ارزیابی طراحی پرده آب‌بند سد خاکی البرز با استفاده از نفوذپذیری و خورند سیمان

*حسین رزاززاده، سید محمود فاطمی عقدا: دانشگاه تربیت معلم
علی نورزاد: دانشکده مهندسی آبو محیط زیست، دانشگاه صنعت آب و برق
noorzad@pwut.ac.ir

تاریخ: دریافت ۸۹/۱۱/۱۰ **پذیرش**۹۰/۰۳/۱۷

چکیده

ساخت‌گاه سد البرز از سنگ‌های مارنی و ماسه سنگی تشکیل شده است. با توجه به این نکته که طرح ارائه شده برای پردهٔ آب‌بند در سنگ‌های مارنی (نسبتاً نرم با خصوصیات پلاستیکی) نسبت به سنگ‌های سخت و شکننده حداقل از نظر فاصله‌های گمانه‌ها (شعاع تأثیر دوغاب)، فشار تزریق (باربری و مقاومت سنگ) و حتی ترکیب و غلظت دوغاب متفاوت هستند، در این مقاله با تأکید بر دو پارامتر مهم نفوذپذیری و خورند سیمان به ارزیابی طرح تزریق پردهٔ آب‌بند سد البرز پرداخته شده است. بررسی نتایج خورند سیمان حاکی از فاصلهٔ زیاد گمانه‌های اولیه و عدم ارتباط مناسب بین گمانه‌های اولیه و ثانویه است. همچنین بررسی نتایج تزریق در گمانه‌های سری پنجم و ششم نشان می‌دهد که بعضی از گمانه‌های سری ششم تا سطح آب‌بندی اجرا نشده‌اند. با بررسی نمودارهای نرخ خورند- زمان- فشار و خورند- زمان در تکیه‌گاه راست سد، می‌توان به این نتیجه رسید که فشارهای تزریق متناسب با سنگ‌های مارنی و نفوذناپذیر پی اعمال نگردیده است و باعث شده پدیده‌هایی نامطلوب، از قبیل باز و بسته شدن درزه‌ها[1] و شکست هیدرولیکی[2] با فراوانی زیاد، خورندسیمان در این بخش از ساخت‌گاه را به طرز چشم‌گیری افزایش دهند. شایـان ذکر است کـه نتایج گمانه‌های

---

*نویسنده مسئول ۲. Hydrofracture ۱.Hydrojacking

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

کنترلی در تکیه‌گاه سمت راست بیان‌گر آن است که آب‌بندی در این محدوده تا حد قابل قبولی فراهم شده است.

واژه‌های کلیدی: سد البرز، سنگ مارن، نفوذپذیری، خورند سیمان، اتساع درزه، شکست هیدرولیکی

مقدمه

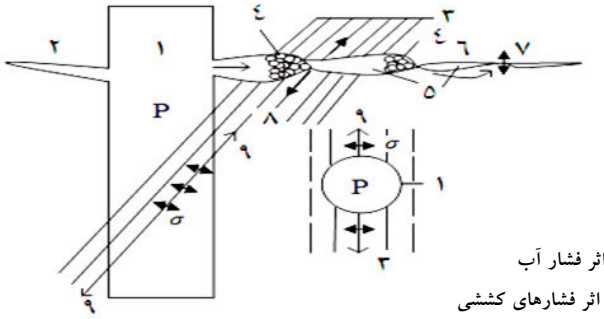
سد خاکی البرز با ارتفاع ۷۸ متر از پی و طول تاج ۸۳۱ متر و حجم مفید مخزن ۱۵۰ میلیون متر مکعب بر روی رودخانه بابل و در حدود ٤٠ کیلومتری جنوب شهرستان بابل در استان مازندران واقع شده است. طول جغرافیایی محل سد ۵۲/۸ درجهٔ شرقی و عرض جغرافیایی آن ۲۳/ ۳٦ درجهٔ شمالی است. با توجه به موقعیت محور سد که از سنگ‌های مارنی و نفوذناپذیر تشکیل شده است، طراحی پردهٔ آب‌بند آن نیازمند تمهیدات خاصی، به‌خصوص در زمینهٔ فشار تزریق است. فشار تزریق در سنگ‌های مارنی باید به گونه‌ای اعمال گردد تا میزان وقوع پدیده‌هایی مانند شکست هیدرولیکی و اتساع درزه‌ها به کم‌ترین میزان خود برسد. عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی عبارتند از: مقاومت کششی سنگ، نوع ناپیوستگی و زاویهٔ تقاطع بین گمانه و صفحات ناپیوستگی، که تأثیر دو مورد اول بر کنترل شکست هیدرولیکی بیش‌تر است. قابلیت تراکم ناپیوستگی‌ها و مسیرهای عبور آب مهم‌ترین عامل در ایجاد اتساع است. سطوح لایه‌بندی و سطوح کلیواژ قابلیت خاصی برای شکست هیدرولیکی دارند و زاویهٔ تقاطع ۹۰ درجهٔ اتساع و شکست هیدرولیکی را ساده‌تر می‌کند.

در درزه‌های نزدیک سطح (که در عمق ۲۰-۱۰ متری سطح زمین قرار دارند) در صورت وقوع هوازدگی مقاومت در سطح ناپیوستگی‌ها کاهش می‌یابد و پیوستگی سنگ از بین می‌رود. با رشد خردشدگی و متلاشی شدن، جدایش زیاد شده و واحدهای سنگی قابل انتقال نسبت به سایر سنگ‌ها را ایجاد می‌کند. در نتیجه در اعماق کم وزن لایه‌های بالایی عاملی مؤثر بر شکست سنگ در امتداد ناپیوستگی‌ها است و با افزایش عمق میزان فشار بحرانی افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

در اعماق پایین‌تر و با کاهش شدت هوازدگی، ارتباط بین واحدهای سنگی مستحکم‌تر است و مقدار فشار بحرانی به انواع ناپیوستگی‌های موجود، درجهٔ جدایش و مقاومت مقطع سنگ‌های اطراف گمانه بستگی دارد. مکانیسم وقوع شکست هیدرولیکی و اتساع درزه‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۱].



۱. گمانهٔ تحت فشار تزریق
۲. درزهٔ ذاتی ۳. درزه‌های پنهانی
٤. جدایش دانه‌های سیمان ٥. آب
٦. جدایش با فشار ۷. اتساع درزه
۸. امکان ایجاد شکست هیدرولیکی در اثر فشار آب
۹. امکان ایجاد شکست هیدرولیکی در اثر فشارهای کششی

شکل ۱. مکانیسم وقوع شکست هیدرولیکی و اتساع درزه [۲]

زمین‌شناسی منطقه

محل سد بر روی یال شمالی محور یک تاقدیس با امتداد محوری تقریباً خاوری- باختری واقع شده است. از پدیده‌های مهم ساختمانی در این محل وجود گسل‌های متعددی است که از محل سد و یا از فاصله‌های نزدیک آن عبور می‌کند. به دلیل پوشیده بودن محل سد درزه‌های قابل اندازه‌گیری کم بوده و فقط در رخنمون‌های کوچک پراکنده در این محل دیده می‌شوند.

نهشته‌های رسوبی تشکیل دهندهٔ سنگ محل سد از قدیم به جدید عبارتند از:

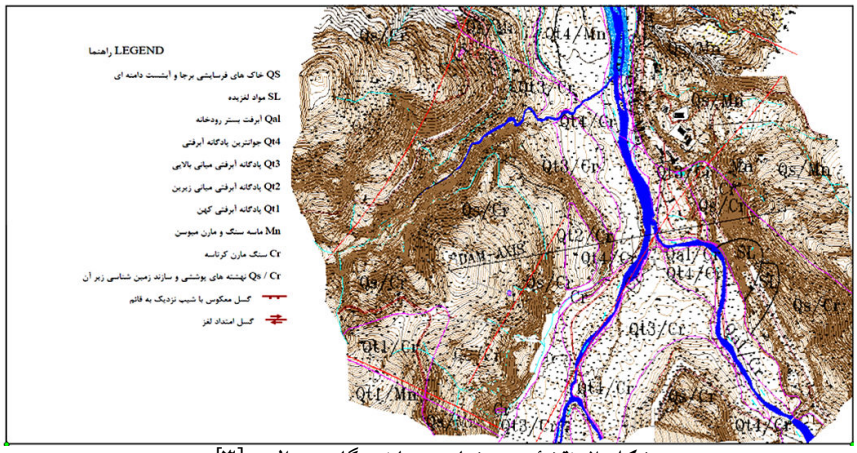
۱. **مارن‌های کرتاسه:** این لایه‌های رسوبی شامل مارن‌های توده‌ای کرتاسه بالایی است و قسمت اصلی پی سنگ محل سد از آن تشکیل شده است. در میان این لایه‌های مارنی گاه درون لایه‌هایی به ضخامت نیم‌متر که به‌طور تدریجی به ماسه سنگ مارنی تبدیل شده‌اند دیده می‌شود.

۲. **مارن‌ها و ماسه سنگ‌های میوسن:** این لایه‌های رسوبی اغلب شامل مارن‌های قرمز رنگ و ماسه سنگ به رنگ سبز و خاکستری و سفید است و گاهی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

لایه‌های نازک میکروکنگلومرا در میان آن‌ها دیده می‌شود. این لایه‌های رسوبی با یک ناپیوستگی هم‌شیب بر روی مارن‌های توده‌ای کرتاسه قرار گرفته‌اند.

۳. **رسوبات عهد حاضر**: که شامل نهشته‌های آبرفتی و خاک‌های فرسایشی برجا و دامنه‌ای ساخت‌گاه سد است. نقشهٔ زمین‌شناسی ساخت‌گاه سد البرز در شکل ۲ ارائه گردیده است [۳].



شکل ۲. نقشهٔ زمین‌شناسی ساخت‌گاه سد البرز [۳]

آزمایش پله‌ای فشار آب

این آزمایش معمول‌ترین آزمون برای تعیین تزریق‌پذیری سنگ‌ها به‌شمار می‌آید و معمولاً در ۵ پله صورت می‌گیرد. اولین آزمایش در فشار کم، آزمایش دوم در فشار متوسط و سومین آن‌ها در فشار حداکثر، آزمایش چهارم در فشاری انجام می‌شود که در آزمایش دوم اعمال شده است و بالاخره آزمایش نهایی با فشار مشابه آزمایش اول انجام می‌شود. فشارهای آزمایش با توجه به عمق آزمایش و مقاومت سنگ تعیین می‌شود [٤].

در سد البرز به‌منظور تعیین نفوذپذیری ساخت‌گاه در تمامی گمانه‌های اولیه، آزمایش لوژان انجام گرفته است. بیش‌تر این آزمایش‌ها در ۳ پله و در گام‌های ۵ متری انجام گردیده است. نتایج بیش از ٤۲۰ آزمایش لوژان در سد البرز در جدول ۱ آورده شده است. حدود ۸۷٪ از

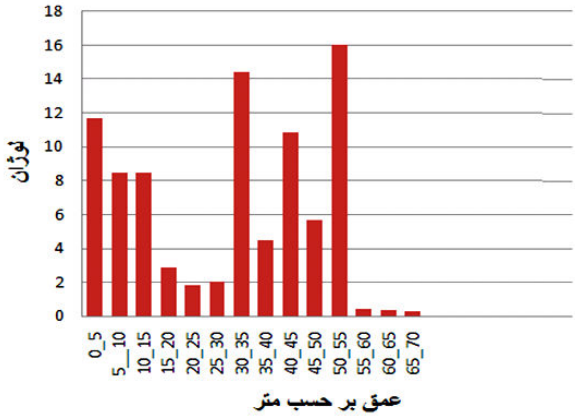
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

آزمایش‌های لوژان صورت گرفته دارای نفوذپذیری کم‌تر از ۳ بود، که بیان‌گر نفوذپذیری پایین ساخت‌گاه سد هستند.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های لوژان در سد البرز

نفوذپذیری (لوژان)	۰	۰-۳	۳-۱۰	۱۰-۳۰	۳۰-۶۰	>۶۰
فراوانی٪	٪۶۲	٪۲۵	٪۴	٪۳	٪۲	٪۴

در قسمت‌های سطحی ساخت‌گاه سد البرز به‌دلیل گسترش هوازدگی و ارتباط شبکه‌های درز و شکاف با یک‌دیگر، تودهٔ سنگ دارای نفوذپذیری اندک (در حد ۱۰ لوژان) است. با افزایش عمق، نفوذپذیری تا حد زیادی کاهش می‌یابد و در بیش‌تر موارد به‌حالت غیرقابل نفوذ می‌رسد. تنها در جناح راست به‌دلیل تغییرات سنگ‌شناسی (تبدیل مارن به ماسه سنگ آهکی) در اعماق ۵۵-۳۰ متری، نفوذپذیری نسبت به‌قسمت‌های سطحی افزایش یافته است. شکل ۳ تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق در ٤ گمانهٔ اکتشافی (PR 27, PR 28, PR 29, PR 30) قسمت بالادستی جناح راست ساخت‌گاه سد البرز را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق در گمانه‌های اکتشافی قسمت بالادستی جناح راست ساخت‌گاه سد البرز

آرایش گمانه‌ها، سطح آب‌بندی و مصالح تزریق

بر اساس یافته‌های انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) پرده‌های تزریق یک ردیفه فقط در سنگ‌هایی که دارای ناپیوستگی‌های منظم و بازشدگی یک‌نواخت هستند کاربرد دارند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

و این انجمن روش نصف کردن فاصله را برای این گونه پرده‌های تزریق پیشنهاد می‌کند. در این روش ابتدا گمانه‌های سری اول در یک فاصلهٔ مشخص حفر و تزریق خواهند شد. سپس گمانه‌های تزریق سری دوم در وسط گمانه‌های سری اول حفر و تزریق می‌شوند. نصف کردن فاصلهٔ بین گمانه‌ها آن قدر ادامه خواهد یافت تا نفوذپذیری یا خورند سیمان معادل آن به حد تعریف شده که سطح آب‌بندی نامیده می‌شود کاهش یابد. سطح آب‌بندی مجاز، به شرایط زمین‌شناسی، نوع سد و ارزش اقتصادی آب نشتی بستگی دارد. اگر آب نشتی ارزش اقتصادی زیادی نداشته باشد، معمولاً مرز آب‌بندی با مقدار نفوذپذیری ۳ لوژان و یا سیمان‌خوری ۳۰-۵۰ kg/m مشخص می‌شود. فاصله‌داری گمانه‌های اولیه نباید به‌اندازه‌ای زیاد باشد که میزان خورند در گمانه‌های ثانویه بی‌تأثیر از گمانه‌های اولیه باشد. به‌عبارت دیگر، شعاع نفوذ دوغاب باید بیش از نصف فاصله‌داری گمانه‌های اولیه باشد. اگر گمانه‌های اولیه آن‌قدر نزدیک باشند که ارتباط دوغاب بین آن‌ها برقرار باشد، کیفیت تزریق کاهش می‌یابد. در صورتی که نفوذپذیری گمانه‌ها به‌اندازه‌ای پایین باشد که امکان ارتباط هیدرولیکی گمانه‌ها بسیار کم باشد، استفاده از سیمان تیپ III به‌دلیل ریزدانه بودن اجزای سیمان نسبت به سیمان‌های تیپ I و II و قابلیت بیش‌تر در نفوذ در درزه‌های کوچک و ظریف، دارای اولویت است و فاصلهٔ ۸- ٦ متر برای گمانه‌های اولیه مناسب است. به‌هر حال فاصله‌داری اولیهٔ گمانه‌ها نباید به‌اندازه‌ای زیاد باشد که نیاز به تزریق گمانه‌های سری ششم و هفتم باشد [۵]، [٦]، [۷].

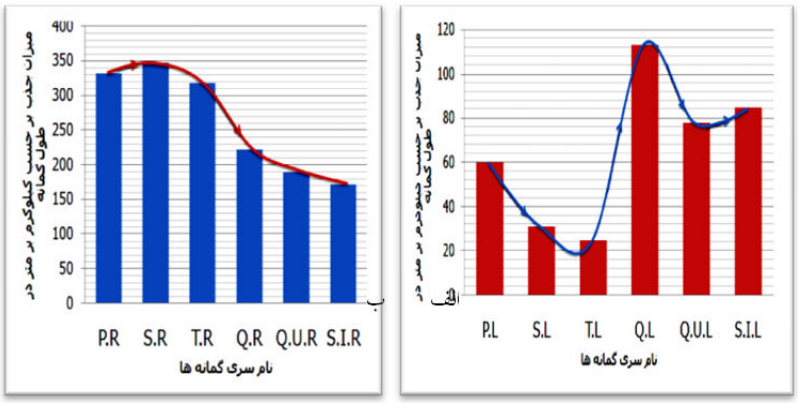
شکل ٤. الف تغییرات جذب دوغاب در گمانه‌های تزریق سری اول تا ششم تکیه‌گاه راست سد البرز را نشان می‌دهد. برای اجرای پردهٔ آب‌بند در این قسمت از گالری سراسری تعداد ۳۱ حلقهٔ گمانه برای سری اولیه (P) با طول ۱٤۲۷ متر حفاری شده، که میزان جذب دوغاب در آن‌ها برابر ۳۳۲ kg/m است. پس از آن گمانه‌های سری ثانویه (S) با طول ۱۲۱۲ متر در قالب ۳۰ حلقه گمانه حفاری شده‌اند، در این سری جذب دوغاب در گمانه‌ها به‌مقدار ۳٤۷ kg/m رسیده است. گمانه‌های سری سوم (T) نیز به طول ۲٤۳۲ متر در قالب ٦۰ گمانه حفاری و تزریق شده‌اند. میزان جذب دوغاب در این سری از گمانه‌ها ۳۱۸ kg/m است. گمانه‌های سری چهارم (QR) به تعداد ٤۲ حلقه و طول ۲۳۱٤ متر دارای جذب۲۲۲ kg/m

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

هستند. گمانه‌های سری پنجم (QUR) به تعداد ۵۶ حلقه و طول ۳۶۱۶ متر دارای میزان جذب دوغاب ۱۸۹ kg/m و گمانه‌های سری ششم (SIR) به تعداد ۸۷ حلقه و طول ۵۳۳۰ متر دارای جذب ۱۷۲ kg/m است.

شکل ٤. ب نشان دهندهٔ تغییرات جذب دوغاب در گمانه‌های تزریق سری اول تا ششم تکیه‌گاه چپ سد البرز است.



ب الف

شکل ٤. الف) تغییرات جذب دوغاب در گمانه‌های سری اول تا ششم تکیه‌گاه راست سد البرز
ب) تغییرات جذب دوغاب در گمانه‌های سری اول تا ششم تکیه‌گاه چپ سد البرز

روند افزایش خورند در گمانه‌های سری اولیه نسبت به گمانه‌های سری ثانویه در تکیه‌گاه راست و همچنین افزایش خورند گمانه‌های سری چهارم نسبت به گمانه‌های سری سوم تکیه‌گاه چپ، بیان‌گر این واقعیت است که خورند گمانه‌های سری اول تا ششم چندان متأثر از هم نیستند. چنین روندی در افزایش جذب دوغاب بیان‌گر فاصله‌داری زیاد گمانه‌های اولیه است. نفوذپذیری پایین در ساخت‌گاه سد البرز (عمدتاً زیر ۳ لوژان) بیان‌گر این است که بازشدگی درزه‌ها کم و بنا بر این شعاع نفوذ دوغاب کم خواهد بود. از این رو به‌عنوان یک پیشنهاد اولیه، به‌نظر می‌رسد که فاصله‌داری ۸ متر برای گمانه‌های اولیه مناسب باشد. ولی مقدار این فاصله به‌علت یک‌نواخت فرض کردن شرایط سنگ‌شناسی ۱۶ متر انتخاب شده است. هم‌چنین در عملیات تزریق پردهٔ آب‌بند سد البرز از سیمان تیپ II استفاده شده است،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

استفاده از سیمان تیپ III به‌دلیل ریزدانه‌تر بودن اجزا سیمان و نفوذ بهتر در درز و شکاف‌های کوچک و ظریف ساخت‌گاه سد البرز دارای اولویت است. هر چند که عملیات تزریق با آمیزهٔ سیمان ریزدانه گران تمام می‌شود ولی ویژگی‌های ممتاز آن از نقطه نظر قدرت نفوذ و آب‌اندازی می‌تواند منجر به کاهش تعداد گمانه‌های مورد نیاز شده و استفاده از آن را از نظر هزینه توجیه کند.

خورند سیمان در گام ۷۵-۷۰ از گمانهٔ سری پنجم Q.U.R223 معادل ۱۰۵۰kg/m است. دلیل این خورند زیاد هر چه که باشد، باید گمانه‌های سری ششم در دو طرف Q.U.R.223 تا عمق ۷۵ متری حفر و تزریق شوند. ولی گمانه‌های S.I.R.445 و S.I.R.446 تا عمق ۵۵ و ٦۰ متری تزریق شده‌اند. خورند سیمان در گام۸۰-۷۵ گمانه سری پنجم Q.U.R226 معادل ۱٥٤۰kg/m است. گمانه‌های سری ششم در طرفین Q.U.R226 باید تا عمق ۸۰ متری حفر و تزریق شوند در حالی‌که فقط گمانهٔ S.I.R.452 تا عمق ۸۰ متری حفر و تزریق شده است. گمانهٔ S.I.R.451 دارای عمق ٦٥ متر است. تمامی گمانه‌های تزریق سری‌های پنجم و ششم قسمت بالادستی تکیه‌گاه راست سد البرز به لحاظ سطح آب‌بندی بررسی شده و نتایج آن که حاکی از عدم تقارن گمانه‌ها و عدم لحاظ سطح آب‌بندی مشخص برای این پروژه است در جدول ۲ ارائه شده است.

مقایسهٔ عدد لوژان و خورند دوغاب در عملیات تزریق سد البرز

برای مقایسهٔ عدد لوژان و خورند دوغاب در گمانه‌های سری اولیه قسمت بالادستی تکیه‌گاه راست، نموداری بر اساس میزان خورند بر حسب کیلوگرم بر متر و نیز عدد لوژان به‌دست آمده از آزمایش لوژان ترسیم شده که در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به نمودار ترسیم شده برای عدد لوژان و میزان سیمان‌خوری در تکیه‌گاه راست سد البرز، چهار حالت کلی در این نمودار مشاهده می‌گردد که عبارتند از:

گروه اول) مقادیر لوژان و سیمان‌خوری هر دو اندک است (عدد لوژان کم‌تر از ۵ و خورند دوغاب کم‌تر از ٤۰ کیلوگرم در متر). این حالت می‌تواند بیان‌گر وجود درزه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

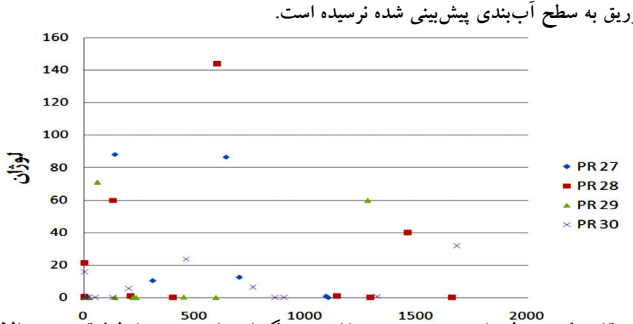
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

بسیار ریز باشد که ارزش تزریق ندارند. همچنین می‌توان احتمال داد که تودهٔ سنگ ناتراوا است و یا این که پرشدگی درزه‌های حاوی رس، سیلت و یا کلسیت مانع از جریان یافتن آب و دوغاب در درزه‌ها گردیده‌اند.

جدول ۲. بررسی سطح آب‌بندی پروژه با استفاده از گمانه‌های تزریق سری پنجم و ششم قسمت بالادستی تکیه‌گاه راست سد البرز

	گمانه های سری ششم	گمانه های سری پنجم	گمانه های سری ششم
	S.I.R.439	Q.U.R.220	S.I.R.440
عمق تزریق (m)	75	75-80	70
خورند (kg/m)		80	
سطح آب بندی(m)	80	80	80
	S.I.R.443	Q.U.R.222	S.I.R.444
عمق تزریق (m)	50	55-60	55
خورند (kg/m)		420	
سطح آب بندی(m)	60	60	60
	S.I.R.445	Q.U.R.223	S.I.R.446
عمق تزریق (m)	55	70-75	60
خورند (kg/m)		1050	
سطح آب بندی(m)	75	75	75
	S.I.R.451	Q.U.R.226	S.I.R.452
عمق تزریق (m)	65	75-80	80
خورند (kg/m)		1540	
سطح آب بندی(m)	80	80	80
	S.I.R.455	Q.U.R.228	S.I.R.456
عمق تزریق (m)	80	75-80	60
خورند (kg/m)		605	
سطح آب بندی(m)	80	80	80
	S.I.R.457	Q.U.R.229	S.I.R.458
عمق تزریق (m)	75	70-75	60
خورند (kg/m)		605	
سطح آب بندی(m)	75	75	60
	S.I.R.461	Q.U.R.231	S.I.R.462
عمق تزریق (m)	60	75-80	70
خورند (kg/m)		740	
سطح آب بندی(m)	80	80	80
	S.I.R.469	Q.U.R.235	S.I.R.470
عمق تزریق (m)	80	75-80	70
خورند (kg/m)		820	
سطح آب بندی(m)	80	80	80

عمق تزریق به سطح آب‌بندی پیش‌بینی شده نرسیده است.



شکل ۵. نمودار مقایسهٔ عدد لوژان و خورند دوغاب در گمانه‌های سری اولیهٔ قسمت بالادستی تکیه‌گاه راست سد البرز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

گروه دوم) مقادیر لوژان زیاد، ولی سیمان‌خوری خیلی کم است (عدد لوژان تا ۲۰ و میزان جذب دوغاب کم‌تر از ٤۰ کیلوگرم در متر). این حالت می‌تواند نشان‌گر وجود درزه‌های باریک در تودهٔ سنگ باشد. در این حالت آب می‌تواند در درزه‌ها نفوذ کند و به‌همین دلیل آب‌خوری زیاد است ولی نفوذ دوغاب به علت وجود دانه‌های سیمان مشکل است، در نتیجه تزریق‌پذیری این توده سنگ‌ها کم است.

گروه سوم) مقدار لوژان و سیمان خوری هر دو زیاد است (عدد لوژان بیش از ۳۰ و خورند دوغاب از ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر). در این حالت تناسب تقریبی بین این دو مقدار وجود دارد و می‌تواند بیان‌گر وجود درزه‌های باز و یا سطوح لایه‌بندی باشد که در نتیجهٔ آن آب و دوغاب به راحتی در آن‌ها جریان می‌یابند.

گروه چهارم) خورند آب در آزمایش لوژان اندک است ولی سیمان‌خوری زیاد است (عدد لوژان کم‌تر از ۵ و خورند دوغاب بیش از ۱۰۰ کیلوگرم در متر تا حتی بیش تر از ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر). این حالت می‌تواند نمایان‌گر پدیدهٔ شکست هیدرولیکی، فرسایش مواد داخل درزه‌ها و یا اتساع درزه‌ها باشد. شکستگی هیدرولیکی می‌تواند در اثر شکسته شدن درزه‌های پنهان سنگ بر اثر فشار زیاد تزریق رخ دهد و نیز فرسایش و حرکت مواد بر اثر فشار تزریق که بیش از فشار آزمایش لوژان است می‌تواند این حالت را به وجود آورد.

بررسی آماری گروه‌های چهارگانه بیان‌گر این واقعیت است که حدود ۵۸٪ منطقه نفوذناپذیر در این بخش از ساخت‌گاه در اثر شکست هیدرولیکی، اتساع درزه و یا فرار دوغاب دارای خورند بیش از ۱۰۰ کیلوگرم در متر شده‌اند. برای تشخیص علت اصلی افزایش میزان خورند در تکیه‌گاه راست سد البرز از نمودارهای ۱. نرخ خورند-زمان- فشار و ۲. خورند تجمعی- زمان استفاده می‌شود.

نمودارهای نرخ خورند-زمان- فشار و خورند تجمعی- زمان

هولزبی[۱] (۱۹۹۰) برای ارزیابی عملیات تزریق استفاده از نمودارهای خورند تجمعی- زمان را پیشنهاد کرد [٤]. کاتزنر[۲] (۱۹۹٦) با تغییر پارامتر خورند تجمعی به نرخ خورند و در نظر

۱. Houlsby ۲. Kutzner

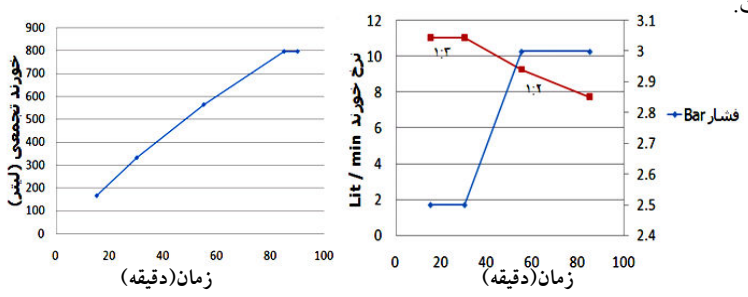
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

گرفتن فشار تزریق استفاده از نمودارهای نرخ خورند- زمان - فشار را برای ارزیابی عملیات تزریق پیشنهاد کرده است [۸].

بـا استفاده از این دو نوع نمودار مـی‌توان رونـد عـادی تـزریق، اتساع درزه، شکست هیدرولیکی و فرار دوغاب را تشخیص داد.

تزریق موفق: شکل ٦. الف نمودار نرخ خورند- زمان- فشار و شکل ٦. ب نمودار خورند تجمعی- زمان، متعلق به تزریق موفقیت‌آمیز در مقطع ۵-۰ گمانه اولیه PR29 است. در نمودار نرخ خورند-زمان- فشار هم‌زمان با افزایش فشار تزریق کاهش نرخ خورند مشاهده می‌شود. در نمودار خورند تجمعی- زمان، افزایش آرام فشار باعث افزایش تدریجی در مقدار خورند دوغاب شده است. با افزایش فشار، میزان خورند به بیش‌ترین مقدار خود رسیده و پس از آن روند نزولی پیدا می‌کند تا در نهایت نقطهٔ امتناع[۱] حاصل می‌شود. حداکثر نرخ خورند در نیم ساعت اول و نقطهٔ امتناع پس از گذشت ۸۰ دقیقه حاصل شده است.



ب الف

شکل ٦. الف) نمودار نرخ خورند- زمان- فشار مقطع ۵-۰ از گمانه(PR29) ب) نمودار خورند تجمعی- زمان مقطع ۵-۰ از گمانه(PR29)

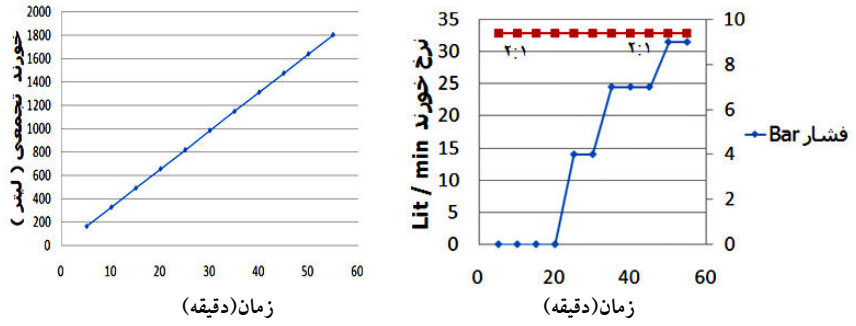
فرار دوغاب: شکل ۷. الف نمودار نرخ خورند- زمان- فشار و شکل ۷. ب نمودار خورند تجمعی-زمان، متعلق بـه فـرار دوغاب در مقطع ۸۰ -۷۰ گمانـه PR29 است. در نمودار نرخ خورند- زمان- فشار هم‌زمان با افزایش فشار تزریق تغییری در نرخ خورند به وقوع نمی‌پیوندد و نرخ خورند دارای مقدار ثابتی است. در نمودار خورند تجمعی- زمان هم‌زمان با

۱ . Refusal point

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

افزایش فشار تزریق، خورند دارای روند صعودی است و هیچ‌گونه نشانه‌ای از کاهش خورند مشاهده نمی‌شود.



ب الف

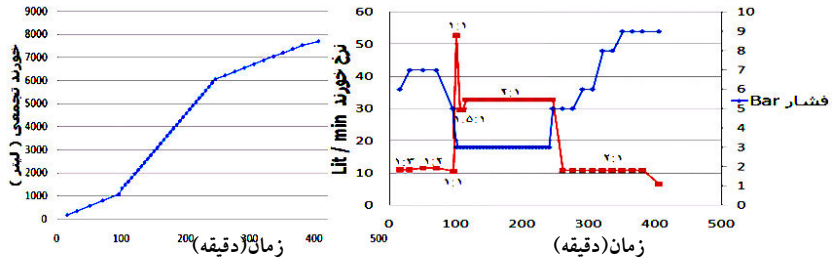
شکل ۷. الف) نمودار نرخ خورند- زمان - فشار مقطع ۸۰-۷۰ از گمانه(PR29) ب) نمودار خورند تجمعی- زمان مقطع ۸۰-۷۰ از گمانه (PR29)

شکست هیدرولیکی: شکل ۸. الف نمودار نرخ خورند- زمان- فشار و شکل ۸. ب نمودار خورند تجمعی- زمان، متعلق به شکست هیدرولیکی در مقطع ۵۰-۴۰ گمانه PR29 است. در نمودار نرخ خورند- زمان- فشار هم‌زمان با افزایش فشار تزریق و کاهش نرخ خورند، به‌طور ناگهانی افت فشار و افزایش نرخ خورند به وقوع می‌پیوندد. در نمودار خورند تجمعی- زمان شیب خورند دوغاب در اثر ایجاد درز و شکاف‌های جدید و افزایش نرخ خورند به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و هیچ‌گونه نشانه‌ای از کاهش خورند دوغاب و رسیدن به نقطهٔ امتناع مشاهده نمی‌شود.

باز و بسته شدن درزه‌ها: شکل ۹. الف نمودار نرخ خورند- زمان- فشار و شکل ۹. ب نمودار خورند تجمعی- زمان، متعلق به اتساع درزه در مقطع ۸۰-۷۵ گمانه PR28 است. در نمودار نرخ خورند- زمان- فشار هم‌زمان با افزایش فشار تزریق، نرخ خورند (به‌علت اعمال فشار تزریق کاذب و باز و بسته شدن درزه‌ها) به‌طور متناوب کم و زیاد می‌شود. در نمودار خورند- زمان شیب خورند دوغاب در اثر باز و بسته شدن درزه‌ها به‌طور متناوب کم و زیاد می‌شود.

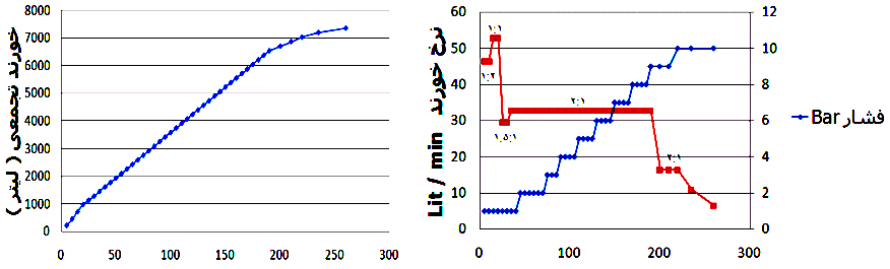
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]



ب الف

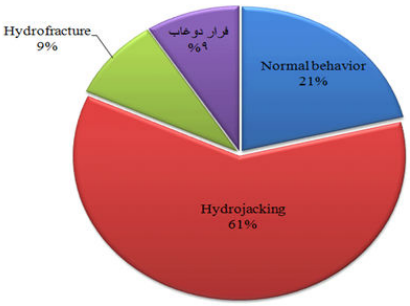
شکل ۸. الف) نمودار نرخ خورند- زمان - فشار مقطع ۵۰-۴۰ از گمانه(PR29) ب) نمودار خورند تجمعی- زمان مقطع ۵۰-۴۰ از گمانه (PR29)



ب الف

شکل ۹. الف) نمودار نرخ خورند- زمان- فشار مقطع ۸۰-۷۵ از گمانه(PR28) ب) نمودار خورند تجمعی- زمان مقطع ۸۰-۷۵ از گمانه (PR28)

۳۳ قطعهٔ تزریق شده در گمانه‌های اولیه قسمت بالادستی تکیه‌گاه راست سد البرز (PR27، PR28، PR29 و PR30) با نمودارهای نرخ خورند- زمان- فشار و خورند تجمعی- زمان بررسی شده‌اند. نتایج ارزیابی انجام گرفته بر روی این نمودارها در شکل ۱۰ ارائه شده است.

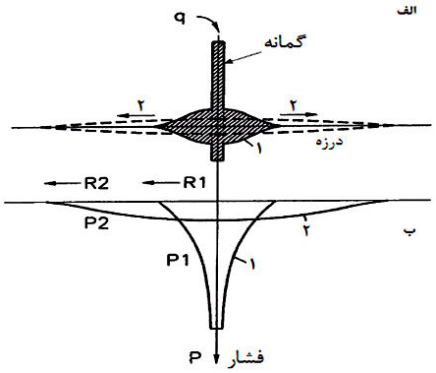


شکل ۱۰. نتایج ارزیابی عملیات تزریق در گمانه‌های PR 27، PR 28، PR 29 و PR30

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

درز و شکاف‌های موجود در لایهٔ ماسه سنگی سست تکیه‌گاه سمت راست به‌طور مداوم باز و بسته شده و باعث شده است، اتساع با فراوانی٦١ درصد مهم‌ترین عامل در افزایش چشم‌گیر خورند دوغاب در تکیه‌گاه راست سد البرز باشد. اعمال فشار تزریق تا مرز ۱۰bar ، بالاتر از فشار بحرانی تودهٔ سنگ (۷bar) است و باعث ایجاد پدیده نامطلوب اتساع درزه‌ها در حین عملیات تزریق می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نحوهٔ وقوع پدیده باز و بسته شدن درزه‌ها در شکاف‌ها

۱. وضعیت درزهٔ قبل از اتساع ۲. وضعیت درزهٔ بعد از اتساع، q جریان دوغاب، P فشار، R شعاع درزه

نتیجه‌گیری

امروزه به‌دست مهندسان، طراحی و ساخت سدهای بزرگ در کشور انجام می‌شود. اما در برخی از زمینه‌ها از جمله طراحی و اجرای پرده آب‌بند خالی از اشکال نیست. بررسی یک پروژه انجام شده می‌تواند راه‌گشایی برای طراحی‌های بهینه در آینده و رفع کاستی‌های گذشته باشد. علت‌یابی نقاط ضعف یک پروژه از تکرار آن در پروژه‌های بعدی جلوگیری می‌کند و به‌عنوان تجربه‌ای مفید می‌تواند در کارهای آینده به کارشناسان و طراحان کمک کند.

مهم‌ترین نتایج این مقاله را می‌توان بدین صورت دسته‌بندی کرد:

۱) در ساخت‌گاه سد البرز که دارای نفوذپذیری پایین (بازشدگی درزه‌ها کم و شعاع نفوذ دوغاب کم) است، فاصله داری ۸ – ٦ متر برای گمانه‌های اولیه تزریق مناسب است. در هر صورت فاصله‌داری اولیهٔ گمانه‌ها نباید به اندازه‌ای باشد که نیاز به حفاری و تزریق گمانه‌های سری ششم احساس شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

۲) فاصلهٔ بین گمانه‌های اولیه تزریق متناسب با تغییرات سنگ‌شناسی (تبدیل مارن به ماسه‌سنگ آهکی) در جناح راست ساخت‌گاه سد البرز تعیین نشده است.

۳) عمق حفاری و تزریق تعدادی از گمانه‌های تزریق پردهٔ آب‌بند سد البرز به سطح آب‌بندی ایده‌آل پروژه نرسیده است (سطح آب‌بندی ایده‌آل پروژه سیمان‌خوری ۳۰-۵۰kg/m است).

٤) در عملیات تزریق پردهٔ آب‌بند ساخت‌گاه سد البرز که دارای نفوذپذیری پایین هستند، استفاده از سیمان تیپ III به‌دلیل ریزدانه‌بودن اجزای سیمان نسبت به سیمان‌های تیپ I و II و قابلیت بیش‌تر در نفوذ در درزه‌های کوچک و ظریف، دارای اولویت است.

۵) فشار آب مخزن سد البرز (حدوداً ۷bar) کم‌تر از فشار حداکثر تزریق (۱۰bar) است. بر این اساس پدیدهٔ شکست هیدرولیکی که در طی عملیات تزریق به‌وقوع پیوسته است، لازم نیست.

٦) با بررسی نمودار لوژان– خورند در گمانه‌های اولیهٔ تزریق تکیه‌گاه سمت راست البرز می‌توان به این نتیجه رسید که، قطعاتی که دارای نفوذپذیری کم‌تر از سه لوژان هستند، غیرقابل نفوذ تلقی نشده و با ایجاد درز و شکاف‌های مصنوعی(شکست هیدرولیکی) و باز و بسته شدن درزه‌ها تزریق انجام گرفت.

۷) اعمال فشار تزریق حداکثر برای مقاطع، بدون طی روند صعودی در افزایش فشار تا رسیدن به فشار حداکثر، باعث از بین رفتن مقاومت سنگ و در نهایت بروز پدیده‌هایی از قبیل شکست هیدرولیکی و باز و بسته شدن درزه‌ها در تکیه‌گاه سمت راست سد البرز شده است.

۸) رسم نمودارهای نرخ خورند- زمان- فشار و خورند تجمعی- زمان در حین تزریق، می‌تواند به کنترل تزریق و تصمیم‌گیری به موقع در مقابله با نارسایی‌ها و مشکلات بسیار مؤثر باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]

تشکر و قدردانی

مؤلفان بر خود لازم می‌دانند از شرکت مهندسین مشاور مهاب‌قدس و شرکت سابیر به خاطر در اختیار گذاشتن گزارش‌ها و اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی را بکند.

منابع

1. Ewert, F. K., Permeability, "Groutability and grouting of rocks relation to dam sites, Groutability and grouting of rocks", Dam Engineering Journal, Vol. 8 (1998) 271-325.
2. Lombardi, G., "Grouting of rock masses, 3rd International Conference on Grouting and Grout Treatment", New Orleans (2003) 1-18.
۳. شرکت مهندسین مشاور مهاب‌قدس، *گزارش زمین‌شناسی مهندسی سد البرز*، مطالعات مرحلهٔ دوم، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران، ساری، ایران (۱۳۷۷).
4. Houlsby, A. C., "Construction and design of cement grouting", John Wiley and Sons Publisher, New York (1990).
5. Weaver, K., "Dam foundation grouting", ASCE, New York (1991).
6. Widmann, R., "Commission on rock grouting, International Journal for Rock Mechanic", Vol. 33, No. 8 (1996) 803-847.
7. Kutzner, C., "Grouting of rock and soil, Brookfield Publisher", Rotterdam (1996).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.3.3]