

# ارزیابی نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگ در آزمایشهای نفوذپذیری لوژون در ساختگاه سد قردانلو

حسین هدایتی تلوکی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، hshossien1364@yahoo.com  
غلامرضا لشکری پور، دکترا، استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، Lashkaripour@um.ac.ir  
محمد غفوری، دکترا، استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، Ghafoori@um.ac.ir  
حسین ترشیزی، کارشناسی ارشد، کارشناس دفتر فنی شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان شمالی، hosseintorshizi@yahoo.com  
عباسعلی صبا، کارشناسی ارشد، کارشناس شرکت مهندسی مشاور طوس آب، saba221357@yahoo.com

## چکیده

ارزیابی نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده های سنگی، یکی از مهم ترین پارامترها در مطالعات ژئوتکنیکی ساختگاه سد ها می باشد. این پارامتر برای تعیین مشخصات فنی تزریق ضروری می باشند. آزمون صحرایی فشار آب متداولترین روش جهت ارزیابی نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگ می باشد. این آزمایش در مقاطع مختلف گمانه های اکتشافی و در پله های فشار مختلف تعیین می گردد. بر اساس نمودارهای فشار- آگذری در هر مقطع، رفتار توده سنگ در جریان و فشار اعمال شده ارزیابی می گردد. در این تحقیق نتایج آزمایشات لوژون در ۱۶ حلقه گمانه اکتشافی و در ۱۲۰ قطعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از نتایج این آزمایشات، رفتار توده سنگ های ساختگاه سد از نظر نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی بررسی گردید. بر این اساس، رفتار آب شستگی در تکیه گاه راست و رفتار آشفته در تکیه گاه چپ و بستر مهمترین رفتار هیدروژئومکانیکی این ساختگاه می باشند. به علاوه، توده سنگ ساختگاه سد براساس نفوذپذیری در رده متوسط تا زیاد قرار دارد.

کلمات کلیدی: سد قردانلو، توده سنگ، نفوذپذیری، آزمایش لوژون، رفتار هیدروژئومکانیکی

## Abstract:

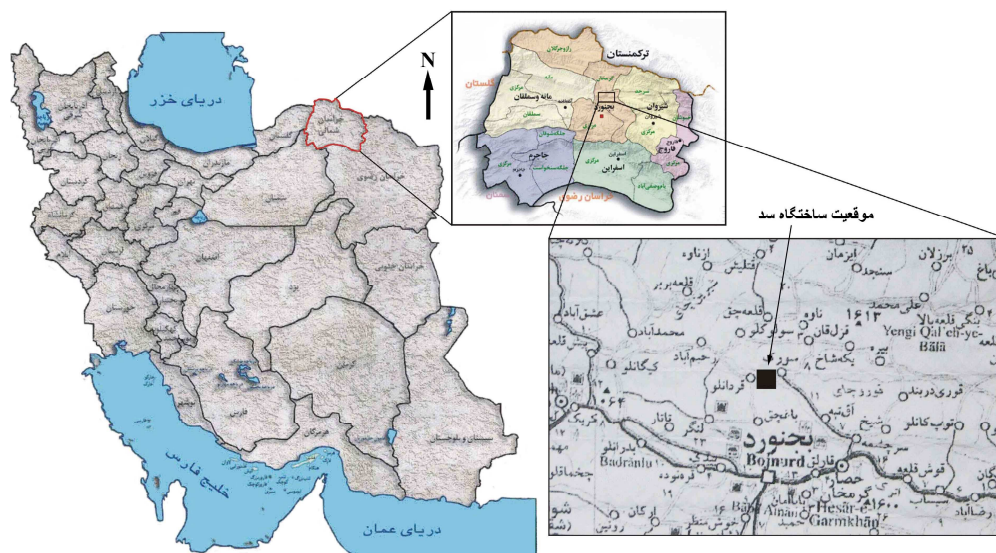
Evaluation of permeability and hydro-geomechanical behavior of rock masses are one of the most important parameters to the geotechnical studies of the dam sites. Thus parameter is necessary to determine the technical specifications of grouting. Water pressure test (Lugeon) is a common method to evaluation of permeability and hydro-geomechanical behavior of rock masses. This test is carried out in various sections of exploration boreholes at different pressure steps. Behavior of rock masses in the applied pressure and flow, evaluated based on the P-Q diagrams in every section. In this study, the results of Lugeon tests interpreted in 16 exploration boreholes and 120 sections. The behavior of rock masses of dam sites in the respect to permeability and hydro-geomechanical behavior, studied based results of these tests. According to these results, wash out behavior in the right abutment and turbulent flow in the left abutment and foundation, are most important hydro-geomechanical behavior in this dam site. Moreover, rock mass of dam site is located in the class of moderate to high, based on permeability.

Keywords: Ghardanloo dam, rock mass, permeability, Lugeon test, hydraulic behavior.

## مقدمه

جهت تحلیل و بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی ساختگاه سد شناخت ویژگیهای نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگهای پی و تکیه گاه ها از اهمیت بالای برخوردار می باشد. میزان نشت آب از پی و تکیه گاه سد از مسائل مهم در طراحی سد ها می باشد [Ewert, 1985; Nonveiller, 1989] که با میزان نفوذپذیری طبیعی زمین رابطه مستقیم دارد و اگر به درستی مورد بررسی و ارزیابی قرار نگیرد می تواند چالشهایی را برای پروژه ایجاد کند [Osazuwa and Chinedu, 2008]. لذا نفوذپذیری یک پارامتر اساسی در طراحی سدها می باشد که باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. متداول ترین روش جهت ارزیابی نفوذپذیری توده سنگی در محل، آزمایش فشار آب می باشد که توسط لوژون (Lugeon) در سال ۱۹۳۳ ارائه گردید [Ewert, 1997a; Nonveiller, 1989]. در این آزمایش آگذری در گمانه های اکتشافی، در طول مقطعی به طول ۵ متر یا کمتر و در پله های فشار مختلف تعیین می

گردد. سپس عدد لوژن توده سنگ، بر اساس آبخوری هر مقطع، تعیین می گردد. همچنین نمودارهای فشار- آگذری برای هر مقطع آزمایش ترسیم شده و با توجه به این نمودارها رفتار توده سنگ را در برابر جریان و فشار اعمال شده ارزیابی می گردد [Nonveiller, 1989; Hously, 1990]. هدف از این تحقیق ارزیابی نفوذپذیری و رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگی ساختگاه سد فردانلو می باشد. ساختگاه سد در مختصات جغرافیایی "۳۶.۶: ۳۷: ۳۷° عرض شمالی و "۳۶.۶: ۱۹: ۵۷° طول شرقی و در فاصله ۳۶ کیلومتری شمال شهرستان بجنورد در مجاورت روستای مخروبه فردانلو در استان خراسان شمالی قرار دارد. این سد از نوع خاکی با هسته رسی می باشد که با ارتفاع ۴۶ متر و طول تاج ۲۳۶ متر دارای حجم مخزن حدود ۲۲۰ میلیون متر مکعب بوده و بر روی رودخانه اترک احداث خواهد شد [طوس آب، ۱۳۸۷]. در شکل یک موقعیت جغرافیایی ساختگاه سد مشخص گردیده است.



شکل ۱- موقعیت ساختگاه سد

## زمین شناسی محدوده ساختگاه سد

از نظر ریخت شناسی منطقه مورد مطالعه منطقه ای کوهستانی و جوان بوده که در زون زمین شناسی- ساختاری کپه داغ قرار دارد و بر اثر فاز های چین خوردگی آلپ پایانی در زمان پلیوسن چین خورده است [افشار حرب، ۱۳۷۳]. گسل های محلی و نیرو های تکتونیک به شدت بر محدوده مورد مطالعه تاثیر گذاشته اند و باعث ایجاد شبکه ای از درز و شکستگی ها به همراه شیپهای برگشته در ساختگاه شده اند. عرض بستر رودخانه در محل محور سد حدود ۹۰ متر بوده و سد در یک دره لا شکل نامتقارن احداث می گردد. شیب تکیه گاه راست بین ۲۷ تا ۴۰ درجه و شیب تکیه گاه چپ بین ۵۰ تا ۷۰ درجه (به طور میانگین ۵۶ درجه) می باشد. از نظر چینه شناسی منطقه مورد مطالعه شامل سازند های زیر می باشد.

**سازند تیرگان:** این سازند با سن باریت تا آپتین [افشار حرب، ۱۳۷۳] در محل ساختگاه از سنگ آهک های ائولیت دار و زیست آواری با میان لایه های ناچیزی از سنگ آهک های مارنی، مارن و شیل آهکی تشکیل شده است. این سازند بخش اعظم ساختگاه را شامل می شود. به دلیل ضخامت زیاد لایه ها و به ویژه تراکم و سختی این سازند، سنگ آهک ها بخوبی از نهشته های شیلی و مارنی سرچشمه قابل تفکیک می باشد.

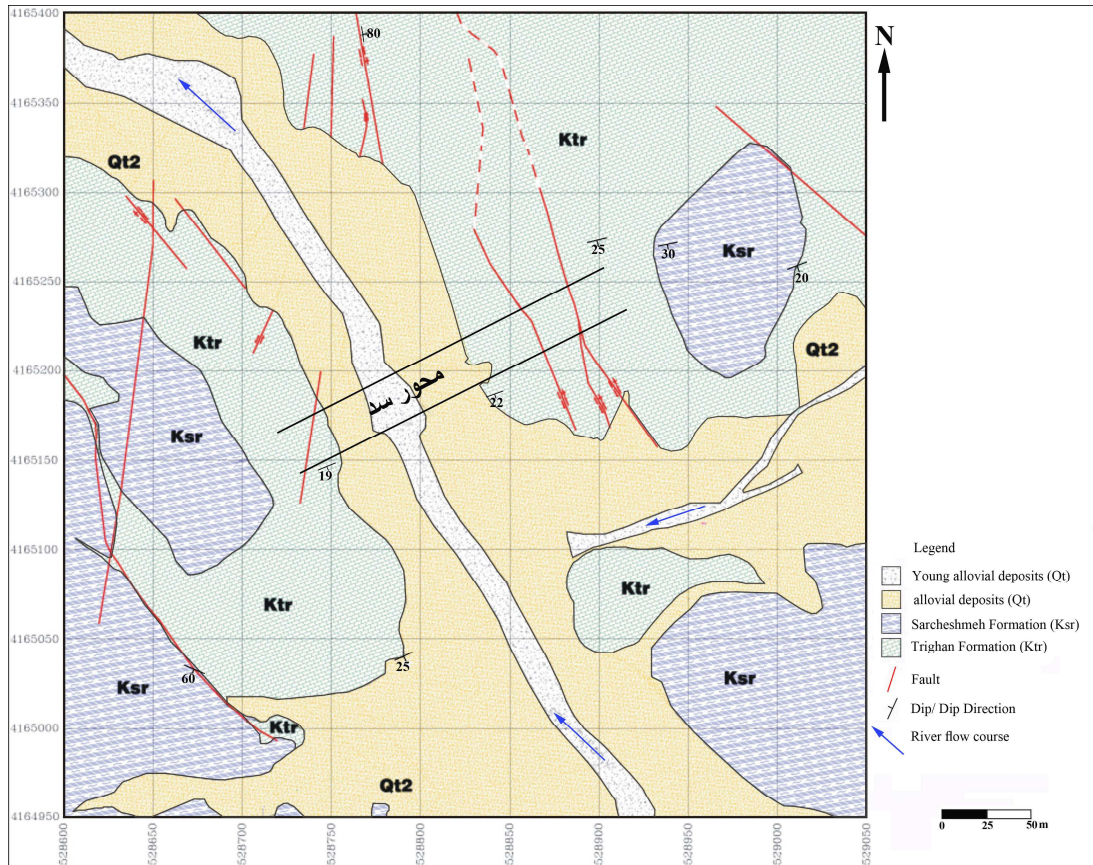
**سازند سرچشمه:** این سازند با سن آپتین [افشار حرب، ۱۳۷۳] در محل ساختگاه از مارن و شیل های به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه های آهکی تشکیل شده و در سطح به شدت هوازده و خرد شده می باشد. این سازند در بخش فوقانی تکیه گاه ها و تا بخش میانی مخزن رخ نمون دارد. این سازند به صورت هم شیب بر روی سازند تیرگان قرار می گیرد و هیچ تماسی با بدنه سد ندارد. **رسوبات عهد حاضر:** این رسوبات در محل تکیه گاه شامل رسوبات آبرفتی بستر رودخانه، پادگانه های آبرفتی و رسوبات واریزه ای و آب شست های دامنه ای می باشد.

رسوبات آبرفتی بستر رودخانه در بستر رودخانه گسترش دارند. این رسوبات عمدتاً ریزدانه هستند و مصالح درشت دانه تا حد قلوه سنگ به صورت محدود دیده می شوند.

نهشته های پادگانه های آبرفتی در محدوده ساختگاه سد در حاشیه رودخانه و در سرتاسر تنگه گسترش دارند. این مصالح در بخش های مرکزی تنگه عمدتاً ریزدانه هستند و به سمت تکیه گاه ها به مصالح درشت دانه تبدیل می شوند.

رسوبات واریزه ای و آب شست های دامنه ای جوانترین واحد رسوبی در محدوده ساختگاه است. عمدتاً از فرسایش زونهای آهکی خرد شده و شیل ها حاصل شده اند و به صورت پوشش رسوبی نه

چندان ضخیم بر روی واحدهای سنگی و رسوبی قدیمی تر استقرار یافته اند و شامل مصالح مختلف از قبیل بلوک های سنگی، قلوه سنگ، شن و ماسه می باشد. در شکل ۲ نقشه زمین شناسی گستره طرح آورده شده است.



شکل ۲ - نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

### بررسی رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگهای ساختگاه سد

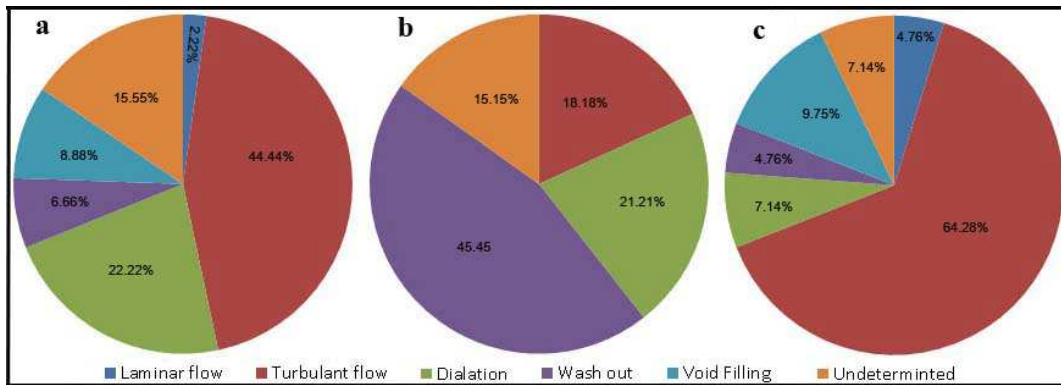
به منظور ارزیابی رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگ ۵ رفتار هیدروژئومکانیکی ارائه شده است [Houlsby, 1990; Ewert, 1997b; Nonveiller, 1989]. با توجه به تقسیم بندی هیدروژئومکانیکی ارائه شده، رفتار هیدروژئومکانیکی بر اساس نتایج آزمایش لوژن در ساختگاه سد مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در زیر ارائه شده است (جدول ۱ و شکل ۳).

#### جناح چپ

در این جناح در ۴ حلقه گمانه حفاری شده ۴۵ قطعه آزمایش لوژن صورت گرفته است، که از این تعداد، ۱ قطعه معادل ۲/۲۲٪ دارای رفتار هیدروژئومکانیکی با جریان یکنواخت (Laminar Flow)، ۲۰ قطعه معادل ۴۴/۴۴٪ دارای جریان آشفته (Turbulent Flow)، ۱۰ قطعه معادل ۲۲/۲۲٪ دارای پدیده باز شدگی (Dilatation)، ۲ قطعه معادل ۴/۴۴٪ دارای پدیده آب شستگی (Wash out)، ۴ قطعه معادل ۸/۸۸٪ نیز دارای پدیده پرشدگی (Void Filling) و در ۷ قطعه معادل ۱۵/۵۵٪ نیز به علت عدم انجام کامل و درست آزمایش رفتار هیدروژئومکانیکی نا مشخص (Undetermined) مانده است. بر اساس بررسی های انجام شده در این تکیه گاه بیشترین رفتار هیدروژئومکانیکی مربوط به جریان آشفته و بازشدگی می باشد (شکل ۳-ا).

#### جناح راست

در این جناح در ۳ حلقه گمانه حفاری شده ۳۳ قطعه آزمایش لوژن صورت گرفته است، که از این تعداد، ۶ قطعه معادل ۱۸/۱۸٪ دارای جریان آشفته (Turbulent Flow)، ۷ قطعه معادل ۲۱/۲۱٪ دارای پدیده باز شدگی (Dilatation)، ۱۵ قطعه معادل ۴۵/۴۵٪ دارای پدیده آب شستگی (Wash out) و در ۵ قطعه معادل ۱۵/۱۵٪ نیز به علت عدم انجام کامل و درست آزمایش رفتار هیدروژئومکانیکی نا مشخص (Undetermined) مانده است. بر اساس بررسی های انجام شده در این تکیه گاه بیشترین رفتار هیدروژئومکانیکی مربوط به آب شستگی می باشد (شکل ۳-ب).



شکل ۳- رفتار آزمایش لوژن در ساختگاه؛ a: تکیه گاه چپ، b: تکیه گاه راست، c: بستر سد

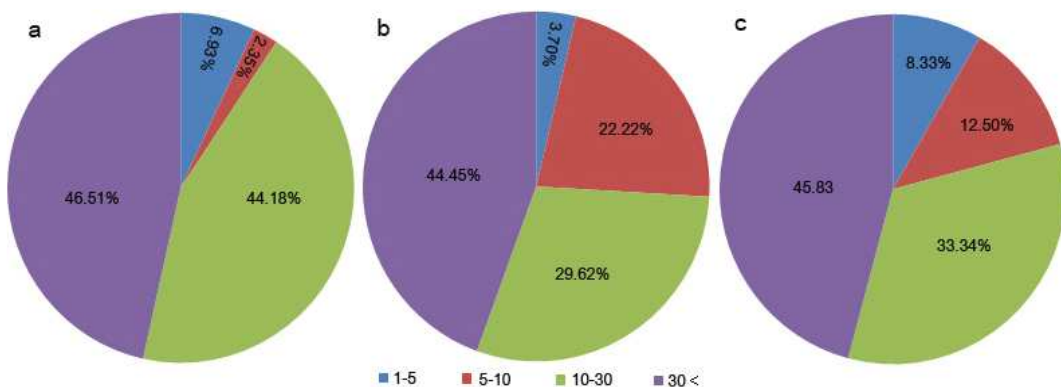
#### بستر

در این جناح در ۹ حلقه گمانه حفاری شده ۴۲ قطعه آزمایش لوژن صورت گرفته است، که از این تعداد، ۲ قطعه معادل ۴/۷۶٪ دارای رفتار هیدروژئومکانیکی با جریان یکنواخت (Laminar Flow)، ۲۷ قطعه معادل ۶۴/۲۸٪ دارای جریان آشفتنه (Turbulent Flow)، ۳ قطعه معادل ۷/۱۴٪ دارای پدیده باز شدگی (Dialation)، ۲ قطعه معادل ۴/۷۶٪ دارای پدیده آب شستگی (Wash out)، ۵ قطعه معادل ۹/۷۵٪ نیز دارای پدیده پرشدگی (Void Filling) و در ۳ قطعه معادل ۷/۱۴٪ نیز به علت عدم انجام کامل و درست آزمایش رفتار هیدروژئومکانیکی نا مشخص (Undetermined) مانده است. بر اساس بررسی های انجام شده در این تکیه گاه بیشترین رفتار هیدروژئومکانیکی مربوط به جریان آشفتنه می باشد (شکل ۳- c).

### بررسی نفوذ پذیری توده سنگ ساختگاه سد

عدد لوژن در تعیین میزان نشست آب، برآورد فرسایش پذیری و ارزیابی تزریق پذیری توده سنگ و بررسی و کنترل کیفی تزریق در ساختگاهها سنگی مورد استفاده قرار می گیرد (فهیمی فر، ۱۳۸۵). با توجه به مقادیر RQD بدست آمده از مغزه های حفاری و نتایج آزمایشات لوژن انجام شده، نفوذپذیری ساختگاه سد مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در زیر آورده شده است.

در شکل ۴ وضعیت کلی مقادیر لوژن در بخشهای مختلف ساختگاه سد براساس دسته بندی Kutzner, 1996 ارائه شده است. براساس نتایج آزمایش های لوژن، میانگین نفوذپذیری واحدهای سنگی در تکیه گاه چپ و بستر در رده متوسط تا زیاد بوده و در تکیه گاه راست در رده زیاد قراردارد. در شکل ۵ و ۶، به ترتیب تغییرات عدد لوژن و RQD نسبت به عمق ارائه شده است.



شکل ۴- نحوه توزیع مقادیر لوژن در بخش های مختلف ساختگاه سد، a: تکیه گاه چپ، b: تکیه گاه راست، c: بستر سد

#### تکیه گاه چپ

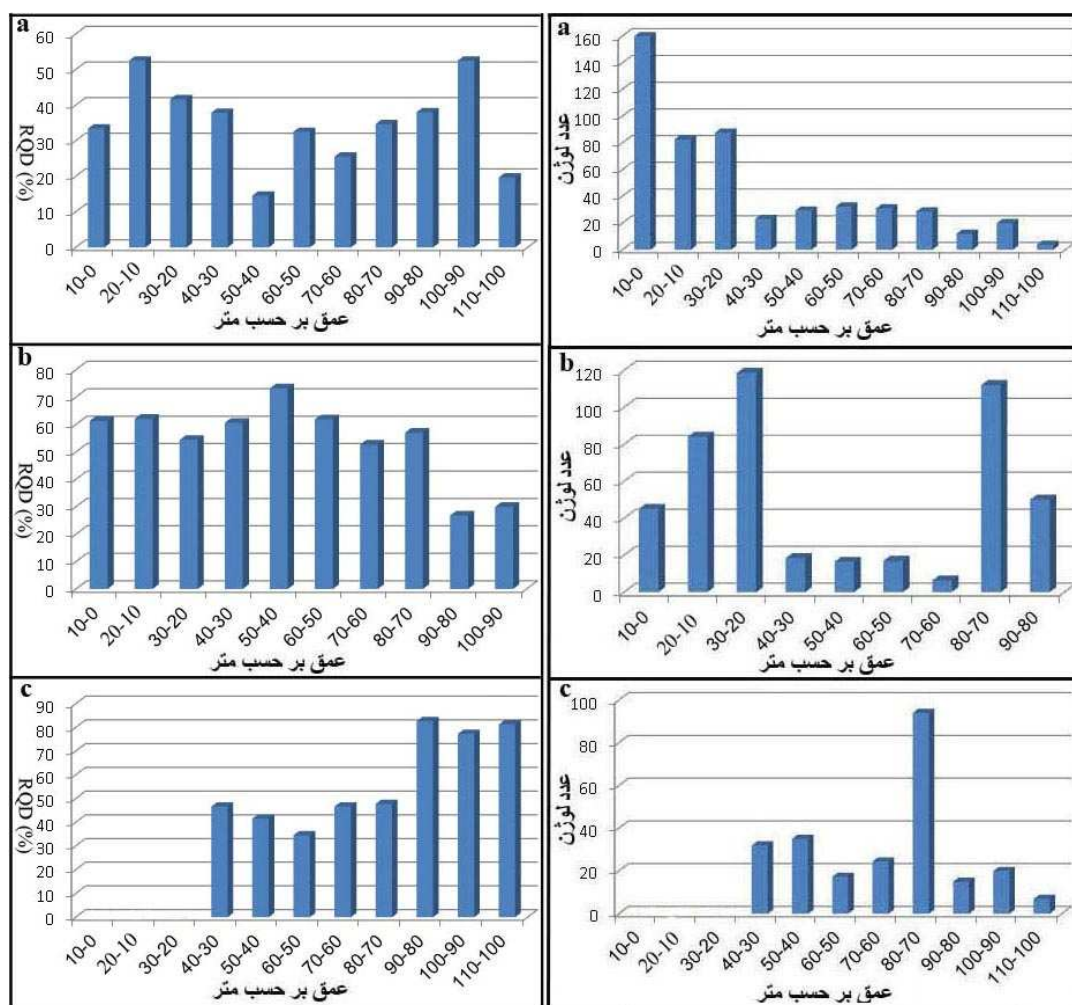
بیشترین نفوذپذیری با لوژن ۱۵۹ مربوط به عمق ۰ تا ۱۰ متری بوده و در این عمق RQD برابر ۳۳ درصد می باشد (شکل ۶- a). بطور کلی در تکیه گاه چپ (شکل ۵- a) با افزایش عمق نفوذپذیری کاهش یافته و در عمق بیشتر از ۱۰۰ متر نفوذپذیری به زیر ۴ لوژن می رسد. علت بالا بودن نفوذپذیری تا عمق ۱۰۰ متری در تکیه گاه چپ را می توان به عملکرد مجموعه ای از گسلها نسبت داد که باعث خورد شدگی توده سنگ شده اند. پایین بودن مقدار RQD (بطور میانگین RQD بین ۲۵ تا ۲۷ می باشد) نیز نشان دهنده خردشدگی توده سنگ در تکیه گاه چپ می باشد (شکل ۶- a). همچنین آثار زون های خوردشده و گسله در مغزه های حفاری نیز قابل مشاهده است.

### تکیه گاه راست

در تکیه گاه راست تغییرات نفوذپذیری منظم نمی باشد (شکل ۵-ب). بیشترین نفوذپذیری با عدد لوژن ۱۱۸ مربوط به عمق حدوداً ۲۰ تا ۳۰ متر می باشد. در این تکیه گاه نفوذ پذیری در عمق های حدوداً ۱۰ تا ۳۰ متر و ۷۰ تا ۹۰ متر بشدت افزایش می یابد که دلیل افزایش نفوذپذیری وجود حفرات کارستی می باشد. در این تکیه گاه بطور میانگین تغییرات RQD بین ۵۰ تا ۶۰ درصد می باشد (شکل ۶-ب).

### بستر

در بستر نفوذ پذیری با افزایش عمق کاهش یافته (شکل ۵-ج) و تنها در عمق حدوداً ۷۰ تا ۸۰ متری نفوذپذیری افزایش می یابد و به ۹۴ لوژن می رسد. در عمق بیش از ۸۰ متری RQD افزایش یافته (شکل ۶-ج) و نفوذپذیری نیز به زیر ۱۷ لوژن می رسد.



شکل ۵- نتایج آزمایش لوژن در ساختگاه؛ شکل ۶- نتایج ارزیابی RQD در ساختگاه؛  
 a: تکیه گاه چپ، b: تکیه گاه راست، c: بستر سد  
 a: تکیه گاه چپ، b: تکیه گاه راست، c: بستر سد

### نتیجه گیری

- در ساختگاه این سد تعداد ۱۶ حلقه گمانه حفر گردید و در مجموع ۱۲۰ مقطع آزمایش لوژن انجام شده است. نتایج حاصل از بررسی رفتار هیدروژئومکانیکی قطعات مورد آزمایش نشان می دهد که، ۳۰٪ دارای رفتار هیدروژئومکانیکی با جریان یکنواخت، ۵۲٪ قطعه معادل ۴۴/۱۶٪ دارای جریان آشفته، ۲۰٪ قطعه معادل ۱۶/۱۷٪ دارای پدیده باز شدگی، ۲۰٪ قطعه معادل ۱۶/۱۷٪ دارای پدیده آب شستگی، ۹٪ قطعه معادل ۷/۵۰٪ نیز دارای پدیده پرشدگی و در ۱۵٪ قطعه معادل ۱۲/۵۰٪ نیز به علت عدم انجام کامل و درست آزمایش رفتار هیدروژئومکانیکی نا مشخص مانده است.

- در این ساختگاه رفتار هیدروژئومکانیکی با جریان آشفته با ۴۴/۱۶ درصد بیشترین رفتار هیدروژئومکانیکی بوده و رفتار جریان خطی با ۲/۵۰ درصد کمترین رفتار هیدروژئومکانیکی است.

- براساس نتایج آزمایش های لوژن، میانگین نفوذپذیری واحدهای سنگی در تکیه گاه چپ (با میانگین لوژن ۲۷ تا ۴۲ لوژن) و بستر (با میانگین لوژن ۱۵ تا ۳۲ لوژن) در رده متوسط تا زیاد بوده و در تکیه گاه راست (با میانگین ۵۱ لوژن) در رده زیاد قرار دارد.

- بر اساس بررسی های انجام شده، وجود حفرات کارستی و زون های خوردشده حاصل از عملکرد گسل ها مهمترین عامل موثر بر افزایش نفوذپذیری توده سنگ این ساختگاه می باشد.

جدول ۱- خلاصه نتایج آزمایش لوژن در ساختگاه سد

موقعیت گمانه	نوع جریان شماره گمانه	Dilatation	Turbulent Flow	Laminar Flow	Wash out	Void Filling	Undetermined	تعداد مقاطع آزمایش لوژن
نکته گاه چپ	BH-1	۶	۵	۱	۱	-	۵	۱۸
	BH-2	۳	۴	-	۱	-	۱	۹
	BH-2-2	۱	۱۱	-	۱	۱	-	۱۴
	BH-23	-	-	-	-	۳	۱	۴
نکته گاه راست	BH5	۶	۴	-	۶	-	۱	۱۷
	BH8	۱	-	-	۸	-	۱	۱۰
	BH10	-	۲	-	۱	-	۳	۶
بستر	BH3	-	۵	-	۱	۲	۲	۱۰
	BH4	۳	۶	-	-	۲	-	۱۱
	BH6	-	۳	-	-	-	-	۳
	BH7	-	۳	-	۱	-	-	۴
	BH9	-	۱	-	-	۱	-	۲
	BH11	-	۱	-	-	-	-	۱
	BH15	-	۲	-	-	-	-	۲
	BH16	-	۲	۲	-	-	۱	۵
BH20	-	۴	-	-	-	-	۴	

## منابع

- شرکت مهندسی مشاور طوس آب،، (۱۳۸۷): "زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی طرح سد، شبکه آبیاری و زهکشی فردانلو (مطالعات مرحله اول)".
- افشار حرب، ع.، (۱۳۷۳): "زمین شناسی ایران: زمین شناسی کپه داغ، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۲۷۵.
- فهیمی فر، ا. و سروش، ح.، (۱۳۸۵): "آزمایش های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استان دارد ها"، مرکز نشر دانشگاه امیرکبیر، ۶۱۲.

## References:

- Ewert, F. K., (1985): "Rock grouting with emphasis on dam sites", Springer Verlag, Berlin-New York, Tokyo, 428.
- Ewert, F. K., (1997a): "Permeability, Groutability and grouting of rocks related to dam site, Part2: Permeability testing by means of water pressure teste", Dam Engineering, 8(2): 123-176.
- Ewert, F. K., (1997b): "Permeability, groutability and grouting of rocks, Part4: Groutability grouting of rocks", Dam Engineering, 8(4), 271-325.
- Nonveiller, E., (1989): "Grouting theory and practice, development of geotechnical engineering", Elsevier, 250 P.
- Houlby, A.C., (1990): "Construction and design of cement grouting", John-Wiley & Sons, 427.
- Kutzner, C., (1996): "Grouting of rock and soil", A. A. Balkema. Rotterdam, 286.
- Osazuwa, I. B., Chinedu, A. D., (2008): "Seismic refraction tomography imaging of high permeability zones beneath an earthen dam, in Zaria area, Nigeria", Journal of Applied Geophysics 66, 44-58.