

مطالعات کارست و بررسی ویژگی‌های تزریق پذیری پی سنگ سد اکباتان (طرح افزایش ارتفاع)

غلامرضا خانلری، دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا *

رضا حیدری ترکمانی، کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

علی اکبر مومنی، مربی، گروه زمین شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده:

سد اکباتان از نوع سد بتنی وزنی پایه دار است که بمنظور تامین آب آشامیدنی شهر همدان بر روی رودخانه یلفان و در فاصله ۵ کیلومتری از شهر همدان ساخته شده است. به دلیل پر شدن بیش از نیمی از ظرفیت سد توسط رسوبات و به منظور رفع مشکل فوق و تامین آب شرب مورد نیاز شهر همدان، پروژه افزایش ارتفاع سد اکباتان به عنوان راه حل اصلاحی انجام پذیرفته است. بستر قبلی سد بر روی سنگ‌های شیستی قرار داشته که در اثر افزایش در قاعده سد بعد از افزایش ارتفاع، بخشی از پی سد جدید بر روی سنگ های آهکی کارستی قرار گرفته است. این موضوع باعث ایجاد نگرانی‌هایی در خصوص وضعیت باربری و نشست پی سنگ کارستیک و همچنین افزایش احتمال فرار آب از طریق مجاری کارستی گردیده است. در این پژوهش بررسی های آزمایشگاهی و صحرایی به منظور ارزیابی خصوصیات زمین شناسی مهندسی پی سنگ انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سنگ- های آهکی موجود در پی سنگ، دارای خصوصیات مهندسی متوسط و قابلیت انحلال بالایی هستند. همچنین شکستگی‌هایی که همراستا با زون زاگرس می‌باشند، نقش مهمی در جهت یافتگی مجاری کارستی دارند. شناسایی زون های کارستی پی سنگ با حفر گمانه‌های اکتشافی و انجام آزمون های فشارآب انجام گردید است. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که زون های کارستی در تکیه گاه راست و بستر سد در بخش سطحی بوده و حداکثر تا عمق ۳۰ متری از سطح زمین ادامه دارند. با این وجود، کارستی شدن در تکیه گاه چپ در اعماق ۵۵-۸۰ متری گسترش پیدا کرده است. با توجه به لزوم اجرای عملیات افزایش ارتفاع سد، به منظور افزایش توان باربری پی سنگ و جلوگیری از فرار آب اقدام به اجرای پرده آبنند و عملیات تزریق سیمان گردیده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: سد اکباتان، افزایش ارتفاع، نفوذپذیری، تزریق پذیری، پی سنگ، کارست

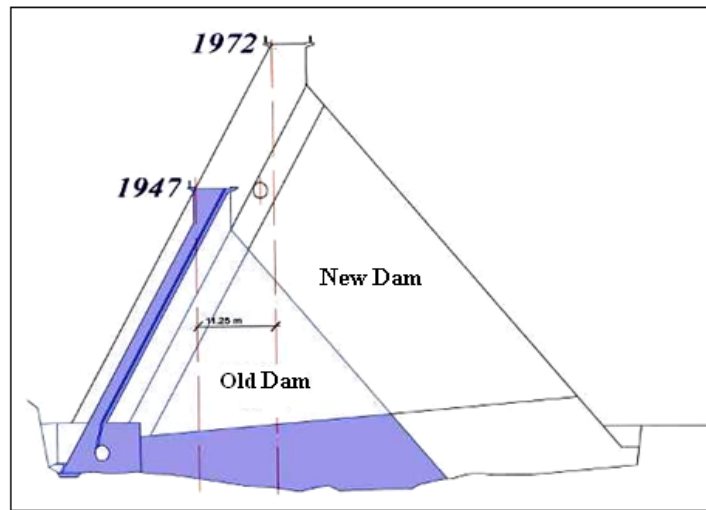
مقدمه

در حال حاضر موضوع پر شدن سدها از رسوبات، یکی از مهمترین مسائل و مشکلات مربوط به سدها در ایران می‌باشد که سد اکباتان از جمله مهمترین این سدها است. این سد از نوع بتنی وزنی پایه دار است که بر روی رودخانه یلفان در فاصله ۵ کیلومتری جنوب شرق همدان و همچنین در ۵ کیلومتری بالا دست سد آبشینه قرار گرفته است. به دلیل کاهش ظرفیت ذخیره آب بر اثر حجم رسوبات موجود در پشت سد و نیاز روز افزون شهر همدان به آب شرب و همچنین به منظور تامین آب کشاورزی و صنعت، در سال ۱۳۷۶ پیشنهاد طرح افزایش ارتفاع سد مطرح گردید. در نهایت مطالعات

مربوط به طرح افزایش ارتفاع این سد در سال ۱۳۸۰ توسط مهندسین مشاور بهان سد به انجام رسید و عملیات افزایش ارتفاع سد در سال ۱۳۸۵ به میزان ۲۵ متر به اتمام رسید. شکل ۱ تصویری از سد اکباتان را پس از افزایش ارتفاع نشان می‌دهد. حجم اولیه مخزن سد ۸ میلیون متر مکعب، ارتفاع اولیه سد ۵۰ متر و طول تاج اولیه ۲۸۶ متر بوده که بعد از افزایش ۲۵ متری در ارتفاع سد، حجم آن به ۴۰ میلیون متر مکعب و طول تاج به ۶۳۲ متر افزایش یافته است. پی سنگ اولیه سد بر روی سنگ های شیبستی قرار داشته که با عریض شدن قاعده سد ناشی از افزایش ارتفاع (شکل ۲) بخشی از پی سد بر روی سنگ های آهکی قرار گرفته است.



شکل ۱ - تصویر سد اکباتان پس از افزایش ارتفاع



شکل ۲- نیمرخ و تراز ارتفاع سد قدیم و جدید اکباتان

است. شیب طبیعی زمین در تکیه‌گاه راست حدود ۲۰ درجه و در تکیه‌گاه چپ تا رقم ۱۹۳۰ حدود ۲۸ درجه و از ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰ حدود ۱۲ درجه می‌باشد. شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی از محل سد اکباتان را نشان می‌دهد. ساختگاه سد اکباتان از سنگ‌های مختلفی تشکیل شده است که از قدیم به جدید به شرح زیر می‌باشند (حیدری ۱۳۸۵).

شیست‌های سیاه رنگ

این شیست‌ها، قسمت اعظم مخزن سد و نیز بخش عمقی پی را پوشانیده و به دلیل تحمل متامورفیسم شدید دارای کانی سیلیمانیت بوده و چین‌خوردگی و فشارهای زیاد تکنیکی را تحمل کرده است. به همین دلیل خواص مکانیکی عمومی آن در حد متوسط تا پایین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی عمومی ساختگاه سد

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی ناحیه مورد مطالعه در زون سندج - سیرجان قرار دارد و سنگ بستر آن از سنگ‌های دگرگونی تشکیل شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی چهار گوش همدان، قسمت اعظم حوضه آبریز رودخانه یلفان بر روی سنگ‌های گرانیتی، شیست‌های آندالوزیت، گرونا و سیلیمانیت‌دار و همچنین اسلیت‌ها و شیل‌های ژوراسیک قرار گرفته است. اغلب این سنگ‌ها فرسایش پذیری بالای دارند که این امر منجر به از بین رفتن بخش زیادی از حجم مفید سد گردیده است. بخش سمت راست مخزن و کف آن از جنس شیست‌های سیاه‌رنگ و جناح چپ از شیست، ماسه سنگ‌های آهکی، و شیل‌های ژوراسیک تشکیل شده است. از نگاه ژئومورفولوژی، دره‌ای که سد اکباتان بر روی آن بنا شده است، دارای مقطع نامتقارن

سنگ آهک های مارنی

سنگ آهک های مارنی بر روی شیست های سیاه رنگ به طور هم شیب قرار گرفته اند و متعلق به ژوراسیک می-باشند. امتداد لایه های مذکور به طور عمده، شرقی غربی و شیب لایه ها عموماً به سمت پایین دست و متمایل به تکیه گاه چپ می باشد. این سنگ ها، دارای میان لایه-های آهک شیلی بسیار نازک لایه و اسلیت می باشند. بخشی از این سنگ ها که در مسیر آب های زیرزمینی و یا سطحی قرار گرفته اند، به شدت کارستی شده و حفرات انحلالی در امتداد درز و شکاف های آنها، دیده می شوند.

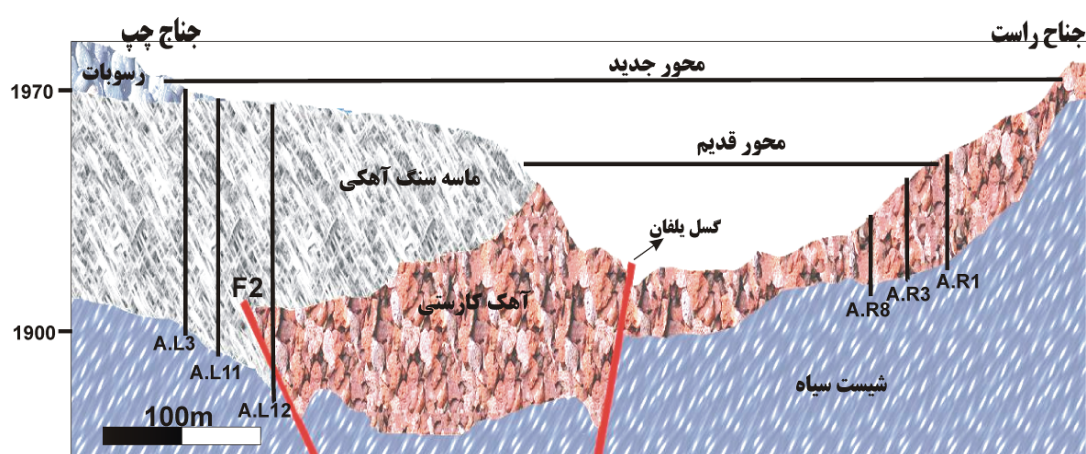
ماسه سنگ های آهکی

ماسه سنگ های آهکی در هر دو تکیه گاه سد به طور دگرشیب بر روی سنگ های آهکی مارنی قرار گرفته اند. امتداد این سنگها مانند آهک های مارنی، شرقی-

غربی بوده و شیب آنها به سمت پایین دست سد (شمالی) و متمایل به جناح چپ می باشد.

رسوبات آبرفتی

در این منطقه، رسوبات آبرفتی روی سازندهای قدیمی تر را با ضخامتهای متغیر پوشانیده اند. این رسوبات به صورت رسوبات واریزه ای هستند که شامل ذراتی در حد شن، قلوه سنگ و مخلوطی از رس و سیلت می باشند که در جناح راست سد، دامنه پایین دست را می پوشانند. بخش دیگر رسوبات آبرفتی، تراسهای آبرفتی قدیمی موجود در تکیه گاه چپ می باشد که به صورت زبانه ای روی آهک های ماسه ای را می پوشانند. جنس این رسوبات بیشتر از قلوه سنگهای کاملاً گرد شده و از جنس گنیس و شیست می باشد که در زمینه ای از ماسه و شن قرار گرفته اند.



شکل ۳ - مقطع شماتیک زمین شناسی ساختگاه سد اکباتان

زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه

ساختگاه سد اکباتان دارای تنوعی از ساختمانهای زمین‌شناسی و حضور حفرات کارستی می‌باشد. این وضعیت موجب پیدایش مشکلات فنی بخصوص از دیدگاه ظرفیت باربری پی سنگ و پتانسیل فرار آب می‌گردد. پدیده فرار آب از طریق مجاری انحلالی در بسیاری از سد های کارستی جهان مشاهده گردیده و موضوع آب بندی محل سد در چنین مناطقی، یکی از مسائل اساسی در پروژه های سد سازی است که نیازمند شناخت کامل از شرایط زمین‌شناسی محل می‌باشد (میلانویچ، ۲۰۰۴). گسترش کارست در گرو وجود دو عامل می‌باشد. نخست اینکه توده سنگ قابلیت انحلال داشته باشد و دوم اینکه زمینه تشکیل یک سیستم جریان آب زیرزمینی (حضور ناپیوستگی‌ها) فراهم گردد. بدین منظور مطالعات زمین‌شناسی مهندسی کارست در

ساختگاه سد اکباتان در دو بخش مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی انجام گردیده است.

مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی آهک های پی سنگ سد شامل مطالعات پتروگرافی، تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، تعیین درجه خلوص کربنات کلسیم، تعیین ثابت سرعت انحلال و پتانسیل باز شدگی درزه‌ها می‌باشند. مطالعات پتروگرافی نشان داده است که بر اساس رده بندی دانهام نام این سنگ ها و کستون بوده که به شدت دگرشکلی دینامیکی را تحمل کرده اند. همچنین تخلخل حفره ای به عنوان تخلخل غالب در این سنگ ها تشخیص داده شده است (شکل ۳) (خانلری و همکاران ۱۳۸۸).



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی از سنگ آهک اکباتان در نور xpl

خلوص این سنگ ها، انجام گرفته که نتایج آن نشان می‌دهد میزان خلوص کربنات کلسیم این سنگ‌ها ۷۹ درصد می‌باشد. آزمایش تعیین خصوصیات فیزیکی و

با توجه به این مطلب که درصد کربنات کلسیم از عوامل موثر در انحلال پذیری سنگ‌های آهکی می‌باشد، آزمایش کلسیمتری به روش تیتراسیون و بمنظور تعیین

سنگ‌ها ۲۷ درصد می باشد. همچنین میانگین مقاومت کششی برزیلی و فشاری تک محوره در حالت اشباع به ترتیب ۱۱/۹۹ مگاپاسکال و ۸۷ مگاپاسکال بدست آمده که نشان دهنده کیفیت متوسط برای این سنگ‌ها می باشد (خانلری و همکاران ۱۳۸۸).

مکانیکی آهک های پی سنگ بر اساس استاندارد ISRM انجام گردیده است که نتایج آنها به اختصار در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. همانطور که در جدول ۱ دیده می شود، این سنگ‌ها چگالی بالا و تخلخل پایینی دارند. نتایج آزمایش سایش لس آنجلس نشان می دهد که درصد افت وزنی در ۱۰۰۰ دور برای این

جدول ۱- نتایج آزمایش خصوصیات فیزیکی سنگ آهک سد اکباتان

(%)	(%)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
/	/	/	/
۰/۴	۰/۱۴	۲/۷۲۸	۲/۷۲۴
۰/۳۴	۰/۱۲	۲/۷۳۹	۲/۷۳۵
۰/۳۳	۰/۱۱	/	/

جدول ۲- نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی سنگ آهک سد اکباتان در حالت اشباع

	σ_c (Mpa)	Is ₅₀ (Mpa)	σ_t (Mpa)	
حد اقل	۷۵/۱۵	۱/۵	۹/۲۷	خیلی پایین
میانگین	۸۷	۲/۳۵	۱۱/۹۹	متوسط
حداکثر	۹۸/۸۶	۳/۵۶	۱۴/۷۲	متوسط

هستند. همچنین با توجه به این نکته که بعد از آبیگری و بالا رفتن فشار آب، درزه های موجود در توده سنگ مسیرهای فرار آب را تشکیل می دهند، آزمون بازشدگی درزه ناشی از جریان آب بر روی درزه های نیم و یک میلیمتری به مدت ۴۹ روز انجام گرفته است. در نهایت میزان بازشدگی برای درزه های یک میلیمتری ۰/۰۹۷۹ میلیمتر و برای درزه های نیم میلیمتری ۰/۰۲۱۴

به منظور ارزیابی پتانسیل ذاتی سنگ برای انحلال پذیری، آزمایش تعیین ثابت سرعت انحلال در سه محدوده از اسیدیته (۵/۶-۷، ۷-۵/۷، ۵/۷-۸) انجام گردیده است. نتایج این آزمایشات در دو روش حجمی و وزنی مورد تحلیل قرار گرفته اند (جدول ۳). نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان می دهند که این سنگ‌ها دارای پتانسیل بالای از نظر انحلال پذیری

میلیمتر بدست آمد. بر این اساس، بازشدگی درزه‌های یک میلیمتری در طی ۵۰ سال می‌تواند به ۳۴ میلیمتر برسد (خانلری و همکاران ۱۳۸۸).

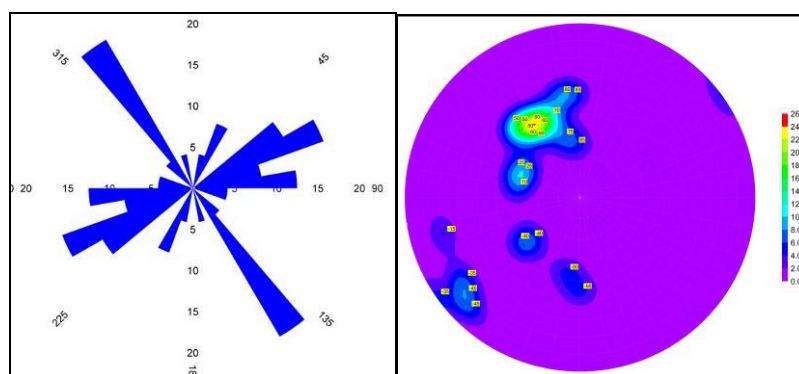
جدول ۳- نتایج آزمایش تعیین ثابت سرعت انحلال بر حسب متر بر ثانیه در اسیدیتته‌های متفاوت

اسیدیتته	۶/۵-۷	۷-۷/۵	۷/۵-۸
روش وزنی	2.10×10^{-5}	1.24×10^{-5}	9.40×10^{-6}
روش حجمی	1.97×10^{-5}	4.92×10^{-5}	1.64×10^{-5}

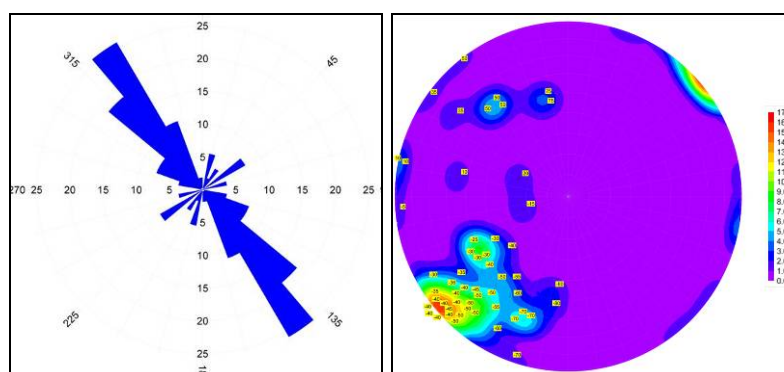
در این جناح دارای ۳ دسته درزه می‌باشد که توزیع آماری آن در شکل ۴ نشان داده شده است. این مطالعات در تکیه گاه چپ نشان می‌دهد که میزان پراکندگی جهت یابی درزه‌ها در این جناح کمتر بوده و دسته درزه غالب هم جهت با روند ساختار کلی منطقه می‌باشد (شکل ۵) (خانلری و همکاران ۱۳۸۵). همچنین نتایج گمانه‌های حفاری شده حکایت از حضور دو گسل در بستر سد دارد.

مطالعات صحرائی

مطالعات صحرائی انجام شده شامل مطالعات درزه نگاری، حفر گمانه‌های اکتشافی و انجام آزمون‌های برجا بوده است. با توجه به نقش ناپیوستگی‌ها در رفتار مهندسی سنگ، بخصوص از دیدگاه فرار آب و گسترش کارست، مطالعات درزه نگاری در هر دو تکیه گاه انجام گردیده است. مطالعات درزه‌نگاری انجام شده در تکیه گاه راست نشان می‌دهند که توده سنگ موجود



شکل ۴- توزیع آماری ناپیوستگی‌های جناح راست



شکل ۵- توزیع آماری ناپیوستگی های جناح چپ

شود. همچنین در بخش مرکزی پی سنگ سد، حفره های کارستی از سطح زمین تا عمق ۳۰ متری با قطرهای متفاوت مشاهده شده اند. قطر حفره های کارستی از ۱۰ سانتی متر تا ۷ متر متغیر بوده است. شکل (۶) شواهدی از حفرات کارستی تخلیه شده از مصالح رسی که بایستی عملیات تزریق و بهسازی بر روی آنها انجام پذیرد را نشان می دهد.

به منظور شناسایی و درک وضعیت زیر سطحی پی سنگ، اقدام به حفر گمانه های اکتشافی گردید. نتایج حاصل از حفر این گمانه ها و مطالعه آنها (Core Logging) نشان داده است که در جناح چپ سد، پدیده کارست در عمق ۵۵ متری از سطح زمین گسترش قابل توجهی پیدا کرده است، در صورتیکه در جناح راست، پدیده کارست فقط در ۵ متر اول سطح زمین دیده می



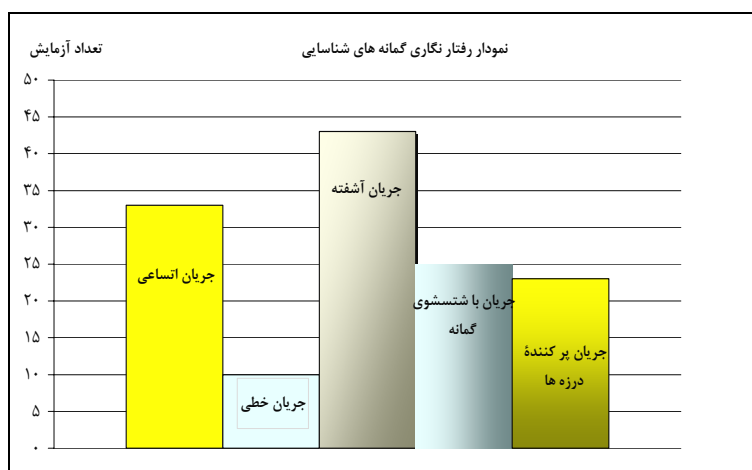
شکل ۶- عملیات شستشو و تخلیه حفرات کارستی حاوی رس در پی سنگ سد اکباتان

سد اکباتان جمعاً بیش از ۳۰۰ آزمایش فشار آب (WPT) یا آزمایش نفوذپذیری از طریق حفر گمانه های قائم و مایل در دو جناح چپ و راست پی سنگ به انجام

آزمایش فشار آب را می توان به عنوان مرسوم ترین آزمایش برجا در محیط های سنگی دانست، بخصوص اگر وضعیت تراوایی پی سنگ مهم باشد. در ساختگاه

رسیده است. فشارهای به کار رفته در این آزمایش (بر حسب بار)، به ترتیب ۰-۲/۵-۵-۱۰-۵-۲/۵-۰ بوده و طول مقطع هر آزمایش ۵ متر بوده و مدت زمان هر آزمایش ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۳). باتوجه به معیار لوژن اگر نفوذپذیری بیش از ۱۰ لوژن باشد، تزریق برای اغلب انواع سدها مورد نیاز است (Houlsby 1985). تحلیل نتایج آزمون‌های فشار آب انجام شده در ساختگاه سد اکباتان نشان می‌دهند که به طور میانگین کیفیت توده سنگ از نظر نفوذپذیری در حد توده سنگ نفوذناپذیر تا نفوذپذیری کم قرار دارد. با این وجود، در بخش‌های کارستی میزان نفوذپذیری تا حد نفوذپذیری خیلی بالا هم می‌رسد. در واقع این مطلب از ویژگی‌های محیط‌های کارستی است که بر ناهمسانی محیط می‌افزاید و تصمیم‌گیری را مشکل می‌نماید. لذا در چنین شرایطی باید

آزمون فشار آب در سطح گسترده‌ای انجام پذیرد و ویژگی‌های تراوایی هر مقطع به منظور لزوم و نحوه انجام عملیات بهسازی در نظر گرفته شود. به منظور ارزیابی وضعیت رفتار هیدرولیکی پی سنگ، اقدام به تفسیر نمودارهای فشار-جریان به دست آمده از آزمایشات فشار آب گردیده است. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، عمده رفتار هیدرولیکی پی سنگ به صورت جریان آشفته می‌باشد. این نوع رفتار بیانگر برخورد به نواحی کارستی می‌باشد. جریان اتساعی دومین رفتار هیدرولیکی غالب پی سنگ بوده که به نوعی نشانگر رفتار شکست هیدرولیکی می‌باشد. در واقع فشار اعمال شده به هنگام انجام آزمون فشار آب، فشار بحرانی بوده و باعث باز شدن شکستگی‌های موجود در توده سنگ شده و در نتیجه نفوذپذیری به شدت افزایش یافته است.



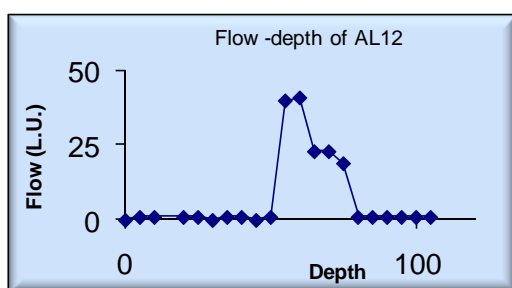
شکل ۷- نمودار رفتار نگاری گمانه‌های شناسایی

مقدار جریان آب نفوذی ابتداء در حدود صفر است. به محض رسیدن به عمق ۵۵ متری به دلیل رسیدن به زون کارستی و احتمالاً برخورد با گسل F2 نفوذپذیری از

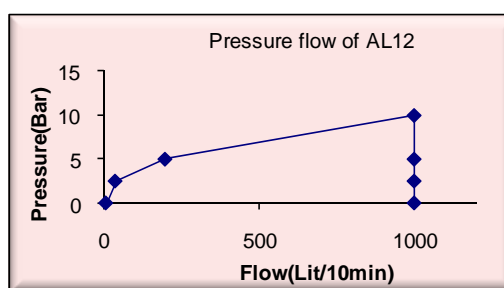
در شکل ۸ رفتار توده سنگ دربرگیرنده گمانه AL12 به عنوان شاخص رفتار توده سنگ در تکیه‌گاه چپ آورده شده است. همانطور که از شکل ۸-الف پیداست

چگونگی فرایند شستشوی حفره مشاهده می شود. قسمت انتهایی نمودار که افت قائمی دارد، نشان دهنده باز شدن مسیرهای آب می باشد. احتمالاً دلیل افت قائم نمودار، عدم توان پمپ آب در تامین آب به میزان بالاتر از ۱۰۰۰ لیتر در ده دقیقه بوده است.

صفر به ۴۰ لوژن افزایش می یابد. این افزایش در نفوذپذیری تا عمق ۸۰ متری ادامه داشته و پس از آن دوباره به شدت کاهش می یابد. در شکل ۸- ب نمودار فشار-جریان آب حاصل از نتایج آزمایش های نفوذپذیری در گمانه AL12 با عمق نهایی ۱۰۵ متر در جناح چپ، نشان داده شده است. در این نمودار،



()

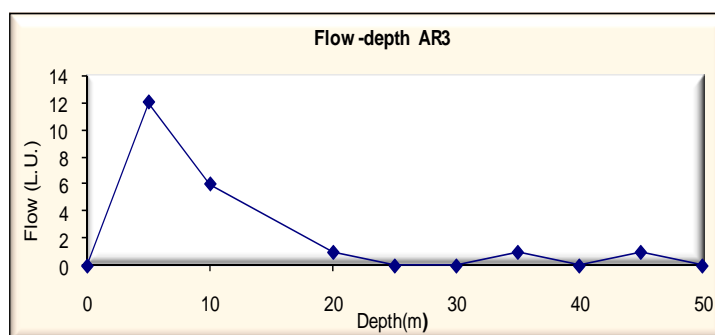


()

شکل ۸- الف) نمودار رابطه نفوذ پذیری با عمق در گمانه AL12 (ب) نمودار آزمایش نفوذ پذیری مربوط به جناح چپ سد در همان گمانه

های نفوذ پذیری گذاشته شده است، مربوط به ۲۰ متر اول گمانه است و بعد از عمق ۲۰ متری، نفوذپذیری کاهش می یابد که نشان دهنده عدم گسترش کارست از این عمق به بعد می باشد.

در شکل ۹، تغییرات نرخ میزان جریان آب با عمق در گمانه AR3 به عنوان نماینده تکیه گاه راست نشان داده شده است. همانگونه که از شکل فوق مشخص است، تاثیری که از سوی حفره های کارستی بر روی شاخص



شکل ۹- رابطه مقدار جریان آب با عمق در گمانه AR3 در جناح راست

جناح چپ حدود ۱۰۵ متر و در جناح راست حدود ۶۰ متر می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۸۰، ۱۳۸۳).

به منظور ترمیم سنگ آهک کارستی، اولین مرحله، تعیین موقعیت دقیق حفره‌های کارستی و دومین مرحله امکان دسترسی به حفره‌های شناسایی شده می‌باشد. در این پروژه، برای تعیین موقعیت و دسترسی به حفره‌های کارستی از حفاری گمانه‌های اکتشافی استفاده شده است. بدیهی است که ترمیم حفره‌های کارستی با استفاده از گمانه، بسیار مشکل‌تر از حالتی است که این حفره‌ها در بخش سطحی قرار داشته و به راحتی قابل دسترسی می‌باشند. در بخش‌های که کارست سطحی بوده، روش بهسازی به این صورت بوده است که ابتدا حفره‌ها به دقت تمیز شده و سپس با استفاده از بتن کم عیار پر شده‌اند. پس از انجام این مرحله از تزریق و سخت شدن مواد تزریقی، به منظور تکمیل شدن عملیات ترمیم حفره‌ها و پر کردن مسیرهای احتمالی باقیمانده، گمانه‌هایی بر روی بخش ترمیم شده حفره‌گردیده‌اند و عملیات تکمیلی تزریق مجدداً انجام گرفته است. در شکل ۱۰ حفرات کارستی مربوط به پی سنگ سد اکباتان ملاحظه می‌گردد که کارگران مشغول تخلیه مصالح رسی داخل آن حفره به منظور پر کردن آن با بتن هستند. با توجه به مقیاس اندازه افرادی که در حال کار هستند، ابعاد حفرات کارستی بزرگ و قابل ملاحظه می‌باشند.

روش بهسازی

قرار گرفتن پی سنگ سد جدید بر روی سنگ‌های کارستی اجرای یک پرده آبنده را برای جلوگیری از فرار آب الزام می‌کند. با توجه به اینکه در طرح افزایش ارتفاع سد، تعداد ۲۷ بلوک جدید هر کدام با عرض ۱۳ متر به مجموعه سد قدیمی اضافه شده است، لذا به منظور شناسایی پی سنگ در مرحله افزایش ارتفاع جهت طراحی عملیات تزریق، به ازای هر بلوک جدید، یک گمانه شناسایی حفره‌گردیده است. گمانه‌های شناسایی با نام سری A معرفی شده‌اند. از آنجائیکه گمانه A در یک بلوک واقع شده است بنابراین گمانه‌های A با فاصله ۱۳ متر از یکدیگر قرار دارند. در مواردیکه با توجه به نتایج حاصل از تزریق در گمانه‌های سری A، فاصله بین دو گمانه A نیازمند تزریق تشخیص داده شوند، این فاصله به چهار قسمت مساوی تقسیم شده و گمانه‌های سری P حفاری و سپس تزریق شده‌اند. در نهایت در صورتی که با توجه به تزریق‌های انجام شده، فاصله بین گمانه‌های P نیز نیازمند تزریق تشخیص داده شده‌اند، در نقطه میانی فاصله بین گمانه‌های P گمانه‌های سری S حفاری و تزریق گردیده‌اند. در مجموع با انجام مراحل فوق، حدود ۱۸۰۰۰ متر گمانه در پی سنگ سد اکباتان حفاری و عملیات تزریق در آنها صورت گرفته است. بنابراین پرده تزریق جدید سد اکباتان در طرح افزایش ارتفاع، دیواره‌ای نفوذناپذیری در مقابل فرار آب است که طول آن حدود ۷۰۰ متر و عمق آن در



شکل ۱۰- مراحل آماده سازی حفره های سطحی به منظور بهسازی با تزریق سیمان

گرفته و تا حصول نتیجه قابل قبول این چرخه تکرار شده است. به منظور ارزیابی رابطه بین نفوذپذیری آزمون فشار آب و تزریق پذیری، اورت (۱۹۸۵) چهار محدوده بین درجه جذب آب و جذب مواد تزریقی ارائه نموده است. محدوده‌های چهارگانه عبارتند از:

A- توده سنگهای با جذب آب زیاد ولی با جذب سیمان کم که شکستگی بیشتری دارند، اما این مسیرها خیلی باریک و تنگ هستند (باز شدگی درزه‌ها کم است). به همین دلیل، میزان آبخوری چنین توده سنگ‌هایی زیاد و تزریق پذیری آنها نیز کم می‌باشد.

B- توده سنگهای با درجه جذب آب زیاد و سیمان زیاد که نفوذ پذیر بوده و بنابراین دارای تزریق پذیری زیاد هستند و نیاز است که در آنها عملیات تزریق و یا در صورت نیاز عملیات ترمیم صورت پذیرد.

C- توده سنگهایی که میزان آب کمی جذب می‌کنند ولی به دلیل پدیده شکست هیدرولیکی ناشی از افزایش فشار مواد تزریقی در حین انجام عملیات تزریق، از تزریق پذیری بالایی برخوردار می‌باشند. به عبارت دیگر، با توجه به پایین بودن نفوذپذیری، این گروه از

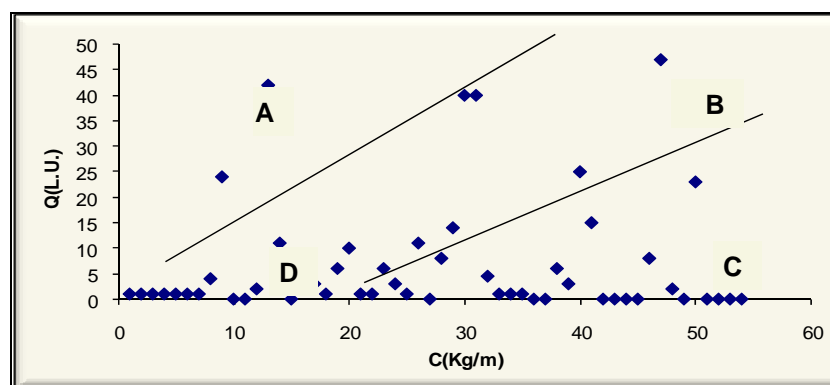
از آنجا که حفره های کارستی در جناح چپ در عمق ۵۰ متر به پایین واقع گردیده اند، لذا تخلیه مصالح داخل حفره ها و تمیز کردن آنها به منظور انجام عملیات ترمیم، مشابه آنچه در بخش‌های سطحی پی سنگ انجام گرفت، امکانپذیر نمی‌باشد. به همین دلیل، حفره ها با روش تزریق از طریق گمانه های حفاری شده و با استفاده از مواد تزریقی ترمیم گردیدند. از آنجا که در طی روند تزریق، استفاده از فشار متعادل و بدون ایجاد شکست هیدرولیکی، فقط باعث پر شدن حفره های بزرگ می‌شود، بنابراین با استفاده از این روش، قطعاً حفره های کوچک پر نخواهند شد. چنانچه صرفاً به چنین روش تزریقی اکتفا شود، نتیجه تزریق حاصله چندان اطمینان بخش نخواهد بود. برای رفع این مشکل، مجدداً در محل تجمع حفره های کارستی، گمانه هایی با عنوان گمانه های کنترلی حفاری گردیده و تحت آزمایش آب قرار گرفتند. پس از این مرحله، با کنترل نتایج عملیات تزریق، در مواردی که نتایج نفوذپذیری بیشتر از یک لوژن بوده است، اقدام به شستشوی گمانه با استفاده از آب گردیده و سپس تزریق مجدد انجام

بالا (بیشتر از ۵ لوژن در بخش مرکزی دره و در جناح چپ) و همچنین جذب سیمان بسیار بالا (بیشتر از ۵۰ کیلوگرم در متر طول گمانه در جناح راست سد) می‌باشند و در بخشهایی نیز مقادیر لوژن پایین (کمتر از ۵ لوژن) و همچنین جذب سیمان پایین (کمتر از ۵۰ کیلوگرم در متر طول گمانه) را از خود نشان می‌دهند. در نهایت، با توجه به پراکندگی نقاط بر روی شکل ۱۱ و مقایسه آن با نمودار ارائه شده توسط اورت (۱۹۸۵)، بخش اعظمی از گمانه‌های ساختگاه سد اکباتان در محدوده‌های گروه D و گروه C از تقسیم بندی مذکور، قرار می‌گیرند.

توده سنگها ظاهراً نیاز به تزریق ندارند و میزان جذب زیاد مواد تزریقی توسط این گروه از توده سنگها، در نتیجه شکست هیدرولیکی می‌باشد.

D- توده سنگهای با جذب آب کم و همچنین جذب مواد تزریقی کم، که عملاً در برابر نفوذ آب مقاوم هستند و بنابراین نیازی به تزریق و عملیات ترمیمی ندارند.

در همین راستا، نتایج آزمایش‌های لوژن و نتایج تزریق‌های انجام شده در ساختگاه سد اکباتان به منظور ارزیابی رابطه بین این دو پارامتر مقایسه شده‌اند. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهند که سنگ آهک کارستی منطقه سد اکباتان در برخی از موارد، دارای مقادیر لوژن



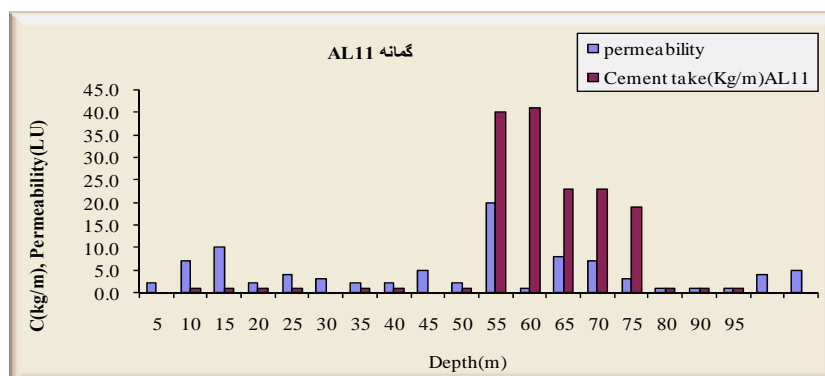
شکل ۱۱- رابطه بین نفوذ پذیری و تزریق پذیری (Q) و جذب سیمان (C)

نتایج نفوذپذیری و خوردند دوغاب در گمانه A111 موجود در تکیه گاه چپ نشان می‌دهد که در این گمانه تا عمق ۵۰ متری مقدار جذب سیمان در حد کمتر از یک کیلوگرم در متر طول گمانه می‌باشد، اما در عمق ۵۵ متری مقدار نفوذپذیری معادل ۲۰ واحد لوژن و مقدار جذب سیمان به ۴۰ کیلوگرم بر متر در طول گمانه رسیده است، در حالی که در عمق ۸۰ متری مقدار نفوذ

همانطور که در شکل ملاحظه می‌گردد، همیشه ارتباط منطقی بین میزان نفوذپذیری و خوردند دوغاب دیده نمی‌شود. این موضوع به خاطر تفاوت در گرانیروی آب و سیمان تزریقی، تفاوت در فشاری که به کار برده می‌شود و همچنین تفاوت در بازشدگی درزه‌های موجود می‌باشد. با این وجود، در مجاری کارستی معمولاً ارتباط منطقی بین این دو پارامتر وجود دارد. به عنوان مثال،

نفوذ پذیری و مقدار دوغاب جذب شده در طی عملیات ترمیمی تزریق وجود دارد.

پذیری ۱ لوژن و مقدار تزریق پذیری ۱ کیلوگرم بر متر در طول گمانه می باشد. از این نتایج چنین استنباط می شود که رابطه مستقیمی بین مقادیر حاصل از آزمایش



شکل ۱۲- رابطه بین میزان تزریق و نفوذ پذیری در گمانه AL11 در جناح چپ

وجود، به دلیل پیچیده بودن این مناطق، می بایستی از روش های کنترلی هم استفاده گردد. پی سنگ اولیه سد اکباتان تماما بر روی سنگ های شیستی قرار داشته است. پس از افزایش در ارتفاع سد، عریض شدن قاعده سد باعث گردیده است که بخشی از پی سنگ بر روی سنگ های آهکی قرار گیرد. این موضوع، اجرای پروژه را با دو مشکل جدی مواجه ساخته است. نخست اینکه، سنگ های تشکیل دهنده پی سنگ رفتار مهندسی متفاوتی داشته و دوم اینکه، سنگ های آهکی موجود کارستی می باشند. علاوه بر این که سنگ های آهکی در مقایسه با سنگ های شیستی مقاومت خوبی دارند ولی فشار اعمالی از طرف ستون آب پشت سد و وزن سازه سد بر روی حفرات کارستی می تواند باعث تخریب طاق سنگی بالای حفره بدرون آنها گردد. در چنین شرایطی، زیر پی خالی شده و سازه با توجه به صلب بودن آن می تواند ترک برداشته و نهایتا شکسته شود. از

بحث و نتیجه گیری

اجرای سازه های مهندسی در سنگ معمولا با مشکلات ژئوتکنیکی همراه است. در صورت عدم شناخت کامل از شرایط زیر سطحی و زمین شناسی منطقه، اجرای این قبیل پروژه ها می تواند با شکست مواجه گردد. در همین مناطق کارستی یکی از مهمترین مناطق بغرنج برای اهداف مهندسی عمران است. چنانچه ارزیابی مناسبی از شرایط زیر سطحی انجام نگردد، کارکردن در این مناطق برای مهندسین عمران با مشکلات فراوانی همراه است. لذا در این مناطق، می بایستی شناخت کاملی از مکانیسم تشکیل کارست و چگونگی گسترش آن بدست آورد. بدین منظور لازم است که در غالب مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی این پدیده به تفصیل مطالعه گردد. شناخت مناسب از این پدیده، تصمیم گیری در مورد نحوه بهسازی را آسان تر نموده و باعث افزایش کارایی روش به کار برده شده می گردد. با این

سطحی با شستشوی مواد پرکننده حفرات و سپس پر کردن حفره تمیز شده با بتن کم عیار بهسازی شده و بخش‌های که در اعماق بیشتر قرار داشته‌اند با حفر گمانه و انجام عملیات تزریق بهسازی گردیده‌اند. مقایسه نتایج لوژن و خوردند دوغاب نشان می‌دهد که این دو پارامتر ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارند. با این وجود، در بخش‌های که مجاری کارستی باز وجود دارند، روند تغییرات این دو پارامتر هم‌روند بوده و یک ارتباط منطقی بین آنها دیده می‌شود. این پروژه، اولین تجربه افزایش ارتفاع سد در این ابعاد در ایران محسوب می‌گردد که خوشبختانه با شناخت مناسب از شرایط زیر سطحی و اجرای سریع و خوب آن، بعنوان یکی از پروژه‌های موفق و قابل تعمیم به سایر پروژه‌هایی است که با چنین مشکلی مواجه هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان از کمک‌های مهندسی مشاور بهان سد به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات تزریق‌های انجام شده به ویژه از آقایان بهمن و ناصر خیرخواه سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

- ۱- حیدری، ر.، ۱۳۸۵، بررسی مسائل زمین‌شناسی مهندسی سد اکباتان با نگرش بر طرح افزایش ارتفاع سد: پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.
- ۲- خانلری، غ.، اقصایی، ف.، حیدری، ر.، ۱۳۸۵، نقش زمین‌شناسی مهندسی در طرح افزایش ارتفاع

طرفی با توجه به وجود تجربه‌های شکست خورده سد سازی در محیط‌های کارستیک در نقاط مختلف ایران نظیر سد لار و ۱۵ خرداد، در صورتی که بهسازی و اجرای روش‌های آبیندی به درستی انجام نگردد، احتمال شکست پروژه می‌تواند وجود داشته باشد. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته، سنگ آهک پی سنگ دارای مقاومتی در حد متوسط می‌باشد. این سنگ‌ها نسبتاً درجه خلوص بالایی داشته و از پتانسیل انحلال‌پذیری بالایی برخوردارند. این مطلب، احتمال حضور پالئوکارست را در سطح وسیعی در ذهن تدائی می‌کند. با این وجود، می‌بایستی با استفاده از روش‌های مستقیم نظیر حفر گمانه، وضعیت پراکندگی کارست ارزیابی گردد. نتایج حفاری گمانه‌های اکتشافی حکایت از حضور گسترده کارست در بخش‌های سطحی تکیه گاه راست و بستر سد دارند که گسترش آن تا عمق ۲۰ متری ادامه دارد. این بخش، هم از دیدگاه ظرفیت باربری و هم آبیندی می‌تواند مشکل‌زا باشد. در تکیه گاه چپ یک زون کارستی در اعماق ۸۰-۵۵ متر تشخیص داده شده است که برای آبیندی سد می‌تواند مسئله ساز باشد. مطالعه ناپیوستگی‌های موجود نشان می‌دهد که دسته درزه اصلی موجود در ساختگاه سد همراستا با روند اصلی زاگرس بوده و عمدتاً جهت یافتگی مجاری کارستی را کنترل می‌نماید. بعلاوه دو گسل در زیر بستر شناسایی گردیده‌اند که در گسترش کارست و فرار آب می‌توانند نقش مهمی را بازی کنند. با توجه به موارد گفته شده لزوم ترمیم بخش‌های سطحی و اجرایی یک پرده آبیند به منظور افزایش توان باربری و جلوگیری از فرار آب اجتناب‌ناپذیر است. بخش‌های

سدها: دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- خانلری، غ.، قبادی، م.ح.، سلیمی، س.، ۱۳۸۸، امکان ارزیابی خصوصیات مهندسی سنگ های آهکی با استفاده از خواص فیزیکی آنها. ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- خانلری، غ.، قبادی، م.ح.، سلیمی، س.، دوستی، م.، ۱۳۸۸، بررسی انحلال پذیری سنگ های آهکی جنوب و جنوب شرق استان همدان. ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

۵- وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه ای غرب، ۱۳۸۰، گزارش زمین شناسی مهندسی طرح افزایش ارتفاع سد اکباتان: مهندسین مشاور بهان سد.

۶- وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه ای غرب، ۱۳۸۳، گزارشهای تست و تزریق در ساختگاه سد اکباتان: شرکت ایران تزریق پمپ، آرشیو فنی سد اکباتان.

7- Ewert, F.K, 1985, Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites: Springer Berlia. 428p.

8- Houlsby, A. C., 1985, Design and construction of cement grouting, A Guide to grouting in Rock Foundations: John Wiley & Sons, Inc Net. York. 441 p.

9- Millanovic, P., 2004, Water resources engineering in karst. CRC, 312 p.