نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

تحلیل حرارتی تراوش از بدنه سدهای خاکی: مطالعه موردی- سد داریان

نیلوفر باقری[۱]
علی اصغر میرقاسمی*[۲]

چکیده

سدسازی به عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های انسان در دامنه مدیریت آب، مزایای فراوانی دارد. در حال حاضر بسیاری از سدهای مرتفع دنیا از نوع خاکی و سنگریزه‌ای می‌باشند. فرسایش درونی و رگاب از علل متداول خرابی سدهای مذکور است. به منظور بررسی رفتار سد و جلوگیری از وقوع خطرات، رفتارنگاری سدها مورد توجه واقع شده است. مطالعه و تحلیل نتایج مربوط به اندازه‌گیری-های دمایی، اساس رفتارنگاری حرارتی است. به عبارت دیگر، مبنای این روش بر پایه ردیابی دمای آب تراوشی می‌باشد. سد داریان، در استان کرمانشاه، در مجاورت روستای داریان و بر روی رودخانه‌ی سیروان واقع شده است. این سد، با ارتفاع ۱۷۹ متر از پی، یکی از مرتفع‌ترین سدهای سنگریزه‌ای ساخته شده در کشور می‌باشد. مطالعه حاضر به رفتارنگاری حرارتی، با استفاده از مبدل‌های حرارتی ابزار دقیق‌های نصب شده، در بدنه‌ی سد و نیز مدل‌سازی حرارتی سد داریان، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس می‌پردازد. به عبارت دیگر ابتدا با ترسیم نمودارهای دمایی ابزار دقیق‌ها، رفتار حرارتی هسته‌ی سد در مقاطع و ترازهای مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود، نتایج حاصله، با نتایج ثبت شده، توسط ابزار دقیق‌ها مقایسه گردید. نتایج این تحقیق، نشان‌دهنده‌ی وضعیت مناسب عملکرد هسته رسی سد داریان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

سد خاکی و سنگریزه‌ای، تراوش، رگاب، رفتارنگاری حرارتی، نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس.

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران.
[۲]* استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران. aghasemi@ut.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

مقدمه

تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب، تولید برق در نیروگاه‌ها، کنترل سیل و جلوگیری از خسارت‌های آن، حفاظت از منابع آب طبیعی و توسعه‌ی گردشگری از جمله مزایای ساخت سدها است. شکل‌پذیری بالا، در دسترس بودن مصالح، مقرون‌به‌صرفه بودن، سازگاری با مصالح بستر و امکان احداث بر روی گسل با رعایت تمهیدات مربوطه، از ویژگی‌های مثبت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای می‌باشد. اما خطراتی نیز این نوع سدها را تهدید می‌کنند که در این میان پدیده‌ی رگاب، یکی از مهم‌ترین عوامل در شکست سد و ایجاد زیان‌های احتمالی جانی و اقتصادی است. وجود انرژی پتانسیل در آب نشتی، موجب جابه‌جایی ذرات و فرسایش می‌شود. از این رو، میزان نشت و تشخیص حالت غیرطبیعی آن جزء مسائل بسیار ضروری محسوب می‌گردد. سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، از نظر تحلیل دارای حساسیت فراوانی هستند؛ زیرا خاک و سنگ، جزء قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین مصالح می‌باشند و پیش‌بینی تمام خصوصیات رفتاری آن‌ها به طور کامل و دقیق امکان‌پذیر نیست. به منظور ارزیابی رفتار سدها در زمان، پارامترهای متعددی با استفاده از ابزار دقیق‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شوند. بررسی نتایج ابزار دقیق‌ها می‌تواند مشکلات و حالت‌های متداول شکست سدها را آشکار سازد (سید کلبادی و همکاران[1]، ۲۰۲۰). یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری، دما است. آب در هنگام حرکت، دما را نیز با خود به محیط منتقل می‌کند و بدین ترتیب، دما می‌تواند همچون ردیاب طبیعی عمل کند. طبق بررسی‌ها، تراوش آب تأثیر چشمگیری بر دمای سد و پی آن دارد؛ بنابراین با تحلیل دمایی می‌توان وجود یا عدم وجود تراوش و مسیر آن را مورد بررسی قرار داد. در این میان، ثبت و تحلیل درست نتایج، دو عامل بسیار تأثیرگذار هستند.

(کاپل میر[2]، ۱۹۵۷)، برای نخستین بار به توسعه‌ی تحلیل حرارتی، به عنوان یک روش مطالعه‌ی تراوش پرداخته است. تغییرات حرارت در یک نقطه از سد خاکی، می‌تواند بر اثر تغییرات دمای هوای اطراف، تغییرات دمای زمین و انتقال حرارت از طریق آب تراوش شده از بدنه و پی باشد. با توسعه‌ی این روش، (بیرمن و همکاران[3]، ۱۹۷۱) یک مطالعه‌ی حرارتی سه ساله را بر روی یک سد کوچک در جنوب کالیفرنیا انجام دادند. این مطالعه، با هدف بررسی قابلیت روش‌های سنجش حرارتی برای تشخیص و پایش تغییرات تراوش انجام شد و اهمیت نظارت حرارتی در تضمین ایمنی سد و تشخیص نشت احتمالی مورد توجه قرار گرفت.

در مطالعه‌ی (باقری[4]، ۱۳۸۴) بیان شده است که تأثیر تغییرات دمای هوای اطراف و تغییرات دمای زمین، ناچیز بوده و جریان تراوش با توجه به تغییرات فصلی دمای آب مخزن و تأخیر فاز زمانی، به سد راه می‌یابد. منظور از تأخیر فاز زمانی، مدت زمانی است که طول می‌کشد که آب تراوش یافته از مخزن، به محل ابزار دقیق مدنظر برسد. مصالح پوسته‌ی سد نفوذپذیری بالایی دارند. در نتیجه، به سرعت اشباع می‌شوند و تغییرات دمای پوسته بالادست با مخزن هماهنگی زیادی دارد. اما در صورت عملکرد مناسب هسته، این هماهنگی مشاهده نمی‌شود.

(میرقاسمی و همکاران[5]، ۱۳۸۸) در مقاله‌ای به تحلیل حرارتی سد کرخه پرداخته‌اند. این سد از نوع خاکی با هسته‌ی رسی مخلوط می‌باشد و برروی رودخانه کرخه واقع شده است. تغییرات دما در پوسته بالادست و پایین‌دست، فیلتر بالادست و پایین‌دست، هسته و پی بصورت جداگانه بررسی شده است. داده‌های حرارتی از ابزار دقیق نصب شده در قسمت‌های مختلف سد، حاصل و بررسی و تحلیل داده‌ها انجام شده است. اندازه‌گیری دمای سطح آب به منظور تعیین اختلاف دمای سالانه‌ی آب مخزن، دمای حداکثر و حداقل، مقایسه شکل هارمونیک تغییرات دما در مکان‌های اندازه‌گیری، تغییرات نوسانی دمای آب مخزن و میزان تأخیر فاز آن، از ملزومات این بررسی می‌باشد. در بررسی منبع آب‌های تراوش شده، دما در ترازهای مختلف مخزن نیز مورد توجه قرار گرفته است.

[1] Seyed-Kolbadi et al.
[2] Kappelmeyer
[3] Birman et al.
[4] Bagheri
[5] Mirghasemi et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

تراوش در خاکریزها، می‌تواند به صورت مستقیم یا غیر-مستقیم، موجب ایجاد مشکل گردد و در موارد بحرانی، حوادث فاجعه‌باری را ایجاد کند. بررسی این مورد توسط (سو و همکاران[1]، ۲۰۱۷) انجام گرفته است. به منظور پایش سرعت تراوش در محل اتصال خاک و بتن خاکریز و سایر سازه‌های موجود، از سیستم حسگر فیبر نوری استفاده شده است. این مطالعات، شامل بررسی‌های تئوری و مدل آزمایشگاهی است. ابتدا مبنای فرآیند پایش سرعت تراوش با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای دمای فیبر نوری بررسی گردید. مدل آزمایشگاهی با توجه به شرایط حاکم شبیه‌سازی شده است. سیستم گرمایش، سیستم تأمین آب، حسگرهای اندازه‌گیری دما و سیستم پردازش داده‌ها در مدل آزمایشگاهی به کار رفته است. سرعت نشت و تغییرات دمای آب تراوشی، مورد بررسی قرار گرفته است. پایش سرعت تراوش در مدل برگرفته از حسگر-های فیبر نوری نصب شده، به صورت تئوری نیز بررسی و با نتایج آزمایشگاهی تأیید شدند. نهایتاً توصیه‌هایی برای توزیع حسگرهای حرارتی در یک خاکریز به منظور پایش سریع سرعت تراوش ارائه شده است.

در مطالعه‌ی (سونگ و یوسف[2]، ۲۰۱۷)، تحلیل کوپل هیدروترمال برای رفتارنگاری تراوش در یک سد خاکی استفاده شده است. در این مطالعه، حسگرهای فیبر نوری برای ردیابی مستمر توزیع دما در بدنه‌ی سد و نرم‌افزار رایانه‌ای انتقال حرارت دو بعدی اشباع به کار رفته است. مشخصات دمایی به دست آمده از طریق تجزیه و تحلیل مذکور، به وضوح محل یک ترک مصنوعی از پیش ایجاد شده در سد را نشان می‌دهد.

فرسایش داخلی به عنوان یک علت بسیار مهم، در خرابی‌های سدها و خاکریزها در تحقیقی که توسط (برسان و همکاران[3]، ۲۰۱۸) انجام گرفته، معرفی شده است. در این مقاله، مطالعه‌ای بر روی یک خاکریز آزمایشی انجام گرفته که تعداد زیادی حسگر در آن نصب شده است. تأثیر تراوش با تجزیه و تحلیل حرارتی مطالعه گردید. خاکریز آزمایشی دارای ۳/۵ متر ارتفاع، ۱۹ متر طول و ۱۵ متر عرض در محل بستر رودخانه است. در ادامه، محل مؤثر قرارگیری حسگرها بررسی شده است.

(سجکا و همکاران[4]، ۲۰۱۸) از سه سیستم اندازه‌گیری مستقل که شامل سیستم کنترل گمانه‌های پایش، حسگر-های دمای گمانه و حسگرهای دمای فیبر نوری می‌باشند، در مطالعه‌ی خود استفاده نمودند. در روند صعودی و نزولی منحنی‌های تراوشی، نتایج حسگرهای دمای گمانه‌ها و فیبر نوری، رابطه مناسبی با نتایج حاصل از بررسی وضعیت تراوش توسط سیستم کنترل داشتند و استفاده از آن‌ها برای نظارت بر رژیم‌های نشت در سدها امکان‌پذیر، بیان شده است. همچنین توزیع محل حسگرها و کالیبراسیون بسیار حائز اهمیت است. هر دو سیستم دمایی مورد استفاده، مزایای خاصی را دارا هستند که با توجه به شرایط موجود، سیستمی که بهترین بازده را دارد، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. از طریق تجهیز چاه‌های پیزومتر با حسگرهای دمای گمانه می‌توان هزینه‌ها را کاهش داد. اندازه‌گیری دما در مسافت‌های طولانی و پیوستگی نتایج نیز به عنوان مزایای حسگرهای فیبر نوری بیان شده است.

تصویربرداری حرارتی[5]، به عنوان یک روش آزمایش غیر-مخرب برای پایش تغییرات وضعیت مصالح داخلی است که با تغییرات دمای سطح یک جسم نشان داده می‌شود. (چن و همکاران[6]، ۲۰۱۸) از مشاهدات میدانی با استفاده از ترموگراف برای پایش و تحلیل روند شکست سدهای خاکی در مقیاس بزرگ استفاده کردند. تصویربرداری حرارتی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. محل آزمایش سد خاکی، نهر لاندائو[7] در تایوان است. چهار آزمایش میدانی برای پایش و بررسی یک سد خاکی منفرد و دو سد خاکی متوالی انجام شده است. با استفاده از ترموگراف‌ها، یک شاخص پایش ($T/\Delta t$)، برای پایش تغییرات دمای سطح در طول زمان پیشنهاد گردید. شاخص پایش مذکور در شبکه‌هایی که رگاب رخ داده است، کاهش یافته است.

[1] Su et al.
[2] Song and Yosef
[3] Bersan et al.
[4] Čejka et al.
[5] Thermal imaging
[6] Chen et al.
[7] Landao

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

(غفوری و همکاران[1]، ۲۰۲۰a) به بررسی روش‌های اندازه‌گیری دما و راهکارهای تفسیر داده‌های حاصل پرداخته‌اند. در روش غیرفعال[2]، بدون نیاز به منبع تغذیه گرمایشی، اندازه‌گیری‌های دمای طبیعی زمین انجام می‌گیرد. این روش معمولاً برای نظارت طولانی‌مدت در سدهای خاکی و خاکریزها به کار می‌رود. روش تحلیل حرارتی فعال[3] سدها و خاکریزها برای تشخیص نشت، نخستین بار توسط (دورنشتادتر[4]، ۱۹۹۷)، با معرفی روش پالس حرارتی انجام شد. او یک منبع حرارتی خطی را در بدنه‌ی سد نصب کرد و پراکندگی گرما را مورد مطالعه قرار داد. در ادامه‌ی مطالعه (غفوری و همکاران، ۲۰۲۰a)، روش تأخیر زمانی مطرح شده است؛ تأخیر زمانی، متداول‌ترین روش بر مبنای مقایسه‌ی تغییرات دما در خاکریزها با تغییرات فصلی دمای هوا و آب داخل مخزن می‌باشد. با توجه به این که درجه حرارت در خاکریزها به طور عمده به دمای هوا و آب داخل مخزن بستگی دارد، پس این روش در مطالعه‌ی حرارتی جریان تراوش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مدت زمان چرخه‌ی روز و شب کوتاه است و ناچیز بودن تغییرات دمایی ۲۴ ساعته‌ی هوا، جزء فرض‌های این روش است. دمای هوای هر فصل، دمای آب داخل مخزن و فاصله‌ی نقطه‌ی اندازه‌گیری‌شده تا مخزن از عوامل مؤثر در این روش هستند. بدین ترتیب، بایستی دمای آب داخل مخزن سد نیز به صورت دقیق اندازه‌گیری گردد. در پایش‌های طولانی‌مدت، تغییرات دمایی اندک، عدم وجود تراوش قابل توجه را نشان می‌دهند. تغییرات فصلی بیشتر، می‌توانند نشان‌دهنده‌ی تراوش غیرمعمول در داخل خاکریز باشند. تغییرات فصلی دمای هوا، در اعماق کمتر از ۱۰ تا ۱۵ متر بر دمای نواحی سد خاکی اثرگذار است. با مقایسه‌ی دما و تغییرات فصلی مربوطه می‌توان سرعت جریان را نیز محاسبه نمود.

(غفوری و همکاران، ۲۰۲۰b) بیان کرده‌اند که شناسایی تراوش غیرمعمول در مراحل اولیه، بسیار حائز اهمیت است. در مطالعه‌ی مربوطه، نظارت مستمر بر تراوش در مدل آزمایشگاهی با استفاده از سیستم سنجش دمای غیرفعال فیبر نوری انجام شده است؛ ماسه‌ی غیراشباع در مدل به کار رفته و دمای اولیه‌ی ماسه، بالاتر از دمای آب تراوش شده است. فواصل زمانی پایش دما، کوتاه می‌باشد. تجزیه و تحلیل عددی نیز برای بررسی تراوش و انتقال حرارت در مدل انجام گرفت. با انتشار نشت در مدل، مقدار کاهش دمای وابسته به سرعت جریان تراوش مشاهده گردید.

(کومار و همکاران[5]، ۲۰۲۱)، با استفاده از ۱۶ مدل سد خاکی به بررسی جریان آب ناشی از تراوش و شار حرارتی ناشی از انتقال حرارت همرفت پرداخته‌اند. دو مدل فیزیکی سد خاکی همگن و با هسته‌ی رسی، با مقادیر پارامترهای هندسی مختلف و تحت اثر جریان‌های ورودی متفاوت در فلوم هیدرولیکی ساخته شده‌اند. اندازه‌گیری دما در مدل‌های ساخته شده، با استفاده از دماسنج‌های دیجیتالی انجام گرفته است. برای محاسبه شار آب، از مدل المان محدود seep/w و برای محاسبه‌ی شار حرارتی، از temp/w استفاده گردید. در محل‌هایی که جریان آب بیشتری وجود داشت، مشاهدات آزمایشگاهی نیز وجود منافذ خاک با حجم بیشتر را تأیید نموده‌اند. نتایج حاصله و مقایسه آن‌ها، نشان داده است که شار حرارتی، جایگزین مفیدی برای شار آب و جریان تراوش است. به عنوان مثال، در مقایسه‌ی نتایج مدل‌های همگن با مدل‌های دارای هسته نفوذناپذیر مرکزی، کاهش قابل توجهی از شار گرما و شار آب مشاهده گردید. طبق نتایج این مطالعه، با توجه به این که حسگرهای دما نسبت به دستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت جریان آب و دبی، کم‌هزینه‌تر هستند، با جایگزین نمودن روش‌های حرارتی، می‌توان مسائل اقتصادی موجود در پروژه را بهتر مدیریت نمود.

شباهت بین تئوری تراوش و تئوری انتقال حرارت در مطالعه (کائو و همکاران[6]، ۲۰۲۱) بررسی شده است. یک مدل سد ماسه‌ای همگن، همراه با میدان تراوشی گذرا و میدان دما، بر اساس معادله‌ی دارسی و معادله‌ی انتقال حرارت در محیط متخلخل با استفاده از نرم‌افزار المان محدود کامسول ایجاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که دمای آب تراوش یافته،

[1] Ghafoori et al.
[2] Passive
[3] Active
[4] Dornstädter
[5] Kumar et al.
[6] Cao et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

عامل اصلی مؤثر بر میدان دما در ناحیه‌ی اشباع سد است و تأثیر دمای محیط و میدان تراوش بر میدان دمای سد، نباید نادیده گرفته شود.

سد داریان در استان کرمانشاه، در نزدیکی شهر پاوه و در مجاورت روستای داریان واقع شده است. سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی مایل، طول تاج آن در حدود ۳۶۸ متر و حجم بدنه ۹/۹۶ میلیون مترمکعب است. ارتفاع آن از بستر رودخانه ۱۵۸ متر و از پی ۱۷۹ متر می‌باشد. محل قرارگیری بر روی رودخانه‌ی سیروان بوده و یکی از اصلی‌ترین اجزاء طرح انتقال آب به حوضه گرمسیری است.

در بخش‌های بعدی به منظور بررسی وضعیت هسته سد داریان، ابتدا به رفتارنگاری حرارتی سد داریان با استفاده از نتایج ابزار دقیق‌ها پرداخته می‌شود. سپس مدل‌سازی حرارتی با نرم‌افزار آباکوس، صحت‌سنجی و مقایسه نتایج تحلیل با نتایج ثبت شده توسط ابزاردقیق‌ها ارائه می‌گردد. در این تحقیق، بررسی عملکرد هسته‌ی سد در نرم‌افزار آباکوس، صرفاً با استفاده از خصوصیات حرارتی مدنظر است. همچنین یکی از اهداف این مطالعه این است که با استفاده از مدل‌سازی، دمای آب در سایر نقاطی که ابزاری برای اندازه‌گیری وجود ندارد، به دست آید. تحلیل حرارتی سد داریان پیش از این مورد مطالعه واقع نشده که در این تحقیق به بررسی این سد پرداخته شده است.

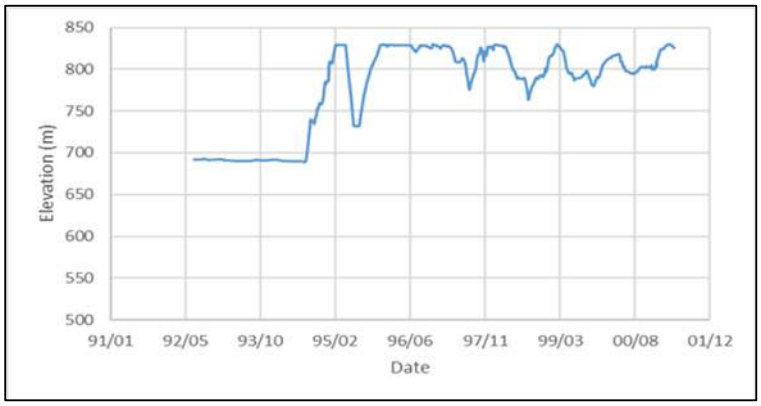
رفتارنگاری حرارتی

در این بخش، مطالعه و بررسی رفتار حرارتی بدنه‌ی سد داریان از طریق نتایج پایش حسگرهای حرارتی ابزار دقیق‌ها ارائه شده است. به منظور در نظر گرفتن تأثیر تغییرات دما بر روی داده‌های حاصل از ابزار دقیق‌های دارای حسگر تار مرتعش، به هنگام قرائت، درجه حرارت نیز به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری می‌گردد. این فرصت مناسبی است که با رصد کردن دمای اندازه‌گیری شده در محل ابزار دقیق، به پایش حرارتی تراوش پرداخت.

نتایج به طور عمده، مربوط به پیزومترهای تار مرتعش خاک (EP) و در برخی از موقعیت‌ها، مربوط به سلول‌های فشار خاک سه‌تایی (PCT) و پنج‌تایی (PCQ) می‌باشند. آب‌گیری سد از آذر ماه سال ۱۳۹۴ آغاز شده و بررسی اطلاعات ابزار دقیق‌ها از آبان ماه همان سال انجام گرفته است.

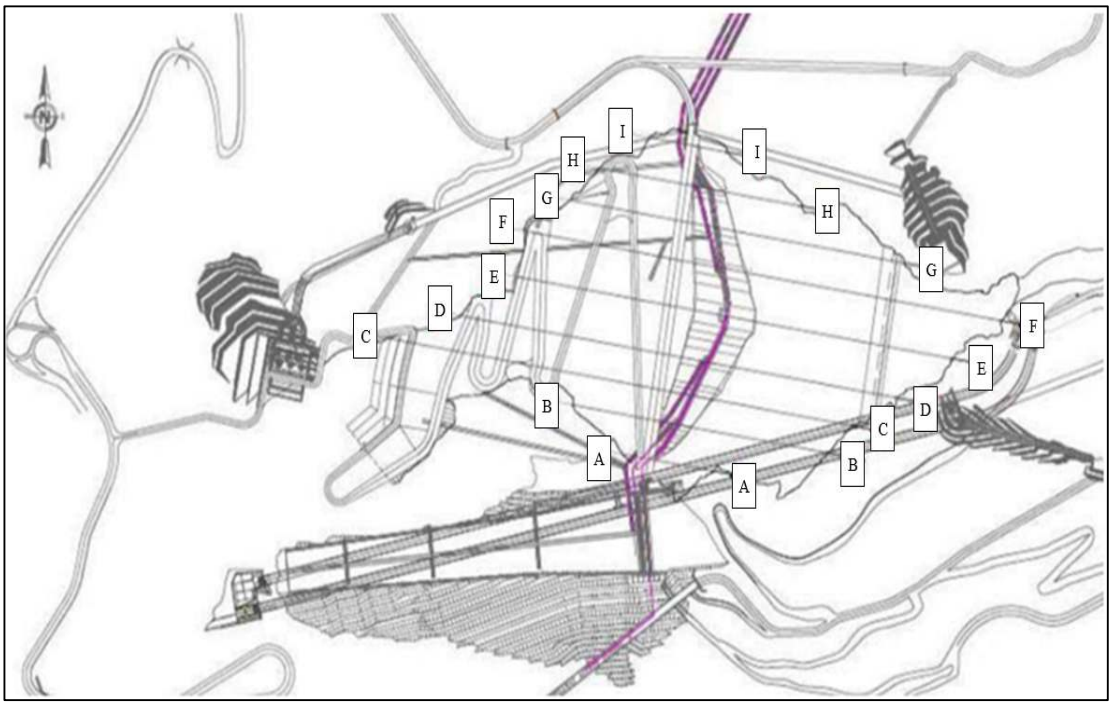
تراز آب موجود در مخزن و در محل پوسته‌ی بالادست در زمان‌های مختلف، از جمله اطلاعات حائز اهمیت است. این اطلاعات در شکل (۱) که مربوط به تغییرات تراز سطح آب مخزن سد داریان در طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۱ است، قابل مشاهده می‌باشند. مطابق شکل (۱)، پس از پایان آب‌گیری، تغییرات تراز سطح آب مخزن دارای رفتار تقریباً هارمونیک است.

موقعیت مقاطع ابزارگذاری سد داریان در شکل (۲) نمایش داده شده است. در سد داریان، در مقاطع و ترازهای مختلفی ابزاردقیق نصب شده است. موقعیت‌های مذکور، بخش‌های گوناگون پوسته، فیلتر و هسته را شامل می‌شوند. در این تحقیق، مطالعه‌ی بدنه‌ی سد، مدنظر بوده و به همین علت، مقاطع C تا G که مربوط به بخش عمده‌ی ابزار دقیق‌های بدنه می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل‌های (۳) تا (۷)، موقعیت ابزاردقیق‌های مقاطع C تا G را نشان می‌دهند.

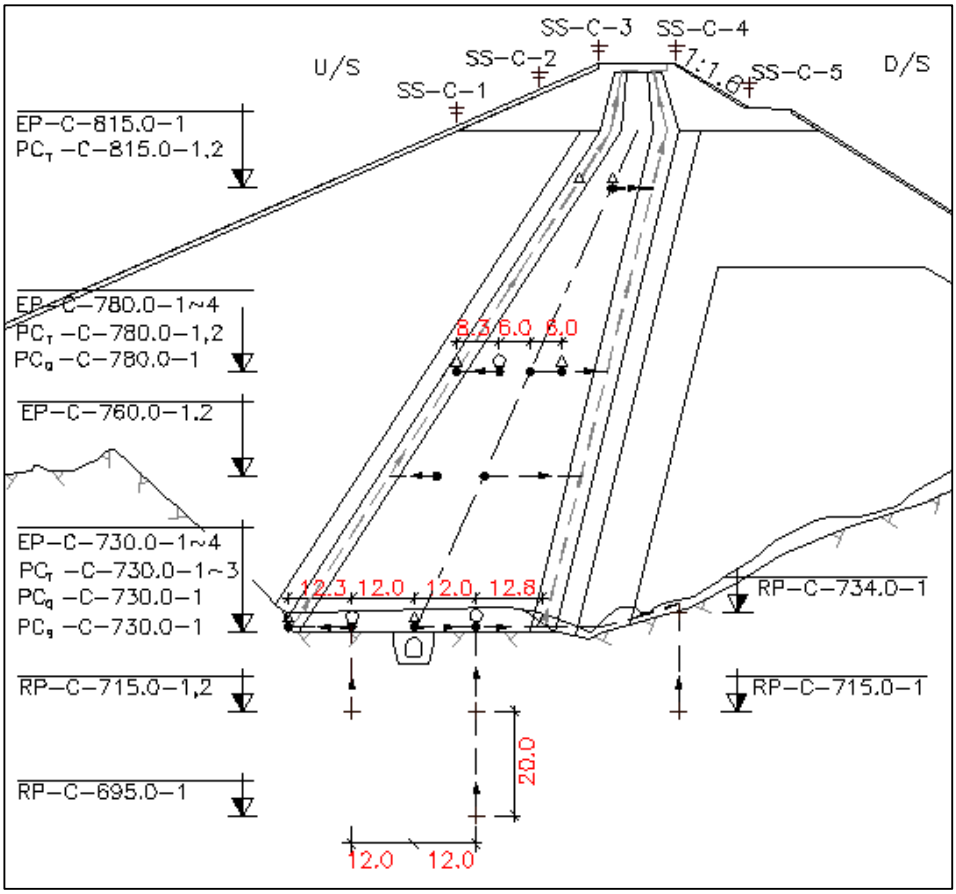


شکل (۱): تغییرات تراز سطح آب مخزن سد داریان نسبت به زمان

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

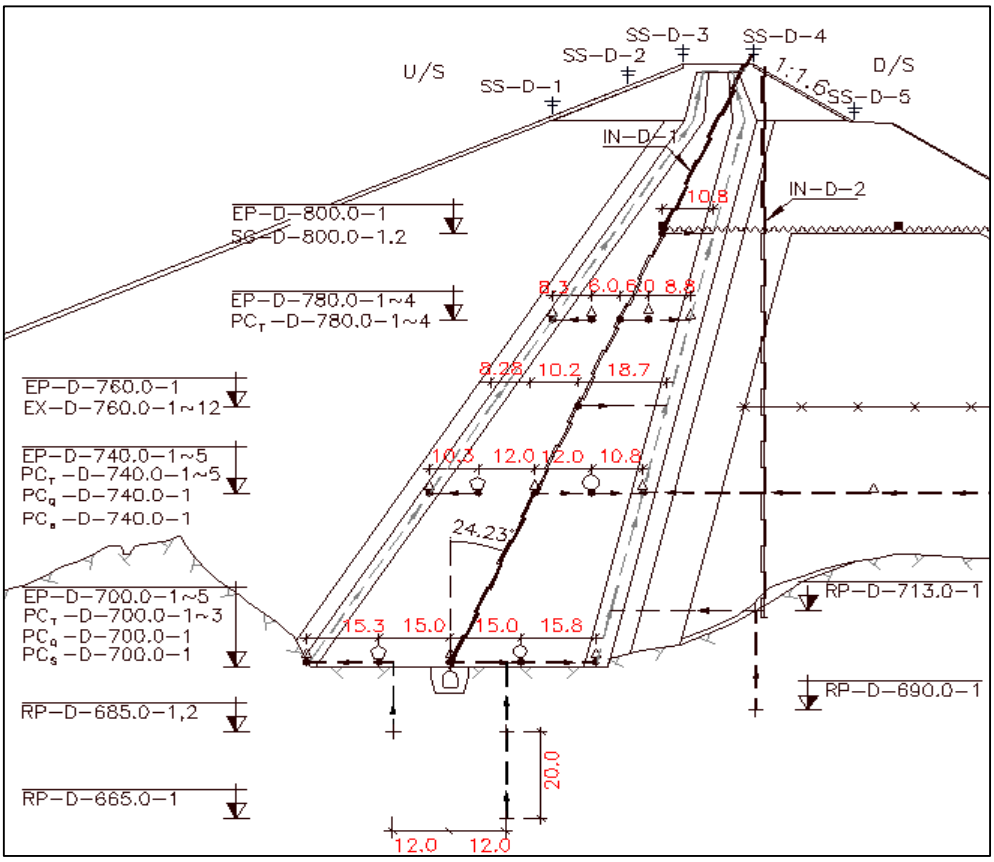


شکل (۲): موقعیت مقاطع ابزارگذاری سد داریان

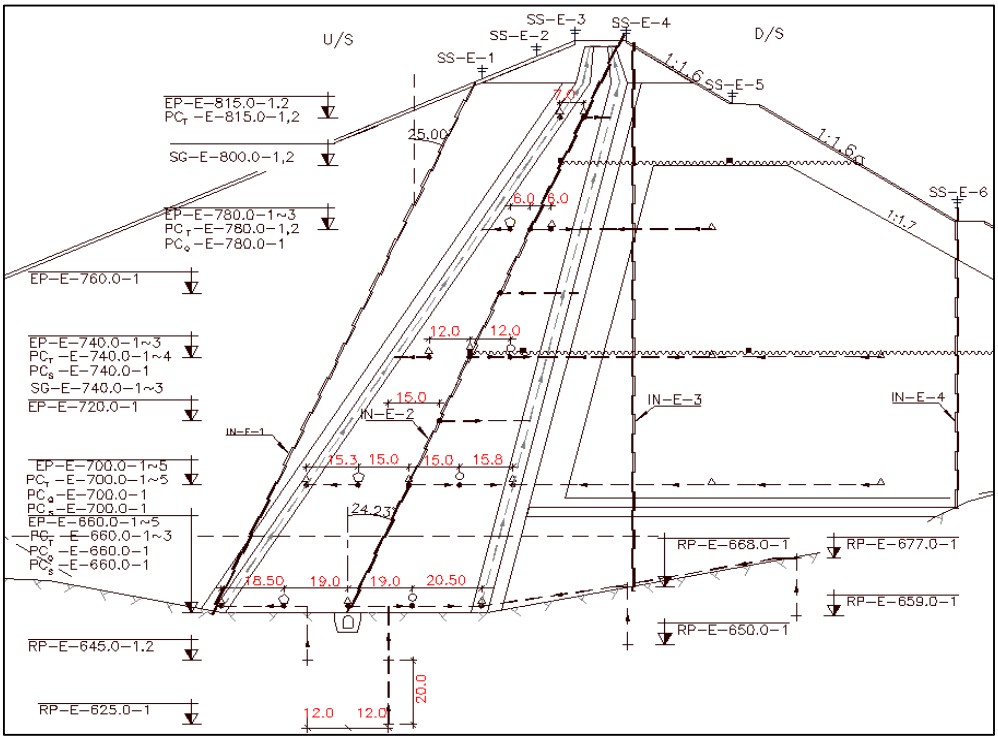


شکل (۳): ابزارهای نصب شده در مقطع C

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

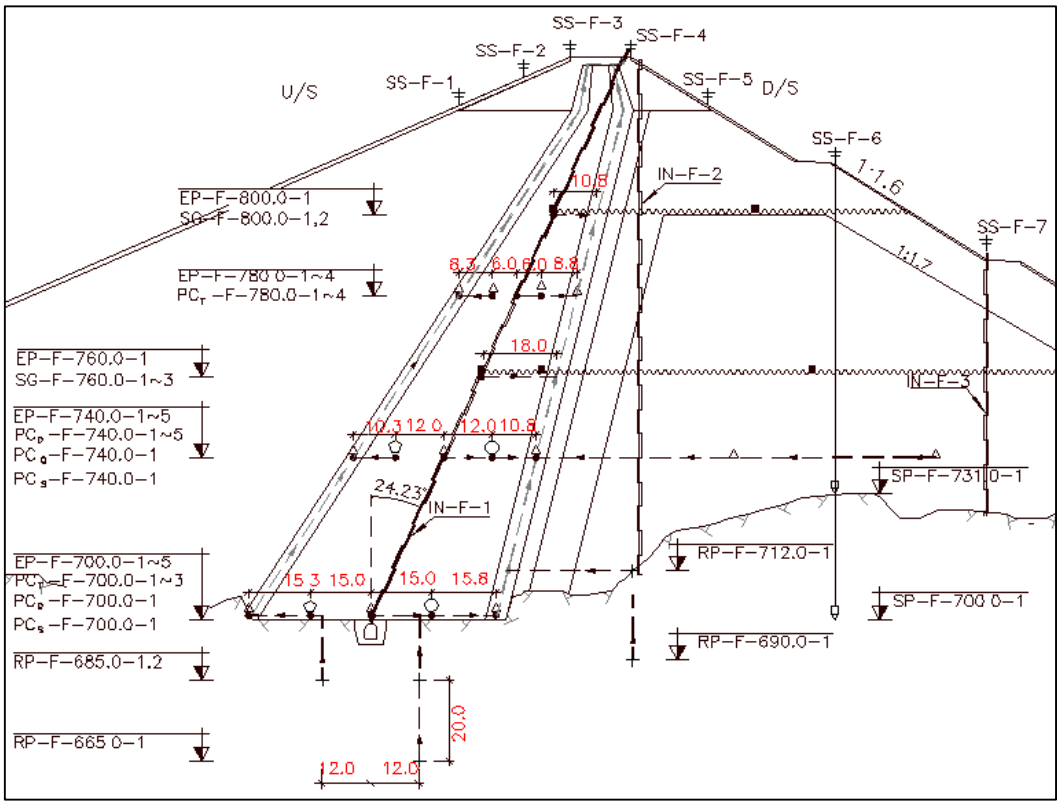


شکل (۴): ابزارهای نصب شده در مقطع D

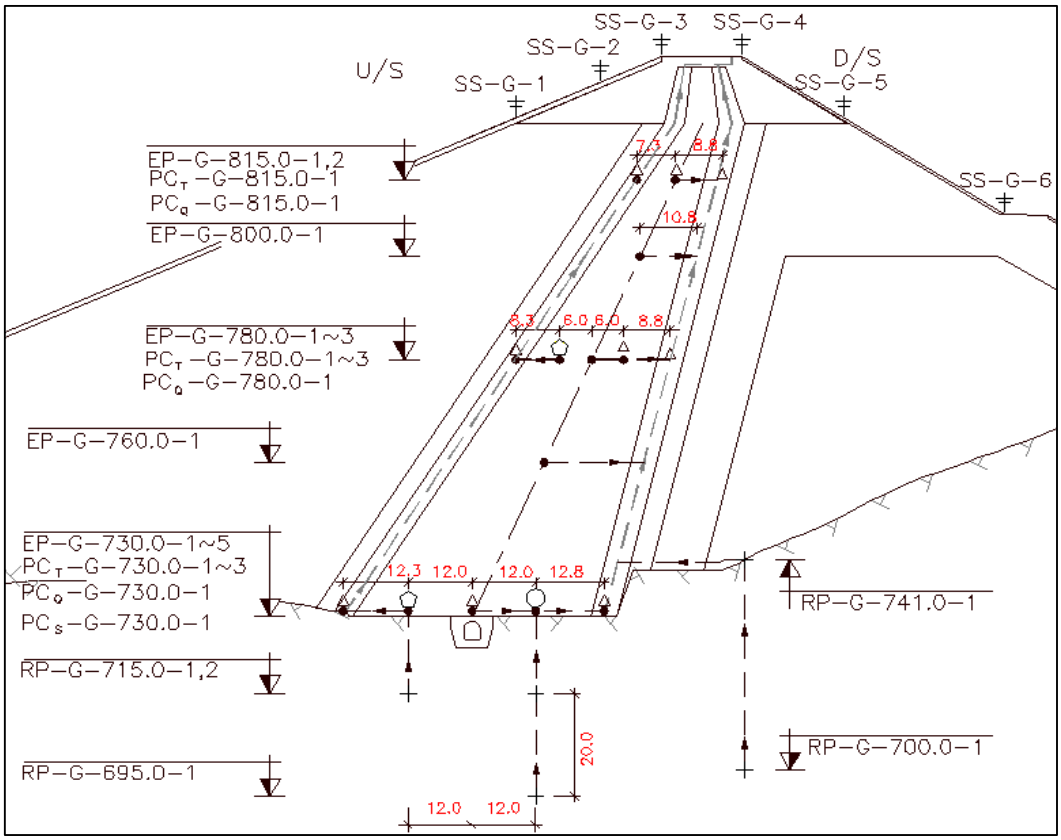


شکل (۵): ابزارهای نصب شده در مقطع E

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۶): ابزارهای نصب شده در مقطع F



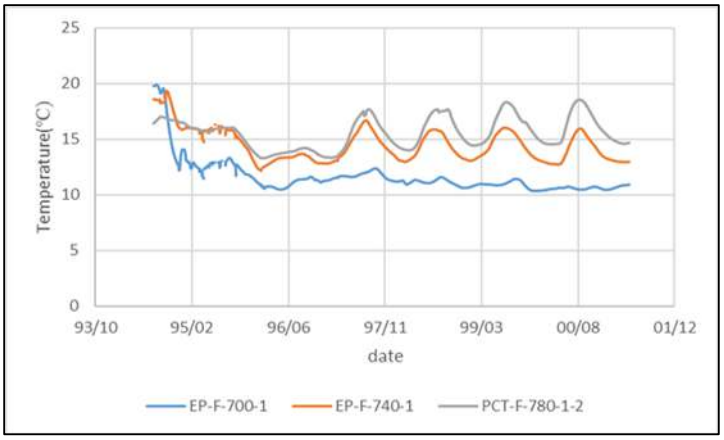
شکل (۷): ابزارهای نصب شده در مقطع G

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

فیلتر بالادست

۱۵ ابزار دقیق در مقطع‌های مورد بررسی در فیلتر بالادست وجود دارد. با رسیدن آب به تراز و موقعیت ابزارها و اشباع شدن خاک اطراف، عمده‌ی ابزارهای قرار گرفته در فیلتر بالادست، دارای رفتار حرارتی نوسانی هستند. با توجه به مصالح مورد استفاده در فیلتر سدها، این ناحیه با اختلاف زمانی اندکی تحت تأثیر دمای آب مخزن و نوسانات دمایی فصلی آن قرار می‌گیرد و رفتار توصیف شده، رفتار قابل انتظاری است.

در رفتارنگاری‌ها، باید توجه گردد که ابزاردقیق همواره در خاک اشباع واقع باشد. در غیر این صورت، حسگرهای حرارتی ابزارها، دمای آب تراوشی را نشان نمی‌دهند. این مورد در ابزارهای واقع در ترازهای بالاتر هسته که امکان دارد در مقاطعی تراوش در آن‌ها رخ ندهد، بسیار حائز اهمیت است. شکل (۸) رفتار حرارتی ابزارهای قرار گرفته در فیلتر بالادست مقطع F را در ترازهای ۷۰۰، ۷۴۰ و ۷۸۰ متر نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، با رسیدن آب به تراز مدنظر و اشباع شدن خاک، رفتار حرارتی نوسانی آغاز شده است. در ترازهای پایین‌تر، دامنه‌ی تغییرات دمایی آب در دریاچه سد کمتر می‌باشد. به عبارتی آب در ترازهای پایین‌تر مخزن، دمای تعادلی دارد و به طور قابل توجه تحت تأثیر نوسانات دمایی سطح دریاچه‌ی سد قرار نمی‌گیرد.



شکل (۸): تغییرات حرارتی ابزارهای قرار گرفته در فیلتر بالادست مقطع F در سه تراز ۷۰۰، ۷۴۰ و ۷۸۰ متر

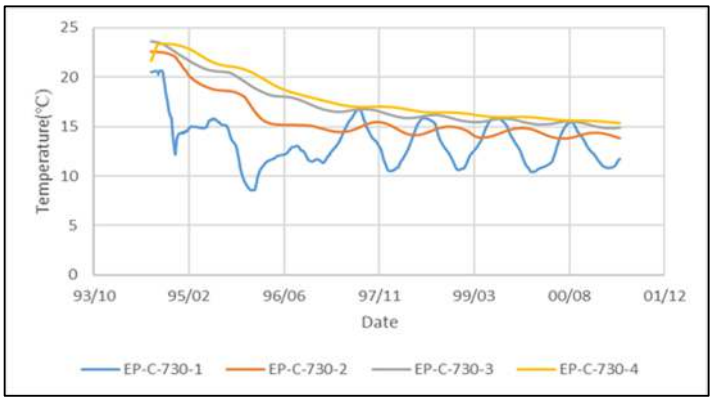
هسته

استفاده از مصالح با نفوذپذیری بسیار کم در هسته، به منظور جلوگیری از پدیده‌ی تراوش غیرمعمول می‌باشد. در نتیجه انتظار می‌رود در تغییرات حرارتی هسته، رفتار نوسانی قابل توجهی وجود نداشته باشد. طبق بررسی‌ها، در تمامی منحنی‌های مربوط به ابزارهای کف هسته در مقاطع C تا G، دامنه تغییرات نوسانی ابزارهای واقع در هسته نسبت به فیلتر بالادست کاهش یافته است. همچنین زمان رخداد نقاط حداکثر دمایی ابزارهای موجود در هسته و فیلتر بالا-دست، متفاوت است.

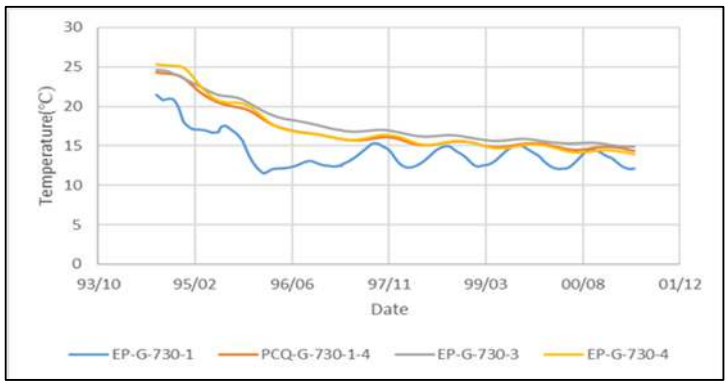
دمای آب مخزن با جریان آب منتقل می‌گردد. زمانی که نفوذپذیری اندک و سرعت جریان، بسیار محدود است، انتقال مذکور صورت نمی‌گیرد و نوسان قابل توجهی در هسته، مشاهده نمی‌شود. در نتیجه پدیده‌ی مشاهده شده، بیانگر مناسب بودن نفوذپذیری هسته‌ی سد مورد مطالعه است.

شکل (۹) و جدول (۱) به ترتیب تغییرات حرارتی و موقعیت ابزارهای واقع در تراز ۷۳۰ متر (کف هسته‌ی سد) در مقطع C را نمایش می‌دهند. سه ابزار EP-C-730-2، EP-C-730-3 و EP-C-730-4 در هسته‌ی سد و ابزار EP-C-730-1 در فیلتر بالادست واقع هستند. ابزارهای واقع در هسته، دامنه بسیار محدودتری دارند و نقطه‌ی حداکثر در نمودارهای این ابزارها نسبت به فیلتر بالادست، اکثراً در زمان‌های متفاوتی رخ داده است. در ابزار پایین‌دست محور هسته (ابزار EP-C-730-4)، دامنه‌ی تغییرات دما بسیار کاهش یافته است که بیانگر عملکرد مناسب هسته‌ی سد در تراز کف این مقطع می‌باشد.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۹): تغییرات حرارتی ابزارها در تراز ۷۳۰ متر (کف هسته سد) در مقطع C



شکل (۱۰): تغییرات حرارتی ابزارها در تراز ۷۳۰ متر (کف هسته سد) در مقطع G

همچنین در تراز ۷۳۰ متر (کف هسته) مقطع G، مطابق شکل (۱۰) و جدول (۱) دامنه‌ی تغییرات نوسانی دماهای ثبت شده در محل ابزارهای موجود در هسته، نسبت به فیلتر بالادست کاهش یافته است. در تمامی منحنی‌های موجود در هسته در شکل (۱۰)، زمان رخداد نقاط حداکثر دمایی نسبت به منحنی فیلتر بالادست متفاوت است. این تفاوت زمانی نشان می‌دهد که مصالح هسته، مانعی برای تراوش غیرمعمول و سریع از مخزن به بدنه سد است.

جدول (۱): موقعیت ابزارهای واقع در تراز ۷۳۰ متر (کف هسته سد) در مقطع C و G

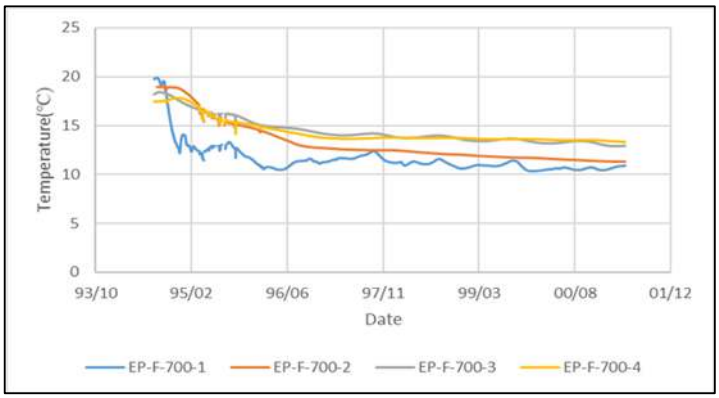
موقعیت ابزار	نام ابزار
فیلتر بالادست	EP-C-730-1
بالادست- ۱۲متر از محور هسته	EP-C-730-2
محور هسته	EP-C-730-3
پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-C-730-4
فیلتر بالادست	EP-G-730-1
بالادست- ۱۲ متر از محور هسته	PCQ-G-730-1-4
محور هسته	EP-G-730-3
پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-G-730-4

با توجه به شکل (۱۱) و جدول (۲)، ابزار EP-F-700-3 که مربوط به محور هسته می‌باشد، دارای رفتار نوسانی با دامنه‌ی کم است. اما در ابزارهای EP-F-700-2 و EP-F-700-4 که به ترتیب در بالادست و پایین‌دست محور هسته قرار دارند، نوساناتی در دما مشاهده نشده است.

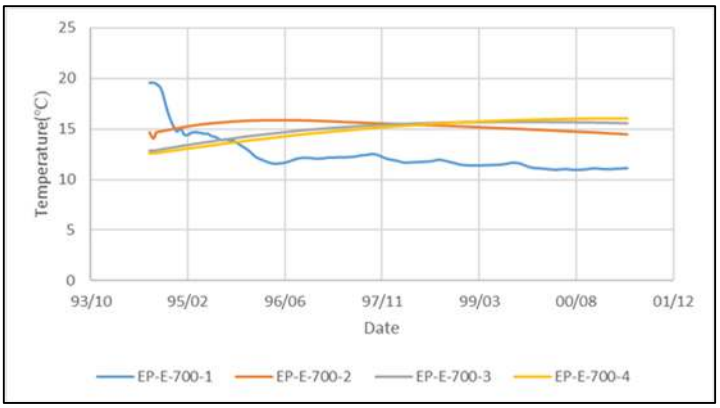
جدول (۲): موقعیت ابزارهای واقع در تراز ۷۰۰ متر (کف هسته سد) در مقطع F

موقعیت ابزار	نام ابزار
فیلتر بالادست	EP-F-700-1
بالادست- ۱۵ متر از محور هسته	EP-F-700-2
محور هسته	EP-F-700-3
پایین‌دست- ۱۵ متر از محور هسته	EP-F-700-4

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۱۱): تغییرات حرارتی ابزارها در تراز ۷۰۰ متر (کف هسته سد) در مقطع F



شکل (۱۲): تغییرات حرارتی ابزارهای واقع در فیلتر بالادست و هسته در تراز ۷۰۰ متر در مقطع E

در تراز ۷۰۰ متر مقطع E، سه ابزار در هسته واقع هستند. با توجه به شکل (۱۲)، در هر سه ابزار، رفتار نوسانی دما وجود ندارد. مطابق جدول (۳)، این ابزارها در بخشی واقع هستند که مربوط به ترازهای پایین بوده و هسته‌ی سد دارای عرض بیشتری می‌باشد. دامنه‌ی تغییرات دما در ابزار فیلتر بالادست ناچیز است اما دمای همگرایی فیلتر بالادست با دمای همگرایی ابزارهای موجود در هسته، یکسان نیست. پس می‌توان نتیجه گرفت که تراوش غیرمعمول، وجود ندارد. زیرا در ترازهای پایین که دمای دریاچه به تعادل رسیده است، در صورتی که نمودار حرارتی ابزارهای موجود در هسته و فیلتر بالادست آن‌ها، دمای تعادل یکسانی داشته باشند، احتمال تراوش غیرمعمول وجود دارد. طبق توضیحات ذکر شده، می‌توان بیان نمود که هسته در این ناحیه، عملکرد مناسبی را دارا می‌باشد.

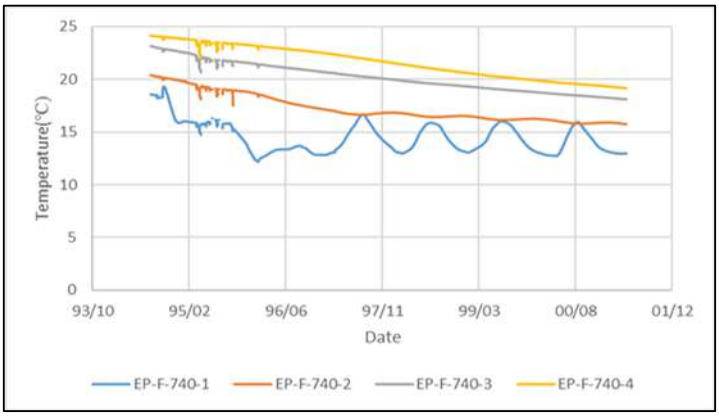
جدول (۳): موقعیت ابزارهای واقع در فیلتر بالادست و هسته در تراز ۷۰۰ متر در مقطع E

موقعیت ابزار	نام ابزار
فیلتر بالادست	EP-E-700-1
بالادست- ۱۵ متر از محور هسته	EP-E-700-2
محور هسته	EP-E-700-3
پایین‌دست- ۱۵ متر از محور هسته	EP-E-700-4

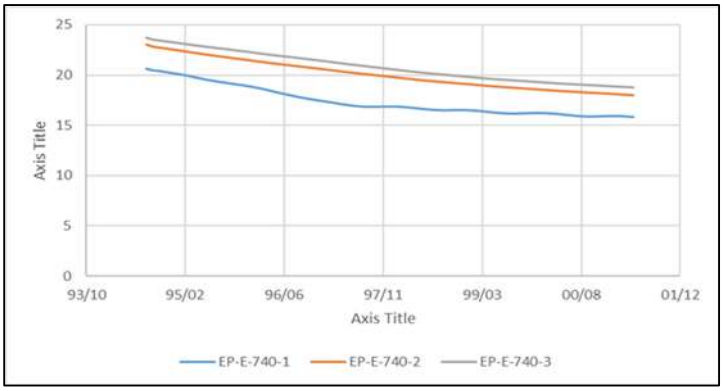
در ابزارهای واقع در هسته که در موقعیت بالادست محور هسته در مقطع F هستند، نوسانات دما با دامنه و مدت زمانی بسیار محدود مشاهده شده است. اما ابزار قرار گرفته در محور هسته و پایین‌دست محور، فاقد رفتار نوسانی بوده‌اند و همانطور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، عدم وجود نوسانات دمایی، بیانگر سرعت کم جریان آب، در نتیجه نفوذپذیری کم هسته و عملکرد مناسب هسته است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) این رفتار قابل ملاحظه است. جدول (۴) موقعیت ابزارهای مربوطه را نمایش می‌دهد. در شکل (۱۳) ابزار EP-F-740-1 در فیلتر بالادست واقع است اما در شکل (۱۴) که

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

مربوط به مقطع E می‌باشد، ابزاری در فیلتر بالادست وجود ندارد.



شکل (۱۳): تغییرات حرارتی ابزارهای واقع در فیلتر بالادست و هسته در تراز ۷۴۰ متر در مقطع F



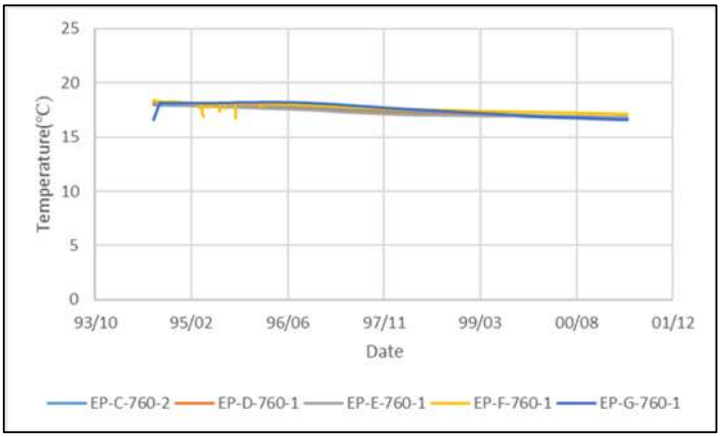
شکل (۱۴): تغییرات حرارتی ابزارهای واقع در هسته در تراز ۷۴۰ متر در مقطع E

جدول (۴): موقعیت ابزارهای واقع در فیلتر بالادست و هسته در تراز ۷۴۰ متر در مقطع F و E

موقعیت ابزار	نام ابزار
فیلتر بالادست	EP-F-740-1
بالادست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-F-740-2
محور هسته	EP-F-740-3
پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-F-740-4
بالادست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-E-740-1
محور هسته	EP-E-740-2
پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	EP-E-740-3

شکل (۱۵) تغییرات حرارتی ابزارهای واقع در محور هسته مقاطع C تا G در تراز ۷۶۰ متر را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، رفتار نوسانی دما وجود ندارد که نشان‌دهنده‌ی عدم وجود تراوش غیرمعمول است. این ابزارها مطابق شکل (۱۵) در تراز یکسانی در طول هسته جایگذاری شده‌اند و به همین علت، دمای تعادلی مشابهی دارند.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۱۵): تغییرات حرارتی ابزارهای واقع در محور هسته مقاطع C تا G در تراز ۷۶۰ متر

مدل‌سازی حرارتی

همانطور که پیش‌تر بیان شد، به منظور مدل‌سازی به روش اجزاء محدود، از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردیده است. شبیه‌سازی رفتار حرارتی، در مدل دو بعدی و در بلندترین مقطع سد (مقطع E) انجام شده است. با توجه به این که بررسی رفتار هسته‌ی سد، مد نظر بوده و ابزاری در پوسته‌ی بالادست وجود ندارد، تحلیل انجام شده، فقط محدوده‌ی هسته و فیلترها را در بر می‌گیرد. تحلیل مورد استفاده، انتقال حرارت است که در آن مطالعات دمایی بدون تأثیر از وضعیت تنش، تغییر شکل، خصوصیات مکانیکی بررسی می‌گردد. دانسیته‌ی اشباع، رسانایی حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه، جزء خصوصیات تعریف شده برای مصالح هسته و فیلتر می‌باشند. معمولاً آزمایش‌های لازم برای دستیابی به خصوصیات حرارتیِ مصالح به کار رفته در سدهای خاکی انجام نمی‌شوند. بنابراین هیچ اطلاعاتی در این زمینه، در اختیار نمی‌باشد. از این رو با استفاده از محدوده‌های ارائه شده برای خصوصیات حرارتی مصالح خاکی توسط (مارکز و همکاران[1]، ۲۰۱۶)، (حمدان و کلارک[2]، ۲۰۱۰) و نیز کالیبراسیون مدل، مقادیر جدول (۵) در شبیه‌سازی استفاده گردیده‌اند.

جدول (۵): خصوصیات به کار گرفته شده مصالح سد در تحلیل

هسته	فیلترها	خصوصیات مصالح
۲۱۷۰	۲۳۰۰	دانسیته اشباع (kg/m^3)
۰/۹	۲/۷	رسانایی حرارتی (W/m°C)
۲۲۵۰	۱۶۳۲	ظرفیت گرمایی ویژه(J/kg°C)

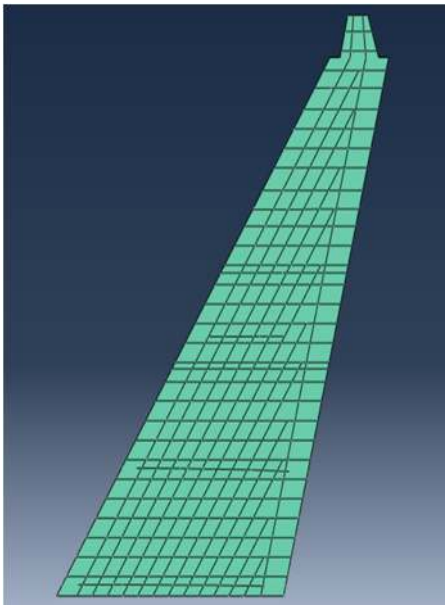
تحلیل انجام شده، مربوط به دوران بهره‌برداری بوده و بازه‌ی زمانی اختیار شده از ۱۴۰۰/۱۰/۰۲ تا ۱۴۰۱/۰۴/۰۸ می‌باشد. در این بازه‌ی زمانی، ابزاردقیق‌ها به وضعیت تعادلی برای ثبت نتایج رسیده‌اند. آب‌گیری سد، از آذر ماه سال ۱۳۹۴ آغاز شده است. بازه‌ی زمانی تحلیل، به نحوی انتخاب شده است که تغییرات حرارتی ابزارها، تحت تأثیر دمای هنگام نصب آن‌ها نبوده و حتی‌الامکان، به نقطه‌ی تعادلی خود نزدیک شده باشند. نوع تحلیل، گذرا[3] انتخاب شده و شرایط اولیه و شرایط مرزی در تحلیل اعمال گردیده است. در هسته و فیلتر، ۲۷ ابزار دقیق برای اندازه‌گیری شرایط اولیه وجود دارد. برای اختصاص شرایط اولیه به کل سطح، سطح هسته مطابق شکل (۱۶) به متوازی‌الاضلاع‌هایی با قاعده و ارتفاع ۶ متر، تقسیم‌بندی شد. با تعیین مرکز متوازی‌الاضلاع‌ها و درون‌یابی، با استفاده از نرم‌افزار متلب، شرایط اولیه در کل سطح تعریف گردید. با توجه به نتایج دما و تراز آب ثبت شده توسط ابزاردقیق‌ها، مدت زمان تحلیل، به صورت ۱۱ بازه‌ی زمانی با شرایط دما و تراز آب تقریباً ثابت در نظر گرفته و معادلات شرایط مرزی هر بازه اعمال شد. به عبارت دیگر، دمای آب در فیلتر بالادست و تغییرات آن در طول زمان، شرایط مرزی حاکم می‌باشد. با

[1] Márquez et al.
[2] Hamdhan and Clarke
[3] Unsteady

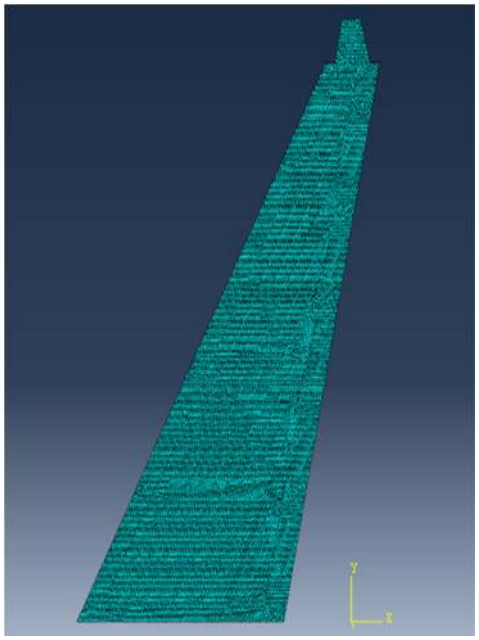
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

توجه به این که تحلیل از نوع گذرا انتخاب گردید، شرایط مرزی در یک موقعیت معین، نسبت به زمان متغیر است. به منظور اعمال شرایط مرزی، مدت زمان تحلیل به صورت بازه‌هایی که شرایط دما و تراز آب تقریبا ثابت است (شرایط پایدار)، در نظر گرفته شد تا بتوان در این بازه‌ها، شرایط مرزی دما را در محل هر ابزاردقیق اعمال نمود. با توجه به این که در هر بازه، تغییرات دمایی قابل توجهی وجود نداشت، میانگین دما در هر بازه برای هر ابزاردقیق واقع در مرزهای مدل محاسبه گردید. معادلات شرایط مرزی، در هر بازه‌ی زمانی به صورت خطی بین هر دو ابزاردقیق متوالی در فیلتر بالادست، محاسبه و اعمال شد. نوع المان مورد استفاده برای مش‌بندی DC2D3، ابعاد مش ۱ متر، تکنیک مش‌زنی آزاد، تعداد کل گره‌ها ۱۱۳۳۶ و تعداد کل المان‌ها ۲۲۱۶۳ می‌باشد. DC2D3 بیانگر المان ۳ گرهی، خطی، از نوع تحلیل انتقال حرارت و مثلثی شکل[1] است. با توجه به هندسه‌ی مورب هسته و فیلترها، ابعاد مش ۱ متری، موجب مش‌بندی مناسب در نواحی گوشه، نسبت به کل هندسه می‌گردد؛ با ریزتر شدن مش‌بندی، هزینه‌ی محاسباتی افزایش می‌یابد؛ همچنین با توجه به بخش صحت‌سنجی که در ادامه به آن پرداخته شده، مقادیر صحت‌سنجی شده‌اند. مش‌بندی نهایی در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از ابزاردقیق‌ها و تحلیل به شرح جدول (۶) است.

شکل‌های (۱۸) و (۱۹)، مقایسه‌ی نتایج ابزاردقیق و تحلیل در تراز ۶۶۳/۵ و ۷۰۰ متر در مقطع هسته را نمایش می‌دهند. با توجه به نتایج جدول (۶) و شکل‌های (۱۸) و (۱۹)، نتایج تحلیل با نتایج ابزاردقیق‌ها اختلاف اندکی دارند و مدل‌سازی از دقت مناسبی برخوردار است.



شکل (۱۶): تقسیم‌بندی هسته و فیلترها برای اختصاص شرایط اولیه



شکل (۱۷): مش‌بندی مدل

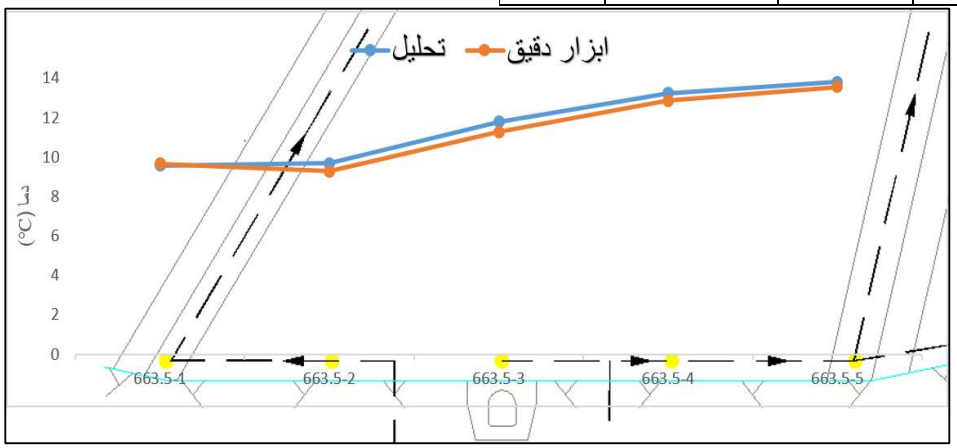
[1] A 3-node linear heat transfer triangle

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

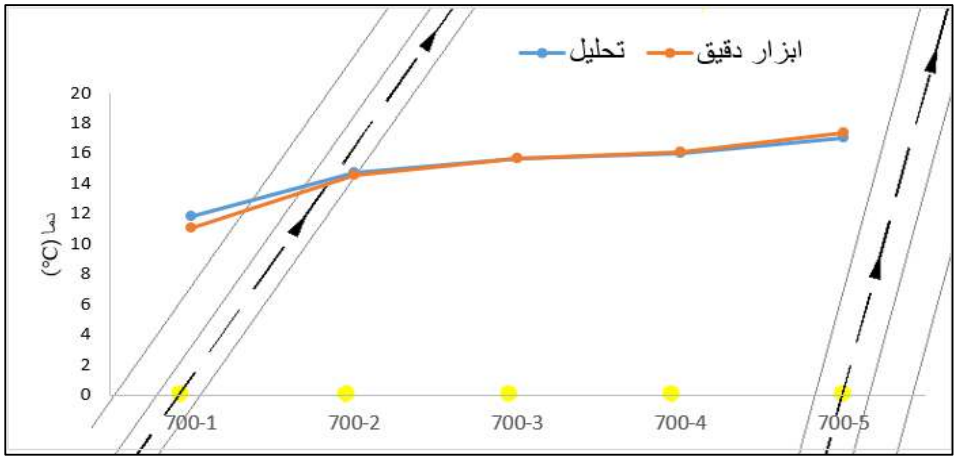
جدول (۶): نتایج تحلیل و ابزاردقیق‌ها

نتایج ابزار(°C)	نتایج تحلیل(°C)	موقعیت ابزار	نام ابزار
۹/۶۶	۹/۵۶	فیلتر بالادست	663.5-1
۹/۲۸	۹/۶۷	بالادست- ۱۹/۷ متر از محور هسته	663.5-2
۱۱/۲۷	۱۱/۷۹	محور هسته	663.5-3
۱۲/۸۵	۱۳/۲۳	پایین‌دست- ۱۷ متر از محور هسته	663.5-4
۱۳/۵۶	۱۳/۸۱	فیلتر پایین‌دست	663.5-5
۱۱/۰۹	۱۱/۸۱	فیلتر بالادست	700-1
۱۴/۵۳	۱۴/۷۱	بالادست- ۱۵ متر از محور هسته	700-2
۱۵/۶۳	۱۵/۶۷	محور هسته	700-3
۱۶/۰۵	۱۶/۰۴	پایین‌دست- ۱۵ متر از محور هسته	700-4
۱۷/۴	۱۷/۰۴	فیلتر پایین‌دست	700-5

نتایج ابزار(°C)	نتایج تحلیل(°C)	موقعیت ابزار	نام ابزار
۱۷/۱۸	۱۷/۱۶	محور هسته	720
۱۵/۸۸	۱۶/۰۹	بالادست- ۱۲ متر از محور هسته	740-1
۱۷/۹۸	۱۸/۰۵	محور هسته	740-2
۱۸/۷۷	۱۸/۶۰	پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	740-3
۱۶/۸۵	۱۶/۹۰	محور هسته	760
۱۶/۱۹	۱۶/۴۰	بالادست- ۶ متر از محور هسته	780-1
۱۶/۳	۱۶/۴۵	محور هسته	780-2
۱۶/۴۳	۱۶/۵۷	پایین‌دست- ۶ متر از محور هسته	780-3



شکل (۱۸): مقایسه نتایج ابزاردقیق و تحلیل در تراز ۶۶۳/۵ متر



شکل (۱۹): مقایسه نتایج ابزاردقیق و تحلیل در تراز ۷۰۰ متر

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

صحت‌سنجی

در بخش قبل، کالیبراسیون خصوصیات به کار گرفته شده برای مصالح سد در تحلیل انجام گردید. در این بخش به صحت‌سنجی کالیبراسیون انجام شده پرداخته می‌شود. بازه‌ی زمانی ۱۴۰۰/۰۴/۰۱ تا ۱۴۰۰/۱۰/۰۱ به عنوان بازه‌ی زمانی مدنظر برای صحت‌سنجی انتخاب شد. با اعمال شرایط اولیه، شرایط مرزی و معادلات مربوطه مطابق توضیحات روش بخش قبل برای داده‌های این بازه و با ثابت بودن خصوصیات اختصاص داده شده به مدل، نتایج تحلیل به شرح جدول (۷) حاصل گردید.

جدول (۷): نتایج تحلیل و ابزاردقیق‌ها در مرحله صحت‌سنجی

نتایج ابزار(°C)	نتایج تحلیل(°C)	موقعیت ابزار	نام ابزار
۹/۴۷	۹/۵۴	فیلتر بالادست	663.5-1
۹/۳۹	۹/۷۷	بالادست- ۱۹/۷ متر از محور هسته	663.5-2
۱۱/۶۲	۱۱/۹۲	محور هسته	663.5-3
۱۳/۱۵	۱۳/۵۰	پایین‌دست- ۱۷ متر از محور هسته	663.5-4
۱۳/۸۲	۱۴/۰۹	فیلتر پایین‌دست	663.5-5
۱۱/۰۱	۱۱/۷۲	فیلتر بالادست	700-1
۱۴/۷۳	۱۴/۷۹	بالادست- ۱۵ متر از محور هسته	700-2
۱۵/۶۹	۱۵/۷۱	محور هسته	700-3
۱۶/۰۲	۱۶/۰۱	پایین‌دست- ۱۵ متر از محور هسته	700-4
۱۷/۴۸	۱۶/۹۷	فیلتر پایین‌دست	700-5
۱۷/۳۴	۱۷/۳۲	محور هسته	720
۱۵/۸۸	۱۶/۰۶	بالادست- ۱۲ متر از محور هسته	740-1
۱۸/۲۰	۱۸/۲۴	محور هسته	740-2
۱۸/۹۶	۱۸/۷۷	پایین‌دست- ۱۲ متر از محور هسته	740-3
۱۶/۸۹	۱۶/۸۳	محور هسته	760
۱۵/۹۱	۱۶/۱۲	بالادست- ۶ متر از محور هسته	780-1
۱۶/۱۰	۱۶/۳۱	محور هسته	780-2
۱۶/۲۸	۱۶/۴	پایین‌دست- ۶ متر از محور هسته	780-3

همانطور که پیش‌تر نیز بیان شد، در مدل‌سازی از خصوصیات حرارتی برای تحلیل استفاده گردید؛ بدین ترتیب، مطابق جدول‌های (۶) و (۷) و با توجه به نزدیک بودن مقادیر دمای حاصل از نتایج تحلیل و ابزاردقیق‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی حرارتی مربوطه، مناسب بوده و با استفاده از این روش تحلیل، می‌توان دمای آب را در نقاط دیگری که ابزاری برای اندازه‌گیری وجود ندارد، به دست آورد.

نتیجه‌گیری:

۱- با رسیدن آب به ابزارهای واقع در فیلتر بالادست و اشباع خاک، رفتار حرارتی نوسانی مشاهده شده است؛ با توجه به این که دمای آب مخزن سد در ترازهای پایین‌تر به حالت تعادل می‌رسد، دامنه نوسانات دمایی در ترازهای پایین‌تر، کمتر است.

۲- ابزارهای واقع در بالادست محور هسته، در برخی از موارد رفتار نوسانی بسیار ناچیز و در برخی از موارد رفتار کاملاً یکنواختی داشته‌اند. بررسی ابزارهای پایین‌دست محور هسته نیز تراوش غیرمعمولی را نشان نداده است.

۳- مدل‌سازی هسته‌ی سد و فیلترها، با توجه به خصوصیات حرارتی، ابتدا کالیبره شده و سپس در گام بعدی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مطابق جدول‌های (۶) و (۷)، نسبت به مقادیر ثبت شده در ابزار-دقیق‌ها از دقت خوبی برخوردار هستند.

۴- از مجموع بررسی‌های رفتارنگاری حرارتی نتایج ابزار-دقیق‌ها و مدل‌سازی مربوطه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که رفتار تراوشی هسته سد مساعد است.

مراجع

1- Bagheri, S. M. (2005). Thermal monitoring of leakage trough dams-case study: Karkheh dam. M.Sc. Thesis, University of Tehran. (In Persian)

2- Bersan, S., Koelewijn, A., & Simonini, P. (2018). Effectiveness of distributed temperature measurements for early detection of piping in river embankments. Hydrology

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

and Earth System Sciences, 22(2), 1491–1508. https://doi.org/10.5194/hess-22-1491-2018

3- Birman, J. H., Esmilla, A. B., & Indreland, J. B. (1971). Thermal monitoring of leakage through dams. (ed.), New York, U.S.A., Am. Soc. Civ. Engrs., 1986, pp.1374-1381. (ISBN 0-87262-536-2), 2261–2284.

4- Cao, B., Yang, J., Chen, L., Zhang, A., & Mao, H. (2021). Finite element simulation of seepage thermal monitoring of earth-rock dam based on COMSOL, Proc. SPIE 12030, Third International Conference on Optoelectronic Science and Materials (ICOSM 2021), 1203022; https://doi.org/10.1117/12.2617689

5- Chen, C. Y., Chen, S. C., Chen, K. H., & Liu, Z. H. (2018). Thermal monitoring and analysis of the large-scale field earth-dam breach process. Environmental Monitoring and Assessment, 190(8). https://doi.org/10.1007/s10661-018-6869-y

6- Čejka, F., Beneš, V., Glac, F., & Boukalová, Z. (2018). Monitoring of seepages in earthen dams and levees. International Journal of Environmental Impacts: Management, Mitigation and Recovery, 1(3), 267–278. https://doi.org/10.2495/ei-v1-n3-267-278

7- Dornstadter, J. (1997). Detection of internal erosion in embankment dams. In Proceedings of the Nineteenth International Commission on Large Dams, Florence, Italy, 26–30 May 1997; pp. 87–102.

8- Ghafoori, Y., Maček, M., Vidmar, A., Říha, J., & Kryžanowski, A. (2020b). Analysis of seepage in a laboratory scaled model using passive optical fiber distributed temperature sensor. Water (Switzerland), 12(2). https://doi.org/10.3390/w12020367

9- Ghafoori, Y., Vidmar, A., Říha, J., & Kryžanowski, A. (2020a). A review of measurement calibration and interpretation for seepage monitoring by optical fiber distributed temperature sensors. Sensors (Switzerland), 20(19), 1–23. https://doi.org/10.3390/s20195696

10- Hamdhan, I. N., & Clarke, B. G. (2010). Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils. Proceedings World Geothermal Congress, April, 25–29.

11- KAPPELMEYER, O. (1957). the Use of Near Surface Temperature Measurements for Discovering Anomalies Due To Causes At Depths. Geophysical Prospecting, 5(3), 239–258.https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1957.tb01431.x

12- Kumar, S., Sahu, A. K., & Kumar, M. (2021). Heat and water flux modeling in an earth dam. Water Science and Technology,84(10–11),2760–2779. https://doi.org/10.2166/wst.2021.241

13- Márquez, J. M. A., Bohórquez, M. Á. M., & Melgar, S. G. (2016). Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. application to very low enthalpy geothermal energy systems. Sensors (Switzerland), 16(3). https://doi.org/10.3390/s16030306

14- Mirghasemi, A. A., aghazadeh nojedehi, N., & Gatmiri, B. (2009). Thermal analysis of earthen dams - a case study of the Karkheh dam. The 8th Hydraulic Conference of Iran. (In Persian)

15- Seyed-Kolbadi, S. M., Hariri-Ardebili, M. A., Mirtaheri, M., & Pourkamali-Anaraki, F. (2020). Instrumented health monitoring of an earth dam. Infrastructures, 5(3), 1–12. https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026

16- Song, C. R., & Yosef, T. Y. (2017). Seepage Monitoring of an Embankment Dam Based on Hydro-Thermal Coupled Analysis. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 139(2), 1–9. https://doi.org/10.1115/1.4036020

17- Su, H., Tian, S., Kang, Y., Xie, W., & Chen, J. (2017). Monitoring water seepage velocity in dikes using distributed optical fiber temperature sensors. Automation inConstruction,76,71–84. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.013

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

Thermal Analysis of Seepage through Embankment Dams: A Case Study-Darian Dam.

Niloufar Bagheri[1]
Ali Asghar Mirghasemi*[2]

Abstract

The construction of dams is a significant human activity in water management, offering numerous benefits. Many of the world's large dams are constructed with soils and rocks. Internal erosion and seepage are frequent causes of failure for such dams. Therefore, it is necessary to study and analyze the thermal behavior of dams to prevent potential risks. In other words, the basis of this method relies on monitoring the temperature of seepage flow. The Darian Dam is one of the highest embankment dams in Iran, located in Kermanshah, near the Darian village, and along the Sirvan River. It has a height of 179 meters above foundation. This study focuses on monitoring the thermal behavior employing the temperature transducer of instrumentation installed within the dam body. Also, the study incorporates thermal simulation of the Darian dam using the Abaqus finite element software. This simulation provides a comprehensive understanding of the dam's thermal behavior under a variety of conditions. Furthermore, the thermal behavior of the dam's core was investigated at various sections and elevations by plotting the temperature graphs of the instruments. Subsequently, the results derived from finite element modeling were compared with the data recorded by the instruments. The findings of this study suggest that the clay core of the Darian Dam is functioning appropriately.

Keywords

Embankment dam, Seepage, Piping, Thermal monitoring, Abaqus finite element software.

[1] Master of Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2]* Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
aghasemi@ut.ac.ir

Received: 2023/04/03 Accepted: 2024/09/09

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]