

به کارگیری تکنیک ردیابی در علاج بخشی نشت سدها (مطالعه موردی: سد زنگان کرمانشاه)

کریمی، احمد رضا^{۱*}، کریمی، حاجی^۲

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

۲- استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

*نویسنده مسئول: ahmadrkarimi.ark@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

چکیده

یکی از بهترین روش‌ها جهت تعیین مسیرهای نشت آب از سدها، به کارگیری تکنیک‌های ردیابی به‌ویژه مواد رنگی فلورسنت می‌باشد. در اولین آگیری سد زنگان واقع در استان کرمانشاه، آثاری از نشت در خلیج موجود در شمال مخزن مشاهده شد و چشمه‌هایی در پایین‌دست سد ظاهر گردیده و چشمه‌های قبلی موجود در منطقه پرآب‌تر شدند. به‌منظور تشخیص مسیرهای نشت و فرار آب و همچنین شناخت نحوه حرکت و نوع رژیم جریان آب (افشان یا مجرای) و میزان توسعه کارست، یک مرحله عملیات ردیابی در محل خلیج انجام شد. در این عملیات، از ماده رنگی فلورسنت اورانین استفاده گردید. ماده ردیاب در تعدادی از گمانه‌ها (گمانه‌های T1، T2، T3 و T5) و در چشمه‌های پایین‌دست سد (چشمه‌های نشت ۱ تا ۱۸ در جناح چپ و چشمه‌های ۷ گانه جناح راست رودخانه) و چشمه نظری مشاهده شد. سرعت ردیاب بیانگر جریان مجرای (توسعه‌نیافته) در این ناحیه بود. به‌منظور جلوگیری از نشت آب از خلیج جناح چپ دو گزینه پیشنهاد گردید. گزینه اول اجرای پرده آب‌بند در داخل یک گالری به طول حدود ۳۰۰ متر از انتهای پرده موجود تا سازند کشکان که به‌عنوان سازند آب‌بند در تکیه‌گاه چپ عمل می‌نماید. گزینه دوم شامل اجرای روکار پرده آب‌بند در محل خلیج جناح راست که آثار نشت در آن مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: چشمه، ردیاب، سد، کارست، نشت.

مقدمه

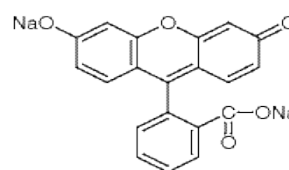
پمپاژ انجام می‌گیرد (باقری و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از تکنیک ردیابی در مطالعات کارست، به‌خصوص در زمینه بررسی مسئله فرار آب از سدهای احداثی در این مناطق، به‌عنوان یکی از ابزارهای مناسب مطرح می‌باشد. به‌ویژه ردیاب‌های رنگی به‌واسطه دارا بودن خصوصیات مناسب جهت ردیابی مانند قابلیت تشخیص زیاد، از اهمیت فراوانی در این زمینه برخوردارند (افتخاری، ۱۳۷۲). ردیابی آب یک ابزار کلاسیک، پیشرفته و قدرتمند برای هیدرولوژیست‌های کارست است که به آن‌ها اجازه می‌دهد مرزهای حوضه‌های آبریز را مشخص کنند، سرعت جریان آب زیرزمینی را تخمین بزنند، مناطق تغذیه را تعیین کنند و منابع آلودگی را شناسایی کنند (Ford and Williams, 1989). آزمایش‌های ردیاب اطلاعات مستقیمی در مورد جابه‌جایی مواد در سفره‌های کارستی ارائه می‌دهند و نه تنها برای تأیید ارتباط هیدرولیکی بین نقاط

نشت آب یکی از چالش‌های مهم در پروژه‌های مهندسی و زمین شناسی (سدها، تونل‌ها و پروژه‌های زیربنایی صنعتی و شهری) است (خلیلی و مورجانی، ۱۴۰۳). سدسازی به‌عنوان یکی از روش‌های مهار آب‌ها و استحصال انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مسئله فرار آب از سدها مشکلی است که گریبان‌گیر بسیاری از سدهای دنیا و برخی سدهای کشور می‌باشد. این موضوع که بیشتر مبتلا به سدهای احداث شده در مناطق کارستی می‌باشد، ضرورت توجه به مطالعات کارست و شناخت خصوصیات هیدروژئولوژی سازندهای زمین شناسی در این مناطق را خاطر نشان می‌سازد. متغیرهای هیدروژئولوژیکی که معمولاً با روش‌های کلاسیک مانند روش‌های آزمایشگاهی، اسلاگ تست، آزمایش ردیابی و آزمون‌های

را فراهم کرد. سلطانی و همکاران (۱۳۸۷) از روش‌های ردیابی رنگی و حرارت سنجی آب زیرزمینی به منظور شناسایی مسیرهای حرکت آب زیرزمینی و بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط بین آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در ساختگاه سد کوثر استفاده نمودند. در روش ردیابی رنگی با به کارگیری ردیاب‌های فلئورسنت مسیر جریان آب زیرزمینی در تکیه‌گاه‌های چپ و راست سد کوثر و چگونگی ارتباط میان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و محلهایی که در آن‌ها آب سرعت نسبتاً بالایی داشت شناسایی شد. در بررسی‌های حرارت‌سنجی نیز صحت نتایج آزمایشات ردیابی رنگی تایید شد. همچنین در مطالعات Peely و همکاران (۲۰۲۱) از منحنی‌های هیدروگراف ردیاب (Breakthrough Curves) برای شناسایی آبخوان‌های کارستی با سیستم‌های جریان دوتایی (ماتریکس و کانال) استفاده گردید. در این مطالعه، مدل Conduit Flow Process (CFPv2) برای بررسی اثر عواملی مانند هدایت هیدرولیکی، جریان تبدیلی، فاصله ردیابی و شیب هیدرولیکی بر BTCها به کار رفت. داده‌های ۲۵۳ آزمایش ردیابی رنگی در ایران نشان داد که غلظت پیک با افزایش قطر کانال و فاصله کاهش می‌یابد، به‌ویژه در شرایط شیب هیدرولیکی مصنوعی، همچنین، غلظت پیک بالا، زمان کوتاه رسیدن به پیک و سرعت جریان زیاد، نشانه توسعه‌یافتگی بالای سیستم کارستی است. این مطالعات به‌خوبی بیانگر کاربردها و دقت استفاده از روش آزمون ردیابی رنگی در مطالعات نشت آب سدها می‌باشد.

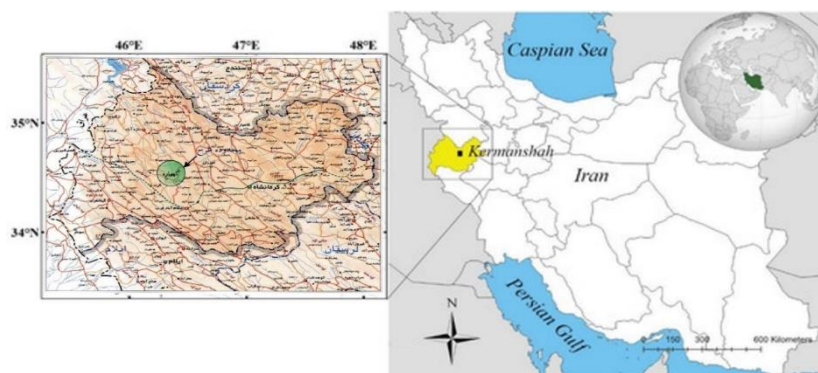
ساختگاه سد زمکان در غرب استان کرمانشاه با مختصات ۲۲° ۴۶' عرض شمالی و ۱۶° ۱۹' ۳۴' طول شرقی و در ۶۰ کیلومتری غرب کرمانشاه و در فاصله حدود ۵ کیلومتری شهر گهواره قرار گرفته است. به لحاظ تقسیمات کشوری نیز محدوده طرح در دهستان گورانی از بخش گهواره در شهرستان دالاهو واقع شده است. فاصله ساختگاه مورد بررسی از شهر اسلام‌آباد غرب ۷۵ کیلومتر است. گستره طرح در میان بخشی از ارتفاعات شمال شهرستان دالاهو قرار گرفته است و دره زمکان در گستره طرح حد فاصل ارتفاعات کوه بزهو در خاور و کوه دیوانگاه در باختر واقع شده است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به ساختگاه ارائه شده است.

(Morales et al., 2007) استفاده می‌شوند، بلکه اطلاعاتی درباره رژیم جریان آب زیرزمینی نیز ارائه می‌دهند. آزمایش ردیابی آب زیرزمینی همچنان یکی از مؤثرترین ابزارها برای درک ساختار و عملکرد سیستم‌های جریان کارستی است (Quinlan, 1989; Dzikowski et al 1995; Grasso, 2003) که می‌تواند ارتباط هیدرولیکی بین دو یا چند نقطه را تعیین کند. منطق کلی حاکم بر کاربرد یک ردیاب این است که با همان سرعت و جهتی که آب حرکت می‌کند، ردیاب نیز حرکت کرده باشد. یکی از مهم‌ترین مواد رنگی فلورسنت برای ردیابی آب‌های زیرزمینی است. این ماده همچنین تحت نام‌های Phthalein Sodium, Uranine yellow, Fluorescein C.I. sodium و غیره شناخته می‌شود. اورانین با نام ژنریک Acid Yellow 73 و شماره اندیکس رنگ CI 45350 و وزن مولکولی ۳۷۶/۲۷ گرم و فرمول شیمیایی $C_{20}H_{10}O_5Na_2$ می‌باشد. شکل ۱ فرمول گسترده (ساختمانی) این ماده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: فرمول گسترده اورانین (نقل از Benischke, 1991).
Figure 1: Structural formula of Uranine (Benischke, 1991).

مطالعات زیادی جهت بررسی مسیرهای جریان آب خصوصاً آب نشتی از سدها، ارتباط هیدرولیکی بین سفره‌ها و تعیین میزان سرعت آب با استفاده از آزمایش ردیابی رنگی صورت گرفته است. (Karimi and Ashjari, 2009) مطالعه‌ای در مورد جریان آب در چشمه گلودره در منطقه زاگرس ایران انجام دادند. آن‌ها با استفاده از آزمایش ردیابی رنگی ارتباط هیدرولیکی بین نقاط تزریق و چشمه را تأیید کردند. یافته‌ها نشان داد که رژیم جریان آب، ترکیبی از سیستم‌های جریان سیفونی و جریان افشان (Diffuse) است، که می‌تواند باعث نشت احتمالی از سد پاتاق شود. حسن زاده و همکاران (۱۳۹۲) بیان کردند مطالعات زمین‌شناسی سدها نقش مهمی در جلوگیری از نشت آب و مشکلات اجرایی دارند. در سد مخزنی مارون بهبهان، با استفاده از ردیابی مواد رنگی، مسیرهای نشت آب و ارتباط هیدرولیکی به دقت شناسایی شد. این روش امکان تعیین دقیق منشأ نشت و مسیرهای جریان



شکل ۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه استان کرمانشاه و کشور.

Figure 2: Location of the study area on the map of Kermanshah Province and Iran.

Width of the crest	10 meters
Height of the dam	58 meters
Dam crest level	1547 meters (above sea level)
Normal water level	1542 meters (above sea level)
Maximum water level	1546.7 meters (above sea level)
Reservoir total volume	23.1 million cubic meters
Reservoir surface at normal water level	1.3 square kilometers
Title	Specifications
River name	Zemkan
Catchment area	352 square kilometers

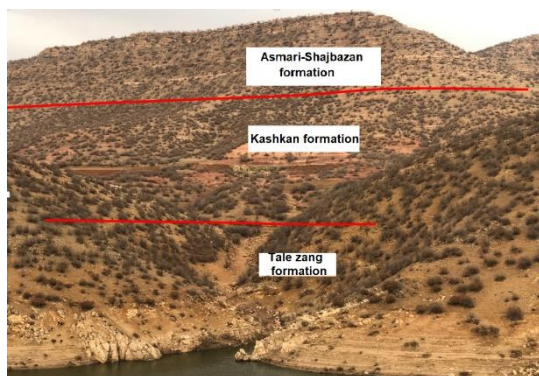
سد مخزنی زمکان جهت تامین آب اراضی دشت گهواره بر روی رودخانه زمکان احداث گردیده است. جدول ۱ مشخصات فنی سد زمکان را به نمایش گذاشته است. پس از آبیگری مخزن سد زمکان، ترک‌هایی در لایه‌های زمین در محدوده جناح چپ دریاچه سد ظاهر شد که با صدای تخلیه آب به داخل تکیه گاه همراه بوده است. به گفته شاهدان، حتی ورود آب در این محدوده با ایجاد گردآب هم همراه بوده است. با پایین رفتن سطح آب دریاچه سد، یک فرو رفتگی به شکل فروچاله در این ناحیه تشکیل گردیده و در ترازهای پایین‌تر نیز آثار و شواهد تخلیه آب دریاچه به داخل تکیه‌گاه با صدای مشخص تخلیه آب مشاهده گردید. چشمه‌های جدیدی در پایین‌دست سد به موازات آن ایجاد شده و چشمه‌هایی که قبلاً در این ناحیه وجود داشته‌اند (مانند چشمه نظری) هم پرآب‌تر شده‌اند و هم ترکیب گوگردی پیدا کرده‌اند. هدف از این مطالعه بررسی مسئله نشت آب از تکیه گاه چپ مخزن سد زمکان از قبیل تعیین سرعت جریان آب زیرزمینی، مسیرهای کلی جریان آب و ارائه راهکارهایی برای تکمیل آب‌بندی سد براساس نتایج حاصله از عملیات ردیابی می‌باشد.

در سد زمکان محل تزریق ردیاب در گمانه T-inj که در محدوده نشت و ترک‌های ایجاد شده در محدوده ضلع شمال شرقی دریاچه سد حفاری گردیده بود تعیین گردید. عمق گمانه تزریق ردیاب ۵۵ متر بوده که تا ۲۰ متر زیر تراز آب زیرزمینی منطقه و حدود ۴۰ متر زیر تراز نرمال دریاچه سد حفاری گردید. این گمانه از نفوذپذیری بالایی برخوردار بود و آزمایش تزریق آب در این گمانه به مدت ۲۴ ساعت و دبی ۲/۵ لیتر در ثانیه نشان داد که میزان بالا آمدن سطح آب در اثر تزریق آب، کمتر از ۲۰ سانتی‌متر بوده است. محل گمانه تزریق، در محلی در بالای یک زون فرار آب که به شکل یک فروچاله (شکل ۳) در آمده است انتخاب گردید.

جدول ۱: مشخصات فنی سد زمکان

Table 1: Technical specifications of the Zemkan Dam

Title	Specifications
River name	Zemkan
Catchment area	352 square kilometers
Average annual recharge	30.2 million cubic meters
Dam type	Earth dam with clay core
Length of the crest	278 meters



شکل ۵: نمایی از سازند کشکان در شمال سد زمکان.

Figure 5: View of the Kashkan Formation in the north of the Zemkan Dam.

تاقدیس بالول یک تاقدیس با پلانژ دوگانه در جناح چپ سد می باشد که هسته آن از سازند تله زنگ با لایه های پرشیب در مرکز تشکیل شده است و حالت یک چین تنگ (جناغی) دارد. به واسطه تکتونیک شدیدی که این تاقدیس متحمل گردیده، درز و شکاف و شکستگی های متعددی همراه با آثار انحلال و کارست به ویژه در بخش های آهکی ضخیم لایه سازند تله زنگ در مرکز آن به وجود آمده و مسیریایی برای انحلال و تشکیل مجاری کارستی برای انتقال آب از خلیج های داخل مخزن به چشمه های پایین دست فراهم نموده است.

هدف از این مطالعه بررسی مسیره های نشت آب از جناح چپ سد زمکان با استفاده از آزمایش ردیابی رنگی و نحوه اجرای پرده آب بند جهت جلوگیری از نشت آب سد زمکان می باشد.

مواد و روش ها

پس از بررسی اسناد کتابخانه ای و گزارش های قبلی در منطقه، چندین بازدید میدانی برای تعیین موقعیت گمانه ها و چشمه ها و درک شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه ترتیب داده شد. نقاط تزریق (گمانه Tinj) و نمونه برداری شامل گمانه های T1 تا T7، نشت های ۱ تا ۱۸ (SP1 تا SP18) در جناح چپ رودخانه و چشمه های گوگردی ۱ تا ۷ (S1 تا S7) در جناح راست رودخانه، چشمه نظری، گمانه های رفتارنگاری در پایین دست سد و گالری مشخص گردید. پیش از تزریق ردیاب رنگی اورانین، از تمامی نقاط نمونه برداری آب که ممکن بود ردیاب در آن ها شناسایی شود، نمونه برداری شد تا غلظت های زمینه ردیاب (Background) تعیین شود. یک گمانه به عمق ۵۰ متر (Tinj) در نزدیکی ناحیه نشت (در نزدیک فروچاله ای که شکل گرفته بود و در فاصله حدود سی متری آب دریاچه)

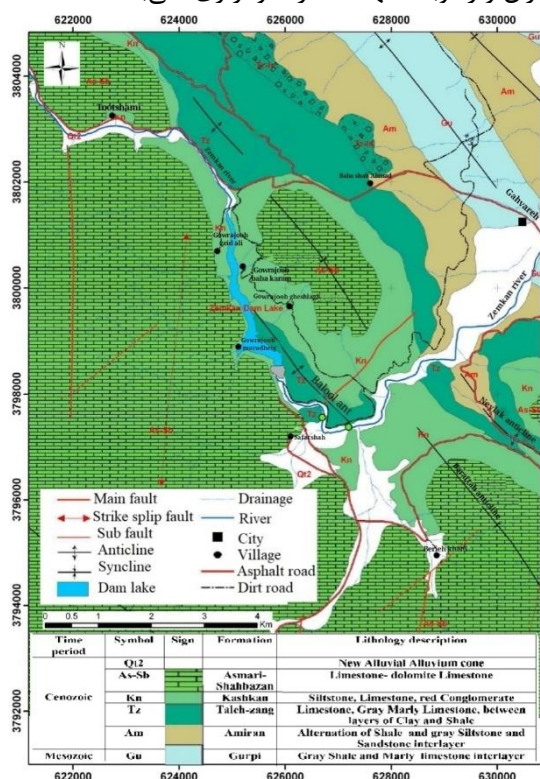


شکل ۳: فرو افتادگی به شکل فروچاله در پایین دست گمانه

تزریق و ترک های ایجاد شده.

Figure 3: Sinkhole-shaped subsidence downstream of the grouting borehole and the induced cracks.

شکل ۴ نقشه زمین شناسی محدوده سد زمکان و شکل ۵ نمایی از زمین شناسی محدوده جناح چپ را به نمایش گذاشته است. مهم ترین سازندهایی که در منطقه مورد مطالعه رخنمون پیدا کرده اند شامل سازندهای تله زنگ، کشکان، آسماری-شهبازان و رسوبات عهد حاضر (کواترنری) می باشند.



شکل ۴: نقشه زمین شناسی محدوده سد و نواحی مجاور.

Figure 4: Geological map of the dam area and adjacent regions.

جدول ۲: سرعت حرکت ماده ردیاب در مسیر چشمه‌های نشت ۱ تا ۱۸.

Table 2: Velocity of tracer movement along leakage springs 1 to 18.

Spring name	Real velocity (m/h)	Distance to Ting (m)	First presence of dye (h)	Apparent velocity (m/h)
Sp 1	5.9	997	246	4.1
Sp 2	5.7	999	258	3.9
Sp 3	5.7	1006	258	3.9
Sp 4	5.7	1008	258	3.9
Sp 5	5.8	1010	258	3.9
Sp 6	5.8	1015	258	3.9
Sp 7	5.8	1018	258	3.9
Sp 8	5.8	1020	258	3.9
Sp 9	6.3	1062	246	4.3
Sp 10	6.1	1076	258	4.2
Sp 11	6.2	1085	258	4.2
Sp 12	7.6	1089	210	5.2
Sp 13	6.3	1105	258	4.38
Sp 14	6.3	1107	258	4.3
Sp 15	6.4	1116	258	4.3
Sp 16	6.5	1139	258	4.4
Sp 17	6.5	1141	258	4.4
Sp 18	6.5	1145	258	4.4

مکان نقطه تزریق و نقاط نمونه‌برداری در شکل ۶ نشان داده شده است. اورانین به آب زیرزمینی از طریق تزریق به گمانه Tinj که در جناح چپ دریاچه سد زمکان و در ناحیه بیرون‌زده سازند تله‌زنگ قرار داشت، تزریق شد. این سازند عمدتاً از تناوب سنگ‌آهک و مارن تشکیل شده که ضخامت سنگ‌آهک به سمت قاعده سازند افزایش یافته و رفتار کارستی را نشان می‌دهد. حضور رنگ در گمانه‌های T1، T2، T3، T5 و همچنین در چشمه‌های Sp1 تا Sp18 (واقع در جناح چپ رودخانه زمکان)، چشمه‌های S1 تا S7 (واقع در جناح راست رودخانه زمکان) و چشمه نظری شناسایی شد. شایان ذکر است که رنگ در سایر گمانه‌ها و چشمه‌ها شناسایی نشد.



شکل ۶: محل نقطه تزریق ردیاب و نقاط نمونه‌برداری.

حفر شد تا ردیاب در آن تزریق شود و شرایط آب زیرزمینی در زمان حال و پس از آب‌بندی و پس از آبیگری کامل، مورد نظارت قرار گیرد. سطح آب در هنگام تزریق رنگ ردیاب به‌طور قابل‌توجهی (حدود ۲۰ متر) پایین‌تر از تراز آب دریاچه بود که نشان‌دهنده شیب هیدرولیکی زیاد برای فرار آب است. اورانین، که به‌عنوان فلورسنتین سدیم شناخته می‌شود، به‌عنوان ماده ردیاب آب زیرزمینی برای تعیین مسیرهای جریان از گمانه تزریق به نقاط بالقوه خروج مجدد انتخاب شد. در مجموع ۱۰ کیلوگرم اورانین به گمانه Tinj تزریق شد. پس از تزریق ردیاب، پمپاژ آب به گمانه با نرخ ۲/۵ لیتر بر ثانیه به مدت هفت روز برای هدایت ردیاب به داخل سفره و انتقال آن به مسیرهای اصلی نشت تداوم یافت. در طول مطالعه، تقریباً ۴۹۰۰ نمونه آب از گمانه‌های پایش، مقاطع رودخانه و چشمه‌ها برای آنالیز و کنترل ماده ردیاب جمع‌آوری شد. این نمونه‌ها در شرایط تاریک به آزمایشگاه منتقل شدند تا از تجزیه نوری جلوگیری شود و بلافاصله برای تشخیص وجود رنگ اورانین در نمونه‌های آب آنالیز شدند. نمونه‌های آب هر دو ساعت یک‌بار برای سه روز اول، هر چهار ساعت برای چهار روز بعد، هر شش ساعت برای هفته بعد، هر دوازده ساعت برای دو هفته بعد و در نهایت روزانه تا پایان آزمایش ردیابی جمع‌آوری شدند. برای پایش غلظت‌های بسیار پایین رنگ در چشمه‌ها و مقاطع رودخانه از کیسه‌های زغال فعال استفاده شد. پس از تزریق رنگ، در مجموع ۳۲ کیسه زغال فعال به‌صورت هفتگی جمع‌آوری شدند. نمونه‌های آب و کیسه‌های زغال فعال از چشمه‌ها و گمانه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج فلوروفتومتر مدل RF-5000 آنالیز شدند. حد تشخیص اورانین در این تحلیل برابر با ۰/۰۵ قسمت در میلیارد (ppb) تنظیم شد.

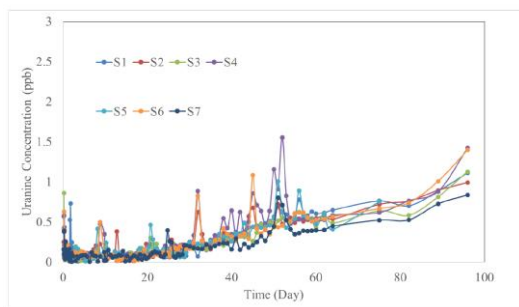
نتایج پژوهش

بررسی سرعت حرکت و مسیرهای ماده ردیاب

جدول ۲ فاصله بین نقطه تزریق و نقاط نمونه‌برداری (فاصله مستقیم ضرب در ۱.۴)، زمان حداکثر غلظت، حداکثر غلظت قله‌ها (پیک‌ها)، سرعت‌های قله مربوط به سرعت متوسط و سرعت حداکثر مربوط به زمان اولین ظهور رنگ در چشمه‌های ۱۸ گانه واقع در جناح چپ در پایین دست سد را نشان می‌دهد.

شکل ۹: منحنی‌های شکست رنگ ردیاب در چشمه‌های Sp1 تا Sp18.

Figure 9: Breakthrough curves of tracer at springs Sp1 to Sp18.



شکل ۱۰: منحنی‌های شکست رنگ ردیاب در چشمه‌های S1 تا S7.

Figure 10: Breakthrough curves of tracer at springs S1 to S7.

براساس منحنی غلظت زمان ماده ردیاب در هر یک از نقاط خروجی که ردیاب از آن خارج شده است و با در نظر گرفتن دبی نقطه تخلیه، با به کارگیری روابط مربوطه، میزان بازیافت ماده ردیاب محاسبه گردیده و نتایج در جدول ۳ ارائه گردیده است. براساس میزان ردیاب تخلیه شده از هر نقطه نسبت به میزان ردیاب تزریق شده (۱۰ کیلوگرم)، درصد بازیافت ماده ردیاب در هر یک از نقاط خروج ردیاب و همچنین درصد کل بازیافت ماده ردیاب محاسبه گردید.

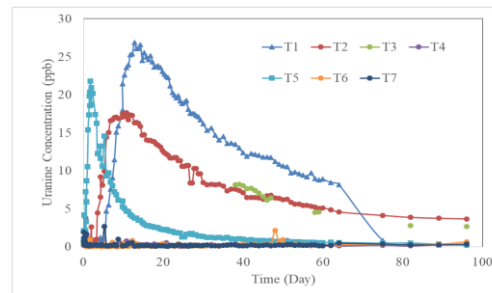
جدول ۳: نتایج محاسبات بازیافت ماده ردیاب در نقاطی که ماده تخلیه شده است.

Table 3: Results of tracer recovery calculations at discharge points

Row	Location	Amount of Tracer Discharged	Recovery Percentage	Recovery in Group
1	Leakage 1	51.5	0.5	Total leakage Recovery = 18.9% (1.89 kg)
2	Leakage 2	118.1	1.2	
3	Leakage 3	20.6	0.2	
4	Leakage 4	3.5	0.04	
5	Leakage 5	3.3	0.03	
6	Leakage 6	36.9	0.4	
7	Leakage 7	17.6	0.2	
8	Leakage 8	16.2	0.2	
9	Leakage 9	237.8	2.4	

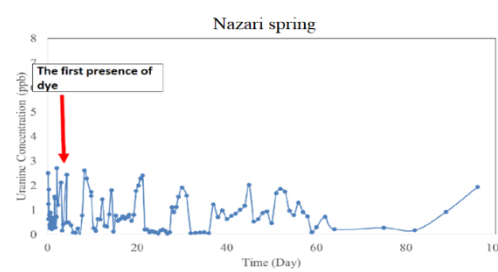
Figure 6: Location of tracer injection point and sampling points.

کل‌های ۷ تا ۱۰ منحنی‌های تغییرات غلظت ماده ردیاب در گمانه‌ها و چشمه‌ها را نشان می‌دهند که ویژگی‌های متمایز و پیچیده آن‌ها را به تصویر می‌کشند.



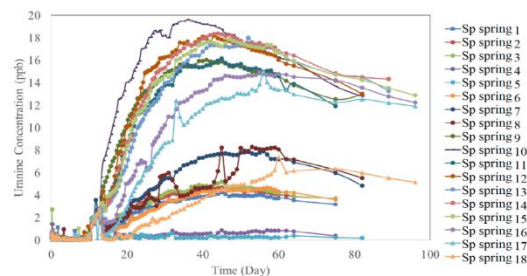
شکل ۷: منحنی‌های غلظت ماده ردیاب در گمانه‌ها.

Figure 7: Concentration curves of tracer in boreholes.



شکل ۸: منحنی‌های شکست رنگ ردیاب در چشمه نظری.

Figure 8: Breakthrough curves of tracer at Nazari spring.



10	Leakage 10	377.4	3.8	
11	Leakage 11	134.5	1.3	
12	Leakage 12	60.8	0.6	
13	Leakage 13	255	2.6	
14	Leakage 14	47.2	0.5	
15	Leakage 15	351.7	3.5	
16	Leakage 16	71.9	0.7	
17	Leakage 17	63.4	0.6	
18	Leakage 18	13	0.1	
19	S1	24.9	0.2	Total S=1
20	S2	3.1	0.03	gr
21	S3	26.7	0.3	
22	S4	4.9	0.05	
23	S5	4.1	0.04	
24	S6	20.2	0.2	
25	S7	23.9	0.2	
26	Nazari spring	405.9	4.1	4.1
Total recovered tracer (2.4 kg)			24	

چشمه نظری و چشمه‌های جناح راست (Sها) ادامه داشته و میزان بازیافت ماده ردیاب بالاتر از این رقم می‌باشد. از آنجا که پرده تزریق سد تا حوالی گمانه T4 اجرا شده و رنگ ردیاب در این گمانه شناسایی نشد، می‌توان نتیجه گرفت که پرده تزریق تا گمانه T4 عملکرد خوبی داشته است (شکل ۱۱). از سوی دیگر، ردیاب رنگی در سایر گمانه‌ها (خارج از ناحیه پرده تزریق) مشاهده شد، که این امر نشان می‌دهد آب‌بندی باید در این محور یعنی از T4 به سمت T6 که سازند غیرقابل نفوذ کشکان در آن قرار دارد به طول حدود ۳۰۰ متر انجام شود.

با توجه به اینکه ماده ردیاب عمدتاً از داخل سازند تله‌زنگ عبور نموده و بخش عمده‌ای از لیتولوژی این سازند از میان لایه‌های مارنی و آهک مارنی نازک لایه تشکیل گردیده، این درصد بازیافت، مقدار قابل توجهی (بالایی) بوده است. انتظار می‌رفت با توجه به وجود میان لایه‌های مارنی، میزان جذب بیشتری از ماده ردیاب در داخل سفره اتفاق می‌افتاد. لازم به ذکر است که همانگونه که منحنی‌های غلظت-زمان ماده ردیاب در نقاط خروجی نشان می‌دهد، در خاتمه عملیات نمونه‌برداری، همچنان تخلیه ردیاب از برخی خروجی‌ها مانند



شکل ۱۱: محل پرده تزریق اجرا شده و پرده پیشنهادی.

Figure 11: Location of executed grout curtain and proposed curtain.

آب پتانسیل جریان از محل سد به سمت چشمه‌ها را دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منبع اصلی آب بسیاری از چشمه‌ها، مخزن دریاچه سد است. یال نزولی منحنی غلظت

تراز سطح آب ثبت شده از گمانه‌های Tinj و دریاچه سد زمكان بالاتر از تراز چشمه‌ها و گمانه‌هایی است که رنگ ردیاب در آن‌ها مشاهده شده است. این اختلاف ارتفاع نشان می‌دهد که

زیادی برخوردار نیست و محدود به ناحیه خلیج تا سازند کشکان در حاشیه کوه بزه‌هو می‌باشد. شرایط زمین شناسی محدوده خلیج تا بدنه سد در تکیه گاه چپ آب بند به نظر می‌رسد زیرا هیچگونه شاهدهی از نشت در پیمایش‌های صحرایی مشاهده نشده و هیچ‌گونه ردیابی در گمانه‌های نزدیک بدنه سد و گود پی مشاهده نشده است. به‌علاوه، با پایین رفتن سطح آب دریاچه و عدم تماس آهک‌های ضخیم لایه با آب دریاچه، چشمه‌های پایین‌دست خشک شده‌اند. همچنین نشت چندانی در پی سد و نواحی پایین دست آن که ناشی از نشت از محدوده نزدیک به تکیه‌گاه و بدنه سد باشد وجود ندارد. این شواهد دال بر عملکرد مناسب نواحی نزدیک به بدنه سد از نظر آب‌بندی است زیرا این بخش از سازند تله‌زنگ دارای میان لایه‌های مارنی زیادی بوده و آهک‌های این بخش نازک لایه می‌باشند و توسعه کارست چندانی در آن‌ها اتفاق نیفتاده است (علاوین خردشدگی آن‌ها و بالا بودن لوژان گمانه‌های این محدوده).



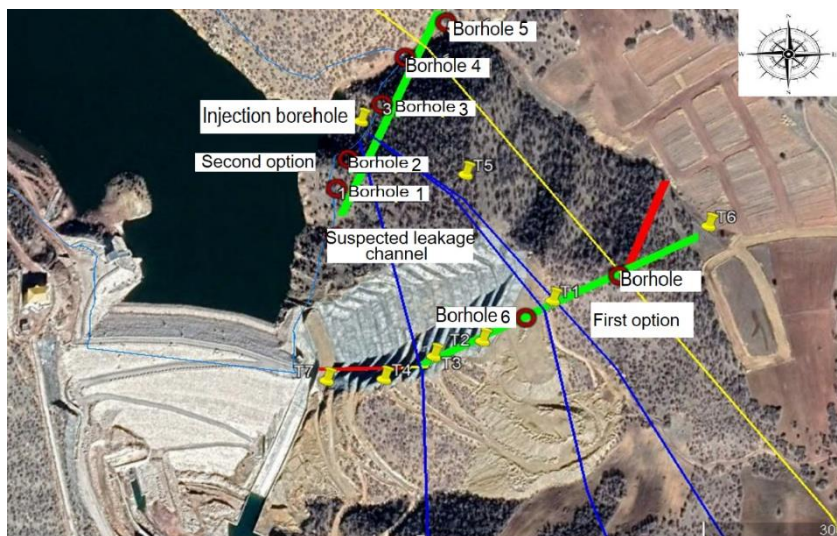
شکل ۱۲: مسیر و محدوده حرکت ماده ردیاب (خطوط آبی) از محل تزریق و خط زرد (مسیرهای احتمالی) به طرف پایین دست.
Figure 12: Path and extent of tracer movement (blue lines) from injection point and yellow line (probable paths) toward downstream.

روش‌های جلوگیری از نشت آب سد زمکان

بر اساس نتایجی که از مطالعات ردیابی حاصل گردیده، یک جریان مجرای توسعه‌نیافته از محدوده نشت (محل گمانه تزریق) به طرف چشمه‌های پایین دست در جناح چپ دریاچه سد زمکان وجود دارد. تنها راه جلوگیری از نشت آب از این محدوده، قطع ارتباط جریان آب از این ناحیه به طرف پایین دست است که برای قطع یا کاهش این ارتباط هیدرولیکی، دو گزینه ارائه شده است. گزینه اول امتداد پرده آب‌بند موجود (با یک زاویه شکست که بر امتداد لایه ها عمود باشد) و گزینه دوم اجرای یک پرده در محدوده خلیج شمال سد که نشت آب

گمانه‌ها شیب تندتری نسبت به چشمه‌ها دارند. همچنین، زمان تداوم غلظت ردیاب (قاعده منحنی غلظت) در گمانه‌ها به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر از چشمه‌ها است. این موضوع بیانگر سرعت بالاتر آب زیرزمینی (و توسعه بیشتر کارست یا وجود کانال‌های بزرگ‌تر) در منطقه گمانه‌ها در مقایسه با مناطق پایین‌دست نزدیک چشمه‌ها است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت آب بین دریاچه و پرده تزریق بیشتر از سرعت آب بین محل سد و چشمه‌ها است. مسیر حرکت ماده ردیاب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله از مطالعات ردیابی، ماده ردیاب در چهار گمانه T1, T2, T3 و T5 به‌طور مشخص ظاهر گردیده و از تمامی چشمه‌های جناح چپ مسیر رودخانه در داخل رودخانه که به نام‌های نشت ۱ تا ۱۸ شناسایی و نامگذاری شده‌اند، نیز تخلیه شده است. همچنین با غلظت کمتری، ماده ردیاب در چشمه‌های جناح راست (Sها) و چشمه نظری ظهور پیدا کرده است. شکل ۱۲ مسیر و محدوده جریان ماده ردیاب در داخل سفره کارستی جناح چپ را نشان می‌دهد. در این شکل، خطوط آبی مسیر و محدوده حرکت و نشت آب و همچنین حرکت ماده ردیاب را از محل گمانه تزریق به طرف چشمه‌های پایین دست سد اعم از چشمه‌های جناح چپ (نشت‌های ۱۸ گانه) و چشمه‌های ۷ گانه جناح راست (Sها) به نمایش گذاشته است. لازم‌به‌ذکر است که از محل تزریق ردیاب نیز مقداری از ماده ردیاب به طرف چشمه نظری حرکت کرده است که توسط جریان‌هایی از آب از نواحی بالادست سد که توسط خط زرد در این شکل مشخص گردیده رقیق‌سازی شده است و یا از مسیرهای مستقلی از محل تزریق ردیاب به این چشمه حرکت کرده است. با توجه به پایین بودن تراز آب زیرزمینی در سفره کارستی تاقدیس بالول و بالا بودن لوژان گمانه‌های حفاری شده در جناح چپ مخزن سد، مسیرهایی برای انتقال آب از مناطق مختلف دریاچه در مناطقی که آهک‌های ضخیم لایه در بخش شمالی و شمال شرقی مخزن (به‌ویژه در محدوده خلیج شمال سد) تشکیل گردیده و آب را به چشمه نظری منتقل می‌نماید. آب‌های نفوذ یافته در نواحی بالادست مخزن که به طرف چشمه نظری و چشمه‌های پایین دست حرکت می‌کنند، همگی از محدوده آهک‌های ضخیم لایه هسته تاقدیس بالول که دارای درز و شکاف‌های زیادی هستند و توسعه کارست بیشتری در آن‌ها اتفاق افتاده است (توسعه فروچاله در ناحیه نشت و محدوده تزریق ردیاب گواه این مطلب است) عبور می‌کند. این ناحیه از نظر گسترش از گستردگی

در آن اتفاق افتاده است. موقعیت کلی این گزینه‌ها با خطوط ضخیم سبز رنگ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: موقعیت گزینه‌های پیشنهادی جهت تکمیل آب بندی مخزن سد زمکان.

Figure 13: Location of proposed options for completing the sealing of the Zemkan Dam reservoir.

به طرف پایین دست، باعث افزایش گستره فرار آب شده و آب‌بندی آن حجم عملیات حفاری و تزریق بیشتری را می‌طلبد. بنابراین اجرای پرده آب‌بند در امتداد پرده آب‌بند موجود، با افزایش طول حفاری و تزریق و در نتیجه هزینه بالاتری برای تکمیل پرده همراه بوده و منطقی به نظر نمی‌رسد.

گزینه دوم: اجرای یک پرده آب‌بند از سطح زمین در محدوده

زون نشت

از آنجا که زون نشت و تخلیه آب از بخش آهک‌های ضخیم لایه سازند تله‌زنگ در مجاورت سازند کشکان و در محدوده خلیج واقع در شمال سد اتفاق افتاده است (شکل ۱۴)، به دلیل ضخامت بیشتر آهک‌ها در این محدوده، توسعه کارست بیشتری در آن‌ها اتفاق افتاده و فرار آب از داخل آن‌ها اتفاق افتاده است. بررسی‌های میدانی از محدوده بین این آهک‌های ضخیم لایه تا بدنه سد، هیچ‌گونه آثاری از فرار آب نه در گذشته و نه در مطالعات حاضر نشان نداده است. این موضوع به دلیل وجود لایه‌های ضخیم لایه مارن، شیل و گل‌سنگ در لابلای آهک‌های نازک لایه سازند تله‌زنگ در این محدوده است (بخش بالایی سازند تله‌زنگ) و نگرانی از بابت نشت از این ناحیه براساس داده‌های موجود، وجود ندارد. مدرک بعدی که این موضوع را تایید می‌نماید، عدم وجود نشت غیرمجاز در محدوده بدنه سد و پی آن می‌باشد. بنابراین، اگر بتوان ارتباط هیدروژئولوژیکی آهک‌های ضخیم لایه را در تراز نرمال سد با

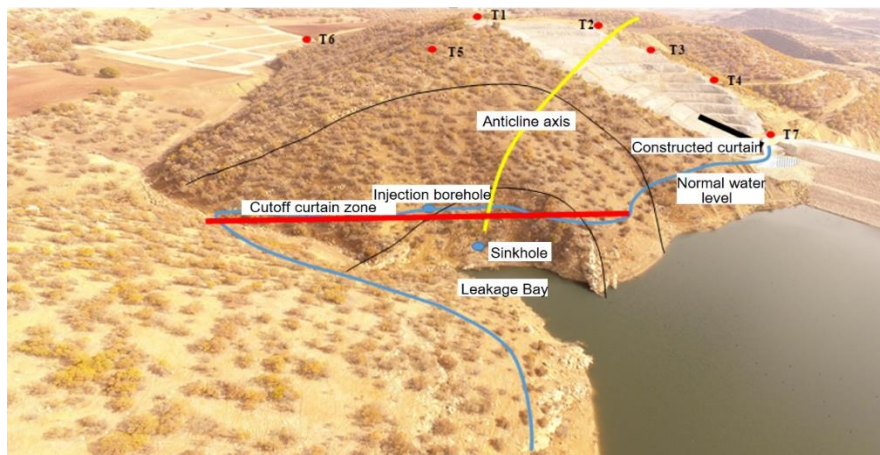
گزینه اول: تداوم گالری تزریق در جناح چپ تا محدوده گمانه

T6

در این گزینه، گالری تزریق جناح چپ با یک زاویه (عمود بر امتداد لایه‌های سازند تله زنگ) به سمت گمانه T6 در تراز نرمال سد حفاری گردیده و یک پرده تزریق در این ناحیه اجرا گردد. طول اولیه این گالری و پرده حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ متر بوده که نیازمند عملیات تکمیل حفر گمانه‌های اکتشافی جهت تدقیق میزان گسترش عمقی و جانبی پرده آب‌بند می‌باشد. با توجه به سوابقی که از رانش‌های منطقه در گذشته وجود دارد و ناپایداری‌هایی که در دامنه‌های این منطقه وجود دارد، این گزینه در اولویت اول نمی‌باشد؛ زیرا برای اجرای پرده در این راستا، نیاز به اجرای یک تونل در تراز نرمال سد بوده و پرده آب‌بند از داخل آن اجرا می‌گردد. عملیاتی کردن این گزینه، ضمن تحمیل هزینه‌های اضافی جهت اجرای گالری دسترسی، امکان رانش در پورتال ورودی به گالری (از طریق یک گالری دسترسی) و حتی ریزش تونل با توجه به خرد بودن لایه‌های منطقه وجود دارد.

نکته قابل توجه دیگر، مورفولوژی و شکل تاق‌دیس بالول است؛ بدین ترتیب که در محل خلیجی که نشت اتفاق می‌افتد، تاق‌دیس فشرده بوده و لایه‌های آهکی پرشیب می‌باشند (شکل ۱۴) و لایه‌های ضخیم که پتانسیل توسعه کارست بیشتری دارند و فرار آب از داخل آن‌ها اتفاق می‌افتد در یک گستره محدود قرار گرفته‌اند اما به طرف محور سد، چین حالت بازتری پیدا کرده و شیب لایه‌ها کاهش می‌یابد. تغییر هندسه چین

چشمه‌های پایین دست قطع نمود، به احتمال زیاد نشت آب از مخزن سد و ناحیه نشت، کنترل خواهد شد.



شکل ۱۴: هندسه تاقدیس بالول در محدوده نشت آب و شیب لایه‌ها.

Figure 14: Geometry of Balool anticline in the leakage area and dip of layers.

که نیازی به آن‌ها نیست می‌باشد تا بتوان در فصل کشاورزی از این آب‌ها استفاده نمود. سد زمکان یکی از سدهایی است که جهت ذخیره سازی آب برای آبیاری بیش از ۲۰۰۰ هکتار اراضی مستعد کشاورزی در پایین دست آن طراحی و اجرا شده است. همانند برخی از سدهای دنیا و کشور، نشت آب در جناح چپ این سد که دارای سازندهای کارستی در عمق می‌باشد نیز اتفاق افتاده و آب بندی آن یکی از نیازهای اساسی جهت بهره برداری بهینه از این سد می‌باشد.

ردیابی با مواد رنگی فلورسنت یکی از ابزارهای مناسب جهت مسیریابی نشت آب از سدها و همچنین تعیین کننده نوع رژیم جریان به‌ویژه در محیط‌های کارستی برای مطالعات نشت سد زمکان بکارگیری شد و ارتباط هیدروژئولوژیکی بین محل نشت (خلیج دریاچه در جناح چپ) و مناطق پایین دست بصورت جریان کارستی توسعه نیافته به اثبات رسید.

به‌منظور جلوگیری از نشت آب از دریاچه دو گزینه آب‌بندی پیشنهاد گردید. گزینه اول شامل تداوم پرده آب‌بند موجود در تکیه‌گاه چپ تا سازند کشکان به طول حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ متر بوده و گزینه دوم شامل اجرای یک پرده آب‌بند از محل ستیغ آهک‌های سازند تله زنگ در ابتدای خلیج شمال سد تا سازند تله‌زنگ در داخل دره می‌باشد. معرفی گزینه برتر، نیازمند حفاری‌های تکمیلی اکتشافی جهت دستیابی به اطلاعات هیدروژئولوژیکی به‌منظور تعیین گسترش جانبی و عمقی پرده آب‌بند و مقایسه اقتصادی هزینه گزینه‌های پیشنهادی است.

برای این‌منظور، از محل ستیغ لایه‌های ضخیم لایه ابتدای خلیج شمال شرق سد تا سازند کشکان در داخل دره، که تدقیق طول و عمق آن نیازمند حفاری‌های اکتشافی بیشتری خواهد بود، یک پرده آب‌بند از سطح زمین اجرا گردد. موقعیت این گزینه بر روی شکل‌های ۱۳ مشخص شده است.

حسن این روش، عدم نیاز به اجرای تونل در این مسیر می‌باشد. با عنایت به شیب تند توپوگرافی این محدوده بایستی حداقل دستکاری در شیب منطقه صورت گیرد تا زمین لغزش در این بخش اتفاق نیفتد (همانند تجربه تلخ زمین لغزش در محدوده سرریز سد). توصیه می‌گردد حمل تجهیزات و دستگاه‌ها به کمک ایجاد ریل‌هایی در این ناحیه و یا راه‌های دسترسی دستی صورت پذیرد. لازم به یادآوری است که در اجرای گزینه‌های علاج‌بخشی و تزریق سیمان در پرده تکمیلی، لازم است تراز آب دریاچه سد پایین انداخته شود تا جریان آب از داخل پیکره‌ای که نشت آب در آن اتفاق می‌افتد کاهش یافته و تزریق سیمان به‌طور موثر انجام گیرد و با جریان آب شسته نشود. همزمان با پایین انداختن تراز دریاچه سد بایستی پایش دقیق و کاملی (هم به‌صورت کمی و هم به‌صورت کیفی) از چشمه‌های پایین‌دست صورت پذیرد تا ارتباط هیدروژئولوژیکی آن‌ها با تغییر تراز آب دریاچه مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

سدسازی در برخی مناطق بهترین راه کنترل و مهار سیلاب‌ها و ذخیره و نگهداری آب‌هایی است که در فصل بارش

Institute for Geothermics and Hydrogeology,
Joanneum Research.

سپاسگزاری

این مطالعه در قالب یک طرح مطالعاتی بین شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه و دانشگاه ایلام به انجام رسیده است که مراتب سپاس خود را از همکاری‌های به‌عمل آمده بین شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه، شرکت مهندسين مشاور نهاداب و شرکت ساختمانی فروزنده اعلام می‌دارد.

منابع

- افتخاری، ع. (۱۳۷۲). کاربرد ردیاب‌های رنگی در بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه کارستی سپیدان، فارس (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه شیراز.
- باقری، ی.، نوین‌پور، ع.، نادری، ع.، نادری، ک. (۱۳۹۷). برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان باروق با استفاده از مدل‌های فازی سوگنو و ممدانی. هیدروژئولوژی، ۳ (۲)، ۹-۱.
- حسن‌زاده، م.، حسونی‌زاده، ه.، محمودیان‌شوشتری، م.، ایزدجو، م. (۱۳۹۲). ارزیابی نشت از بستر سدها با استفاده از تزریق مواد ردیاب رنگی (مطالعه موردی سد تنظیمی آریوبرزن بهبهان). همایش ملی ژئوماتیک.
- خلیلی، م.، شجاعی مرجانی، م. (۲۰۲۴). ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی (GPR و ERT) برای شناسایی و ردیابی نشت در محیط‌های رسوبی. هیدروژئولوژی، ۱ (۹)، ۱۰۱-۱۰۹.
- سلطانی، ه.، داوودی‌راد، م.، ر.، سالمی، ش. (۱۳۸۷). مطالعات ردیابی رنگی و حرارت‌سنجی در ساختگاه سد کوثر. دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی. تهران.
- Reference**
- Bagheri, Y., Novinpour, A., Nadri, A., Naderi, K. (2018). Estimation of hydraulic conductivity of the Barough aquifer using Sugeno and Mamdani fuzzy models. *Hydrogeology*, 3(2), 1-9. [In Persian].
- Behrouj Peely, A., Mohammadi, Z., Raeisi, E. (2021). Breakthrough curves of dye tracing tests in karst aquifers: Review of effective parameters based on synthetic modeling and field data. *Journal of Hydrology*, 602, 126604.
- Benischke, R. (1991). Fluorescent tracers in hydrology: Principles, instrumentation, physico-chemical properties, analytics. Graz, Austria:
- Dzikowski, M., Delay, F., Sauty, J.P., Crampon, N., de Marsily, G. (1995). Convolution à débit variable à partir des réponses de traçages artificiels; application à un système karstique (Causse de Gramat, Lot, France). *Journal of Hydrology*, 164(1-4), 305-324.
- Eftekhari, A. (1993). Application of dye tracers in hydrogeological studies of the Sepidan karst region, Fars (Master's thesis). Shiraz University, Department of Geology. [In Persian]
- Ford, D., Williams, P.W. (1989). Karst geomorphology and hydrology. London/Boston: Unwin Hyman.
- Grasso, D. A., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F. (2003). A deterministic approach to the coupled analysis of karst springs' hydrographs and chemographs. *Journal of Hydrology*, 271(1-4), 65-76.
- Hassan-Zadeh, M., Hassouni-Zadeh, H., Mahmoudian-Shoushtari, M., Izadjou, M. (2013). Assessment of seepage from dam reservoirs using dye tracers (Case study: Ariobarzan diversion dam, Behbahan). National Geomatics Conference. [In Persian]
- Khalili, M., Shojaei Morjani, M. (2024). Combination of geophysical methods (GPR and ERT) for detecting and tracing seepage in a sedimentary environment. *Hydrogeology*, 9(1), 101-109. [In Persian]
- Karimi, H., Ashjari, J. (2009). Periodic breakthrough curve of tracer dye in Gelodareh Spring, Zagros, Iran. *Cave and Karst Science*, 36, 5-10.
- Morales, T., Valderrama, I.F., Uriarte, J.A., Antiguada, I.A., Olazar, M. (2007). Predicting travel times and transport characterization in karst conduits by analyzing tracer-breakthrough curves. *Journal of Hydrology*, 334, 183-198.
- Quinlan, J.F. (1989). Ground-water monitoring in karst terranes: Recommended protocols and implicit assumptions. Las Vegas, NV: U.S. Environmental Protection Agency.
- Soltani, H., Davoudi-Rad, M. R., & Salami, S.h. (2008). Dye tracing and thermometry studies at the site of Kowsar Dam. 2nd National Conference on Dams and Hydropower Plants, Tehran. [In Persian].