

مقاله پژوهشی

تأثیر پرده تزریق اولیه و آب‌بندی تکمیلی-ترمیمی سد تنگاب بر ارتباط هیدرولیکی مخزن و آب زیرزمینی پایین دست

مرتضی مظفری^{*۱}

چکیده

طراحی و ساخت یک سد نیازمند صرف هزینه و وقت فراوان است. در مدیریت منابع آب، حجم مخزن هر سد متناسب با نیاز آبی و تخصیص مربوط طراحی می‌شود. آب مخزن سد می‌تواند از درون پی یا تکیه‌گاه‌ها به‌سوی پایین‌دست حرکت کند و دستیابی به اهداف طرح را با مشکل روبه‌رو سازد. سد خاکی تنگاب با حجم مخزن ۱۴۰ میلیون مترمکعب با هدف تأمین بخشی از آب موردنیاز کشاورزی دشت فیروزآباد و کنترل سیلاب ساخته شده است. از نظر زمین‌شناسی، سد تنگاب در ورودی یک دره کارستی، در یال شمالی تاقدیس پودونو در زیر پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده قرار دارد. تاقدیس پودونو از مارن‌های سازند پابده-گورپی، آهک کارستی سازند آسماری، لایه‌های متناوب آهک و مارن بخش انتقالی و مارن‌های سازند رازک ساخته شده است. با آغاز آبیگری در اسفند ۱۳۸۸، مخزن سد با مشکل فرار آب روبه‌رو شد. به‌منظور جلوگیری از فرار آب، عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی پرده آب‌بند مخزن طراحی و اجرا شد. در این پژوهش کوشش شده است تا عملکرد تزریق تکمیلی-ترمیمی پرده آب‌بند سد تنگاب و نتایج اجرای آن بر کاهش ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و نواحی پایین‌دست بررسی شود. به این منظور، نخست تاریخچه آب‌بندی مخزن و ویژگی تزریق تکمیلی-ترمیمی اجراشده بررسی شد. در ادامه، با استفاده از سری زمانی تراز آب زیرزمینی در گمانه‌های دو سوی پرده تزریق و محاسبه ضریب همبستگی بین تراز آب مخزن و گمانه‌ها، نقش عملیات اجراشده در کاهش ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین‌دست ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که آب‌بندی اجراشده در کاهش ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین‌دست تا حد زیادی موفق بوده است. آویزان بودن پرده و عدم اتصال آن به بخش ناتراوا در عمق و دو تکیه‌گاه، سبب شده تا آب بتواند علاوه‌بر عبور از درون پرده، از زیر و انتهای آن نیز دور زده و به سمت پایین‌دست جریان یابد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، پرده آب‌بند، تزریق تکمیلی-ترمیمی، سد تنگاب، فرار آب.

ارجاع: مظفری م. ۱۴۰۲. تأثیر پرده تزریق اولیه و آب‌بندی تکمیلی-ترمیمی سد تنگاب بر ارتباط هیدرولیکی مخزن و آب زیرزمینی پایین دست. مجله پژوهش آب ایران. ۴۹: ۷۱-۵۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13999.2436>

*- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: mmozafari@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

مقدمه

به دلیل هیدروژئولوژی پیچیده کارست، احتمال نشت آب از سدهای ساخته‌شده در این مناطق بیشتر است. آب‌بندی مخزن‌های ساخته‌شده روی سازندها کارستی، سخت‌تر، طولانی‌تر و گران‌تر از دیگر سازندهای زمین‌شناسی است (بروز، ۲۰۱۷؛ چارلتون و همکاران، ۲۰۱۰). مسیرهای فرار آب، بیشتر مجراهای کارستی هستند که در امتداد سطوح لایه‌بندی یا درز و شکاف‌ها ایجاد شده‌اند. آب مخزن می‌تواند از طریق چشمه‌های قدیمی یا جدید خارج شود. میزان نشت می‌تواند از چند لیتر تا چند مترمکعب در ثانیه تغییر کند. برای نمونه، سد هیلز بار که در سال ۱۹۱۳ میلادی در آمریکا ساخته شد، از نخستین مواردی بود که با مشکل فرار آب روبه‌رو شد و به دلیل مقدار زیاد فرار آب و عدم موفقیت عملیات آب‌بندی، سد جدیدی در ۱۰ کیلومتری پایین‌دست آن احداث شد (دونلی و همکاران، ۲۰۰۹). بیشتر روش‌های آب‌بندی مخزن‌های کارستی، مانند ایجاد پرده تزریق و دیواره آب‌بند، از تجربه‌های سدسازی در آمریکا در نیمه اول قرن بیستم به دست آمد (میلانوویچ، ۲۰۰۴). با افزایش تجربه و پیشرفت تکنولوژی، دانش آب‌بندی مخزن‌های کارستی توسعه یافت و سدهای زیادی در نواحی کارستی کشورهای نظیر آمریکا، اسلونی، اسپانیا، ترکیه، یوگوسلاوی، چین، کرواسی، یونان و ایران ساخته شد. عملکرد تعداد زیادی از این پروژه‌ها موفق بوده، اما عدم موفقیت در برخی موارد، کارست را به‌عنوان یک محیط خطرناک برای ساخت سد معرفی کرده است (میلانوویچ، ۲۰۰۴؛ فیلز و بروز، ۲۰۱۶).

پس از مشاهده فرار آب، انجام عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی مخزن سد بسیار رایج است. این عملیات در بسیاری از موارد موفقیت‌آمیز است، مانند سد مارون در ایران (کلانتری و حیدری، ۲۰۰۹) و سد دوکان در عراق (میلانوویچ، ۲۰۰۴) که در آن‌ها با انجام عملیات تزریق تکمیلی از مقدار فرار آب تا حد زیادی کاسته شد. با این وجود، عملیات تزریق تکمیلی همیشه با موفقیت همراه نیست؛ برای نمونه با وجود عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی زیاد، مشکل فرار آب از سدهای مونتخاکه در اسپانیا (شاهوکویلو، ۱۹۸۵)، می (دوگان و چیچک، ۲۰۰۲) و کالیک (ترکمن و همکاران، ۲۰۰۲) در ترکیه، آنکور در آمریکا (ژارویس، ۲۰۰۳) و لار در ایران هنوز

پابرجاست. تعداد قابل‌توجهی مقاله در مورد مشکل فرار آب و تزریق تکمیلی-ترمیمی در سدهای ساخته‌شده در مناطق کارستی جهان منتشر شده است. مرور این مقاله‌ها نشانگر استفاده از روش‌های مختلفی برای شناسایی دلایل و مسیر فرار آب است که مهم‌ترین آن عبارت‌اند از: برداشت ژئوفیزیکی (دای و همکاران، ۲۰۱۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱)، هیدروشیمی و ایزوتوپ‌ها (پرتراند و همکاران، ۲۰۱۵؛ واسیچ و همکاران، ۲۰۲۰؛ زو و همکاران، ۲۰۲۱؛ زنگ و همکاران، ۲۰۲۲)، آزمایش‌های ردیابی (مظفری و همکاران، ۲۰۱۲؛ ناصح و همکاران، ۲۰۱۳؛ صابری‌مهر و رئیسی، ۲۰۱۹)، حفاری اکتشافی (میلانوویچ و همکاران، ۲۰۱۸)، شانگسین و همکاران، ۲۰۲۰)، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی (میلانوویچ و واسیک، ۲۰۱۶؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۹) و تجزیه و تحلیل نوسان سطح آب در مخزن و نواحی پیرامون آن و همچنین هیدروگراف چشمه‌ها (یونچی و روبینیک، ۲۰۰۹؛ میلانوویچ و واسیک، ۲۰۲۱). در بین روش‌های یادشده، آزمایش ردیابی، برداشت ژئوفیزیک و حفاری اکتشافی نتایج کمی و کیفی قابل‌قبول و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد؛ اما استفاده از آن‌ها نیازمند صرف هزینه و وقت زیاد است. مطالعات هیدروشیمی و ایزوتوپی، به‌ویژه در مواردی که تنوع منابع آب و گوناگونی سازندهای زمین‌شناسی زیاد نیست، از کارایی کمتری برخوردار است. در این میان مدل‌سازی و بررسی نوسان آب کم‌هزینه‌تر است و می‌تواند نتایج مفیدی ارائه دهد.

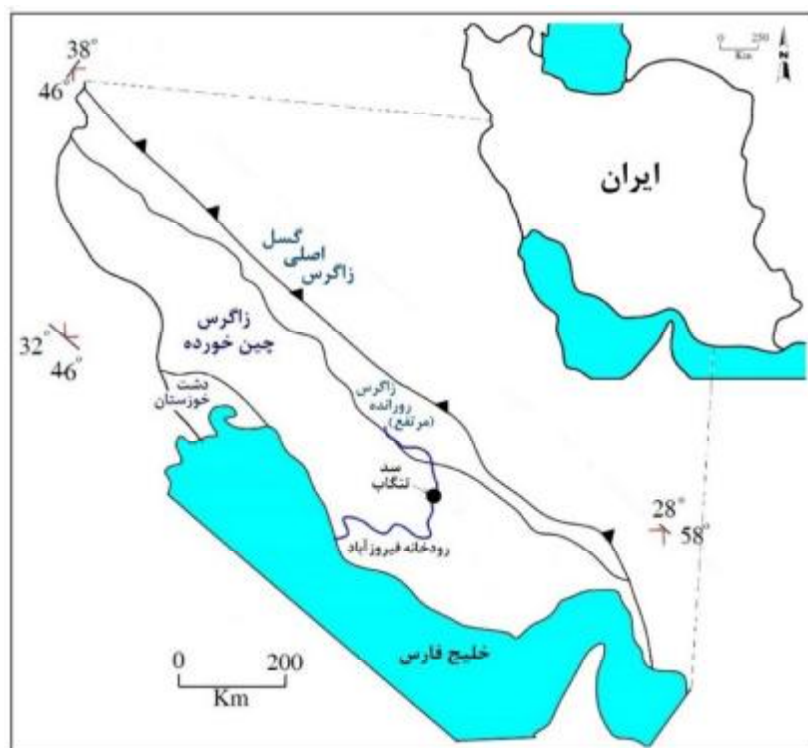
سد تنگاب، یک سد سنگریزه‌ای با هسته رسی، با ارتفاع ۴۷ متر، طول تاج ۲۷۰ متر و حجم مخزن ۱۴۰ میلیون مترمکعب است که در جنوب‌غرب ایران و در فاصله ۱۳ کیلومتری شمال‌غربی شهر فیروزآباد قرار دارد (شکل ۱ و ۲). این سد برای کنترل سیلاب رودخانه و همچنین تأمین بخشی از آب موردنیاز دشت فیروزآباد ساخته شده است. با شروع آبیگری در سال ۱۳۸۸، مخزن سد با مشکل فرار آب روبه‌رو شد و پیرو آن عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی گسترده‌ای انجام شد. بررسی تأثیر پرده تزریق تکمیلی و آب‌بندی ترمیمی سد تنگاب بر ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و آب زیرزمینی نواحی پیرامون و در نتیجه شناخت محتمل‌ترین مسیر فرار آب از مخزن از جمله اهداف انجام پژوهش پیش‌روست. با توجه به پراکندگی مکانی و زمانی عملیات تزریق تکمیلی-

بین سطح آب مخزن و گمانه‌ها، از جمله نوآوری‌های این پژوهش است.

ترمیمی، تعیین نقش هر گام بر کاهش ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین‌دست با استفاده از ضریب همبستگی



شکل ۱- نمایی از تکیه‌گاه چپ سد تنگاب



شکل ۲- موقعیت سد تنگاب در ایران و زاگرس چین خورده

مواد و روش‌ها

و شیب لایه‌بندی در ساختگاه سد را شامل نمی‌شد، با انجام بازدید زمین‌شناسی، این موارد تعیین و به نقشه ساختگاه سد افزوده شد. تاریخچه آگیری مخزن و ویژگی پرده تزریق اولیه و تکمیلی-ترمیمی انجام شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس و شرکت آب‌نیرو (۱۳۹۲) دریافت شده است. در ارزیابی تأثیر تزریق‌های اجرا شده بر

داده‌های مورداستفاده این پژوهش اطلاعات زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و آب زمین‌شناسی را شامل می‌شود. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه براساس نقشه زمین‌شناسی فیروزآباد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۵) ترسیم شده است. از آنجا که نقشه یادشده کوچک‌مقیاس بوده و گسل‌های کوچک

رازک ساخته شده است. سازند پابده-گورپی در هسته تأقدیس قرار دارد. دیواره‌های دره تنگاب از سازند آسماری تشکیل شده است و پدیده‌های مختلف کارستی از قبیل کارن، گریک، غار، حفرات انحلالی و چشمه در آن قابل مشاهده است. در محدوده محور سد تا ابتدای دره تنگاب، آب مخزن در ناحیه‌ای با گسترش جانبی به طول حدود ۶۵۰ متر در تکیه‌گاه چپ و ۸۰۰ متر در تکیه‌گاه راست با سازند آسماری در تماس است. در سایر نقاط مخزن، بخش انتقالی و سازند رازک گسترش دارد. از آنجا که سازند رازک و بخش انتقالی بیشتر از مارن تشکیل شده‌اند، قابلیت نفوذ و آبگذری قابل توجهی ندارند. قبل از آبیگری مخزن، چشمه‌های آتشفشان، تنگاب و دهبرم و همچنین قنات‌های جستان و مورد شهرک در یال جنوبی تأقدیس پودونو و از سازند آسماری خارج می‌شدند. ارتباط هیدرولیکی این منابع با مخزن سد به کمک آزمایش ردیابی مشخص شده بود (اسدی، ۱۳۷۷؛ طلائی، ۱۳۷۸).

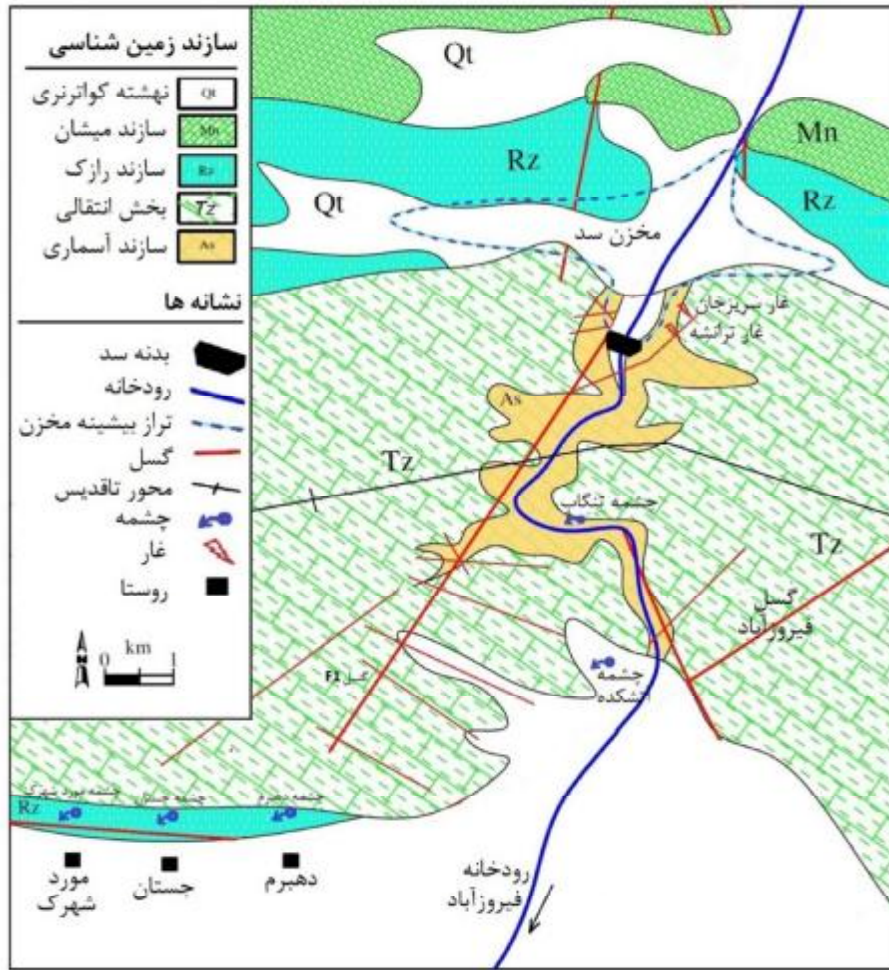
پرده تزریق اولیه

سیستم آب‌بندی اولیه سد تنگاب شامل دیواره آب‌بند اجرا شده در بستر رودخانه و پرده تزریق اولیه در تکیه‌گاه چپ، پی و تکیه‌گاه راست است (شکل ۴). در تکیه‌گاه چپ این پرده به طول ۲۵۶ متر در گالری LG1، به طول حدود ۷۲ متر در دیواره دره، به طول ۲۳۸ متر در گالری LG3 و به طول حدود ۱۷۷ متر در گالری LG35 اجرا شده است. آب‌بندی بستر رودخانه شامل دو بخش دیواره آب‌بند و پرده تزریق است. دیواره آب‌بند با طول حدود ۱۶۰ متر و عمق متوسط ۲۰ متر، از جنس بتن پلاستیک است. پرده تزریق اجرا شده در بستر رودخانه در طول حدود ۱۶۰ متر و در دو تراز متفاوت (یکی در فضای آزاد و از روی دال بتنی و دیگری بخش زیرین گالری G5) اجرا شده است. بخش‌های مختلف پرده تزریق تکیه‌گاه راست براساس محل تزریق عبارت‌اند از: ۷۲ متر تزریق در دیواره دره، ۲۰۶ متر در گالری RG2، ۲۱۶ متر در گالری RG4 و ۸۴ متر در گالری RG45 (شکل ۵). سرریز سد تنگاب یک سازه اوجی با ۱۵۰ متر طول، ۳۶ متر عرض و ۱۵ متر ارتفاع است و پرده تزریق با طول حدود ۳۵۰ متر به صورت محاطی و در سه دیواره آن اجرا شده است (شکل ۴ و ۵).

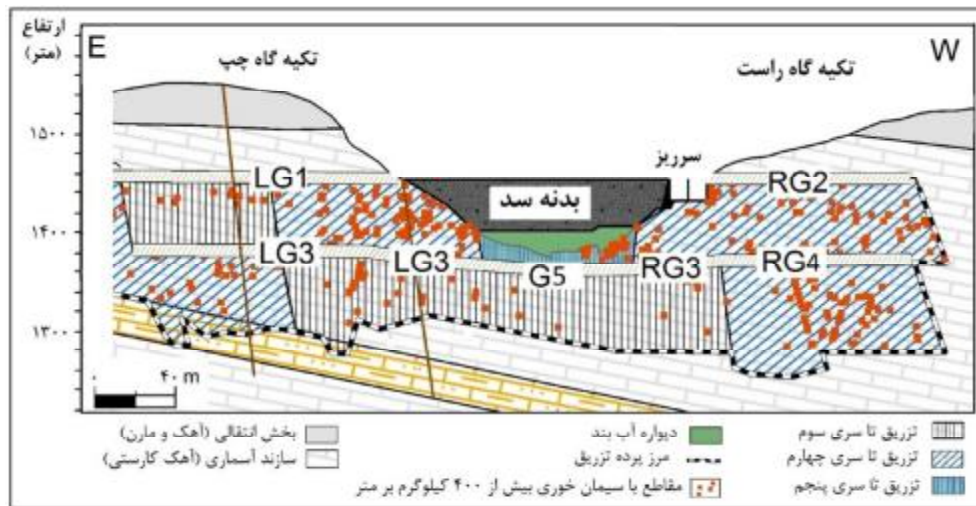
ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین دست از سری زمانی تغییرات تراز آب مخزن و گمانه‌های پیرامون آن استفاده شده است. براساس داده‌های موجود، ثبت تغییرات تراز آب دریاچه در دوره بهره‌برداری از نظم خوبی برخوردار نیست. در حالی که در برخی زمان‌ها داده‌ای وجود ندارد، در بعضی زمان‌ها حتی داده‌های روزانه نیز در دسترس است. با این وجود داده‌ها به صورت دستی بررسی و تصحیح شد. به دلیل گستردگی منطقه، ساختگاه سد به سه بخش شامل تکیه‌گاه چپ، بستر رودخانه و تکیه‌گاه راست تفکیک شده و در هر بخش، تأثیر تزریق‌های اجرا شده (شامل پرده تزریق اولیه و همچنین تزریق تکمیلی-ترمیمی) بر تغییرات تراز آب زیرزمینی بررسی شده است. از سری‌های زمانی تغییرات تراز آب مخزن و گمانه‌ها به عنوان معیاری در تعیین چگونگی ارتباط هیدرولیکی بین آن‌ها استفاده شده است. به منظور تعیین رابطه بین تراز آب مخزن و سطح آب زیرزمینی گمانه‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این ضریب بین -۱ تا ۱ متغیر است و مقدار منفی آن نشانگر رابطه معکوس، مقدار مثبت آن نشانگر رابطه مستقیم و مقدار صفر نشانگر عدم رابطه بین متغیرهاست. نزدیک‌تر بودن ضریب همبستگی به ۱ یا -۱ نشانگر شدت بیشتر رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته است. پس از تعیین مقدار همبستگی، با پیاده کردن روند پیشرفت تزریق تکمیلی-ترمیمی روی سری زمانی تغییرات تراز آب گمانه‌ها، تأثیر این عملیات بر کاهش ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین دست و در نتیجه کاهش نشت آب به دست می‌آید.

زمین‌شناسی

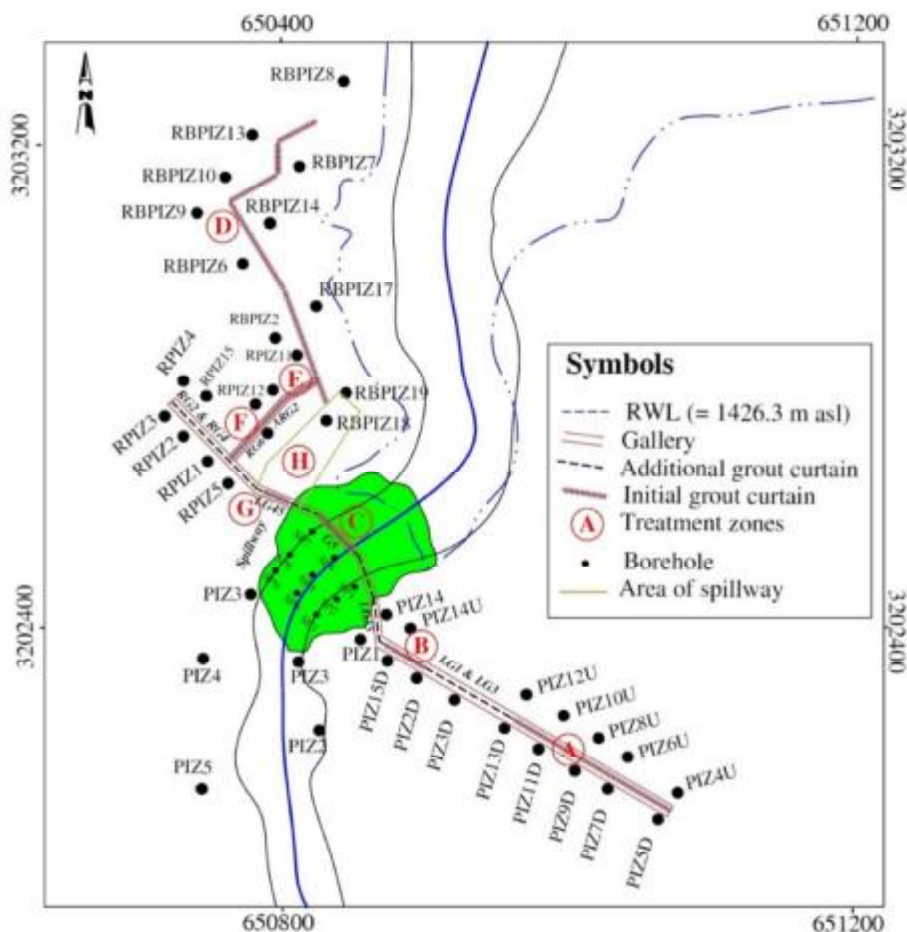
سد تنگاب در یال شمالی تأقدیس پودونو واقع در زیر پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده قرار دارد (شکل ۲ و ۳). دره تنگاب در نواحی مرکزی این تأقدیس قرار گرفته و رودخانه فیروزآباد درون آن جاری است. تراز بستر رودخانه و تاج سد به ترتیب ۱۴۰۱ و ۱۴۴۸ متر است. بخش‌های باختری و خاوری تأقدیس پودونو دارای حدود ۲۷۰۰ متر ارتفاع است؛ ولی بخش مرکزی آن در حدود ۱۵۰۰ متر ارتفاع دارد. تأقدیس پودونو از مارن‌های سازند پابده-گورپی، آهک کارستی سازند آسماری، لایه‌های متناوب آهک و مارن بخش انتقالی و مارن‌های سازند



شکل ۳- نقشه زمین شناسی ساختگاه سد تنگاب (مظفری، ۱۳۹۷)



شکل ۴- موقعیت پرده تزریق اولیه در نیمرخ زمین شناسی به موازات محور سد



شکل ۵- موقعیت سد تنگاب، گمانه‌ها، پرده تزریق اولیه و تزریق تکمیلی-ترمیمی. عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی در بخش جدید گالری LG1، بخش قدیمی گالری LG1، گالری G5، امتداد ساحل راست مخزن، گالری ARG2، گالری RG6، گالری G45 و سطح سرریز به ترتیب با حروف A, B, C, D, E, F, G و H نشان داده شده است.

به‌دلیل پدیده فرار آب، مخزن پس از ۷۴ روز به‌طور کامل تخلیه شد. در دومین آگیری در سال ۱۳۸۸ نیز حجم آب مخزن به $31/1$ میلیون مترمکعب رسید، اما در طول ۱۶۴ روز تخلیه شد؛ بنابراین و به‌منظور کاهش آگذری، تصمیم به اجرای تزریق تکمیلی در تکیه‌گاه چپ و راست شد. در تکیه‌گاه چپ، در حفاری‌های اکتشافی گالری LG3 یک لایه آهک مارنی- دولومیتی کم‌ویش ناتراوا مشاهده شد؛ بنابراین در بازه زمانی از آغاز پاییز ۱۳۸۷ تا اواخر پاییز ۱۳۸۸ یک پرده تزریق تکمیلی به طول ۳۰۰ متر در امتداد پرده اولیه و تا عمق ۵ متری این لایه ناتراوا اجرا شد. در تکیه‌گاه راست، یک پرده تزریق جدید با عمق حدود ۱۲۰ متر که از پیرامون سرریز شروع می‌شد و ۵۰۰ متر در امتداد ساحل راست مخزن ادامه داشت، طراحی و تا آذر ۱۳۹۰ اجرا شد. آگیری مخزن

آگیری مخزن و تزریق تکمیلی

با شروع آگیری در سال ۱۳۸۸، دبی چشمه‌های پایین‌دست افزایش یافت. طی سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ تراز آب بیشینه مخزن به‌ترتیب برابر با $1420/7$ ، $1419/49$ ، $1418/82$ ، $1424/25$ ، $1439/39$ و $1431/64$ بود. براساس محاسبه بیلان، دبی فرار آب در این ترازهای مخزن به‌ترتیب در حدود $1/36$ ، $1/106$ ، $0/53$ ، $2/1$ ، $2/86$ و $2/1$ مترمکعب بر ثانیه تخمین زده شد (مظفری و همکاران، ۲۰۲۱). برای حل این مشکل، عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی در ساختمان سد انجام شد که روند تکامل آن در ادامه شرح داده شده است.

در نخستین مرحله آگیری در تیر ۱۳۸۸ حجم آب مخزن به حدود $32/32$ میلیون مترمکعب رسید؛ اما

تأقیس توسعه یافته و بین دو یال ارتباط هیدرولیکی برقرار است. وجود پدیده‌های کارستی فراوان (غار، گریک و درزه‌های انحلالی) نیز تأییدکننده نفوذپذیری بالا در دیواره دره است.

پنجره تماس مستقیم آب مخزن با سازند آسماری با عمقی در حدود ۴۰ متر، در تکیه‌گاه چپ و راست به ترتیب در حدود ۶۵۰ و ۸۵۰ متر طول دارد؛ بنابراین آب می‌تواند به راحتی وارد سازند کارستی آسماری شود و به سوی پایین‌دست جریان یابد. در آب‌بندی اولیه و تکمیلی-ترمیمی کوشش شده تا با اجرای پرده تزریق در راستای محور سد در هر دو تکیه‌گاه، ارتباط هیدرولیکی ناحیه مخزن و بخش پایین‌دست قطع شود. با بررسی چگونگی پاسخ گمانه‌های پایین‌دست پرده به نوسان آب مخزن می‌توان شدت ارتباط هیدرولیکی آن‌ها و در نتیجه مسیر محتمل فرار آب را تعیین کرد. به دلیل گستردگی پرده، ساختمان سد به سه بخش شامل تکیه‌گاه چپ، بستر رودخانه و تکیه‌گاه راست جدا شده و در هر بخش، تأثیر تزریق‌های اجرا شده (شامل پرده تزریق اولیه و همچنین تزریق تکمیلی-ترمیمی) بر تغییرات تراز آب زیرزمینی بررسی شده است.

در تکیه‌گاه چپ، گمانه‌های Piz8U, Piz6U, Piz4U, Piz10U, Piz12U و Piz14U در بالادست و گمانه‌های Piz2D, Piz3D, Piz5D, Piz7D, Piz9D, Piz11D و Piz13D در پایین‌دست پرده تزریق حفاری شده‌اند (شکل ۵). سری زمانی تراز آب مخزن و سطح آب این گمانه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین مخزن و گمانه‌های بالادست پرده بین ۰/۸۰ تا ۰/۹۶ است (جدول ۱) که نشانگر ارتباط قوی بین آن‌هاست، هرچند با فاصله‌گرفتن از مخزن از میزان همبستگی تا حد کمی کاسته می‌شود. در ارتباط با گمانه‌های پایین‌دست پرده، ضریب همبستگی بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۹ است که نشانگر ارتباط خوب مخزن با نواحی گمانه‌های بالادست این ارتباط ضعیف‌تر است. هماهنگی بین نوسان تراز آب مخزن و سطح آب بین گمانه‌های بالادست و پایین‌دست پرده وجود ارتباط هیدرولیکی بین آن‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. تراز آب گمانه‌ها وجود شیب هیدرولیکی و در نتیجه جریان آب زیرزمینی از مخزن به سمت پایین‌دست پرده را تأیید می‌کند. با این

طی سال‌های پس از ۱۳۹۱ نیز ادامه یافت، اما مشکل فرار آب مخزن همچنان باقی بود؛ در نتیجه عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی به شرح زیر آغاز شد (شکل ۵):

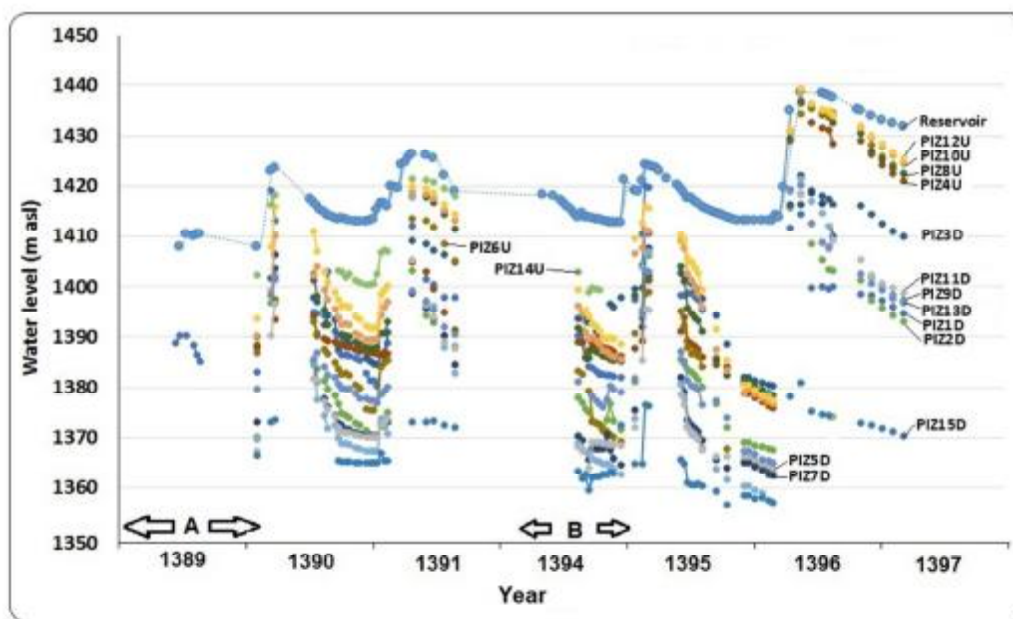
- در سال ۱۳۹۴، در تکیه‌گاه چپ ۲۲ حلقه گمانه در ۲۰۰ متر ابتدایی گالری LG1 حفاری و تزریق شد.
- از تیر تا بهمن ۱۳۹۵، در بستر سد ۱۲۰ حلقه گمانه تکمیلی-ترمیمی در سقف گالری G5 به سوی دیواره آب‌بند حفاری و تزریق شد که در حدود ۱۰ متر به درون دیواره نفوذ کرد.
- تا خرداد ۱۳۹۶، تعداد ۸۱ گمانه در سقف گالری RG45 (تا فاصله ۳ تا ۵ متری بستر گالری RG2 و بستر سرریز) حفاری و تزریق شد.
- از اسفند ۱۳۹۳ تا بهمن ۱۳۹۴، در ساحل راست مخزن، از درون گالری ARG2 (واقع در حدفاصل گالری‌های RG2 و RG4 تا پرده ۵۰۰ متری) یک پرده تزریق به طول ۱۷۰ متر، رو به پایین و تا عمق ۴۰ تا ۷۰ متری اجرا شد.
- از اسفند ۱۳۹۳ تا بهمن ۱۳۹۴، در ساحل راست مخزن گالری RG6 به طول ۲۶۰ متر و در تراز ۱۳۷۳ متری حفاری شد. در ۲۴ متر ابتدایی فضای گالری RG4 تعداد ۶ گمانه با فاصله ۴ متر از یکدیگر حفاری و تزریق شد. در بخش دوم تزریق در گالری RG6، پرده‌ای به طول ۲۶۰ متر و تا عمق ۹۵ تا ۱۵۰ متری اجرا شد که در بخش انتهایی در حدود ۳ متر از پرده تزریق ساحل راست (۵۰۰ متری) فاصله داشت. در انتها و برای پیوستن پرده تزریق اجرا شده از گالری ARG2 و به پرده آب‌بند قدیمی ساحل راست (۵۰۰ متری)، تعداد ۲۵۸ گمانه، با عمق متوسط ۵/۵ متر، با آرایش مثلثی و با زاویه مناسب از درون بخش ابتدایی گالری RG6 به سوی پرده قدیمی حفاری و تزریق شد.

نتایج و بحث

در ساختمان سد تنگاب، سازند آسماری در حدود ۴۰۰ متر ضخامت دارد که ۱۰۰ متر آن در دیواره دره تنگاب برونزد دارد و ۳۰۰ متر آن در زیر بستر رودخانه قرار گرفته است. به دلیل پایین‌افتادگی سازند آسماری و وجود درز و شکاف فراوان در اثر عملکرد گسل‌های عرضی، مجاری کارستی از یال شمالی به سوی یال جنوبی

متر کاهش تراز آب در گمانه‌های پایین دست شده است. با حرکت در بالادست پرده تزریق، از سمت مخزن به سوی انتهای پرده، از تراز آب زیرزمینی گمانه‌های بالادست پرده کاسته می‌شود. به عبارتی دی‌گر، جریان آب زیرزمینی به سمت انتهای پرده وجود دارد و می‌تواند با دور زدن آن به سمت پایین دست حرکت کند.

وجود، اختلاف تراز آب حدود ۵۰ متری بین مخزن و این گمانه‌ها نشانگر عملکرد قابل قبول پرده تزریق اولیه در این ناحیه و در تراز آب مخزن ۱۴۱۰ است. مقایسه تراز آب گمانه‌ها در تراز یکسان مخزن طی فروردین سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴، نشانگر این است که تزریق تکمیلی-ترمیمی سال ۱۳۹۴ در گالری LG1، سبب ۰/۰۷ تا ۰/۶۵



شکل ۶- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های بالادست و پایین دست پرده تزریق تکیه‌گاه چپ. بازه زمانی A: تزریق در بخش جدید گالری LG1 و B: تزریق تکمیلی ترمیمی در بخش قدیمی گالری LG1

قرارگیری نسبت به تزریق‌های اجرا شده، گمانه‌های موجود را می‌توان در قالب چند گروه بررسی کرد. با حرکت از سمت بدنه سد به درون تکیه‌گاه در پایین دست گالری‌های تزریق RG2، به ترتیب گمانه‌های RPIZ1، RPIZ2، RPIZ3 قرار دارند (شکل ۵). تغییر تراز آب این گمانه‌ها طی دوره بهره‌برداری نشانگر وجود ارتباط هیدرولیکی با مخزن است. ضریب همبستگی بین تراز آب مخزن و تراز آب این گمانه‌ها بین ۰/۵۵ تا ۰/۶۷ متغیر است که نشانگر ارتباط هیدرولیکی متوسط بین آنهاست. همچنین اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که تزریق‌های انجام شده در گالری‌های ARG2 و RG6 سبب کاهش چندمتری تراز آب در گمانه‌های پایین دست و کاهش ارتباط آنها با مخزن شده است (شکل ۸). گمانه‌های RPIZ1، RPIZ15، RPIZ12 و RPIZ4 در پایین دست پرده تزریق احداث شده در گالری‌های ARG2 و RG6 قرار دارند (شکل ۵). نوسان تراز آب این گمانه‌ها

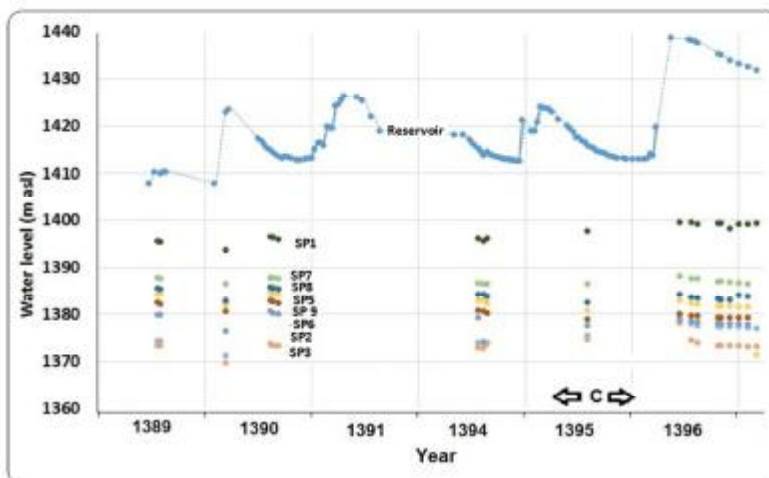
در بدنه سد تعداد ۹ پیزومتر کاساگرانده (شامل SP1، SP2، SP3، SP4، SP5، SP6، SP7، SP8 و SP9) حفر شده‌اند (شکل ۵) که تا تراز ۱۳۶۵ (حدود ۳۵ متر زیر بستر بدنه سد) نفوذ کرده‌اند؛ بنابراین فشار آب پایین دست پرده را نشان می‌دهند. سری زمانی تغییرات تراز آب مخزن با تراز آب این پیزومترها (شکل ۷) نشانگر پاسخ ضعیف آنها به نوسان تراز آب مخزن است. ضریب همبستگی بین تراز آب مخزن و پیزومتر کاساگرانده بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۲ است (جدول ۱) که از ارتباط هیدرولیکی بسیار ضعیف آنها حکایت دارد. تراز آب گمانه‌ها پیش و پس از تزریق ترمیمی در گالری G5 در سال ۱۳۹۵ تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. با این وجود، اختلاف بار هیدرولیکی قابل توجه در مخزن و این گمانه‌ها نشان‌دهنده عملکرد خوب دیواره آب‌بند و پرده تزریق در بستر سد است. در تکیه‌گاه راست سد تنگاب، تعداد ۲۵ گمانه فعال وجود دارد. در این تکیه‌گاه، بر حسب موقعیت

ارتباط هیدرولیکی آن‌ها با مخزن سد را نشان می‌دهد (شکل ۹). ضریب همبستگی بین تراز آب مخزن و تراز آب این گمانه‌ها بین ۰/۴۰ تا ۰/۶۹ متغیر است که نشانگر ارتباط هیدرولیکی متوسط بین آن‌هاست. مقایسه تراز آب این گمانه‌ها در هنگام اوج تراز آب مخزن (+۱۴۲۴) طی سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ نشان می‌دهد که تزریق تکمیلی در امتداد ۵۰۰ متر از ساحل راست و همچنین تزریق در گالری ARG2 سبب افت ۷/۲۹، ۲۴/۹۴، ۳/۵۵ متری به ترتیب در تراز آب گمانه‌های RPIZ1، RPIZ12 و RPIZ4 شده است. گمانه‌های RPIZ17، RPIZ18 و RPIZ19 در فضای بین مخزن تا پرده اجرا شده در گالری‌های RG6 و ARG2 قرار دارند (شکل ۵) و تراز آب آن‌ها با تراز آب مخزن هماهنگ است. شروع تزریق در گالری‌های ARG2 و RG6 سبب ایجاد تغییرات شدید در سطح آب این گمانه‌ها شده و حتی در مواردی سطح آب آن‌ها بالاتر از تراز آب مخزن قرار گرفته که می‌تواند متأثر از آب ناشی از عملیات حفاری گمانه‌های مجاور باشد. تزریق در سطح سرریز نیز نوسان تراز آب گمانه‌های RPIZ18 و RPIZ19 را شدت بیشتری بخشیده است. ضریب همبستگی بین ۰/۹۱ تا ۰/۹۵ محاسبه شده برای تراز آب مخزن و تراز آب این گمانه‌ها نشانگر ارتباط

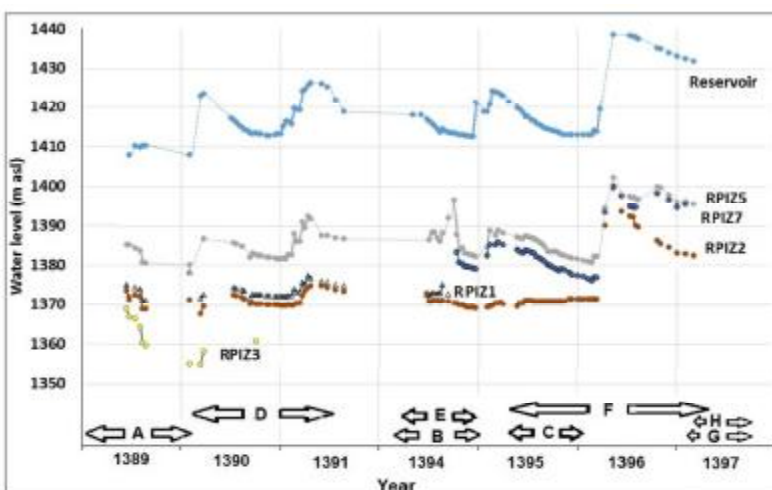
هیدرولیکی قوی بین آن‌هاست. با حرکت در امتداد ساحل مخزن، از ناحیه سرریز به سوی انتهای پرده، به ترتیب گمانه‌های RPIZ11، RPIZ2، RPIZ6، RPIZ9، RPIZ10 و RPIZ13 در پایین دست پرده قرار دارند (شکل ۵). نوسان تراز آب تمامی این گمانه‌ها با تراز آب مخزن هماهنگی خوبی دارد (شکل ۱۰ و ۱۱) و ضریب همبستگی آن‌ها بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۲ است. تزریق‌های ساحل راست سبب افت سطح آب حدود ۱۶، ۳، ۱۰، ۱۲، ۱۰ و ۵ متری به ترتیب در سطح آب گمانه‌های RPIZ11، RPIZ2، RPIZ6، RPIZ9، RPIZ10 و RPIZ13 شده است. به نظر می‌رسد که بیشترین تأثیر در ناحیه گمانه‌های RPIZ11 و RPIZ2 بوده و سطح آب آن‌ها با تراز آب مخزن هماهنگی کمتری دارد. بالآمدن سطح آب مخزن در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۷ حداقل سبب افزایش ۳۰ متری سطح آب گمانه‌های RPIZ6، RPIZ9، RPIZ10 و RPIZ13 و افزایش حدود ۱۵ متری سطح آب گمانه‌های RPIZ11 و RPIZ2 شده است. این پدیده می‌تواند متأثر از پیشروی آب مخزن به سوی ناحیه پرده تزریق و همچنین زیادبودن نفوذپذیری در ترازهای بالایی ساحل راست باشد.

جدول ۱- مقادیر ضریب همبستگی بین تراز آب مخزن و سطح آب گمانه‌های واقع در تکیه‌گاه راست، بدنه سد و تکیه‌گاه چپ

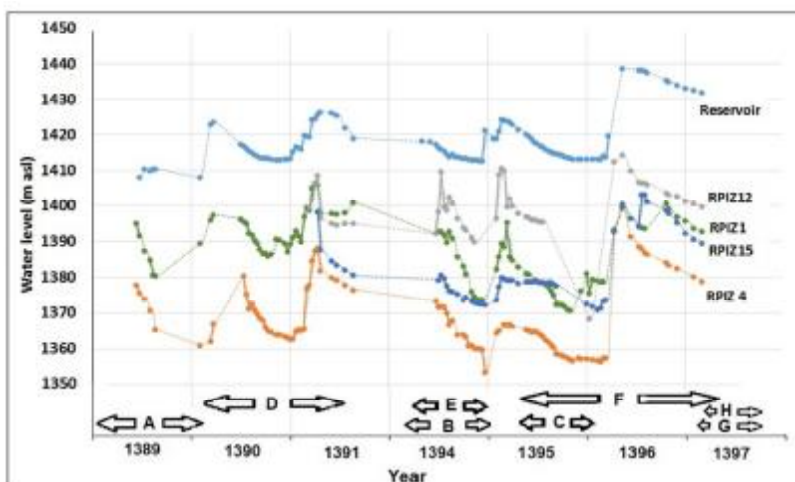
تکیه‌گاه چپ		بدنه سد		تکیه‌گاه راست	
ضریب همبستگی	نام گمانه	ضریب همبستگی	نام گمانه	ضریب همبستگی	نام گمانه
۰/۸۰	PIZ4U	۰/۱۲	SP1	۰/۶۶	RPIZ1
۰/۸۸	PIZ6U	۰/۰۹	SP2	۰/۵۵	RPIZ2
۰/۸۹	PIZ8U	۰/۰۶	SP3	۰/۶۷	RPIZ3
۰/۸۸	PIZ10U	۰/۱۲	SP4	۰/۶۰	RPIZ5
۰/۸۷	PIZ12U	۰/۰۸	SP5	۰/۹۵	RBPIZ17
۰/۹۶	PIZ14U	۰/۰۵	SP6	۰/۹۱	RBPIZ18
۰/۸۹	PIZ2D	۰/۱۱	SP7	۰/۹۴	RBPIZ19
۰/۸۴	PIZ3D	۰/۰۷	SP8	۰/۷۹	RBPIZ8
۰/۷۰	PIZ5D	۰/۰۶	SP9	۰/۷۹	RBPIZ10
۰/۸۹	PIZ7D			۰/۸۲	RBPIZ9
۰/۸۹	PIZ9D			۰/۷۴	RBPIZ6
۰/۸۸	PIZ11D			۰/۶۱	RBPIZ4
۰/۸۷	PIZ13D			۰/۷۹	RPIZ11
۰/۷۹	PIZ15D			۰/۴۰	RPIZ12
				۰/۶۹	RPIZ15



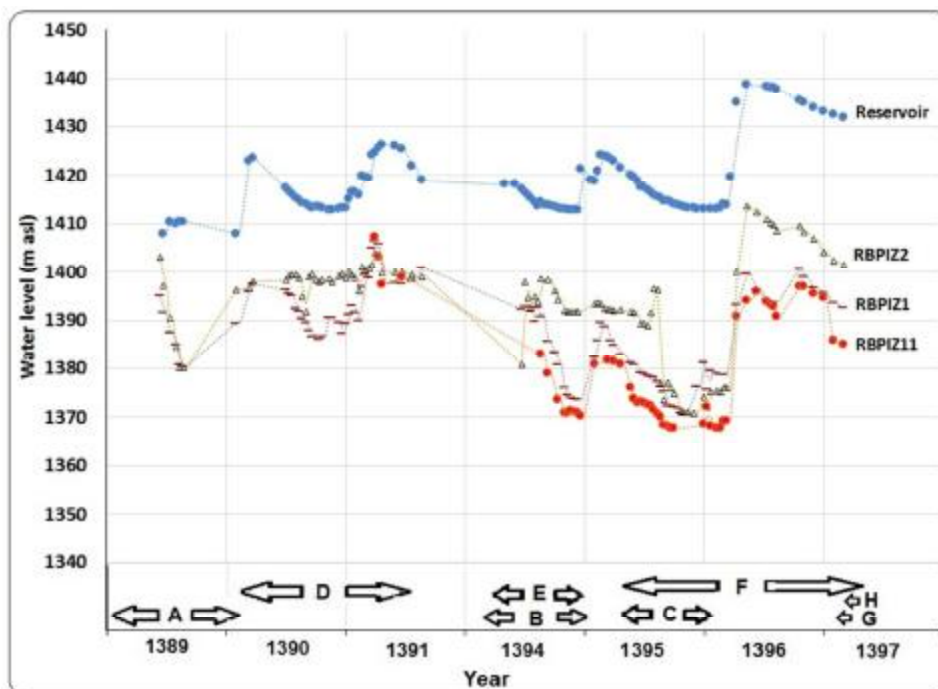
شکل ۷- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های پی سد. بازه C: زمان تزریق ترمیمی در گالری G5



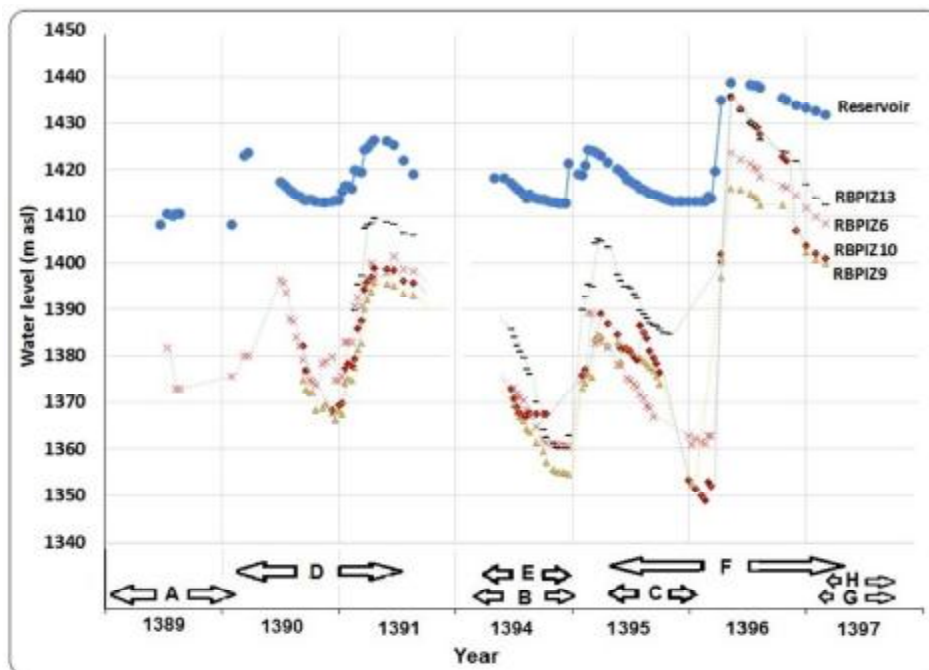
شکل ۸- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های پایین‌دست گالری RG2. بازه زمانی D: تزریق در امتداد ساحل راست، E: تزریق در ARG2، F: تزریق در RG6، G: تزریق در G45، و H: تزریق در سطح سرریز



شکل ۹- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های پایین‌دست گالری‌های RG6 و ARG2. بازه زمانی D: تزریق در امتداد ساحل راست، E: تزریق در ARG2، F: تزریق در RG6، G: تزریق در G45، و H: تزریق در سطح سرریز



شکل ۱۰- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های پایین دست پرده امتداد ساحل راست. بازه زمانی D: تزریق در امتداد ساحل راست، E: تزریق در ARG2، F: تزریق در RG6، G: تزریق در G45، و H: تزریق در سطح سرریز



شکل ۱۱- تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب در گمانه‌های پایین دست پرده امتداد ساحل راست. بازه زمانی D: تزریق در امتداد ساحل راست، E: تزریق در ARG2، F: تزریق در RG6، G: تزریق در G45، و H: تزریق در سطح سرریز

نواحی پایین دست است. در تکیه‌گاه چپ سد تنگاب ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و گمانه‌های پایین دست پرده به خوبی آشکار است. ضریب همبستگی بین مخزن

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل نوسان سطح آب از جمله روش‌های تعیین تأثیر پرده تزریق بر کاهش ارتباط هیدرولیکی مخزن با

می‌توان با حفر چاه از آب جمع‌شده در این سفره استفاده کرد. اگر آب مخزن به سوی یال جنوبی تاقدیس فرار کند، سبب تغذیه پایدار چشمه و قنات‌های موجود در پای این یال خواهد شد.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس و شرکت آب‌نیرو به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های موردنیاز این پژوهش، نهایت تشکر را دارد.

منابع

۱. آب‌نیرو. ۱۳۹۲. بررسی وضعیت پرده تزریق آب‌بندی اجراشده در بستر و تکیه‌گاه‌های سد با توجه به اجرای عملیات تزریق تکمیلی.
۲. اسدی ن. ۱۳۷۷. مطالعه مشکل آب‌بندی در سد تنگاب با استفاده از ردیابی ماده رنگی اورانین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بخش زمین‌شناسی دانشگاه شیراز.
۳. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۳۷۵. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ فیروزآباد، برگه شماره ۶۵۴۷.
۴. طلایی ح. ۱۳۷۸. مطالعه جهت جریان در سازند کارستی تکیه‌گاه چپ سد تنگاب با استفاده از ردیابی ماده رنگی رودامین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بخش زمین‌شناسی دانشگاه شیراز.
۵. مظفری م. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد عملیات تزریق تکمیلی پرده آب‌بند بر آبگذری سد تنگاب شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس.

با گمانه‌های بالادست و پایین‌دست پرده به‌ترتیب بین ۰/۸۰ تا ۰/۹۶ و ۰/۷۰ تا ۰/۸۹ متغیر است. اختلاف حدود ۵۰ متری بین سطح آب در مخزن و گمانه‌های پایین‌دست، عملکرد قابل‌قبول پرده تزریق در این تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد دیواره آب‌بند و پرده تزریق اجرایی در بخش پی سد عملکرد خوبی داشته‌اند؛ چراکه گمانه‌های واقع در بدنه سد ارتباط چندانی با مخزن را نشان نمی‌دهند (ضریب همبستگی بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۲). در تکیه‌گاه راست، کمترین میزان همبستگی بین مخزن و گمانه‌های پایین‌دست پرده تزریق در گالری‌های RG2، ARG2 و RG6 مشاهده می‌شود. تزریق ترمیمی در این بخش‌ها نیز کاهش چند متری تراز آب در گمانه‌های پایین‌دست را به همراه داشته است. به‌نظر می‌رسد در این تکیه‌گاه بیشترین ارتباط هیدرولیکی در ناحیه سرریز به سوی انتهای پرده اجراشده به موازات دیواره مخزن وجود دارد. بالآمدن قابل‌توجه تراز آب گمانه‌های پایین‌دست در پاسخ به خیزش حدود ۲۵ متری تراز آب مخزن، نشانگر وجود بخش‌های تراوا و در نتیجه ارتباط هیدرولیکی در ترازهای بالای (به‌ویژه بیش از ۱۴۲۰ متر) این تکیه‌گاه است. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تزریق اجراشده در کاهش نفوذپذیری و همچنین افزایش طول مسیر حرکت آب (و در نتیجه کاهش سرعت و دبی نشت) تا حد زیادی موفق بوده‌اند. با این وجود، آویزان‌بودن پرده‌ها و عدم‌اتصال آن‌ها به بخش ناتراوا در عمق و هر دو تکیه‌گاه سبب شده تا آب بتواند علاوه‌بر عبور از درون پرده، از زیر و انتهای آن نیز دور زده و به سمت پایین‌دست جریان یابد.

آب‌بندی تکمیلی-ترمیمی سد تنگاب نیازمند برنامه تزریق گسترده‌ای است که از نظر اقتصادی هزینه زیادی در بر خواهد داشت. همچنین دست‌یافتن به آب‌بندی کامل مخزن حتی با اجرای این تزریق‌ها نیز تضمین‌شده نیست؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که عملیات تزریق تکمیلی-ترمیمی دیگری در ساختگاه این سد طراحی و اجرا نشود؛ زیرا آب فرارکرده از مخزن به هدر نمی‌رود. در صورتی که آب مخزن در امتداد یال تاقدیس به سوی ناحیه پلانچ حرکت کند، سفره کارستی این ناحیه را تغذیه می‌کند. به‌دلیل وجود سازند ناتراوای پابده-گورپی در زیر سازند آسماری، امکان نفوذ آب به بخش‌های عمیق زمین وجود ندارد. در صورت نیاز به منابع آبی در آینده،

6. Bertrand C. Guglielmi Y. Denimal S. Mudry J. Deveze G. and Carry N. 2015. Hydrochemical response of a fractured carbonate aquifer to stress variations: application to leakage detection of the Vouglans arch dam lake (Jura, France). *Environmental Earth Sciences*. 74(12): 7671-7683.
7. Bruce D.A. 2017. Remedial cutoff walls for dams in the US: 40 Years of Case Histories. In *Grouting*. 533-547.
8. Bonacci O. and Rubinić J. 2009. Water losses from a reservoir built in karst: the example of the Boljunčica reservoir (Istria, Croatia). *Environmental Geology*. 58(2): 339-345.

- seepage paths in left abutment of Bidvaz Dam using tracing technique. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3(4): 719-724.
22. Saberi-Mehr S. Raeisi E 2019. Investigation of seepage flow path(s) in the right embankment of Sheshpeer Dam, the Zagros Region, Iran. *Carbonates and Evaporites*. 34(4): 1321-1331.
 23. Shangxin F. Yufei Z. Yujie W. Shanyong W. and Ruilang C. 2020. A comprehensive approach to karst identification and groutability evaluation, a case study of the Dehou reservoir, SW China. *Engineering Geology*. 269: 105529.
 24. Vasić L. Milanović S. Puskás-Preszner A. and Palcsu L. 2020. Determination of the groundwater-leakage mechanism (binary mixing) in a karstic dam site using thermometry and isotope approach (HPP Visegrad, Bosnia, and Herzegovina). *Environmental Earth Sciences*. 79(8): 1-12.
 25. Zeng C. He C. Liu Z. Gong X. Chen W. Zeng Y. and Deng J. 2022. Storage capacity of a karst groundwater reservoir associated with a large dam in a humid subtropical canyon karst area in southwestern China. *Hydrogeology Journal*. 30(7): 1989-2012.
 26. Zhou Z. Zhou Z. Xu H. and Li M. 2021. Surface water-groundwater interactions of Xiluodu Reservoir based on the dynamic evolution of seepage, temperature, and hydrochemistry due to impoundment. *Hydrological Processes*. 35(8): e14304.
 9. Charlton J.E. Ginther C. and Bruce D.A. 2010. Comprehensive foundation rehabilitation at Bear Creek Dam. *Environ Eng Geosci*. 3: 211-227.
 10. Dai Q. Fangpeng L., Xiaoping W., Deshan F. and Richard C.B. 2017. Detection of concrete dam leakage using an integrated geophysical technique based on flow-field fitting method. *Journal of Applied Geophysics*. 140: 168-176.
 11. Donnelly C. R. Hinchberger S. and Mohammadian E. 2009. The design of foundation treatment measures for dams on karst foundations. *Canadian dam association bulletin*. 20(4): 7-20.
 12. Filz G.M. Bruce D.A. 2016. Deep mixing grows up: the evolution of deep-mixing technology in the US market over the last decade. *Geo-Strata-Geo Institute of ASCE*. 20(3): 30-37.
 13. Jiang T. Zhang J. Wan W. Cui S. Deng D. 2017. 3D transient numerical flow simulation of groundwater bypass seepage at the dam site of Dongzhuang hydro-junction. *Engineering Geology*. 231: 176-189.
 14. Kalantari N. Heydari M. 2009. Solubility of limestone and seepage problems in the left abutment of the Marun Dam, Southwest of Iran. *Journal of engineering geology*. 3(1): 591-614.
 15. Liu, B. Wang C. Liu Z. Xu Z. Nie L. Pang Y. and Feng S. 2021. Cascade surface and borehole geophysical investigation for water leakage: A case study of the Dehou reservoir, China. *Engineering Geology*. 294: 106364.
 16. Milanović P. 2004. *Water resources engineering in karst*. CRC Press, Boca Raton, Florida, US. 312 p.
 17. Milanović P. 2018. *Engineering Karstology of Dams and Reservoirs*. CRC Press. Boca Raton, Florida, US. 355 p.
 18. Milanović S. and Vasić L. 2021. Methodological approaches and research techniques for addressing construction and remediation problems in karst reservoirs. *Hydrogeology Journal*. 29(1): 101-122.
 19. Mozafari M. Milanović P. and Jamei J. 2021. Water leakage problems at the Tangab Dam Reservoir (SW Iran), case study of the complexities of dams on karst. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80(10): 7989-8007.
 20. Mozafari M. Raeisi E. Zare M. 2012. Water leakage paths in the Doosti Dam, Turkmenistan and Iran. *Environmental Earth Sciences*. 65(1): 103-117.
 21. Nasseh S. Ghafoori M. Hafezi M. N. and Lashkaripour G. R. 2013. Investigation of

