

بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد خرسان ۲

مجتبی رحیمی شهید^۱، نیما رحیمی^۲

^{۱*} گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

^۲ دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

Mr619htt@gmail.com

چکیده

هر ساختگاه سد خرسان ۲ در ۶۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان لردگان واقع شده است. ساختگاه سد بر روی یال شمالی تاقدیس سرکمر قرار گرفته است. شیب و راستای لایه‌بندی در دو تکیه‌گاه تقریباً مشابه است. دره محل سد یک دره ۷ شکل و نامتقارن است. دسته‌دره‌های موجود در منطقه، تحت یک سیستم واحد (متأثر از ساختار تشکیل چین‌خوردگی) ایجاد شده‌اند. در این مقاله جهت بررسی زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد خرسان ۲، آزمایش‌های برجا شامل؛ دیلاتومتری، برش مستقیم برجا، بارگذاری صفحه‌ای، لوژون و شاخص کیفی سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به مطالعات ژئومکانیکی صورت پذیرفته، میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری برآورد شده از آزمون دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای به ترتیب، ۸/۸۴ و ۲۰/۴۵ گیگاپاسکال و همچنین میانگین ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک برآورد شده از آزمایش برش مستقیم برجا، ۰/۷۷ و ۳۷/۶ درجه است. بر اساس آزمایش لوژون، تکیه‌گاه چپ بیشترین نفوذپذیری را نسبت به تکیه‌گاه راست و بستر سد دارد. طبق تقسیم‌بندی کیفی سنگ‌ها بر اساس RQD توده‌سنگ‌های بستر سد در ردیف خوب قرار می‌گیرند. البته شایان‌ذکر است که تکیه‌گاه و ساحل چپ، کمترین مقدار RQD را دارند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی مهندسی، عملیات سنگی، سد خرسان ۲، پارامترهای ژئومکانیکی.

۱. مقدمه

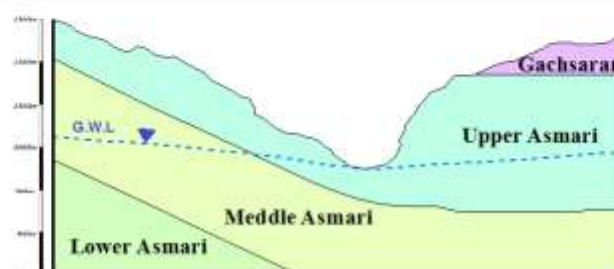
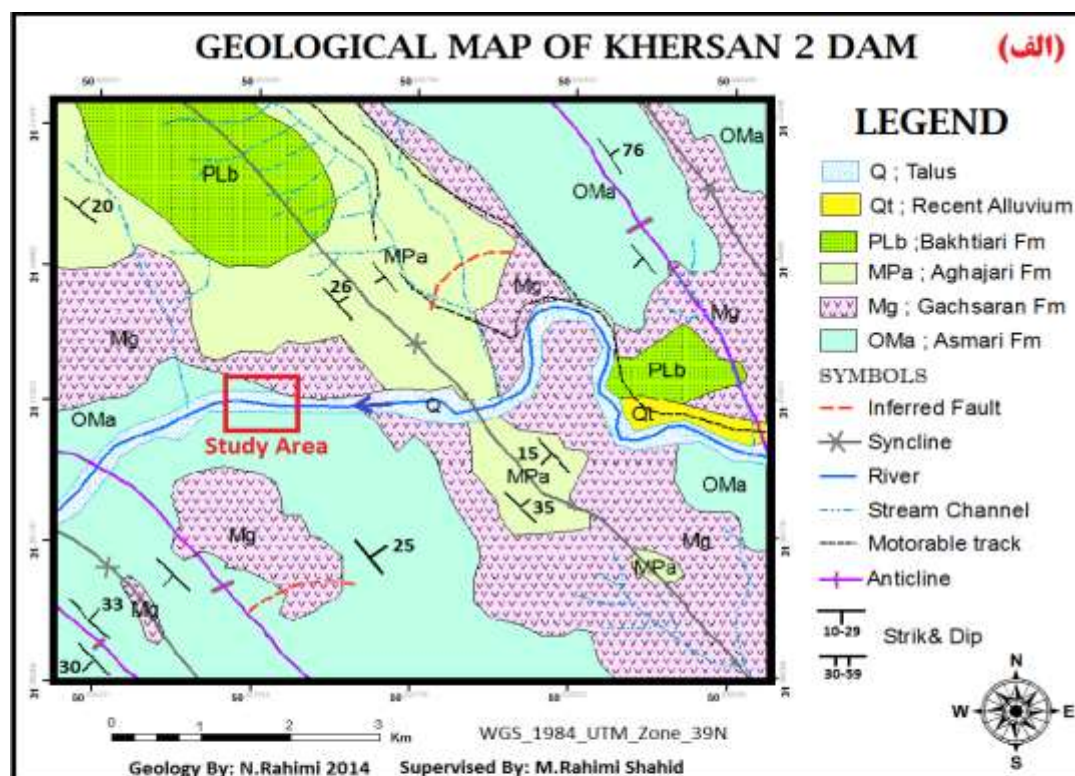
کشور ایران به دلیل دارا بودن آبوهوای نیمه خشک با کمبود منابع آب مواجه است. کاهش میزان بارندگی، افزایش روزافزون جمعیت و همچنین گسترش مصارف صنعتی در سالهای اخیر نیاز به حفظ منابع آبی و استفاده بهینه از این منابع را در کشور ما دوچندان کرده است. یکی از این موارد استفاده بهینه، مهار آبهای سطحی است [۱]. علاوه بر این، زمان و محل ریزش نزولات جوی نیز با میزان مصرف آب در کشور مطابقت ندارد [۲]. سدها از جمله سازههای هیدرولیکی می باشند که با اهداف جمع آوری آبهای سطحی، ذخیره آب برای مصارف گوناگون، تولید برق، جلوگیری از سیلاب استفاده می گردند [۳، ۴ و ۵]. طراحی و ساخت سد مستلزم شناخت شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی توده سنگهای ساختگاه سد می باشد که بدین منظور انجام آزمونهای صحرایی و آزمایشگاهی الزامی می باشد [۶]. ۲۵ درصد شکست سدها در سراسر جهان به دلیل مشکلات ژئوتکنیکی مانند نشست، اجرای نامناسب دیوار آب بند، گسل و لغزشها است [۷]. به طور کلی در ارزیابیهای زمین شناسی مهندسی رفتار سازههایی نظیر سدها و آسمان خراشها که بر روی پوسته زمین اجرا می شوند یا سازههای زیرزمینی نظیر تونلها و مغارها که در درون زمین احداث می شوند مورد بررسی قرار می گیرند. در این ارتباط لازم است خصوصیات رفتاری پوسته زمین شامل سنگها و خاکها و حرکت آب در زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و وضعیت تنش - کرنشها در اطراف سازههای فوق الذکر تحلیل شود تا بتوان در خصوص موضوع پایداری و سلامت آنها اظهار نظر نمود [۸]. نقش هیچ یک از فاکتورهای طبیعی مهم تر از فاکتور زمین شناسی نیست. مثالهای بسیار زیادی را می توان مطرح نمود که عدم توجه دقیق به شرایط و وضعیت زمین شناسی ساختگاه برای ساختن آن سد مشکلاتی فراوان به همراه هزینههای سرسام آور برای احداث آن متقبل شده است [۹]. در این مقاله، به بررسی خصوصیات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی ساختگاه سد خرسان ۲ پرداخته شده است، هدف از بررسیهای زمین شناسی مهندسی، شناسایی ویژگیهای زیرسطحی، برآورد پارامترهای ژئومکانیکی و تعیین ویژگیهای هیدروژئولوژی ساختگاه سد است تا بتوان ارزیابی درستی از ویژگیهای ژئومکانیکی سنگ بستر سد ارائه شود.

۲. زمین شناسی ساختگاه سد

سد خرسان ۲، بر روی رودخانهی خرسان یکی از سرشاخههای مهم رودخانهی کارون به مختصات ۳۱/۲۵ درجه عرض شمالی و ۵۰/۳۶ درجه طول شرقی در استان چهارمحال و بختیاری در فاصلهی حدود ۶۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان لردگان و در ناحیه جنوب غربی ایران در ارتفاعات زاگرس احداث شده است [۱۰]. سد خرسان ۲ با ارتفاع ۲۴۰ متر از پی و طول تاج حدود ۵۵۵ متر و از نوع بتنی دو قوسی است [۱۱]. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و در شکل (۲) نقشه زمین شناسی سد نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و مکانی سد

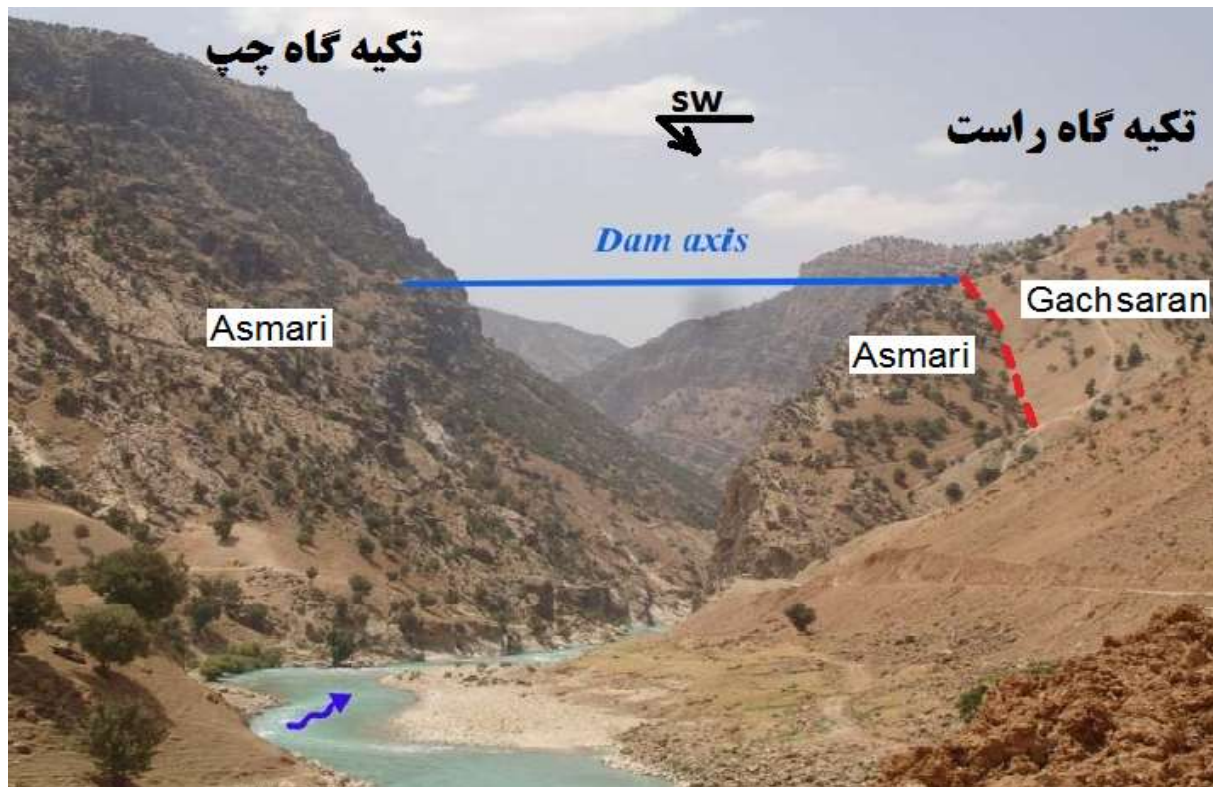


شکل ۲- (الف) نقشه زمین‌شناسی [۱۲] و (ب) مقطع زمین‌شناسی ساختگاه سد خرسان ۲

گستره مورد مطالعه در واحد زمین‌ساختی زاگرس و در زیر واحد زمین‌ساختی چین‌خورده از تقسیمات زمین‌شناسی ایران قرار گرفته است. این زون زمین‌شناختی در باختر و جنوب باختری فلات ایران قرار داشته و به سمت جنوب و جنوب خاوری به گسل میناب محدود می‌شود [۱۳]. همان‌طور که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، در بالادست محل سد سازندهای زمین‌شناسی باسن کرتاسه تا عهد حاضر، شامل سازندهای آسماری، گچساران، آغاچاری، بختیاری و رسوبات آبرفتی عهد حاضر رخنمون دارند. ساختگاه سد خرسان ۲ بر روی سازند آسماری واقع شده است (شکل ۲-ب). این سازند از نظر لیتولوژی شامل آهک کرم تا قهوه‌ای رنگ با درزه و شکاف فراوان در سطح است. سازند آسماری در بخش زیرین خود، عموماً شیل‌ها و مارن‌های سازند پایده را به‌طور هم‌شیب می‌پوشاند و خود نیز توسط سازند گچساران بطور هم‌شیب پوشیده شده است. این سازند به لحاظ خصوصیات زمین‌شناختی به سه واحد آسماری بالایی، آسماری میانی و آسماری زیرین قابل تفکیک است. بخش بالای آسماری که بدنه اصلی سد را در بر گرفته است از آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه، با لایه‌بندی منظم و درصد کمی از آهک‌های نازک لایه تا آهک‌های مارنی تشکیل شده است. آسماری میانی دارای تناوبی متشکل از آهک‌های خاکستری تا کرم‌رنگ، متوسط تا نازک لایه، آهک مارنی و مارن بوده و ضخامت آن حدود ۱۵۰-۱۲۰ متر است. رخنمون بخش زیرین آسماری در پایین‌دست مجموعه سازه‌های جانبی طرح مشاهده شده است که شامل حدود ۱۶۰-۱۴۰ متر از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ نخودی روشن است [۱۴]. از آنجایی که گچساران یک واحد سنگی با رفتار شکل‌پذیر است، بنابراین، در سطح زمین برش کامل ندارد و برش تلفیقی چاه‌های میدان گچساران به‌عنوان برش الگو (غیررسمی) دانسته شده که هفت بخش و ۱۶۰۰ متر ضخامت دارد. در بالادست محور سد خرسان ۲، در هسته ناودیس موسوم به ناودیس سرخ، سازند گچساران گسترش فراوانی دارد. سازند آغاچاری شامل ۲۹۶۶ متر تناوب تکراری چرخه‌هایی است که به‌طرف بالا دانه‌ریز می‌شوند. این سازند شامل ماسه‌سنگ‌های آهک‌دار قهوه‌ای خاکستری با لایه‌های نازک گچ همراه با مارن‌های قرمز و فروش سن است. در بالادست محور سد خرسان ۲، در هسته ناودیس سرخ، سازند آغاچاری بر روی سازند گچساران با گسترش قابل‌توجهی مشاهده می‌گردد. سازند بختیاری اگرچه گسترش چندانی ندارد اما جوان‌ترین سازند منطقه مورد مطالعه و مخزن سد است. رسوبات عهد حاضر موجود در منطقه مورد مطالعه، شامل؛ آبشست‌های دامن‌های (واریزه‌ها)، سنگ‌ریزه‌ها، رسوبات آبرفتی و خاک‌های برجا است.

۳. ژئومورفولوژی ساختاری ساختگاه سد

ساختگاه سد بر روی یال شمالی تاقدیس سرکمر قرار گرفته است. شیب و راستای لایه‌بندی در دو تکیه‌گاه سد تقریباً مشابه است. دره محل سد یک دره V شکل و نامتقارن می‌باشد، بطوریکه در تکیه‌گاه راست شیب توپوگرافی بسیار تند (تقریباً قائم) و در تکیه‌گاه چپ ۴۰ تا ۵۰ درجه است. جهت جریان رودخانه در تنگه محدوده طرح از خاور به سمت باختر بوده و رودخانه در این محل شیب نسبتاً ملایمی دارد. عرض بستر جاری رودخانه در محدوده محور حدود ۲۵ متر است [۱۰]. تفاوت شیب توپوگرافی در ساختگاه به‌طور عمده ناشی از وضعیت هندسی لایه‌بندی در دو تکیه‌گاه است. در تکیه‌گاه چپ به دلیل ریزش قطعات خردشده سنگی در طی دوره‌های زمین‌شناسی، در جهت شیب لایه‌بندی (به سمت رودخانه) از شیب توپوگرافی کاسته شده است و در تکیه‌گاه راست به دلیل جهت شیب دور شونده لایه‌بندی از رودخانه این پدیده رخ نداده و امکان تشکیل دیواره‌های قائم به وجود آمده است. فرسایش نسبتاً کم در امتداد درزه‌های عمود بر راستای محور چین در اثر آب‌های سطحی، به‌ویژه در ساحل چپ رودخانه سبب تشکیل آبراهه‌های باریک و کم‌عمق عمود بر دره خرسان گردیده‌اند. شکل (۳) محل ورودی دره خرسان، فرم زمین ریخت و گسترش سازندهای زمین‌شناسی را در این محدوده نشان می‌دهد. در محل ساختگاه، سازند آسماری و سازند گچساران (در ترازهای بالای تکیه‌گاه راست) رخنمون یافته‌اند.



شکل ۳ - نمای از ساختگاه سد خرسان ۲ (دید به سمت جنوب غرب)

۴. مطالعات ژئومکانیکی و بررسی ناپیوستگی‌ها

توده سنگ سازند آسماری که ساختگاه اصلی محل سد را تشکیل می‌دهد به وسیله‌ی شبکه‌ای از درزه‌ها و گسله‌های فرعی و کوچک قطع گردیده است. برای تجزیه و تحلیل آماری و به منظور بررسی آن‌ها برای ارزیابی پایداری اقدام به اندازه‌گیری و برداشت سطحی در راستاهای مختلف و بررسی آن‌ها در هر تکیه‌گاه گردید. بدین منظور در ده ایستگاه اندازه‌گیری‌ها انجام شده است. ویژگی دسته درزه‌های هر کدام از تکیه‌گاه‌ها در جداول (۱) و (۲) ارائه گردیده است.

مطالعه دسته درزه‌های معرفی شده در کل ایستگاه‌های برداشت ناپیوستگی‌ها با در نظر گرفتن ریخت‌شناسی هر ایستگاه و مقایسه کل دسته درزه‌ها نشان می‌دهد که دسته درزه‌ها تحت یک سیستم واحد (متأثر از ساختار تشکیل چین‌خوردگی) ایجاد شده‌اند و تفاوت فراوانی دسته درزه‌های برداشت شده مختلف در ایستگاه‌های متفاوت به دلیل شرایط مورفولوژی حاکم بر آن ایستگاه است. در شکل (۴) برای مقایسه بهتر، نمودار ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه‌های راست و چپ محور سد ارائه شده است.

بر اساس واکنش پوشش رسوبی روی پی‌سنگ، در برابر تنش‌های فشاری، آقناباتی زاگرس را به سه زیر پهنه «راندگی‌ها»، «چین‌خورده» و «به تقریب چین‌خورده» تقسیم می‌کند [۱۴]. محدوده مورد مطالعه در زیر پهنه چین‌خورده واقع است. چین‌ها از نظر نوع، بیشتر از نوع دکولمان یا جدایشی هستند. پیدایش و توسعه آن‌ها نتیجه حرکات متناوب بین پی‌سنگ و پوشش سنگی رویی است. بیشتر چین‌ها، به دلیل داشتن شیب زیاد در پهلوی جنوب باختری، نامتقارن‌اند. مهم‌ترین چین‌خوردگی‌های موجود در گستره طرح تاقدیس‌های لکی، ماشمی، شورم، بادامستان، سرکمر و منگشت و ناودیس‌های سرخ، انجو و سردشت می‌باشند. تاقدیس سرکمر به واسطه قرارگیری محور سد خرسان ۲ در یال شمالی آن، مهم‌ترین ساختار تکتونیکی گستره مورد بررسی است. در شکل (۵) موقعیت تاقدیس سرکمر نسبت به محل ساختگاه سد نشان داده شده است.

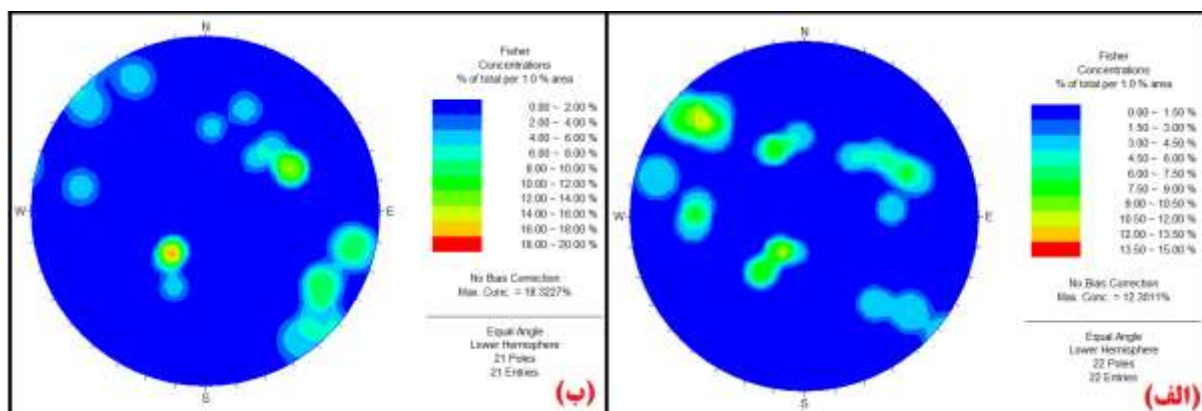
با توجه به رویه تکنیکی موجود در منطقه مورد مطالعه، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تنش‌های برجای منطقه، انیزوتروپ است و جهت تنش‌های حداکثر تقریباً عمود بر محور سد است.

جدول ۱- مشخصات دسته‌درزه‌ها در تکیه‌گاه چپ ساختمان سد

شماره ایستگاه	درزه	شیب/جهت شیب (درجه)	فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها (cm)	تداوم دسته‌درزه‌ها (m)	سایر مشخصات
۱	J۱	۷۶/۳۰۰	۶-۲۰	۱-۳	بازشدگی کمتر از ۲/۵ میلی‌متر و زبر، مواد پرکننده عمدتاً کلسیت، تمامی درزه‌ها فاقد رطوبت
	J۲	۷۲/۱۰۱			
	J۳	۶۴/۲۰۱			
	BJ۴	۳۳/۰۳۹			
۳	J۱	۵۷/۲۴۵	۲-۲۵۰	۱-۲۰	بازشدگی بین ۰/۵ تا ۲۰ میلی‌متر، مواد پرکننده شامل اکسید، کلسیت، خاک و لکه‌های سطحی
	J۲	۸۴/۳۲۴			
	J۳	۴۵/۲۲۳			
	BJ۴	۳۱/۰۴۱			
۴	J۱	۵۰/۰۲۳	۲۰-۶۰	۲-۱۵	بازشدگی بین ۲ تا ۵ میلی‌متر و تخت و زبر، مواد پرکننده شامل لکه‌های سطحی، خاک و کلسیت، تمامی درزه‌ها فاقد رطوبت
	J۲	۸۴/۱۳۲			
	J۳	۷۶/۳۰۴			
	J۴	۵۶/۲۲۶			
۹	J۱	۸۳/۳۱۳	۶-۲۵۰	>۱۰ تا <۲۰	بازشدگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر و تخت و زبر، بیشتر درزه‌ها دارای سطح تمیز، مواد پرکننده شامل اکسیدهای فلزی، خاک، کلسیت و لکه‌های سطحی
	J۲	۸۰/۲۸۳			
	BJ۳	۳۵/۰۳۸			
	J۴	۵۷/۲۴۳			
۱۰	J۱	۵۱/۱۸۴	۲۰-۲۰۰	۱-۲۵	بازشدگی درزه‌ها اغلب حدود ۲ میلی‌متر، مواد پرکننده شامل کلسیت و مواد رسی
	J۲	۸۱/۱۵۲			
	BJ۳	۳۹/۰۴۰			
	J۴	۸۴/۲۸۴			
	J۵	۵۷/۲۴۲			

جدول ۲- مشخصات دسته‌درزه‌ها در تکیه‌گاه راست ساختگاه سد

شماره ایستگاه	دسته‌درزه‌های اصلی	شیب/جهت شیب (درجه)	فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها (cm)	تداوم دسته‌درزه‌ها (m)	سایر مشخصات
۲	BJ۱	۴۳/۰۳۶	۶-۶۰	>۱	بازشدگی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و زبر، مواد پرکننده عمدتاً کلسیت، ژئپس و خاک، تمامی درزه‌ها فاقد رطوبت
	J۲	۶۵/۰۸۶			
	J۳	۸۲/۱۰۵			
۵	J۱	۸۰/۱۳۰	۲-۲۰۰	>۳	بازشدگی کمتر از ۲/۵ میلی‌متر و تخت و زبر، مواد پرکننده شامل کلسیت و خاک، تمامی درزه‌ها فاقد رطوبت
	J۲	۴۶/۱۵۲			
	J۳	۵۷/۲۳۰			
	J۴	۶۵/۳۲۱			
	J۵	۴۵/۰۴۰			
۶	J۱	۶۸/۲۵۱	۲۰-۲۰۰	۳-۱۰	بازشدگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر و تخت، مواد پرکننده شامل لکه‌های سطحی، ژئپس، خاک و کلسیت، تمامی درزه‌ها فاقد رطوبت
	J۲	۶۳/۰۹۶			
	J۳	۷۰/۱۳۲			
	J۴	۴۹/۱۷۶			
	BJ۵	۲۶/۰۳۸			
۷	J۱	۶۲/۲۴۳	۲۰-۲۰۰	>۱۵	بازشدگی ۰/۵-۱۰ میلی‌متر و زبر، مواد پرکننده شامل اکسیدهای فلزی، خاک، کلسیت و لکه‌های سطحی
		۴۵/۱۵۹			
		۷۸/۳۱۲			
		۷۶/۱۳۹			
		۳۰/۰۳۷			
۸		۴۷/۲۱۹	۶-۲۰۰	>۱۲	بازشدگی درزه‌ها ۰/۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر، مواد پرکننده شامل کلسیت، خاک و لکه‌های سطحی
		۸۵/۱۳۰			
		۲۴/۰۱۶			
		۵۳/۲۶۵			





شکل ۵ - موقعیت تاقدیس سرکمر نسبت به محل ساختگاه سد

۵. عملیات خاکی و سنگی (آزمون‌های برجا)

انجام آزمون‌های ژئوتکنیکی و بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی یکی از مطالعات پایه در ساخت پروژه‌های مهندسی به ویژه سدها می‌باشد که مطالعات مختلفی نیز در سال‌های اخیر در این زمینه صورت گرفته است [۱۵؛ ۱۶؛ ۱۷؛ ۱۸]. در ادامه جهت بررسی زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد خرسان ۲، آزمایش‌های برجا شامل؛ دیلاتومتري، برش مستقیم برجا، بارگذاری صفحه‌ای، لوژون و شاخص کیفی سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵-۱. آزمایش دیلاتومتري

ارزیابی مدول تغییرشکل بر اساس آزمون‌های برجا از جمله آزمون بارگذاری صفحه‌ای زمان‌بر و گران است و فقط در پروژه‌های عظیم سد و تونل از نقطه نظر اقتصادی امکان‌پذیر هستند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که روش‌های اندازه‌گیری مدول برجا، بازه گسترده‌ای از مدول را نشان می‌دهند. بخشی از این پراکندگی به علت درزه‌های موجود در محیط و بخش دیگر به دلیل شرایط مرزی آزمایش، طراحی ضعیف آزمایش یا تحلیل نادقیق داده‌ها است [۱۹]. آزمایش دیلاتومتري در محیط‌های سنگی به دو صورت تخت و انعطاف‌پذیر انجام می‌شود. این آزمون ویژگی‌های تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با ایجاد فشار داخلی در یک گمانه توسط دیلاتومتر تعیین می‌نماید. میزان افزایش قطر گمانه از طریق اندازه‌گیری انبساط حجمی دیلاتومتر محاسبه و سپس با توجه به روابط بین فشار - تغییر قطر، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ در محل قرارگیری دیلاتومتر محاسبه می‌گردد. نتایج این آزمایش در ارزیابی کیفیت سنگ و طراحی پی، سد، تونل و مغار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. انبساط ایجادشده در گمانه با اندازه‌گیری مقدار جریان روغن یا گاز وارد شده به استوانه و یا مستقیماً توسط حسگرهای تعبیه‌شده در دیلاتومتر اندازه‌گیری می‌شود. در دیلاتومتر استفاده شده جهت بررسی کیفیت توده‌سنگ در ساختگاه سد خرسان ۲، انبساط ایجاد شده در گمانه مستقیماً توسط حسگرها، اندازه‌گیری می‌شود. در این نوع دیلاتومترها، حسگرها با زاویه ۹۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته است که با استفاده از آن می‌توان ناهمسانگردی تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ را نیز در صفحه‌ای عمود بر محور گمانه بررسی نمود [۲۰]. ازجمله مدول‌های مدنظر در تحلیل‌های مهندسی می‌توان به مدول‌های الاستیسیته (یانگ)، برشی و غیره اشاره نمود. به نسبت تنش به کرنش ایجاد شده در راستای همان تنش را مدول الاستیسیته یا مدول یانگ گویند [۲۱]. برای مثال در حالتی که تنش عمودی تک‌محوری در راستای X وارد می‌شود، مدول یانگ برابر است با [۲۱]:

$$\sigma = E\varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma_{(N/m^2)}}{\varepsilon_{(N/m^2)}} \quad (1)$$

که در اینجا، E مدول الاستیسیته، σ تنش محوری و ε کرنش محوری معرفی می‌گردد. در آزمایش دیلاتومتري بسته به میزان ناپیوستگی در توده سنگ، برای محاسبه‌ی مدول تغییرشکل پذیری از روابط متفاوتی استفاده می‌شود. در مورد توده - سنگ‌های با درزه‌داری کم، مدول تغییر شکل پذیری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$E_d = (1 + \nu_R) \times D \times \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \quad (2)$$

در رابطه فوق، E_d مدول تغییرشکل (MPa)، ν_R نسبت پواسون توده سنگ، ΔP_i افزایش فشار در بخش موردنظر (MPa)، D قطر گمانه (mm) و ΔD میانگین تغییر قطر گمانه (mm) است. چنانچه آزمایش در توده سنگی با درزه‌داری زیاد انجام گیرد و مقدار P_i از دو برابر متوسط فشار زمین اطراف گمانه بیشتر شود، کلیه ترک‌های شعاعی موجود باز خواهد شد و بنابراین رابطه زیر جایگزین رابطه قبل می‌گردد [۲۲]:

$$E_d = D \frac{P_i}{\Delta D} (1 + \nu_R) \left[(1 + \nu_R) \ln \left(\frac{P_i}{2P_0} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق، P_i فشار اعمالی (MPa)، P_0 متوسط فشار برجا (MPa) و ΔD متوسط افزایش قطر گمانه در اثر افزایش فشار از صفر به (mm) معرفی می‌گردد. همچنین، نسبت تغییرشکل زاویه‌ای ایجادشده بر اثر تنش برشی وارده را، مدول برشی گویند و در حالت تنش و کرنش صفحه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$\sigma_{xy} = G\varepsilon_{xy} \Rightarrow G = \frac{\sigma_{xy_{(N/m^2)}}}{\varepsilon_{xy_{(N/m^2)}}} \quad (4)$$

در اینجا، G مدول برشی، σ_{xy} تنش برشی و ε_{xy} کرنش برشی معرفی می‌گردد. پس از محاسبه‌ی مدول تغییر شکل پذیری با استفاده از روابط زیر می‌توان مدول بالک (K) و ضریب تراکم ناپذیری (B) را محاسبه کرد [۲۱].

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{K} \quad (6)$$

در اینجا، E مدول تغییرشکل پذیری و ν ضریب پواسون معرفی می‌گردد. در مرحله مطالعات ساختگاه سد خرساں ۲، مجموعاً ۶۱ عدد آزمایش دیلاتومتري (۳۴ عدد آزمایش در جناح چپ و ۲۷ عدد آزمایش در جناح راست) انجام گرفته که نتایج مربوط به ۴۳ عدد از این آزمایش‌ها در جداول (۳) تا (۷) آورده شده است. میانگین مدول تغییرشکل پذیری به دست آمده از آزمایش‌های دیلاتومتري ۸/۸۴ GPa است.

جدول ۳- مقادیر مدول تغییرشکل پذیری به دست آمده برای گالری LG۱

LG۱										گالری	
D۲L۱			D۱L۱							گمانه	آزمون دیلاتومتري
-۹۱	-۸۴/۵	-۷/۴	-۳۴/۳	-۳۴/۹	-۳۴/۵	۳۳-۳۲	-۱۵/۵	-۱۲	-۸/۱	عمق	
۹۲	۸۵/۵	۸/۴	۳۵/۳	۳۵/۹	۳۵/۵		۱۶/۵	۱۳	۹/۱		
۸/۰۸	۷/۲۳	۱۸/۳	۴/۱۹	۱۲/۸	۴/۸۴	۳/۸۹	۴/۲۹	۶/۴۸	۴/۵۹	E.mass (Gpa)	
۳/۱۱	۲/۷۸	۷/۰۴	۱/۶۱	۴/۹۲	۱/۸۶	۱/۵۰	۱/۶۵	۲/۵	۱/۷۶	G.mass (Gpa)	

۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۲۶	B.mass (۱ /GPa)	
۶/۷۳	۶/۰۲	۱۵/۲	۳/۴۹	۱۰/۷	۴/۰۳	۳/۲۴	۳/۵۷	۵/۴	۳/۸۲	K.mass (GPa)	

جدول ۴- مقادیر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده برای گالری LG۲

LG۲									گالری	
D۱L۲									گمانه	آزمون دیلاتومتری
۹۴/۸	۹۲/۲	۹۰-۸۹	۷۶/۶	۷۰/۸	۵۹/۸	۵۶/۴	۵۵/۵	۴۹-۴۸	عمق	
۹۵/۸	۹۳/۲		۷۷/۶	۷۱/۸	۶۰/۸	۵۷/۴	۵۶/۵		E.mass (Gpa)	
۵/۳۷	۶/۲۹	۴/۴۳	۳/۳۹	۵/۶۲	۷/۳۸	۶/۶۷	۴/۹۶	۵/۵۷	G.mass (Gpa)	
۲/۰۶	۲/۴۲	۱/۷۰	۱/۳۰	۲/۱۶	۲/۸۴	۲/۵۶	۱/۹۱	۲/۱۴	B.mass (۱ /GPa)	
۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۱	K.mass (GPa)	
۴/۴۷	۵/۲۴	۳/۶۹	۲/۸۲	۴/۶۸	۶/۱۵	۵/۵۶	۴/۱۳	۴/۶۴		

جدول ۵- مقادیر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده برای گالری RG۱ گمانه D۱R۱

RG۱									گالری	
D۱R۱									گمانه	آزمون دیلاتومتری
۹۴-۹۳	۸۳-۸۲	۷۸-۷۷	۶۹-۶۸	۵۹-۵۸	۳۸/۸-۳۹/۸	۲۶-۲۵	۱۷/۵-۱۸/۵	۱۰/۸-۱۱/۸	عمق	
۵/۷۷	۶/۵۳	۴/۹۲	۶/۹۲	۵/۹۸	۱۲/۹	۷/۲۲	۱۵/۱	۱۷/۸	E.mass (Gpa)	
۲/۲۲	۲/۵۱	۱/۸۹	۲/۶۶	۲/۳	۴/۹۶	۲/۷۸	۵/۸۱	۶/۸۵	G.mass (Gpa)	
۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۷	B.mass (۱ /GPa)	
۴/۸۱	۵/۴۴	۴/۱	۵/۷۷	۴/۹۸	۱۰/۷۵	۶/۰۲	۱۲/۵۸	۱۴/۸۳	K.mass (GPa)	

جدول ۶- مقادیر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده برای گالری RG۱ گمانه D۲R۱

RG۱								گالری	
D۲R۱								گمانه	آزمون دیلاتومتری
۹۶/۵-۹۵/۵	۸۸-۸۷	۷۶/۳-۷۵/۳	۶۷-۶۶	۴۹-۴۸	۳۴-۳۳	۲۸-۲۷	۲۲-۲۱	عمق	
۵/۲۶	۵/۴۳	۷/۱۸	۶/۳۹	۱۷/۶	۱۷/۱	۵/۸۶	۱۶/۳	E.mass (Gpa)	
۲/۰۲	۲/۰۹	۲/۷۶	۲/۴۶	۶/۷۷	۶/۵۸	۲/۲۵	۶/۲۷	G.mass (Gpa)	
۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۰۷	B.mass (۱ /GPa)	
۴/۳۸	۴/۵۲	۵/۹۸	۵/۳۲	۱۴/۶۷	۱۴/۲۵	۴/۸۸	۱۳/۵۸	K.mass (GPa)	

جدول ۷- مقادیر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده برای گالری RG۲

RG۲							گالری	
D۲R۲				D۱R۲			گمانه	آزمون دیلاتومتری
۴۳/۵-۴۲/۵	۳۱-۳۰	۲۳-۲۲	۵/۱-۴/۱	۴۸/۵-۴۷/۵	۳۳/۷-۳۲/۷	۲۳/۲-۲۴/۲	عمق	
۱۶/۸	۶/۶۹	۶/۸۹	۸/۶۱	۱۱/۷	۱۵/۴	۲۲	E.mass (Gpa)	
۶/۴۶	۲/۵۷	۲/۶۵	۳/۳۱	۴/۵	۵/۹۲	۸/۴۶	G.mass (Gpa)	
۰/۰۷	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۵	B.mass (۱ /GPa)	
۱۴	۵/۵۷	۵/۷۴	۷/۱۷	۹/۷۵	۱۲/۸۳	۱۸/۳۳	K.mass (GPa)	

۵-۲. آزمایش برش مستقیم بر جا

مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی یکی از پارامترهای مهم در طراحی و اجرای سازه‌ها در داخل و بر روی سنگ می‌باشد. پارامترهای مقاومت برشی از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا قابل اندازه‌گیری می‌باشند. این دو روش آزمایش از لحاظ ابعاد و شرایط سطوح مورد آزمایش با یکدیگر تفاوت دارند که باعث می‌شود نتایج متفاوتی به دست آیند [۲۳]. آزمایش برش مستقیم برجا بر روی یک بلوک مکعبی شکل که همه جوانب آن به جز سطح برش، با بتن مسلح قالب گرفته شده است، انجام می‌شود. این بلوک نباید در حین آماده‌سازی دچار دست‌خوردگی شود و کف بلوک بایستی به‌طور دقیق بر صفحه برش منطبق باشد بطوریکه لغزش بلوک در حین آزمایش در امتداد سطح ناپیوستگی صورت پذیرد. صفحه برش معمولاً سطح یک ناپیوستگی مانند درز و ترک، لایه‌بندی، تورق، گسل یا فصل مشترک سنگ با بتن یا خاک است. در این آزمایش با انجام چند سیکل مجزا بر روی سطح برش و تحت بارهای عمودی متفاوت می‌توان بعد از انجام محاسبات، پارامترهای مقاومت برشی نهایی و باقیمانده را به دست آورد [۲۴]. آزمایش برش مستقیم برجا در ساختگاه سد خرسان ۲، بر اساس روش پیشنهادی ISRM [۲۴] در ۳ گالری، در ساختگاه سد خرسان بر روی بلوکی با ابعاد $35 \times 70 \times 70$ سانتی‌متر در حالت اشباع و بصورت افقی انجام گرفته است.

مقادیر تنش برشی و تنش نرمال در آزمایش برش مستقیم برجا طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$\tau = \frac{P_s}{A} = \frac{P_{sa} \cdot \cos \alpha}{A} \quad (7)$$

$$\delta_n = \frac{P_n}{A} = \frac{P_{na} + P_{sa} \cdot \sin \alpha}{A} \quad (8)$$

که در این روابط τ تنش برشی، σ_n تنش نرمال، P_s مجموع نیروی برشی، P_n مجموع نیروی قائم، P_{sa} نیروی برشی اعمال شده، P_{na} نیروی قائم اعمال شده، α زاویه بین نیروی برشی اعمال شده و صفحه برش و A مساحت سطح برش (که مقدار آن با احتساب جابجایی برشی و جانبی تصحیح شده است) است. مقادیر ضریب چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک (ϕ) محاسبه شده از آزمایش برش مستقیم برجا در ساختگاه سد خرسان ۲ در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸- مقادیر C و ϕ محاسبه شده از آزمایش برش مستقیم برجا در ساختگاه سد خرسان ۲

گالری	سیکل	σ (Mpa)	τ (Mpa)	ϕ (Degrees)	C (Mpa)
LG۱	۱	۱/۰۰۱	۱/۵۱۲	۳۶/۲	۰/۸
	۲	۲/۴۹۷	۲/۶۷۴		
	۳	۳/۹۹۹	۳/۷۰۳		
LG۲	۱	۰/۵۰۰	۰/۸۵۰	۳۶/۹	۰/۵
	۲	۱/۴۹۲	۱/۷۱۶		
	۳	۲/۹۹۷	۲/۷۴۰		
RG۱	۱	۲/۰۰۳	۲/۶۰۴	۳۹/۷	۱/۰
	۲	۳/۴۹۹	۳/۹۱۴		
	۳	۴/۹۹۸	۵/۰۹۳		

۵-۳. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در داخل گالری، با بارگذاری از طریق یک جفت صفحه دایره‌ای شکل صلب یا انعطاف‌پذیر بر روی سطوح متقابل دیواره گالری صورت می‌گیرد. صفحات فولادی دارای قطر چند ده سانتیمتر (۵۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر) بوده و به‌طور همزمان توسط جک‌هایی که در امتداد قطر گالری و بین این سطوح قرار گرفته، تحت بارگذاری قرار می‌گیرند [۲۰]. مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$E_m = \frac{q_{av} \times a}{2W_{Z.O}} \left[2(1 - \nu^2) \operatorname{arc cot} anz + (1 + \nu) \frac{z}{z^2 + 1} \right] \quad (9)$$

در رابطه ۳، E_m مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ (GPa)، Z عمق جابجایی سنج (m)، q_{av} تنش میانگین روی سطح بارگذاری (MPa)، ν نسبت پواسون، $W_{Z.O}$ جابجایی در جهت بار وارد شده در زیر صفحه بارگذاری ($Z=0$) و a شعاع صفحه بارگذاری (m) است. در ساختگاه سد خرساں ۲ به منظور تعیین تغییر شکل پذیری توده سنگ اقدام به انجام ۲۸ عدد آزمایش بارگذاری شده است که نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها در جدول (۹) آورده شده است. نتایج این بررسی‌ها بیانگر آن است که میانگین مدول تغییر شکل پذیری حاصل از این آزمایش‌ها ۲۰/۴۵ GPa است. مدول تغییر شکل پذیری برآورد شده از آزمون دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای در ساختگاه سد اختلاف زیادی باهم دارند. در آزمون دیلاتومتری، از آنجاکه آزمایش در گمانه انجام می‌شود، مقادیر برآورد شده کمتر از مقادیر واقعی است و حفر گمانه باعث کاهش مقاومت توده سنگ می‌شود.

جدول ۹- مقادیر مدول تغییر شکل پذیری به دست آمده توسط آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در ساختگاه سد خرساں ۲

گالری	گمانه	موقعیت	E.mass(GPa)
LG _۱	D _۱ L _۱	(Upper) J _۱ L _۱	۲۳/۵
		(Down) J _۱ L _۱	۲۴/۶
		(Right) J _۲ L _۱	۲۸
		(Left) J _۲ L _۱	۲۷
	D _۲ L _۱	(Upper) J _۳ L _۱	۲۲/۱۲
		(Lower) J _۳ L _۱	۲۶/۴
		(Right) J _۴ L _۱	۲۵/۳
		(Left) J _۴ L _۱	۲۳/۴۲
LG _۲	D _۱ L _۲	(Upper) J _۳ L _۲	۱۴/۶۷
		(Lower) J _۳ L _۲	۱۹/۱
		(Upper) J _۱ L _۲	۲۲/۸
		(Lower) J _۱ L _۲	۲۲/۸
		(Upper) J _۲ L _۲	۱۰/۸۵
		(Lower) J _۲ L _۲	۸/۳۵
RG _۱	D _۱ R _۱	(Right) J _۱ R _۱	۲۶/۸۵
		(Left) J _۱ R _۱	۹/۴
		(Upper) J _۲ R _۱	۲۲
		(Lower) J _۲ R _۱	۲۷
	D _۲ R _۱	(Right) J _۳ R _۱	۲۴/۵
		(Left) J _۳ R _۱	۲۶
		(Upper) J _۴ R _۱	۲۶/۹۷
		(Lower) J _۴ R _۱	۲۱/۲۲
RG _۲	D _۱ R _۲	(Upper) J _۲ R _۲	۲۶/۵۲
		(Lower) J _۲ R _۲	۲۰/۵
		(Upper) J _۳ R _۲	۹/۸۷
		(Lower) J _۳ R _۲	۱۴/۵۵

۱۲/۴	(Right) J ₁ R ₂		
۵/۸۷	(Left) J ₁ R ₂		

۵-۴. نفوذپذیری سنگ بستر

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی سازه‌های آبی بزرگ، نفوذپذیری ساختگاه آن سازه‌ها می‌باشد. مرسوم‌ترین روش برای تعیین ضریب نفوذپذیری سنگ‌های درزه‌دار، استفاده از آزمایش لوژون می‌باشد [۲۶]. نفوذپذیری توده‌سنگ‌ها به وسیله محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۷، ۲۸، ۱۶، ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲]. لوژون جذب یک لیتر آب در یک دقیقه در یک متر طول گمانه تحت فشار ۱۰ بار است [۳۳]. بعد از آماده شدن قطعه مورد آزمایش و نصب مسدود کننده، آزمایش لوژون انجام می‌گیرد که معمولاً ۵ یا ۷ پله دارد و هر پله با حروف a, b, c, d, e, f و g مشخص می‌شود [۳۴]. نفوذپذیری یک پارامتر بسیار مهم در طراحی پروژه‌های سدسازی است [۳۵]. بر اساس نتایج ۱۴۵ آزمایش لوژون که در گمانه‌های تکیه‌گاه چپ انجام شده‌اند، متوسط نفوذپذیری واحدهای سنگی این تکیه‌گاه ۳۵/۸ لوژون و وضعیت نفوذپذیری آن «زیاد» برآورد شده است. در تکیه‌گاه راست نیز مقدار نفوذپذیری با انجام ۱۱۴ آزمایش لوژون بررسی شده است (جدول ۱۰). مطابق نتایج آزمایش‌های مذکور، میانگین مقدار نفوذپذیری در تکیه‌گاه راست حدود ۱۶/۹۴ لوژون برآورد شده است که این عدد، وضعیت سنگ این جناح را در بازه متوسط، قرار می‌دهد. همچنین گمانه BH۲۳ در محل پی سد، در وسط رودخانه حفاری شده است. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده در این گمانه نیز نشان می‌دهد مقدار نفوذپذیری پی سد در آسماری بالایی در حد متوسط بوده و مقدار آن ۱۸ لوژون برآورد شده است. در آزمایش‌های نفوذپذیری سنگ، علاوه بر به دست آوردن میزان آبخوری سنگ تحت فشارهای گوناگون، می‌توان به عکس‌العمل درزه‌ها و ناپیوستگی‌های سنگ در مقابل جریان تحت فشار آب نیز پی برد. نتیجه حاصل از رفتار نگاری توده‌سنگ ساختگاه در جدول (۱۱) ارائه شده است. بررسی نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری نسبت به عمق آزمایش‌های لوژون نشان می‌دهد که مقاطع آزمایش واقع در رقوم بالاتر، به دلیل بازشدگی بیشتر درزه‌های کششی دارای نفوذپذیری بیشتری نسبت به مقاطع عمیق‌تر می‌باشند، ضمن این‌که در عمق، با نزدیک شدن به واحد میانی سازند آسماری، با توجه به ماهیت آهکی - ماری این واحد، نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

جدول ۱۰- میانگین لوژون محاسبه شده برای گمانه‌های اکتشافی ساختگاه سد خرسان ۲

نام گمانه	موقعیت	لوژون	نفوذپذیری	نام گمانه	موقعیت	لوژون	نفوذپذیری
BH۱	تکیه‌گاه چپ	۵۵	زیاد	BH۱۵	ساحل چپ	۵۶	زیاد
BH۲	تکیه‌گاه چپ	۲۹/۵	متوسط	BH۱۶	ساحل چپ	۶۹/۵	خیلی زیاد
BH۳	تکیه‌گاه چپ	۲۵/۵	متوسط	BH۱۷	ساحل چپ	۳۰	متوسط
BH۴	تکیه‌گاه راست	۱۷	متوسط	BH۱۸	ساحل چپ	۳۷/۵	متوسط
BH۵	تکیه‌گاه راست	۱۲/۴۵	متوسط	BH۱۹	ساحل چپ	۲۸	متوسط
BH۶	تکیه‌گاه راست	۵۵	متوسط	BH۲۰	ساحل راست	۱۰۰	خیلی زیاد
BH۷	ساحل چپ	۶۷	خیلی زیاد	BH۲۱	ساحل راست	۱۹	متوسط
BH۸	ساحل چپ	۲	خیلی کم	BH۲۲	ساحل راست	۲۳/۵	متوسط
BH۹	ساحل راست	۴۳/۹	زیاد	BH۲۳	پی سد	۱۸	متوسط
BH۱۰	ساحل راست	۲۱	متوسط	BH۲۴	پی سد	۳۲	متوسط

BH۱۱	ساحل راست	۸۴	خیلی زیاد	BH۲۵	ساحل چپ	۳۹	زیاد
BH۱۲	ساحل چپ	۲۵/۵	متوسط	BH۲۶	پی فرازبند	۲	خیلی کم
BH۱۳	ساحل راست	۸۸	خیلی زیاد	BH۲۷	جناح راست	۲۱/۴۵	متوسط
BH۱۴	ساحل چپ	۳۶/۵	زیاد	BH۲۸	خروجی نیروگاه	۲۲	متوسط

جدول ۱۱- رفتار نگاری آزمایش های لوژون در محدوده ساختگاه سد

محل	تکیه گاه چپ	بستر رودخانه	تکیه گاه راست
پارامتر (%)			
رفتار خطی	۱۰	-	-
رفتار آشفته	۱۷<	۲۰	-
رفتار انبساطی	۷/۵	-	-
رفتار آبشستگی	۷	-	-
رفتار پرشدگی	-	۲۰	-
رفتار نفوذپذیر	۳۰<	-	۱۲
رفتار نفوذناپذیر	۲۴	۶۰	۵۱

۵-۵. شاخص کیفی توده سنگ (RQD)

شاخص کیفیت توده سنگ بر اساس تعداد شکستگی ها و میزان تخریب توده سنگ، در نمونه های مغزه ای که از گمانه های حفاری به دست می آید، بنا نهاده شده است. در این روش، نسبت مجموع طول قطعات سالم مغزه با طول بیش از ۱۰ سانتی - متر، به طول حفاری شده، مبنای تعیین شاخص کیفیت توده سنگ قرار می گیرد [۳۶]. به منظور ارزیابی کیفیت توده سنگ در ساختگاه سد، ۲۸ عدد گمانه اکتشافی در تکیه گاه های راست و چپ و پی سد حفر گردیده و در کلیه گمانه ها مقادیر شاخص کیفی در تمام نوبت های حفاری اندازه گیری و ثبت گردید. در جدول (۱۲) مقادیر میانگین RQD برای گمانه های ذکر شده، آورده شده است. ۱۶ گمانه دارای شاخص کیفی ۹۰-۷۵ درصد بوده و در ردیف سنگ های با RQD خوب قرار می گیرند. مقدار شاخص کیفی سنگ در ۴ گمانه نیز در حد عالی (بیش از ۹۰ درصد) ارزیابی گردیده است.

جدول ۱۲- میانگین RQD محاسبه شده برای گمانه های اکتشافی ساختگاه سد خرسان ۲

نام گمانه	موقعیت	RQD (%)	شرح	نام گمانه	موقعیت	RQD (%)	شرح
BH۱	تکیه گاه چپ	۷۲/۵	متوسط	BH۱۵	ساحل چپ	۷۹/۳	خوب
BH۲	تکیه گاه چپ	۶۴	متوسط	BH۱۶	ساحل چپ	۶۶	متوسط
BH۳	تکیه گاه چپ	۸۱/۵	خوب	BH۱۷	ساحل چپ	۶۶	متوسط
BH۴	تکیه گاه راست	۷۶	خوب	BH۱۸	ساحل چپ	۸۲	خوب
BH۵	تکیه گاه راست	۷۳	متوسط	BH۱۹	ساحل چپ	۸۵	خوب
BH۶	تکیه گاه راست	۹۲	عالی	BH۲۰	ساحل راست	۶۰	متوسط
BH۷	ساحل چپ	۷۰	متوسط	BH۲۱	ساحل راست	۷۶/۵	خوب
BH۸	ساحل چپ	۸۹	خوب	BH۲۲	ساحل راست	۸۵	خوب
BH۹	ساحل راست	۷۷	خوب	BH۲۳	پی سد	۹۲	عالی
BH۱۰	ساحل راست	۹۳	عالی	BH۲۴	پی سد	۸۰	خوب

BH۱۱	ساحل راست	۸۴	خوب	BH۲۵	ساحل چپ	۷۷	خوب
BH۱۲	ساحل چپ	۸۰	خوب	BH۲۶	پی فرازبند	۸۹	خوب
BH۱۳	ساحل راست	۸۰	خوب	BH۲۷	جناح راست	۷۹/۵	خوب
BH۱۴	ساحل چپ	۶۳	متوسط	BH۲۸	خروجی نیروگاه	۹۲	عالی

۶. نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی صورت پذیرفته در منطقه مورد بررسی می‌توان بیان نمود که تفاوت شیب توپوگرافی در ساختگاه سد به طور عمده ناشی از وضعیت هندسی لایه‌بندی در دو تکیه‌گاه بوده و دسته‌درزه‌های موجود در دو تکیه‌گاه‌های راست و چپ محور سد، تحت تأثیر ساختار چین‌خوردگی ایجاد شده است و تفاوت فراوانی دسته درزه‌های موجود در دو تکیه‌گاه به دلیل شرایط مورفولوژی حاکم بر آن منطقه است. لازم به ذکر است، دسته درزه‌های موجود در تکیه‌گاه راست محور سد، تمرکز بالاتری را نشان می‌دهند. با توجه به مطالعات ژئومکانیکی صورت پذیرفته، میانگین مدول تغییر شکل‌پذیری برآورد شده از آزمون دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای به ترتیب، ۸/۸۴ و ۲۰/۴۵ گیگاپاسکال و همچنین میانگین ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک برآورد شده از آزمایش برش مستقیم برجا، ۰/۷۷ و ۳۷/۶ درجه است. بر اساس آزمایش لوژون، تکیه‌گاه چپ بیشترین نفوذپذیری را نسبت به تکیه‌گاه راست و بستر سد دارد. طبق تقسیم‌بندی کیفی سنگ‌ها (RQD) توده‌سنگ‌های بستر سد در ردیف خوب قرار می‌گیرند. البته شایان ذکر است که تکیه‌گاه و ساحل چپ، کمترین مقدار RQD را دارند.

۷. قدردانی

در پایان از همکاری و مساعدت مدیریت محترم شرکت آزمون فولاد، جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز و بسترسازی برای مطالعات پژوهشی و همچنین از جناب آقای دکتر محمد هفتانی به خاطر همکاری صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- عباسی، م.، صادقی، ع.، ارومیه‌ای، ع. و نظری، م. ح.، (۱۳۹۲)، بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ساخت گاه سد سنگریزه‌ای سردشت به منظور ارزیابی وضعیت آبگذری ساخت گاه سد، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران ۱۵ و ۱۶ آبان ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، ۱۰۹۹-۱۱۰۸ ص.
- افکار، م. ر.، غفوری، م.، لشکری‌پور، غ.، اردلان‌زاده، آ.، (۱۳۸۹)، بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی ساختگاه سد زیرزمینی ریخان در شهرستان بیرجند، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ارومیه، ایران، ۷ ص.
- رهنماراد، ج.، مصلی‌نژاد، ا.، عنایت، م. ع.، انصاری‌فر، م.، یعقوبی فیض‌آبادی، م. ر.، (۱۳۹۲)، بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد هایقر (جنوب خاوری فیروزآباد)، هفتمین همایش زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور، لرستان، ایران، ۸ ص.
- عرب، ع. ر.، لشکری‌پور، غ.، (۱۳۸۴)، ارزیابی آماری درزه‌ها در رخنمون سطحی ساختگاه سد شی کلک چابهار، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، تهران، ۷ ص.

۵. Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., and Tarigh Azali, A. (۲۰۱۱), "Investigation of the geological and geotechnical characteristics of Daroongar Dam Northeast Iran". *Geotech. Geol. Eng.*, Vol. ۲۹, ۹۶۱-۹۷۵ pp.
۶. کشیری دولت آبادی، ا.، اجل لوئیان، ر.، پسندی، م.، (۱۳۹۰)، بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک ساختگاه سد تنگاب سمیرم، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران، ۱۱ ص.
۷. Akinrinmade, A.O., Ogunsanwo, O., Ige, O.O., (۲۰۱۳). "Geophysical and Geotechnical Investigation of river Ero, Ajuba, southwestern Nigeria for dam development". *International Journal of science and Technology*. Vol. ۲(۷), ۵۱۸-۵۲۸ pp.
۸. بشری، ع.، مجدی، ع.، بیگی، م.، احدی، ب.، (۱۳۸۸)، ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی جدید تعیین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از داده‌های آزمایش دیلاتومتری، دومین همایش ملی سدسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ۹ ص.
۹. Ichikawa, K., (۱۹۹۹). "Geological Investigation of Dam Proc", ۲nd Asian Symposium on Engineering Geology and the Environment, Malaysian Group, Malaysian, ۱-۴۴, ۱-۵۷.
۱۰. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (۱۳۸۹)، طرح سد و نیروگاه خرسان ۲، گزارش زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۷، ۱۹۶ ص.
۱۱. مه‌باب قدس، (۱۳۸۹)، مطالعات توجیهی سد و نیروگاه آبی سد خرسان ۲، گزارش زمین‌شناسی منطقه سد، ۱۹۶ ص.
۱۲. Ra himi Shahid, M., Moshrefy-far, M.R., and Rahimi, N. (۲۰۱۶), Three-dimensional modeling of the permeability of the rock masses of Khersan ۲ dam using geostatistical methods, *The Specialty Journal of Architecture and Construction (SJAC)*, ۲, pp. ۲۱-۴۲.
۱۳. نوگل سادات، ع. ا.، (۱۳۷۲)، نگرشی بر لرزه‌خیزی، زلزله زمین‌ساخت ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور، دوازدهمین گردهمایی علوم زمین. تهران، ایران، ۹ ص.
۱۴. آقانباتی، ع. (۱۳۸۳)، زمین‌شناسی ایران، انتشارات دایره سبز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
۱۵. Ra himi Shahid M., Kargaranbafghi F., Moosavi S.M., Rahimi N., (۲۰۱۶), Engineering geological assessment of the Shahid dam site (Semirom, Iran), *Journal of Geotechnical Geology*, ۲, pp. ۱۹۳-۲۰۵.
۱۶. Ajalloeian, R., Habibi, V., Sharifipour, M., Azimian, A., (۲۰۱۲), "Evaluation Engineering Geology Properties of Jamishan Dam Site with Emphasis on Its Groutability". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. ۱۷, ۲۷۷۷-۲۷۹۳ pp.
۱۷. Ar babi M., Rahnamarad J., Shabanigorji K. ۲۰۱۵. Engineering geology characteristics of Miyanrood dam site (South East of Iran). *International Journal of Biology, pharmacy and Allied sciences (IJBPAAS)*, ۳۱ (S۳): ۴۴۱-۴۴۸.
۱۸. Os tadmahmoodi-do F., Rahnamarad J., Shabanigorji K. ۲۰۱۵. Engineering geology characteristics of Dodaroo dam site (Southeastern Iran), *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, ۵: ۳۸۱۳-۳۸۱۸.

۱۹. Pa
Imstrom, A., and Singh R., (۲۰۰۱), "The deformation modulus of rock masses: comparisons between in situ tests and indirect estimates", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. ۱۶, ۱۱۵-۳۱ pp.
۲۰. جابری، م. ع.، ذوالفقاری، ع.، هفتانی، م.، یزد خواستی، ن.، (۱۳۹۱)، اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای توسط کاوش‌های توموگرافی لرزه‌ای (مطالعه موردی سد خرسان ۲)، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، تهران، ایران، ۱۰ ص.
۲۱. فاتحی مرجی، م.، (۱۳۸۹)، مکانیک سنگ برای مهندسين، انتشارات نورنار، چاپ اول شهریور ۸۹، ۲۴۶ ص.
۲۲. Ch
arrua-Graça J. G., (۱۹۷۹), "Dilatometer tests in the study of the deformability of rock masses", *Proc. ۴th ISRM Congr. Vol. (۲)*, ۷۳-۷۶ pp.
۲۳. هاشمی، س.، ایران‌زاده، ا.، (۱۳۹۳)، مقایسه نتایج آزمون‌های برجا و آزمایشگاهی برش مستقیم در سنگ‌های آهکی، پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، انجمن مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۹ ص.
۲۴. IS
RM, (۱۹۸۱). "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock masses", *Rock Characterization, Testing and Monitoring*, London. Pergamon, Oxford, ۲۲۱ p.
۲۵. IS
RM, (۱۹۷۹), "Suggested method for determination of in situ deformability of rock"; *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; Vol. ۱۶, ۱۴۳-۶ pp.
۲۶. اسپندار، ر.، ذاکرشبستری، ح.، (۱۳۸۴)، ارزیابی رفتار هیدروژئومکانیکی و نفوذپذیری پی سد رودبار لرستان، نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ایران، ۱۱ ص.
۲۷. اجل‌لوئیان، ر.، عظیمیان، ع.، حافظی مقدس، ن.، بهرامی سامانی، ف.، (۱۳۹۲)، ارزیابی نفوذپذیری و تزریق‌پذیری نهشته‌های کواترنری و توده‌سنگ‌های رسوبی ساختگاه سد نرگسی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، بهار و تابستان ۱۳۹۲، جلد ششم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۱۳-۳۲.
۲۸. Aj
alloeian, R., Fatehi, L., Ganjalipour, K., (۲۰۱۱), "Evaluation of hydrojacking and hydrofracturing behavior in Aghajari formation (Gotvand dam site foundation)", *Iran. Journal of Geology and Mining Research*, Vol. ۳(۳), ۴۶-۵۳ pp.
۲۹. Az
imian, A., Ajalloeian, R., (۲۰۱۳), "Comparison between lugeon with secondary permeability index obtained of water pressure test in rock masses", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. ۱۸, ۱۶۰۳-۱۶۱۲ pp.
۳۰. Ch
amanzadeh A., Moshrefy-far M.R., Rahimi Shahid M., Moosavi S.M., (۲۰۱۶), Statistical analysis of the rock masses permeability in Shahid dam site, *International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment in the Third Millennium*, Rasht, Iran, ۱۲ p.
۳۱. Ch
amanzadeh A., Moshrefy-far M.R., Rahimi Shahid M., Moosavi S.M., (۲۰۱۶), Grout

curtain optimum position design of Shahid dam using RockWork ۱۵ software, International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment in the Third Millennium, Rasht, Iran, ۱۶ p.

۳۲. G urocak, Z., Alemdag, S., (۲۰۱۱), "Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. ۶۴, ۴۰۰-۴۰۹ pp.

۳۳. Lu geon, M. (۱۹۳۳). "Barrages et Geologie". Dunod, Paris, ۱۳۸ p.

۳۴. سازمان برنامه و بودجه، (۱۳۷۸)، دستورالعمل آزمایش‌های تراوایی، انتشارات سازمان برنامه و بودجه، نشریه شماره ۱۸۸، ۵۰ ص.

۳۵. La shkaripour, G.R. and Ghafoori, M., (۲۰۰۲). "The engineering geology of the Tabarak Abad Dam", Engineering Geology Vol. ۶۶, ۲۳۳-۲۳۹ pp.

۳۶. توکلی، ب.، (۱۳۹۰)، زمین‌شناسی مهندسی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۳۰۵ ص.