

## کاربرد روش موازنه فشار تزریق و فشار سطح آب مخزن در کنترل نشتی سد زاوین (استان خراسان رضوی)

اکبر قاضی فرد<sup>۱</sup>، ناصر مافطی مقدس<sup>۲</sup> و ناصر تالی<sup>۳\*</sup>

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ghazifard@yahoo.com

(۲) دانشکده علوم زمین، دانشگاه فردوسی مشهد، nhafezi@shahroodut.ac.ir، nasertali@yahoo.com

(\*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۰/۱/۱۵؛ دریافت اصلاح شده: ۹۰/۷/۵؛ پذیرش: ۹۰/۷/۲۰؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۱۱/۲۰

### چکیده

محدود نمودن نشت آب از پایین دست سدها از الزامات طراحی و اجرای مناسب آن‌ها می‌باشد. این مسئله از طریق شناسایی صحیح ساختارهای زمین‌شناسی و طراحی و اجرای درست پرده تزریق با توجه به این ساختارها قابل دست‌یابی است. این موضوع در خصوص سد زاوین مورد بررسی قرار گرفت. با آغاز بهره‌برداری از سد زاوین و بالا آمدن تراز آب دریاچه پشت سد، نشت آب در پایین دست سد و بخصوص در تکیه‌گاه چپ مشاهده شد. در این پژوهش، به منظور مشخص شدن علت نشت آب، برداشت صحرایی و بررسی ساختار زمین‌شناسی ساختگاه سد، مطالعات جامعی انجام شد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، پرده تزریق جدید و تزریق تحکیمی طراحی و برای رفع مشکل نشتی‌های باقیمانده نیز «روش تزریق موازنه فشار تزریق با فشار آب مخزن» اجرا شد. در حین انجام عملیات تزریق نیز آزمون‌های مورد نیاز جهت ایجاد دوغاب تزریق پایدار که دارای کمترین میزان جدایش باشد و بتواند ناپیوستگی‌های توده‌سنگ را به خوبی پر کند، صورت گرفت. این عملیات در نهایت باعث حذف نشتی آب در پایین دست سد گردید. نتایج این تحقیق می‌تواند در آب‌بندی سدها با این خصوصیات مفید باشد.

**واژه‌های کلیدی:** سد زاوین، تزریق، نشت آب، ترکیب دوغاب.

### ۱- مقدمه

نظر از نوع مصالح به کار رفته در بدنه و یا نحوه طراحی، احتمال وقوع نشت وجود داشته و این آب می‌تواند از مقادیر بسیار ناچیز تا حجم‌های قابل توجه تغییر نماید. نشت آب در پایین دست سدها می‌تواند به صورت افزایش رطوبت، ایجاد نرمی در خاک همراه با توسعه پوشش گیاهی، جریان‌های متمرکز و کانالی شکل از آب و یا به شکل افزایش آبدهی چشمه‌ها و بالا آمدن سطح پیرومتری آب

به دنبال ساخت سد، شیب هیدرولیکی بزرگی در بالادست سد نسبت به پایین دست آن ایجاد می‌گردد که این امر باعث ایجاد تمایل به نشت و حرکت آب از بالادست سد به سمت پایین دست می‌شود. هدف از احداث پرده تزریق، پرده آب‌بند و سایر روش‌های آب‌بندی، جلوگیری یا کاهش این حرکت به سمت پایاب می‌باشد. در تمامی سدها، صرف

ایجاد امکانات تفریحی، ماهیگیری، تأمین آب کشاورزی و ناحیه صنعتی زاوین بوده است. این سد در سال ۱۳۸۲ به بهره‌برداری رسیده است با بالا آمدن آب تا تراز ۱۲۹۵ متر از سطح دریا دچار نشت آب از تکیه‌گاه چپ سد گردید. این در حالی بود که تا سرریز شدن آب مخزن ۷ متر اختلاف ارتفاع وجود داشت. از آنجا که میزان دبی پایه رودخانه زاوین کم می‌باشد (حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه)، ذخیره و کنترل آب در فصول پر باران سال و استفاده و مدیریت منابع آب در فصول کم باران و خشک از اهمیت خاصی برخوردار است. نشت آب در دراز مدت باعث ناپایداری شده و آسیب جدی را به بدنه سد وارد می‌کند. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات لازم جهت شناسایی دلایل نشت آب و مسیرهای آن در دستور کار قرار گرفت. اجرای پرده تزریق جدید و انجام تزریق تحکیمی به عنوان طرح اصلاحی مطرح و به مرحله اجرا رسید.

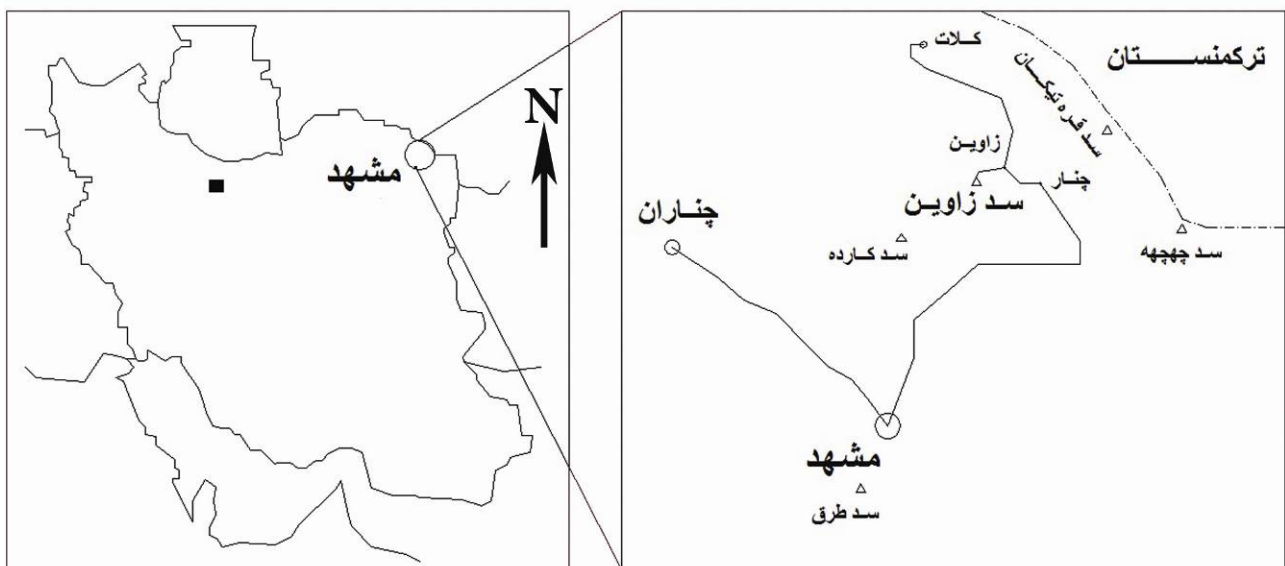
در این مقاله علاوه بر ارائه مشخصات تکیه‌گاه‌های سد و معرفی زمین‌شناسی منطقه علل نشت آب در کنار تشریح طرح پرده تزریق و روش جدیدی که در آب‌بندی نشت آب باقیمانده به کار رفته است تشریح شده است.

## ۲- مورفولوژی منطقه

منطقه مورد مطالعه در دسته تیپ ناهمواری کوهستانی قرار می‌گیرد. سازندهای مزدوران، چمن‌بید، شوربجه و تیرگان ارتفاعات منطقه و سازندهای سرچشمه، سنگان، آتامیر، آب‌دراز و آب‌تلخ واحدهای تپه ماهوری آن را تشکیل داده‌اند.

زیرزمینی در پایین دست مشاهده شود و تا غیراقتصادی شدن سد پیش رود (Maurice et al. 2010). همچنین، فرار آب می‌تواند باعث ناپایداری در سد یا سازه‌های وابسته گردد (مرادی و همکاران ۱۳۸۹، Ertunç 1999).

با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی سدهای دارای مشکل نشت آب، روش‌های اجرای بلانکت رسی، اصلاح طرح پرده تزریق، دیوار آب‌بند و روش‌های دیگر برای حل مشکل نشت آب پیشنهاد شده است. به منظور محاسبه میزان نشت آب، از نرم‌افزارهای عددی نشت سه‌بعدی مانند SEEP/W استفاده شده و در نهایت مدلی مناسب برای آب‌بندی تکیه‌گاه‌ها ارائه می‌گردد (شهربانوزاده و کیامنش ۱۳۸۲، کنگی و همکاران ۱۳۸۹، موهبت‌زاده و همکاران ۱۳۸۹). با توجه به اهمیت کارست در فرار آب از مخزن سدها، در بعضی از مطالعات به بررسی انحلال‌پذیری و پهنه‌بندی توسعه کارست نیز توجه شده است (حیدری و همکاران ۱۳۸۹). در این پژوهش، آب‌بندی و کنترل نشت سد زاوین مورد توجه قرار گرفت. سد زاوین در استان خراسان رضوی و در ۹۵ کیلومتری شمال شهر مشهد و ۵ کیلومتری شهر زاوین، در محلی به نام دوآبی بر روی رودخانه زاوین از سرشاخه‌های رودخانه قره‌تیکان احداث گردیده است (تصویر ۱) (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان ۱۳۷۵). این سد از نوع بتنی وزنی بوده و ارتفاع آن از پی ۵۱/۲ متر می‌باشد. طول تاج سد ۱۴۲ متر، عرض آن ۴/۵ متر، ضخامت در پی ۴۴ متر و حجم مخزن در رقوم نرمال ۲/۶۹ میلیون مترمکعب و نوع سرریز به صورت آزاد از روی سد می‌باشد (تصویر ۲). هدف از ساخت سد چند منظوره زاوین، ذخیره‌سازی جریان پایه رودخانه و سیلاب‌های فصلی، تأمین آب شرب شهر زاوین و روستاهای مجاور،



تصویر ۱- موقعیت سد زاوین و راه‌های دسترسی به آن



تصویر ۲- نمای از سد زاوین (دید به سمت جنوب)

قابل مشاهده است. جنس سازند شوربچه لایه‌های قرمز رنگ مربوط به رسوبات خشکی است و بیشتر به صورت ماسه‌سنگ و مادستون می‌باشد که گاهی لایه‌هایی از ژپس و انیدریت نیز در آن قابل مشاهده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان ۱۳۷۵). محور سد بر روی یال شمالی طاقدیسی قرار دارد که شیب لایه‌های آن در محل سد حدود ۷۰ درجه و به طرف شمال شرق است. شیب تکیه‌گاه‌ها در محل سد زیاد است. مصالح تکیه‌گاه‌ها از نوع سنگ‌آهک، آهک مارنی، آهک ماسه‌ای، مارن و ماسه‌سنگ آهکی با امتداد لایه‌های شمال غرب-جنوب شرق است و شیب آن به طرف شمال یعنی پایین دست سد می‌باشد (تصویر ۳).

#### ۴- خصوصیات توده‌سنگ

خصوصیات توده‌سنگ تکیه‌گاه‌ها و پی سد، بر عملکرد آب‌بندی سدها تأثیر مهمی دارد، بنابراین، شناسایی دقیق ویژگی‌های آن ضروری است (Gothäll & Stille 2010). در ادامه، مطالعات انجام شده در این زمینه تشریح خواهند شد.

#### ۴-۱- شاخص کیفی توده‌سنگ

شاخص کیفی توده‌سنگ (R.Q.D) مجموع طول مغزه‌های حاصل از حفاری با طول بزرگتر از ده سانتیمتر نسبت به طول گمانه حفاری شده

جنوبی‌ترین ارتفاعات، که خط‌الرأس حوضه را تشکیل می‌دهد، تشکیلات آهکی و دولومیتی مزدوران است. بلندترین نقطه آن ۲۲۱۷ متر از سطح دریا ارتفاع دارد و پست‌ترین نقطه حوضه ۱۲۴۰ متر می‌باشد (افشار حرب ۱۳۷۳). طرح آبراهه‌های منطقه از نوع داربستی است. این حوضه از دو زیر حوضه تشکیل، توسط دو رودخانه زهکش می‌شوند و در محل احداث سد به هم می‌پیوندند. دره در محل احداث سد به دلیل وجود سنگ‌های مقاوم آهکی از نوع V شکل می‌باشد (تصویر ۲) (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان ۱۳۷۵).

#### ۳- زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه در زون کپه داغ در شمال شرق ایران گسترش دارد. رسوباتی با ضخامت حدود ۶۰۰۰ متر از ژوراسیک تا الیگوسن به طور هم شیب در این حوضه تشکیل شده‌اند. مجموعه رسوبات این زون شامل شیل، آهک، مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های تبخیری است که به وسیله تشکیلات قرمز رنگ نئوژن پوشیده شده است (درویش‌زاده ۱۳۸۰).

#### ۳-۱- زمین‌شناسی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد

مخزن سد زاوین در سازند شوربچه واقع شده است. بخش زیادی از این تشکیلات شیلی است که به صورت متناوب با لایه‌های ماسه سنگی



تصویر ۳- نمایی از وضعیت و شیب لایه‌ها در ساختگاه سد زاوین (دید به سمت شمال)

به کمک مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌های اکتشافی در ساختگاه سد و محاسبه مقادیر شاخص کیفی توده‌سنگ، توصیف کیفیت توده‌سنگ در ساختگاه سد زاوین مطابق جداول ۲ و ۳ و تصویر ۴) استخراج گردید. (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۸۶). در جدول ۲، توزیع شاخص کیفی توده‌سنگ بر اساس نوبت (Run) حفاری تنظیم شده است. به عنوان مثال تعداد نوبت حفاری که مقدار شاخص کیفی توده‌سنگ آن بین ۹۰ تا ۱۰۰ است، ۶۱ درصد نوبت حفاری‌ها را در بر می‌گیرد و در این حالت مترآژ ذکر نمی‌گردد. در جدول ۳ توزیع شاخص کیفی توده‌سنگ بر اساس مترآژ حفاری آورده شده است. به عنوان مثال از نظر مترآژ، ۶۳ درصد حفاری‌ها، دارای شاخص کیفی توده‌سنگ بین ۹۰ تا ۱۰۰ می‌باشند. بر اساس مقادیر شاخص کیفی توده‌سنگ مشخص شد که حدود ۸۷ درصد توده‌سنگ دارای شاخص کیفی متوسط به بالا و ۱۳ درصد دیگر شاخص کیفی پایین و خیلی پایین دارند که عمدتاً مربوط به میان لایه‌های مارنی می‌باشند.

ضرب درصد است. این شاخص به آسانی قابل اندازه‌گیری است، بنابراین به صورت گسترده تقریباً در کلیه طبقه‌بندی‌های رایج توده‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه عددی بین شاخص کیفی توده‌سنگ و توصیف کیفیت سنگ مطابق جدول ۱ می‌باشد (Shroff & Shah 1999).

جدول ۱- رابطه عددی بین شاخص کیفی توده‌سنگ و توصیف کیفیت توده‌سنگ (هراتی ۱۳۷۴)

توصیف کیفیت توده‌سنگ	مقدار عددی شاخص کیفی توده‌سنگ
عالی	۹۰-۱۰۰
خوب	۷۵-۹۰
نسبتاً خوب	۵۰-۷۵
ضعیف	۲۵-۵۰
بسیار ضعیف	۰-۲۵

جدول ۲- وضعیت شاخص کیفی توده‌سنگ ساختگاه سد زاوین بر اساس نوبت‌های حفاری

توصیف کیفیت توده‌سنگ	جناح چپ تعداد	جناح چپ ٪	جناح راست تعداد	جناح راست ٪	کل ساختگاه تعداد	کل ساختگاه ٪	مقدار شاخص کیفیت توده‌سنگ
بسیار ضعیف	۲۵	۵	۱۸	۵	۴۳	۵	<۲۵
ضعیف	۵۷	۱۲	۱۱	۳	۶۸	۹	۲۶-۵۰
نسبتاً خوب	۶۲	۱۴	۱۸	۵	۸۰	۱۰	۵۱-۷۵
خوب	۷۹	۱۷	۳۷	۱۱	۱۱۶	۱۵	۷۶-۹۰
عالی	۲۳۴	۵۱	۲۴۶	۷۵	۴۸۰	۶۱	۹۱-۱۰۰
مجموع	۴۵۷	۱۰۰	۳۳۰	۱۰۰	۷۸۷	۱۰۰	

جدول ۳- وضعیت شاخص کیفی توده سنگ ساختمانی سد زاوین بر اساس مترای حفاری

مترای						شاخص کیفیت توده سنگ
راست	%	چپ	%	کل ساختمانی	%	
۱۸	۴	۲۸	۶	۴۶	۵	بسیار ضعیف
۶۰٫۱	۱۴	۱۲	۲	۷۲	۸	ضعیف
۲۲٫۵	۵	۵۱	۱۰	۷۴	۸	نسبتاً خوب
۳۹٫۸	۹	۱۱۲	۲۲	۱۵۱	۱۶	خوب
۲۹۴	۶۸	۲۹۷	۵۹	۵۹۱	۶۳	عالی
۴۳۴	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۹۳۴	۱۰۰	



تصویر ۴- نمایی از مغزه‌های بازیافتی در حفاری‌های اکتشافی ساختمانی سد زاوین

به‌سزایی دارند، در این قسمت با بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری به مطالعه ناپیوستگی‌ها پرداخته شد (کیوانی ۱۳۶۹).  
 بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری نشان داد که ۳۵ درصد درزه‌ها دارای سطح صاف (Smooth)، ۵۶ درصد دارای سطح زبر (Rough) و ۹ درصد باقی‌مانده دارای آثار خشل‌لغز (Strike) می‌باشند. درزه‌ها و شکاف‌های توده سنگ عمدتاً توسط کلسیت، لوم و اکسید آهن پر شده‌اند و گاهی نیز پرشدگی با ژئیس قابل مشاهده است. حفرات انحلالی نیز در سطح مغزه‌های حاصل از حفاری مشاهده می‌شود (شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی ۱۳۷۵ و ۱۳۸۶).

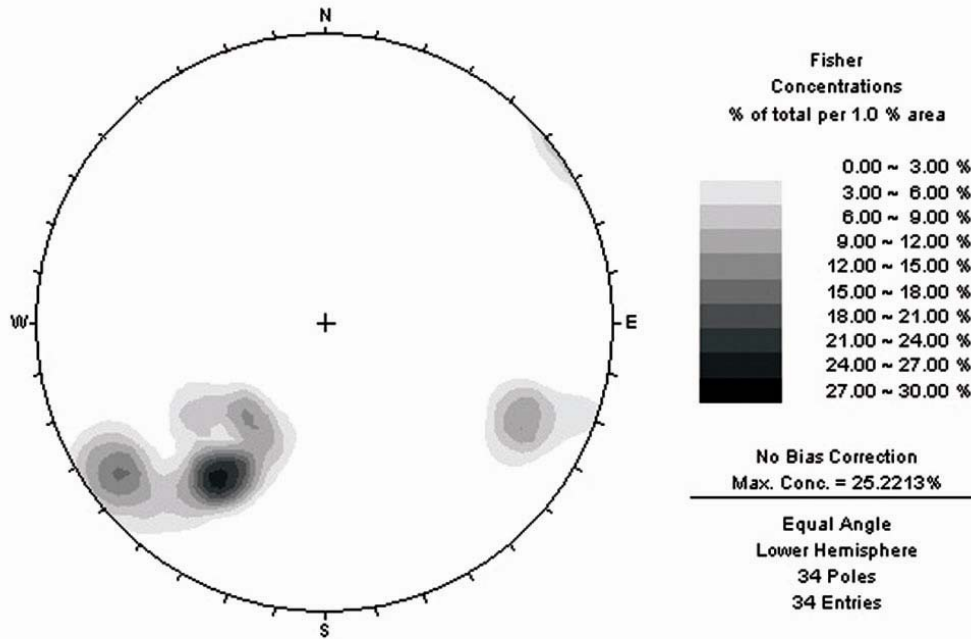
با توجه به جداول ۲ و ۳، کیفیت توده سنگ در تکیه‌گاه چپ سد نسبت به تکیه‌گاه راست سد پایین‌تر است. بر اساس این جداول، تطابق خوبی از نظر توزیع مقادیر شاخص کیفی توده سنگ در نوبت‌های حفاری و مترای حفاری قابل مشاهده است که نشان‌دهنده مساوی بودن تقریبی طول نوبت‌های حفاری است.

#### ۴-۲- وضعیت ناپیوستگی توده سنگ

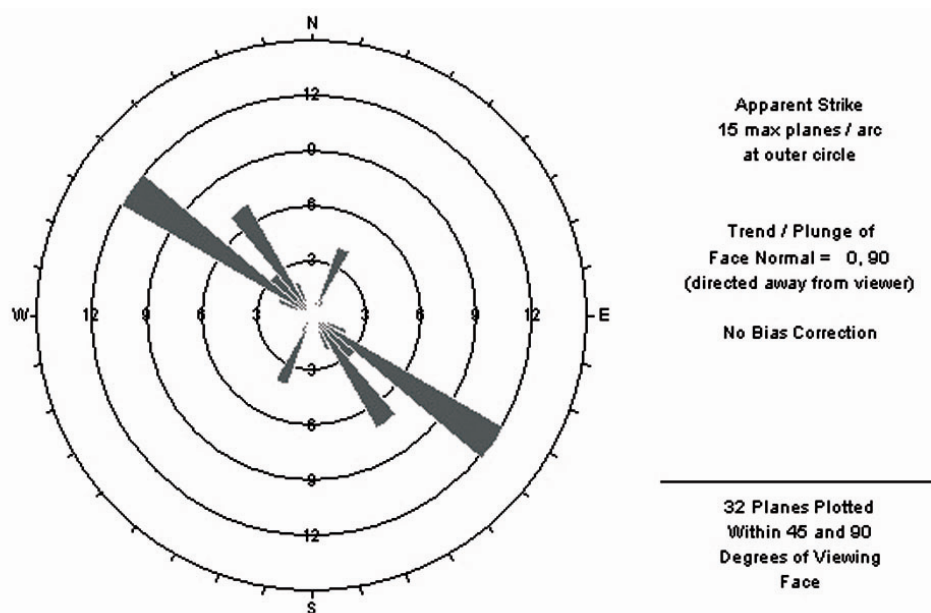
یکی از تفاوت‌های بین سنگ بکر و توده سنگ، وجود ناپیوستگی‌ها در توده سنگ است. ناپیوستگی‌های توده سنگ بر مقاومت، تغییر شکل‌پذیری پی، جریان آب زیرزمینی و فرار آب از مخزن سد تأثیر

لایه‌بندی و یا درزه‌های با این امتداد است. دسته دیگر با روند تقریباً عمود بر سطح لایه‌بندی است که مربوط به زون‌های برشی می‌باشد. امتداد و جهت لایه‌بندی نیز N60W 49-65NE است. ترکیب این دو دسته ناپیوستگی شرایط را جهت فرار آب از مخزن فراهم نموده است (تصویر ۷).

بر اساس برداشت‌های صحرایی، مشخصات سطح ناپیوستگی‌ها اندازه‌گیری شد، تصویر کنتوردیاگرام و رزدیاگرام این ناپیوستگی‌ها در تصاویر ۵ و ۶ (مربوط به کل ساختگاه سد) قابل مشاهده است (Bell 2000). با توجه به این تصاویر مشخص شد که امتداد غالب ناپیوستگی‌ها در جهت شمال شرق-جنوب غرب است که با روند عمومی ساخت‌های منطقه‌ای سازگاری دارد و عمدتاً مربوط به سطوح



تصویر ۵- نمایی از پل دیاگرام ناپیوستگی‌های ساختگاه سد زاوین



تصویر ۶- نمایی از رز دیاگرام ناپیوستگی‌های ساختگاه سد زاوین

و به کمک روابط، عدد لوژن محاسبه می‌شود. در جدول ۴ توصیف نفوذپذیری توده سنگ آورده شده است (نان وایلر ۱۳۷۵).

جدول ۴- توصیف نفوذپذیری توده سنگ

توصیف نفوذپذیری	عدد لوژن
نفوذناپذیر	۰-۳
نفوذپذیری کم	۳-۱۰
نفوذپذیری متوسط	۱۰-۳۰
نفوذپذیری بالا	۳۰-۶۰
نفوذپذیری بسیار بالا	۶۰<



تصویر ۷- نمایی از وضعیت ناپیوستگی‌های ساختگاه سد زاوین (دید به سمت جنوب)

آزمایش لوژن، در فشارهای (پله) متفاوت صورت می‌گیرد. با توجه به رفتار توده سنگ در مقابل کاهش و افزایش فشار آب، محققین رفتارهای گوناگونی را برای توده سنگ تعریف نموده‌اند که این رفتارها می‌تواند به شکل خطی، آشفته، بازشدگی، شستشوی درزه‌ها و پرشدن درزه‌ها باشد (Houlsby 1990).

با استفاده از آزمایش‌های فشار آب (لوژن) انجام گرفته در گمانه‌های اکتشافی، رفتار هیدرولیکی توده سنگ مورد بررسی قرار گرفت و به کمک آن میزان لوژن هر مقطع تعیین گردید، میزان لوژن و رفتار هیدرولیکی توده سنگ در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

#### ۱۴-۳- نفوذپذیری توده سنگ

یکی از روش‌های رایج تعیین نفوذپذیری در توده سنگ، آزمایش لوژن می‌باشد. یک لوژن نفوذپذیری یک لیتر آب در یک متر طول گمانه در مدت یک دقیقه و تحت فشار ۱۰ بار است (دفتر امور فنی و تدوین معیارها ۱۳۷۸). این آزمایش معمولاً در قطعات ۵ متری در طول گمانه‌ها انجام می‌شود و مقطع مورد آزمایش توسط مسدود کننده (packer) از سایر قطعات جدا و آب تحت فشار به داخل مقطع تزریق می‌گردد. مقدار جذب آب توسط کنتور در بازه‌های زمانی قرائت شده

جدول ۵- وضعیت نفوذپذیری توده سنگ ساختگاه سد زاوین

توصیف نفوذپذیری	جناح چپ		جناح راست		کل ساختگاه	کل ساختگاه %	عدد لوژن
	تعداد	%	تعداد	%			
نفوذناپذیر	۳۵	۳۵	۲۸	۴۲	۶۳	۳۸	۰-۳
نفوذپذیری کم	۲۳	۲۳	۲۵	۳۸	۴۸	۲۹	۳-۱۰
نفوذپذیری متوسط	۳۲	۳۲	۱۰	۱۵	۴۲	۲۵	۱۰-۳۰
نفوذپذیری بالا	۸	۸	۲	۳	۱۰	۶	۳۰-۶۰
نفوذپذیری بسیار بالا	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۶۰<

جدول ۶- رفتار هیدرولیکی توده سنگ ساختگاه سد زاوین

نوع جریان	جناح چپ		جناح راست		کل ساختگاه	کل ساختگاه %
	تعداد	%	تعداد	%		
خطی	۱۵	۱۵	۲۱	۳۰	۳۶	۲۱
آشفته	۲۶	۲۶	۲۴	۳۴	۵۰	۳۰
بازشدگی	۱۰	۱۰	۷	۱۰	۱۷	۱۰
شستشوی درزه	۲۵	۲۵	۹	۱۳	۳۴	۲۰
پرشدن درزه	۲۳	۲۳	۹	۱۳	۳۲	۱۹

هستند. تصویر شماتیک ۸ این مکانیسم را نشان می‌دهد. در جناح چپ، به دلیل فاصله گرفتن بدنه از لایه مارنی در ترازهای بالا آب به آسانی به بیرون نشت پیدا می‌کند و در این حالت بدنه سد به شکل یک سرپوش (Cap) عمل نمی‌کند. تصویر شماتیک ۹ این وضعیت را نشان می‌دهد. حجم آب زهکشی شده از گمانه‌های تکیه‌گاه راست این مسئله را تأیید می‌کند. دبی گمانه‌های زهکش در گالری پیرامونی سد در جناح راست به مراتب بیشتر از دبی گمانه‌های زهکش در جناح چپ می‌باشد که دلیل آن تمرکز آب در پشت این لایه مارنی بوده که توسط زهکش‌ها تخلیه می‌گردد. در جناح چپ آب از پایین دست سد تخلیه می‌گردد، بنابراین آب کمتری در پشت لایه‌های سنگی جمع شده و دبی گمانه‌های زهکش کاهش می‌یابد. عمده جریانات و رطوبت موجود در مجاورت و نزدیکی بدنه سد قابل مشاهده است که دلیل آن عملکرد سرپوش بتن بدنه سد می‌باشد.

#### ۴- طرح آب‌بندی سد زاوین

در این بخش، به منظور کنترل آب نشتی سد زاوین طرح پرده تزریق و تزریق تحکیمی بررسی می‌گردد.

#### ۴-۱- طرح پرده تزریق جدید

به منظور شناخت وضعیت آب‌گذری توده‌سنگ ساختگاه سد زاوین، طرح حفاری گمانه‌های اکتشافی به همراه مغزه‌گیری در طول تاج و گالری‌های پیرامونی سد ارائه گردید. این گمانه‌ها با فاصله‌بندی ۱۲ متر از یکدیگر و با زاویه قائم و قطر ۷۶ میلیمتر حفاری شدند. پس از حفر هر ۵ متر طول گمانه، آزمایش لوژن انجام شد. بررسی میزان لوژن گمانه‌ها نشان داد که بیش از ۶۰ درصد مقاطع گمانه‌ها دارای لوژن بیشتر از ۳ می‌باشد و در حین حفاری تعدادی از گمانه‌ها نفوذپذیری توده‌سنگ آنقدر بالا بوده که آب از سر گمانه خارج نشده است. مقادیر بالای لوژن و خالی بودن درز و شکاف‌ها به دلیل پر نشدن در زمان اجرای پرده تزریق (در مرحله ساخت سد)، دلیل اجرای پرده تزریق جدید است. از آنجا که وضعیت توده‌سنگ در تکیه‌گاه چپ نامناسب بوده و عمده فرار آب از این جناح صورت می‌گرفت، لذا در طرح پرده تزریق جدید طول پرده تزریق افزایش یافت. در این طرح گمانه‌های مرحله دوم، با فاصله طولی ۴ متر از گمانه‌های اکتشافی و با فاصله جانبی ۱ متر حفاری و تزریق شدند. گمانه‌های مرحله سوم، با فاصله‌بندی ۲ متر از گمانه‌های مراحل قبل حفاری و تزریق شدند. در محل‌هایی که مقادیر نفوذپذیری و جذب دوغاب سیمان کاهش نشان می‌داد، گمانه‌های مراحل قبل حذف می‌شد، تصویر ۱۰ نمایی از این طرح را نشان می‌دهد.

با بررسی جداول ۵ و ۶ مشخص شد که حدود ۱/۳ مقادیر لوژن در حد متوسط و بالا می‌باشند. همچنین ۳۰ درصد رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ حالت آشفته دارد که بیانگر حرکت آب در درزه‌های باز می‌باشد. با توجه به وجود میان لایه‌های مارنی و پر شدن درزه‌ها توسط لوم و اکسید آهن، حساسیت و اهمیت اجرای صحیح پرده تزریق مشخص می‌گردد.

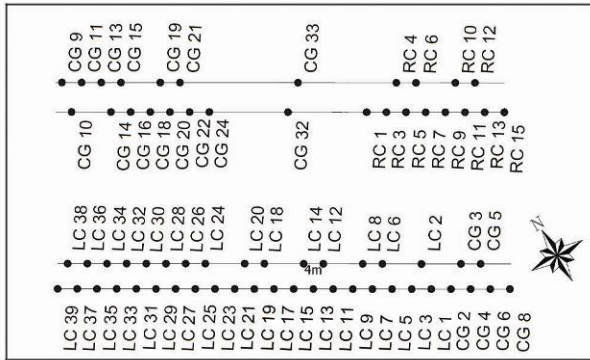
#### ۵- بررسی دلیل پیدایش نشت آب

به دنبال آنگیری سد زاوین در پایین دست سد، مرطوب شدن بتن و سنگ‌های مجاور بدنه سد در ترازهای پایین به‌خصوص در جناح چپ مشاهده گردید. با بالا آمدن سطح آب مخزن بر شدت و میزان نشت آب افزوده شد، طوری که در ترازهای بالای جناح چپ میزان فرار آب به ۵۰ لیتر بر ثانیه رسید. در این موقعیت تراز آب دریاچه سد ۷ متر تا لبه سرریز فاصله داشت. در صورت بالاتر آمدن سطح آب، امکان فرار آب افزایش یافته که احتمال وقوع خطرات ناشی از فرسایش نیز وجود خواهد داشت. میزان نشت آب از تکیه‌گاه راست و پی سد ناچیز و در حد نم دار شدن سنگ‌ها و جریانات کوچک بوده است. بر اساس مطالعات و تحلیل‌های صورت گرفته، مکانیسم نشت آب به این صورت تشریح می‌شود: با توجه به شیب لایه‌ها که ۷۰ درجه به سمت پایین دست سد می‌باشد آب پس از وارد شدن به لایه‌های سنگی مجاور مخزن، به موازات سطح لایه‌بندی حرکت کرده و به سمت عمق پیش می‌رود. از آنجا که ناپیوستگی‌ها و سطوح لایه‌بندی به سمت اعماق بسته می‌شوند، بنابراین پس از اشباع این ناپیوستگی‌ها، آب از طریق درزه‌های عمود بر سطوح لایه‌بندی و درزه‌های اتفاقی موجود در جهت عمود بر لایه‌بندی حرکت می‌کند. با توجه به تناوب لایه‌های آهکی، آهک مارنی و مارن آهکی در تکیه‌گاه‌های سد، آب پس از رسیدن به لایه‌های مارنی متوقف شده و مانع حرکت آب در جهت عمود بر لایه‌بندی می‌شود. در این حالت آب با توجه به فشار هیدرولیکی در خلاف جهت ثقل حرکت می‌کند تا بتواند از درز و شکاف سنگ‌ها به بیرون جریان پیدا کند.

امتداد لایه‌های سنگی در ساختگاه سد با راستای بدنه سد متفاوت می‌باشد (حدود ۲۰ درجه). وضعیت بدنه سد در تکیه‌گاه راست به شکلی است که یکی از لایه‌های مارنی کنترل‌کننده نشت آب در زیر بدنه سد قرار گرفته و این سبب می‌شود تا جریان آبی که از مخزن به داخل لایه‌های سنگی وارد می‌شود در پشت این لایه مارنی متوقف و حرکت آن به سمت پایین دست خاتمه یابد. از سوی دیگر بدنه سد نیز مانع از جریان آب به سمت بالا و بیرون تکیه‌گاه می‌شود و تنها جریانات بسیار کوچک قادر به گذر از حدفاصل بتن بدنه و توده‌سنگ

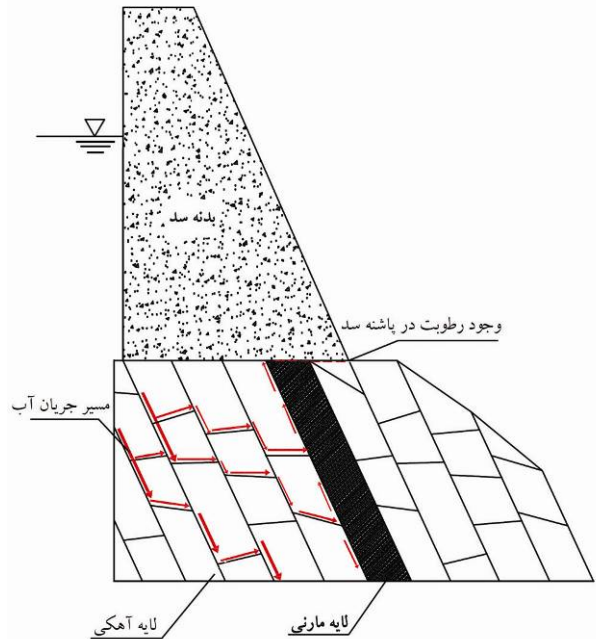


حفاری و تزریق گردید. عملیات حفاری و تزریق تعداد ۸۵ گمانه نیز از روی پله‌های پایین دست سد انجام شد. طول این گمانه‌ها با توجه به محل قرارگیری دستگاه حفاری و وضعیت لایه‌ها از ۸ تا ۳۰ متر متغیر بوده است.

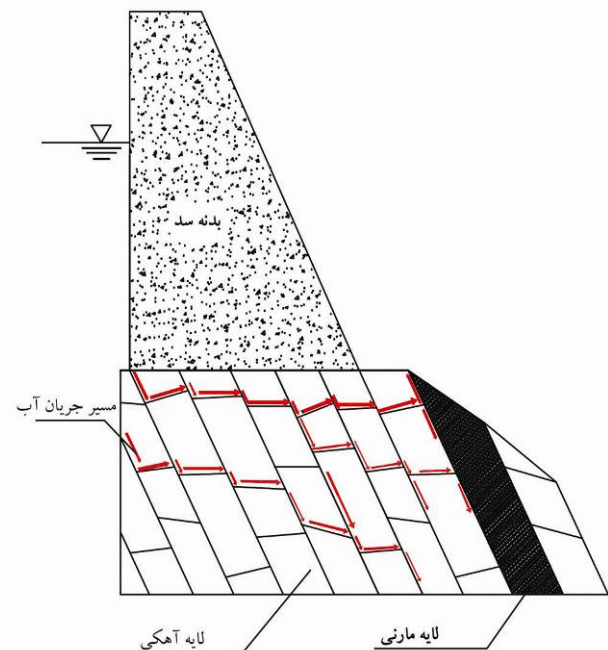


تصویر ۱۰- آرایش گمانه‌های پرده تزریق

با اجرای پرده تزریق جدید و تزریق تحکیمی، مقادیر نشت آب به میزان قابل توجهی کاهش یافت، البته در چند نقطه هنوز نشت آب قابل مشاهده بود. با بالا آمدن سطح آب، محل نشت آب مشخص‌تر گردید و پیشنهاد استفاده از نصب لوله ایستا (Stand Pipe) در محل نشتی‌ها ارائه شد. در صورت زیاد بودن میزان نشت آب از این مجاری و بالاتر بودن سطح آب مخزن از تراز این مجاری، انجام عملیات تزریق مقدور نمی‌باشد. زیرا فشار آب اعمال شده در اثر بستن مسدود کننده، باعث کندی شدن لوله و جلوگیری از نشت‌گیری دوغاب می‌شود. به علاوه وضعیت توده‌سنگ در این محدوده بسیار ضعیف می‌باشد. در نتیجه برای آب‌بندی این گونه نشتی‌ها، عمل تزریق زمانی آغاز می‌گردد که سطح آب به تراز محل نشت رسیده باشد تا فشار آب باعث کندی شدن لوله‌ها و فرار دوغاب نگردد. همچنین گذشت زمان باعث می‌شود تا شدت جریان آب خروجی باعث شستشو و باز شدن درزه‌ها و شکاف‌ها شود و مواد ریزدانه و رس موجود در آن‌ها را از بین ببرد و در نتیجه میزان و عمق نفوذ دوغاب افزایش یابد. این روش در سدهایی که نشت آب به لحاظ پایداری در کوتاه مدت مشکلی برای پی سد ایجاد نمی‌کند و زمان و شرایط فراهم آوردن موارد ذکر شده وجود دارد، بسیار مفید می‌باشد؛ زیرا جریان آب تا رسیدن به تراز نشت آب باعث شستشوی مواد ریز دانه داخل ناپیوستگی‌ها می‌شود. جهت بهینه‌سازی عملیات تزریق، دقت در نسبت اختلاط مصالح دوغاب تزریق ضروری است. با بررسی مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌های اکتشافی در طول محور سد، مشخص شد که در عملیات تزریق صورت گرفته در مرحله ساخت سد، درز و شکاف‌های موجود در توده‌سنگ بصورت کامل توسط سیمان پر نشده است و قسمت‌هایی



تصویر ۸- چگونگی حرکت آب و کنترل آن توسط لایه ماری در تکیه‌گاه راست سد زاوین



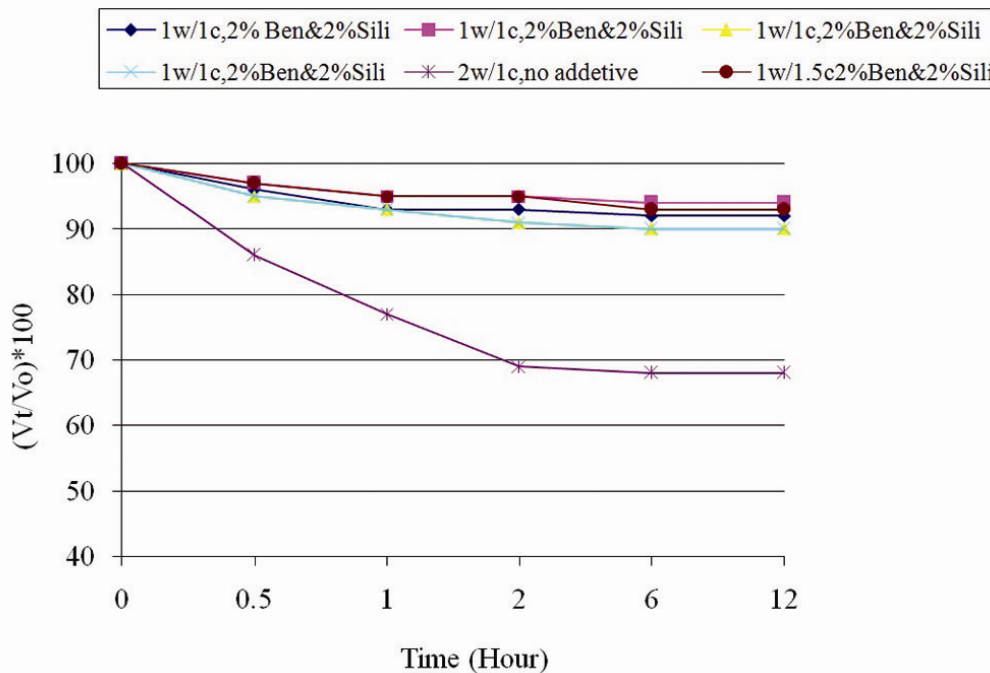
تصویر ۹- چگونگی حرکت آب و نشت آن در تکیه‌گاه چپ سد زاوین

#### ۴-۲- طرح تزریق تمکیمی

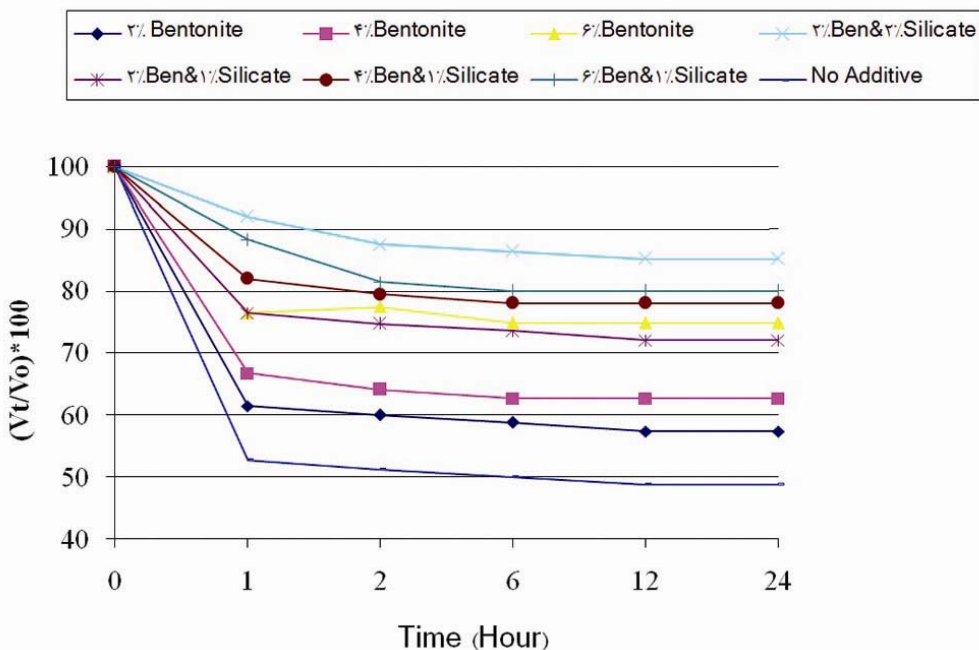
با توجه به وجود نم و جریان‌های نشتی در مجاور بدنه سد و شدت آن در جناح چپ، ارائه طرح تزریق تحکیمی این تکیه‌گاه در دستور کار قرار گرفت. طرح تزریق تحکیمی از داخل مخزن و از پله‌های پایین دست سد ارائه گردید که طی آن با ساخت یک بستر بتنی در داخل مخزن و مجاورت دیواره سد، تعداد ۳۲ گمانه با زاویه‌های مختلف

از آن خالی است. با آزمون‌های جدایش (Bleeding) انجام شده بر روی سیمان مصرفی (سیمان فله کارخانه سیمان قاین و سیمان پاکتی و فله کارخانه سیمان شرق- مشهد)، نسبت اختلاط بهینه مصالح دوغاب مشخص گردید (۱۱ و ۱۲) (زهتاب ۱۳۸۰). با افزایش بنتونیت بر پایداری دوغاب حاصله افزوده می‌شود (تصویر ۱۱ و ۱۲). همچنین

افزودن ۱ درصد سیلیکات سدیم به دوغاب‌های بنتونیتی میزان پایداری مخلوط را افزایش داده که در نهایت میزان رسوب و جدایش سیمان و آب کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که میزان بنتونیت به دلیل اثرات کاهشی که بر روی مقاومت ترکیب تزریق ما می‌گذارد، باید محدود گردد.



تصویر ۱۱- نمایش تاثیر افزودن بنتونیت و سیلیکات سدیم بر پایداری دوغاب سیمان با نسبت‌های مختلف آب به سیمان



تصویر ۱۲- نمایش تاثیر افزودن بنتونیت و سیلیکات سدیم بر پایداری دوغاب سیمان با نسبت ۲ آب به ۱ سیمان (2W/1C)

پروژه‌های مختلف این آزمون‌ها باید جهت بهینه‌سازی ترکیب دوغاب صورت پذیرد.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله، از کلیه افرادی که در این پژوهش همکاری نمودند، به‌خصوص از مدیران محترم پروژه آقایان مهندس بیاتی و مهندس زرین‌خو و از کلیه افرادی که در شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی و شرکت مهندسین مشاور آب پوی و شرکت فنی و مهندسی ساروج پی زمین به‌ویژه جناب آقای مهندس صالحی که زمینه‌ساز این پژوهش بوده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

- افشارحرب، ع.، ۱۳۷۳، "زمین‌شناسی کپه داغ"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش شماره ۱۱، ۲۷۶ ص.
- حیدری، م.، محمدی، د.، زارعی، ح. ر. و سرشاری، ب.، ۱۳۸۹، "مطالعه انحلال‌پذیری و پهنه‌بندی توسعه کارست در پی و تکیه‌گاه‌های سد ابوالعباس - خوزستان"، پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست: ۲۰۱-۱۸۶.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۰، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات نشر امروز، ۹۰۱ ص.
- دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ۱۳۷۸، "دستورالعمل آزمایش‌های تراوایی"، سازمان برنامه و بودجه، ۵۰ ص.
- زهتاب، س.، ۱۳۸۰، "مطالعه وضعیت سیمان‌های تولیدی کارخانه‌های کشور"، استانداردهای ملی و بین‌المللی و نیازهای سلسله‌سازی، نشریه شماره ۴۰، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۶۸ ص.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۶، "گزارش ژئوتکنیکی ساختگاه سد زاوین"، ۲۵۰ ص.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۳۷۵، "گزارش ژئوتکنیکی سد مخزنی زاوین"، ۱۷۳ ص.
- شهربانوزاده، م.، و کیامنش، ح.، ۱۳۸۲، "مدل عددی نشت سه بعدی از محدوده پی سدها به روش حجم محدود (مطالعه موردی: سد دز)"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران: ۱۰۵-۹۶.
- کنگی، ع.، رهنماری، ج. و دُرزاده، ح.، ۱۳۸۹، "نقش شکستگی‌های فصل مشترک در فرار آب از زیر پی سد خلیفان و روش آب‌بندی آن"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال ۶ (۴): ۳۱۵-۳۰۳.
- کیوانی، ع.، ۱۳۶۹، "اصول تکنولوژی تزریق"، انتشارات رودکی ارومیه، ۱۴۵ ص.
- موهبت‌زاده، آ.، مشعل، م. و خیاط، ن.، ۱۳۸۹، "آنالیز تراوش سد خاکی کرخه با نرم افزار Seep/w و بررسی صحت سنجی آن"، اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی: ۵۹-۵۲.
- نان وایرلر، ای.، ۱۳۷۵، "عملیات مهندسی تزریق"، ترجمه مهندسین مشاور زاینده‌آب، انتشارات مهندسین مشاور زاینده، ۴۰۰ ص.

حالت بهینه ترکیب دوغاب با افزودن ۲ درصد بتونیت و ۲ درصد سیلیکات سدیم حاصل می‌شود. در این حالت از یک سو دوغاب حالت پایدار به خود می‌گیرد به صورتی که میزان جدایش آن کمتر از ۱۰ درصد می‌شود و از طرف دیگر مقدار بتونیت و سیلیکات سدیم در حدی است که باعث پایین آمدن مقاومت و افزایش پوکی آمیزه تزریقی نمی‌شود. همان‌طور که از تصاویر ۱۱ و ۱۲ مشخص است دوغاب سیمان به تنهایی قابل تزریق نبوده و میزان جدایش آن حدود ۵۰ درصد می‌باشد، اما میزان ناپایداری دوغاب با کاهش نسبت سیمان/آب (W/C) کاهش می‌یابد (Tseny et al. 2001).

### ۴- نتیجه‌گیری

توجه خاص به ساختارهای زمین‌شناسی در حین مطالعات و ساخت سدها از اهمیت خاصی برخوردار است که عدم توجه به آن می‌تواند مشکلات زیادی را در بر داشته باشد. در سد زاوین در صورتی که امتداد بدنه سد در راستای لایه‌بندی سنگ‌ها انتخاب می‌شد به تبع آن مشکل فرار آب وجود نداشت. در سدهایی که با مشکل نشت آب مواجه هستند لازم است که ابتدا مطالعات جامع صحرایی صورت پذیرد و اطلاعات مورد نیاز فراهم گردد. با توجه به اهمیت پروژه، حساسیت، ابعاد و میزان خطرپذیری روش پیشنهاد شده، متفاوت می‌باشد. در این مطالعه، با بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که علت اصلی نشتی آب، عدم دقت لازم در حین اجرای پرده تزریق و تزریق تحکیمی، عدم توجه کافی به ساختارهای زمین‌شناسی و توزیع درزه‌ها و شکاف‌ها و ناپوستگی‌های حاصل از زون‌های گسلی بوده است که با اجرای آن نشتی آب که حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه می‌رسید (برابر دبی ثابت رودخانه) کاملاً مهار گردید.

این پژوهش نشان داد که در سدهای با نشت زیاد می‌توان به هنگام رسیدن سطح آب به تراز محل نشت، با نصب لوله ایستا در توده‌سنگ‌های سست و بستن مسدودکننده و تزریق دوغاب سیمان، عمل آب‌بندی را با موفقیت انجام داد. در این روش جریان یافتن آب باعث شستشوی درزه‌ها و شکاف‌ها شده و نفوذ دوغاب به خوبی صورت می‌پذیرد. این روش برای سدهایی که نشت آب پایداری آن را در کوتاه مدت به خطر نمی‌اندازد و فرصت کافی برای تعادل آب با سطح نشتی‌ها وجود دارد، روش کم‌هزینه‌ای است که در این مطالعه به نام «روش تزریق موازنه فشار تزریق با فشار آب مخزن» نامیده شده است.

عدم توجه به طرح اختلاط و پایداری دوغاب تزریقی، حتی اگر سایر پارامترهای آن به خوبی طراحی شده باشد می‌تواند عملیات تزریق را با شکست مواجه نماید. لذا با توجه به نوع سیمان مورد استفاده در

هراتی، م.، ۱۳۷۴، "طبقه بندی مهندسی سنگها در ارتباط با طراحی فضاهای زیرزمینی"، انتشارات فنی ایران، ۱۶۸ ص.

**Bell, F. G., 2000**, "Engineering properties of soils and rocks", 4<sup>edn</sup>, Blackwell Science Pub., 482 pp.

**Ertunç, A., 1999**, "The geological problems of the large dams constructed on the Euphrates River (Turkey)", *Engineering Geology*, Vol. 51 (3): 167-182

**Gothäll, R. & Stille, H., 2010**, "Fracture-fracture interaction during grouting", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 25 (3): 199-204.

**Houlsby, A. C., 1990**, "Construction and design of cement grouting", *Awily inter science & John Wiley & Sons Pub.*: 281 pp.

**Maurice, L., Atkinson, T. C., Williams, A. T., Barker, J. A. & Farrant, A. R., 2010**, "Catchment scale tracer testing from karstic features in a porous limestone", *Journal of Hydrology*, Vol. 389 (1-2): 31-41.

**Shroff, A. V. & Shah, D. L., 1999**, "Grouting technology in tunneling and dam construction", 2<sup>edn</sup>, Oxford & IBH Pub., 609 pp.

**Singh, B. & Goel, R. K. 1999**, "Rock mass classification an approach to civil engineering", *Elsevier Science*, 1<sup>edn</sup>, 282 pp.

**Tseny, D. J., Tsai, B. R. & Chany, H. C. 2001**, "A case study on ground treatment for a rock tunnel with high ground water ingress in Taiwan", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 16 (3): 175-183.