار آب در سازندهای سنگی ساختگاه سد سیمره نتایج زیر به دست آمده است:

۱- با انجام آزمون لوژن، به طور مستقیم نفوذپذیری ذاتی توده سنگ قابل اندازه‌گیری است.

۲- مقایسه نتایج به دست آمده از محاسبه میزان نشت از این رابطه با میزان اندازه‌گیری شده نشت از گالری‌های کنترلی، بیانگر دقت مناسب رابطه به دست آمده در این تحقیق است.

۳- نتایج اندازه‌گیری‌های مستقیم نشت آب از گالری‌های احداث شده در پایین دست نشان می‌دهد که پرده آب‌بند اجرا شده در سد سیمره از کیفیت مناسبی برخوردار بوده و در کاهش نشت مؤثر بوده است (حدود ۶۲ درصد).

۴- در تحلیل نشت در ساختگاه سدها، باید رفتار هیدرولیکی سنگ را نیز مدنظر قرار داد و نگاه ویژه‌ای به رفتار آب شستگی و انسداد معطوف داشت چرا که رفتار آب شستگی و انسداد هر دو تابع گذر زمان می‌باشند. در مقاطعی که رفتار آب شستگی و انسداد دارند، با گذر زمان مقدار آب‌گذری از این مقاطع به ترتیب بیشتر و کمتر می‌شود. بر اساس این مطالعات مشخص گردید که درزه‌های موجود در توده سنگ سازند آسماری بیشتر رفتار انسدادی از خود نشان می‌دهند که این امر به دلیل عملکرد مناسب تزریق دوغاب در آن‌ها بوده است. رفتار آب‌شستگی در این سازند بیشتر به شستگی سیمان رسی موجود در این سازند مربوط بوده که کمتر از ۱۰ درصد درزه‌های توده سنگ ساختگاه چنین رفتاری را نشان می‌دهند.

- Irzooki, R.B, 2016. Computation of Seepage through Homogenous earth Dams with Horizontal Toe Drain, eng. &Tech.Journal, Vol.34, Part (A), No.3, 2016, 430-440.
- Paisley, A; Wullenwaber, J; Bruce, Donald A, 2017. Practical Aspects of Water Pressure Testing for Rock Grouting, Conference Grouting Paper, 12p.
- Palmer, M; El-Idrysy, H, 2015. Comparison of Borehole Testing Techniques and Their Suitability in the Hydrogeological Investigation of Mine Sites, 10th International Conference on Acid Rock Drainage, 12p.
- Quiñones-Rozo, C., 2010. Lugeon test interpretation, revisited, Collaborative Management of Integrated Watersheds, US Society of Dams, 30th Annual Conference, S. 405–414.
- Qureshi, M.; Muzaffar K., Kamran; Bessaih, N.; Al-Mawali, K.; Al-Sadrani, K., 2014. An empirical Relationship between In-situ Permeability and RQD of Discontinuous Sedimentary Rocks, EJGE Vol. 19, 4781-4790.
- Soleymani, S; Akhtarpour, A, 2011. Seepage Analysis for Shurijeh Reservoir Dam Using Finite element Method, Geo-Frontiers Congress 2011, American society of civil engineering, 4 , 211 , 3227-3234.
- کربلا، م؛ کتیبه، ه، ۱۳۸۸. تزریق دوغاب سیمانی در سنگ، انتشارات تراوا اهواز، ۳۰۸ص.
- Canoğlu, M; Kurtuluş, B, 2017. Determination of the Dam Axis Permeability for the Design and the Optimization of Grout Curtain; an Example from Orhanlar Dam (Kütahya-Pazarlar). PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 5 No. 1, 37-43.
- El-Naqa, A., 2000. The hydraulic conductivity of the fractures intersecting Cambrian sandstone rock masses, central Jordan, environmental Geology, 973-995.
- Ewert, F., K., 1985. Rock grouting with emphasis on dam sites. Springer-Verlage, Berlin-Heilerberg. 428p.
- Fakhri, A; Ghanbari, A, 2013. A Simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core Journal of GeoEngineering, Vol. 8, and No. 1.27-32
- Fetter, C.W, 2000. Applied Hydrogeology, 4th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 598p.
- Habibi, V; Ajalloeian, A, 2013. Evaluate the permeability Damsite Jamishan with emphasis on engineering geology, International symposium on advances in science and technology, 7th SASTech, 13p.
- Hamm, s.; Kim, m; Cheong, j; Kim, j; Son, m; Kim, t, 2007. Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite, engineering Geology, Volume 92, Issues 1–2, 73–87.