

بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی تحت تغییرات دما

(تحلیل حرارتی گذرا، اندرکنش دما-تنش و رفتار سازه‌ای سدهای بتنی قوسی و وزنی)

بهار سالاری

کارشناس عمران

چکیده

سدهای بتنی قوسی، به‌ویژه از نوع دوانحنایی و نازک، به دلیل هندسه منحنی، ضخامت کم نسبت به ارتفاع و مهار شدن در تکیه‌گاه‌های سنگی، نسبت به تغییرات دمای محیط، آب مخزن و تابش خورشیدی حساسیت قابل توجهی دارند. در این مقاله، با تکیه بر یافته‌های گذشته - شامل یک سد قوسی بهره‌برداری شده در تایلند، یک سد وزنی غلتکی در حال ساخت در پاکستان، یک سد وزنی بتنی در حال ساخت در عربستان سعودی، یک سد قوسی دوانحنایی پنجاه‌ساله در هند، یک سد قوسی در حال ساخت در چین و یک سد قوسی-وزنی در اسلوونی - رفتار حرارتی و سازه‌ای سدهای بتنی قوسی و وزنی، هم در فاز بهره‌برداری و هم در فاز ساخت، به‌صورت یکپارچه مرور و تحلیل می‌شود. مکانیزم‌های اصلی انتقال حرارت شامل هدایت درون بدنه بتن، جابجایی در سطوح مجاور هوا و آب، و جذب و گسیل تابشی معرفی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد در اقلیم‌های گرمسیری با دامنه نوسان دمایی محدود، بار حرارتی سهم نسبتاً کوچکی در تنش و تغییر شکل کلی سد دارد؛ اما در مقیاس بلندمدت و در سدهای قوسی نازک، همین بار حرارتی می‌تواند جهت جابه‌جایی تاج را به‌طور کامل معکوس کند و تنش‌های کششی موضعی قابل توجهی در نواحی حساس مانند گالری‌ها و سطح تماس سد-پی ایجاد نماید. در فاز ساخت نیز حرارت ناشی از هیدراتاسیون سیمان، فاصله زمانی بتن‌ریزی و دمای محیط، عوامل تعیین‌کننده‌ای در بروز تنش‌های کششی و ترک‌خوردگی احتمالی هستند. همچنین «پدیده افزایش دما پس از آب‌بندی» در سدهای تازه‌ساخت و اثر اقدامات کاهنده مانند پوشش‌های بازتابنده و سامانه‌های لوله‌ای خنک‌کننده تشریح می‌شود.

واژگان کلیدی: سد بتنی قوسی؛ سد وزنی؛ تحلیل حرارتی گذرا؛ اجزای محدود سه‌بعدی؛ حرارت هیدراتاسیون؛ تنش حرارتی؛ تابش خورشیدی؛ پدیده افزایش دما پس از آب‌بندی؛ پایش میدانی سد

۱. مقدمه

سدهای بزرگ نقش بی‌بدیلی در تأمین آب شرب و کشاورزی، تولید برق آبی، کنترل سیلاب و تنظیم رودخانه‌ها ایفا می‌کنند. در میان انواع سدها، سدهای قوسی بتنی با وجود سهم اندک (حدود چهار درصد) از مجموع سدهای بزرگ جهان، به دلیل هندسه کارآمد، صرفه اقتصادی در حجم بتن، توزیع مناسب بار به تکیه‌گاه‌ها و ظرفیت ذخیره بالا، جایگاه ویژه‌ای دارند. با این حال، همین ویژگی‌های هندسی - به‌ویژه در سدهای دوانحنایی نازک که هم در پلان و هم در ارتفاع دارای انحنا هستند - آن‌ها را نسبت به بارهای حرارتی آسیب‌پذیر می‌سازد.

بارهای مؤثر در تحلیل سازه‌ای سدهای قوسی بتنی عبارت‌اند از وزن خود سازه، فشار هیدرواستاتیک آب مخزن، فشار آب منفذی (زیرفشار)، فشار رسوب، بار زلزله و بار حرارتی. با صرف‌نظر از حرارت اولیه هیدراتاسیون سیمان که تنها در سنین ابتدایی بتن اهمیت دارد، بار حرارتی در یک سد قدیمی عمدتاً متأثر از دو عامل است: نوسانات فصلی دما و تابش خورشیدی وارد بر سطوح در معرض هوا. دمای آب مخزن نیز نقش مهمی در توزیع دما در بدنه سد ایفا می‌کند. در مناطق حاره‌ای و نزدیک به خط استوا، تابش طولانی‌مدت خورشید و دامنه نوسان دمای هوا از یک سو، و افت تراز مخزن در فصول پرمصرف از سوی دیگر، سبب می‌شود سطح بالادست سد که معمولاً زیر آب پوشیده است، در معرض دمای محیط قرار گیرد. اختلاف دمای حاصل نسبت به «دمای بست درزها» (دمایی که درزهای انقباضی در آن دوغاب‌ریزی و یکپارچه شده‌اند) باعث انبساط یا انقباض بتن، ایجاد تنش کششی، احتمال ترک‌خوردگی و افزایش رانش به تکیه‌گاه‌ها می‌شود. این پدیده، که اغلب در ارزیابی ایمنی سدهای قوسی کمتر از بارهای زلزله و سیلاب مورد توجه قرار می‌گیرد، موضوع اصلی این نوشتار است.

علاوه بر سدهای در حال بهره‌برداری، در سدهای وزنی غلظتی و توده‌ای در حال ساخت، حرارت ناشی از هیدراتاسیون سیمان به‌دلیل حجم زیاد بتن‌ریزی، دمای درونی بدنه سد را به‌شدت افزایش می‌دهد و رسیدن به دمای پایدار ممکن است سال‌ها به طول انجامد. در این شرایط، توالی و فاصله زمانی بتن‌ریزی، محتوای سیمان و دمای محیط از عوامل کلیدی کنترل‌کننده دمای اوج و تنش‌های حرارتی ناشی از آن هستند.

هدف این مقاله، ارائه یک تصویر یکپارچه و تطبیقی از رفتار حرارتی سدهای بتنی قوسی و وزنی، هم در فاز بهره‌برداری بلندمدت و هم در فاز ساخت، بر اساس یافته‌های شش مطالعه موردی منتشرشده است: سد قوسی رودخانه پینگ در تایلند، سد وزنی غلظتی داسو در پاکستان، سد وزنی مزدلفه در عربستان سعودی، سد قوسی دوانحنایی ایدوکی در هند، سد قوسی زیلودو در چین و سد قوسی-وزنی موسته در اسلوانی.

۲. مبانی تحلیل حرارتی سدهای بتنی

۲.۱. هدایت حرارتی

انتقال حرارت درون بدنه بتنی سد از معادله عمومی هدایت حرارتی سه‌بعدی تبعیت می‌کند که در آن ضریب هدایت حرارتی، چگالی، گرمای ویژه و نرخ تولید حرارت درونی نقش دارند. در سدهای قدیمی که فرایند هیدراتاسیون سیمان کامل شده است، می‌توان از شرایط پایا (Steady State) استفاده کرد و عبارت تولید حرارت درونی را حذف نمود؛ حال آنکه در سدهای در حال ساخت یا تازه آب‌بندی‌شده، باید معادله ناپایا (Transient) با در نظر گرفتن منابع حرارتی داخلی (گرمای هیدراتاسیون و اثر خنک‌کننده لوله‌های آب‌گذر) حل شود.

۲.۲. جابجایی حرارتی

نرخ جابجایی حرارتی سطحی مطابق قانون سرمایش نیوتن، تابعی از اختلاف دمای سطح بتن و دمای محیط (هوا یا آب) و ضریب جابجایی است. ضریب جابجایی هوا-بتن معمولاً به‌صورت تابعی خطی از سرعت باد برآورد می‌شود که در دره‌های تنگ محل استقرار سدهای قوسی اهمیت بیشتری می‌یابد؛ در حالی که ضریب جابجایی آب-بتن مقداری بزرگ‌تر انتخاب می‌شود تا تعادل دمایی میان سطح بتن و آب مجاور آن را به‌درستی شبیه‌سازی کند.

۲.۳. تابش خورشیدی و تابش گسیلی

شار حرارتی ناشی از تابش خورشیدی به ضریب جذب بتن، عامل زمینی و جهت‌گیری سطح سد بستگی دارد. ضریب جذب تابشی بتن معمولاً در بازه ۰.۵ تا ۰.۷ گزارش شده است. تبادل تابشی میان سطح بتن و محیط پیرامون، که در دماهای متفاوت قرار دارند، با قانون استفان-بولتزمن ارزیابی می‌شود و ضریب گسیل‌مندی بتن در بازه‌ای حدود ۰.۶۵ تا ۰.۹۰ در نظر گرفته می‌شود. در تحلیل‌های دقیق‌تر، اثر سایه‌اندازی توپوگرافی اطراف سد و همچنین سرریز آب از روی تاج نیز بر شرایط مرزی حرارتی سطح پایین‌دست تأثیرگذار است.

۲.۴. شرایط مرزی و روش‌های عددی

در مدل‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی، دو دسته شرط مرزی اصلی اعمال می‌شود: در سطوح در تماس با هوا، مجموع شار جذب تابشی، جابجایی هوا-بتن و تابش گسیل‌شده اعمال می‌گردد؛ در سطوح در تماس با آب مخزن، عمدتاً جابجایی آب-بتن حاکم است که ضریب آن به مراتب بزرگ‌تر از جابجایی هوا است. دمای آب مخزن با توجه به عمق و فصل از روابط تجربی-تحلیلی محاسبه می‌شود، در حالی که دمای هوا و شدت تابش خورشیدی ساعتی به‌عنوان داده‌های محیطی واقعی وارد تحلیل می‌شوند. در سدهای قوسی، برخلاف سدهای وزنی، تنش‌های حرارتی از طریق کمان به تکیه‌گاه‌های سنگی

منتقل می‌شود؛ از این رو اختلاف دما بین روبه بالادست و پایین‌دست قوس می‌تواند به تغییر شعاع انحنا و جابه‌جایی تاج به سمت بالادست یا پایین‌دست منجر شود.

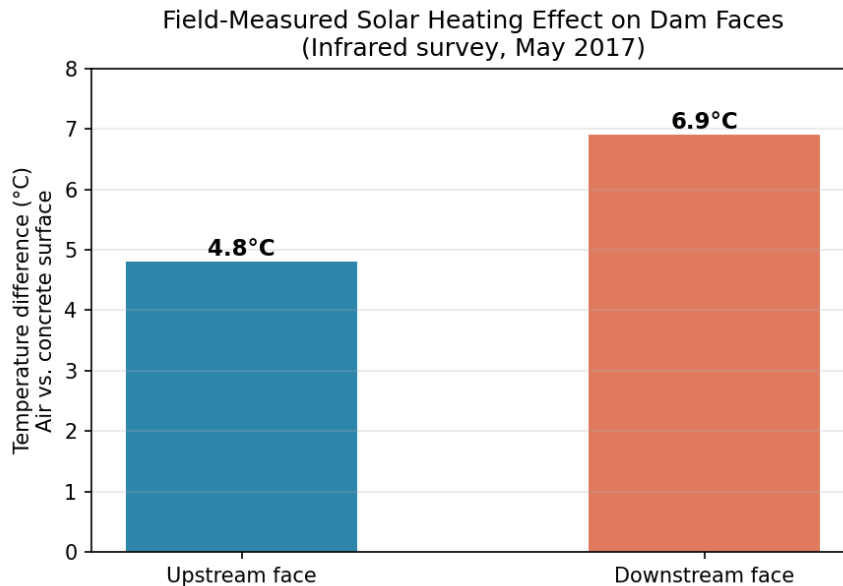
در شش پژوهش مورد بحث، رویکردهای عددی متفاوتی به کار گرفته شده است: تحلیل اجزای محدود حرارتی و سازه‌ای با نرم‌افزار ANSYS (سدهای تایلند و ایدوکی)، مدل حرارتی-هیدراتاسیونی مبتنی بر رویکرد شیمیایی-حرارتی (سد داسو)، تحلیل جفت‌شده حرارتی-تنشی مراحل ساخت (سد مزدلفه)، تحلیل حرارتی ناپایای سه‌بعدی راستی‌آزمایی‌شده با ابزار پایش (سد زیلودو)، و تحلیل یک‌بعدی و دوبعدی هدایت حرارتی غیرخطی با برنامه اختصاصی TeEx بر پایه MATLAB (سد موسته). در تمامی موارد، صحت‌سنجی نتایج عددی از طریق مقایسه با داده‌های پایش میدانی (پاندول‌های مستقیم و معکوس، برداشت کولیماسیون تاج، دماسنج‌های مدفون در بتن، کرنش سنج و درزسنج) صورت گرفته و انطباق قابل‌قبولی گزارش شده است.

۳. مطالعات موردی در فاز بهره‌برداری (سدهای موجود)

۳.۱. سد قوسی بتنی رودخانه پینگ (تایلند)

این سد قوسی نسبتاً نازک با ارتفاع حداکثر ۱۵۰ متر، طول تاج ۴۸۶ متر و شعاع قوس ۲۵۰ متر، واقع بر رودخانه پینگ در تایلند، با استفاده از یک مدل اجزای محدود حرارتی سه‌بعدی (نرم‌افزار ANSYS) با بیش از ۴۲ هزار المان حرارتی جامد، طی یک بازه سه‌ساله (۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳) تحلیل شده است.

نتایج نشان می‌دهد سطح بالادست که در تماس مستقیم با آب مخزن قرار دارد، عمدتاً تحت تأثیر دمای آب است و در اعماق بیش از ۵۰ متر زیر سطح آزاد، تقریباً ثابت می‌ماند. در مقابل، سطح پایین‌دست و تاج سد که در معرض هوا و تابش خورشیدی قرار دارند، به‌شدت از دمای هوا و تابش خورشیدی تأثیر می‌پذیرند؛ به‌طور خاص، تابش خورشیدی دمای سطح بتن را نسبت به دمای هوا حدود ۲ تا ۷ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد.



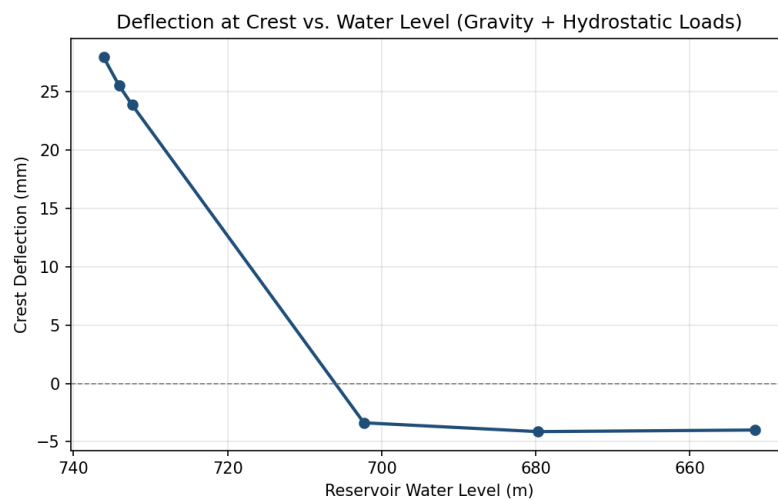
شکل ۱- اختلاف دمای اندازه‌گیری شده میدانی میان هوا و سطح بتن در سطوح بالادست و پایین‌دست سد (دوربین مادون قرمز، اردیبهشت ۱۳۹۶ / می ۲۰۱۷).

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، اندازه‌گیری میدانی با دوربین مادون قرمز در سال ۲۰۱۷ انجام شده است. بر اساس این اندازه‌گیری، اختلاف دمای هوا و سطح بتن در سطح بالادست حدود ۴٫۸ درجه سلسیوس و در سطح پایین‌دست حدود ۶٫۹ درجه سلسیوس بوده که با نتایج مدل اجزای محدود همخوانی مناسبی داشته است. میدان دمایی حاصل از تحلیل حرارتی گذرا به‌عنوان بار حرارتی در تحلیل سازه‌ای خطی برای گرم‌ترین و سردترین ماه سال به‌کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد بار حرارتی اثر ناچیزی بر تغییر شکل سد در جهت جریان دارد و حداکثر تنش کششی ناشی از آن در حدود چند دهم مگاپاسکال، در نزدیکی پی سطح پایین‌دست، ثبت شده است؛ مقداری که در مقایسه با مقاومت کششی بتن (حدود ۳ مگاپاسکال) کاملاً ناچیز است. اندازه‌گیری‌های میدانی با تجهیزات شاقول نصب‌شده در بدنه سد نیز تأیید می‌کند که جابجایی‌های سد عمدتاً متأثر از سطح آب و وزن خود سازه است و سهم بارهای حرارتی ناچیز است.

۳.۲. سد قوسی دوانحنایی ایدوکی (هند)

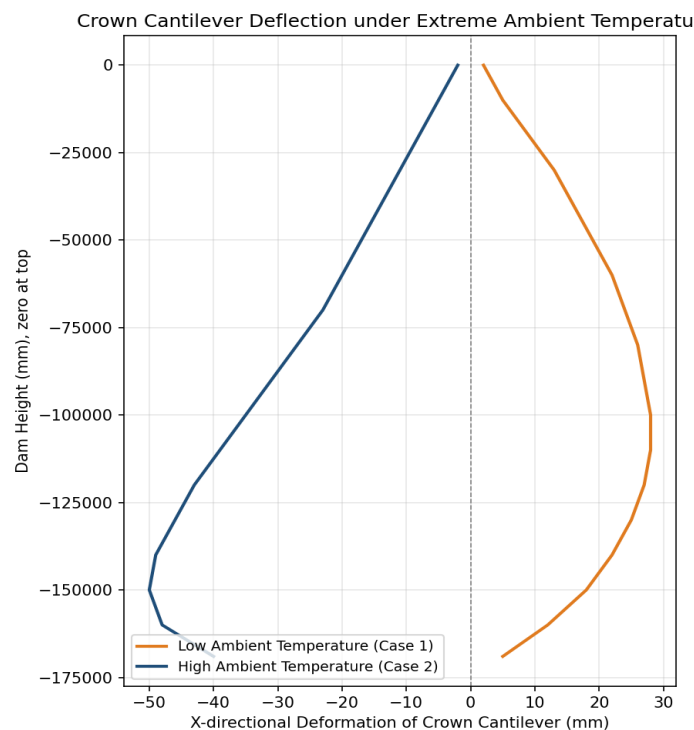
سد ایدوکی، سازه‌ای دوانحنایی، نامتقارن و نازک به ارتفاع ۱۶۹ متر و طول تاج ۳۸۱ متر است که در دره تنگ ۷-شکل رودخانه پریار در ایالت کراالا احداث و از سال ۱۹۷۵ (حدود پنجاه سال) در بهره‌برداری است. ضخامت سد از ۷٫۶ متر در تاج تا ۲۴٫۴ متر در پی متغیر است. مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۲٫۷ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته پایدار ۲۵ هزار مگاپاسکال گزارش شده است. مدل سه‌بعدی شامل پیکره سد (۲۴ بلوک با درزهای انقباضی)، پی سنگی و تکیه‌گاه‌ها با نرم‌افزار انسیس و حدود ۶۴۹ هزار المان تهیه شده است.

بر اساس داده‌های دمایی از سال ۱۹۷۵ تاکنون، دمای محیط بین حدود ۲۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس در نوسان بوده است. دو سناریوی حدی برای تحلیل انتخاب شد: سناریوی دمای پایین (تراز آب کامل) و سناریوی دمای بالا (تراز آب حداقل، دمای پایین‌دست تا ۳۵ درجه سلسیوس). نتایج نشان داد که تحت بار ثقلی و هیدرواستاتیک به‌تنهایی (بدون بار حرارتی)، سد با افزایش تراز آب به سمت پایین‌دست و با کاهش تراز به سمت مخزن جابه‌جا می‌شود.



شکل ۲- جابه‌جایی تاج سد ایدوکی بر حسب تراز آب مخزن (تحت بار ثقلی و هیدرواستاتیک، بدون بار حرارتی).

با افزودن بار حرارتی، رفتار سد کاملاً معکوس شد: در سناریوی دمای پایین (تراز آب بالا)، بیشینه جابه‌جایی معادل ۳۱،۳۳ میلی‌متر در نزدیکی گالری فوقانی به سمت پایین‌دست ثبت شد؛ در حالی‌که در سناریوی دمای بالا (تراز آب پایین)، بیشینه جابه‌جایی تاج معادل ۴۳،۹۲ میلی‌متر به سمت بالادست (مخزن) رخ داد. این یافته با داده‌های پایش میدانی پاندول‌ها و برداشت کولیماسیون تاج هم‌خوانی داشت.



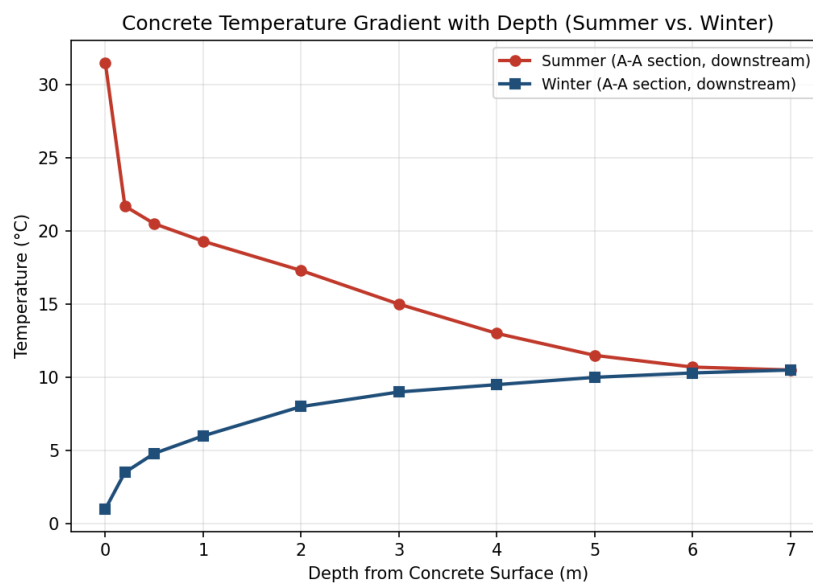
شکل ۳- پروفیل جابه‌جایی افقی کنسول تاجی سد ایدوکی در دو سناریوی حدی دمایی.

بیشینه تنش کششی محاسبه‌شده در پیکره سد در هر دو سناریو کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال و در محدوده مجاز ۲۰۷ مگاپاسکال قرار داشت؛ بیشینه تنش‌ها عمدتاً در سطح تماس سد-پی‌سنگی و در نزدیکی گالری فوقانی مشاهده شد. نکته درخور توجه این است که پس از اجرای پوشش بازتابنده حرارتی بر سطح پایین‌دست سد در سال ۲۰۱۶، روند فزاینده جابه‌جایی تاج به سمت بالادست که از اوایل دهه ۱۹۹۰ ادامه داشت، متوقف یا معکوس شد؛ این موضوع نشان می‌دهد کاهش دمای سطح پایین‌دست می‌تواند اقدامی مؤثر برای کنترل جابه‌جایی‌های نامطلوب باشد.

۳.۳. سد قوسی-وزنی موسسه (اسلوونی)

سد موسسه، بلندترین سد اسلوونی از نوع قوسی-وزنی با ارتفاع سازه‌ای ۵۹۰٫۸ متر و طول تاج ۷۲ متر، در سال ۱۹۵۲ ساخته شده است. برای این سد سامانه پایش خودکار دما (شش دماسنج بتنی در سه گمانه و چهار دماسنج آب مخزن) به همراه ایستگاه هواشناسی متحرک نصب شد. برخلاف دو مطالعه دیگر، در این پژوهش اثر سایه‌اندازی توپوگرافی اطراف سد (با داده‌های اسکن لیزری زمینی) و اثر سرریز آب از روی تاج به‌طور دقیق مدل شد؛ هرگاه سطحی بر اثر سرریز مرطوب باشد، پارامترهای جابه‌جایی و دمای آب جایگزین پارامترهای جابه‌جایی هوا و شار تابشی می‌شوند. در طول یک‌سال بررسی‌شده، حدود ۱۳۰۶ ساعت (۱۴٫۹ درصد از سال) سرریز آب ثبت شد. تحلیل‌های یک‌بعدی و دوبعدی هدایت حرارتی غیرخطی و غیرپایا با برنامه اختصاصی TeEx (بر پایه MATLAB) انجام شد.

نتایج تحلیل یک‌بعدی برای دوره پانزده‌روزه و یک‌ساله در محل دماسنج‌های مدفون، انطباق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد (خطای جذر میانگین مربعات ۱۰۳ تا ۲۰۵ درجه سلسیوس). بیشینه دامنه نوسان سالانه دما در نزدیک‌ترین دماسنج به سطح (۰٫۱ متر عمق) نزدیک به ۳۵ درجه سلسیوس و در عمق یک متری به حدود ۱۷ تا ۱۸ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد.



شکل ۴- گرادیان دمای بتن بر حسب عمق از سطح، در مقطع پایین‌دست آفتاب‌گیر سد موسته، برای فصول تابستان و زمستان.

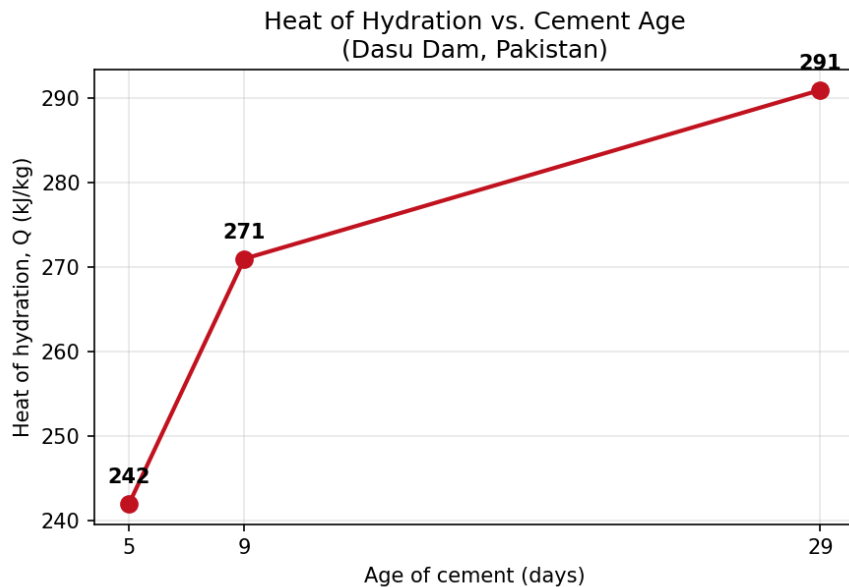
تحلیل دوبعدی میدان دمای کامل سد نشان داد بیشینه گرادیان دمایی بتن در نزدیکی سطح ناحیه بالایی و آفتاب‌گیر پایین‌دست، در فصل تابستان رخ می‌دهد؛ گرادیان دمایی نزدیک سطح در تابستان بسیار تند است (کاهش حدود ۹٫۸ درجه سلسیوس فقط در ۰٫۲ متر نخست)، اما دما تا عمق حدود شش متری به مقدار پایدار خود نمی‌رسد. تحلیل عدم قطعیت نیز نشان داد بیشترین پراکندگی آماری دما (انحراف معیار ۱٫۱۵ درجه سلسیوس) دقیقاً در همین نقطه سطحی و آفتاب‌گیر رخ می‌دهد.

۴. مطالعات موردی در فاز ساخت

۴.۱. حرارت هیدراتاسیون در سد وزنی غلتکی داسو (پاکستان)

برخلاف سدهای در حال بهره‌برداری، در سدهای بتنی غلتکی (RCC) در حال ساخت مانند سد داسو در پاکستان (بر رودخانه سند)، منبع اصلی تولید حرارت، واکنش گرمای هیدراتاسیون سیمان است. در این پژوهش، مدل حرارتی-هیدراتاسیونی

مبتنی بر رویکرد شیمیایی-حرارتی (Thermo-Chemical) برای پیش‌بینی توزیع دما در بدنه سد در حال ساخت به کار گرفته شده و از یک تابع نمایی برای تخمین حرارت هیدراتاسیون سیمان استفاده شده است، زیرا آزمون کالریمتری آدیاباتیک برای مخلوط بتنی این سد در دسترس نبوده است.



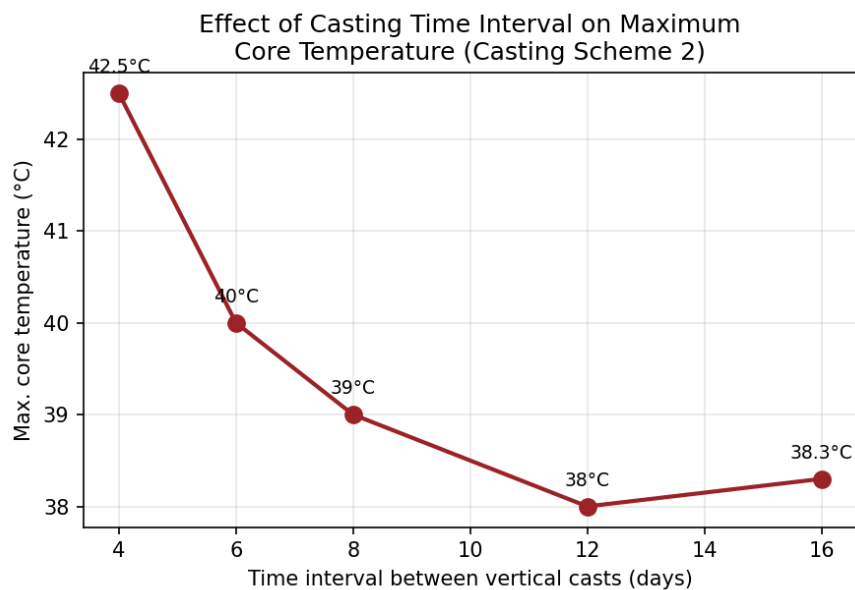
شکل ۵- مقدار حرارت آزادشده هیدراتاسیون سیمان بر حسب سن سیمان (پنج، نه و بیست‌ونه روزه) در سد داسو.

بر اساس نتایج آزمایش پنجاه نمونه سیمان در سنین پنج، نه و بیست‌ونه روزه، مقدار حرارت هیدراتاسیون به ترتیب ۲۴۲، ۲۷۱ و ۲۹۱ کیلوژول بر کیلوگرم برآورد شده است. خنک‌سازی بتن در این پروژه از پایین بلوک‌ها با استفاده از لوله‌های آبرسانی انجام شده که هدف اصلی آن تسهیل دوغاب‌ریزی درزهای انقباضی است. نتایج سیستم پایش دما نصب‌شده در سایت نشان داد پیش از اعمال خنک‌سازی ثانویه، دمای مشاهده‌شده و محاسبه‌شده برای بلوک‌های میانی (با ارتفاع یکسان ۹۶ متر) هم‌خوانی مناسبی دارند و دمای هوا نیز به دلیل نوسانات فصلی، اثر محسوسی بر دمای نزدیک سطوح سد داشته است.

۴.۲. تحلیل جفت‌شده حرارتی-تنشی مراحل ساخت: سد وزنی مزدلفه (عربستان سعودی)

در این بخش، نتایج یک تحلیل جفت‌شده حرارتی-تنشی اجزای محدود سه‌بعدی که مراحل ساخت را نیز لحاظ می‌کند، بر روی سد وزنی مزدلفه در عربستان سعودی مرور می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، تعیین اثر تغییر فاصله زمانی بتن‌ریزی، محتوای سیمان و دمای محیط بر پاسخ حرارتی و تنشی سد بوده است.

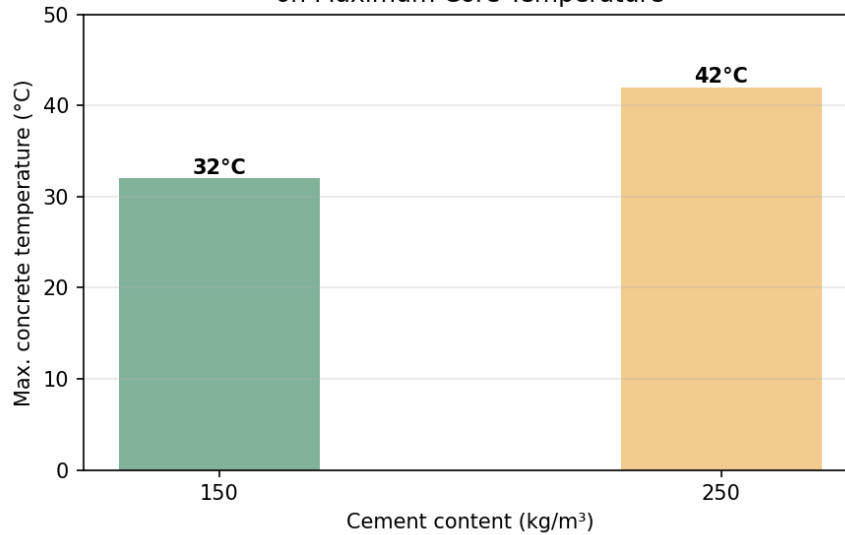
نتایج تحلیل نشان می‌دهد افزایش فاصله زمانی میان لایه‌های بتن‌ریزی قائم، دمای اوج درون بدنه سد را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. برای طرح بتن‌ریزی با لایه‌های یک‌متری، افزایش فاصله زمانی از ۴ روز به ۱۶ روز، کاهشی در حدود ۱۳ درصد در دمای اوج مرکز سد به همراه داشته است.



شکل ۶- اثر فاصله زمانی بتن‌ریزی لایه‌ها بر دمای بیشینه مرکز سد مزدلفه.

بر اساس نتایج تنش کششی متناظر، فاصله زمانی ۶ روزه به‌عنوان گزینه بهینه معرفی شده است که هم دمای اوج و تنش کششی را در محدوده قابل قبول نگه می‌دارد و هم موجب تأخیر غیرضروری در زمان‌بندی اجرای پروژه نمی‌شود. دمای آدیاباتیک بتن که تابعی از محتوای سیمان است، اثر مستقیمی بر دمای تولیدشده در بدنه سد دارد. با تغییر محتوای سیمان از ۱۵۰ به ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، حداکثر دمای بتن در نقطه میانی بدنه سد از حدود ۳۲ درجه سلسیوس به حدود ۴۲ درجه سلسیوس افزایش یافته است؛ این اختلاف دمایی همچنین با افزایشی در حدود ۲۳ درصد در تنش‌های بین لایه‌ای همراه بوده است.

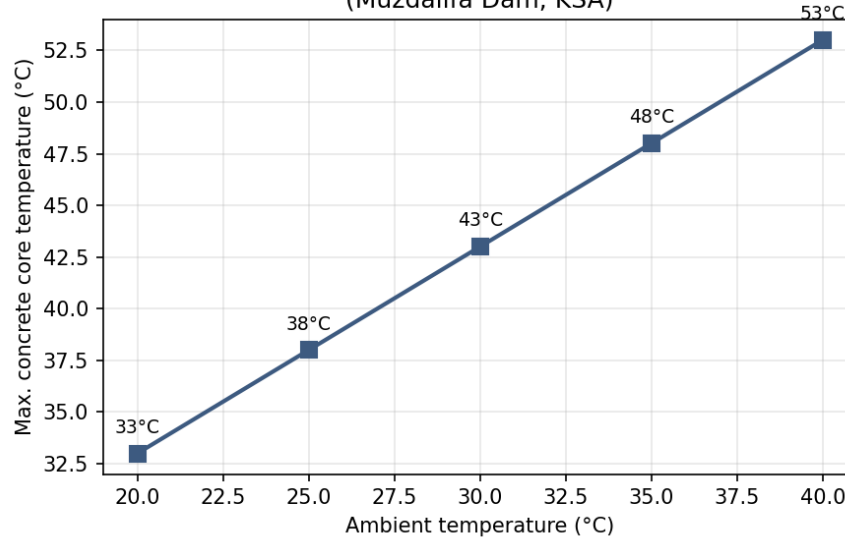
Effect of Cement Content (Adiabatic Temperature)
on Maximum Core Temperature



شکل ۷- اثر محتوای سیمان (به‌عنوان شاخص دمای آدیاباتیک) بر حداکثر دمای بتن در بدنه سد مزدلفه.

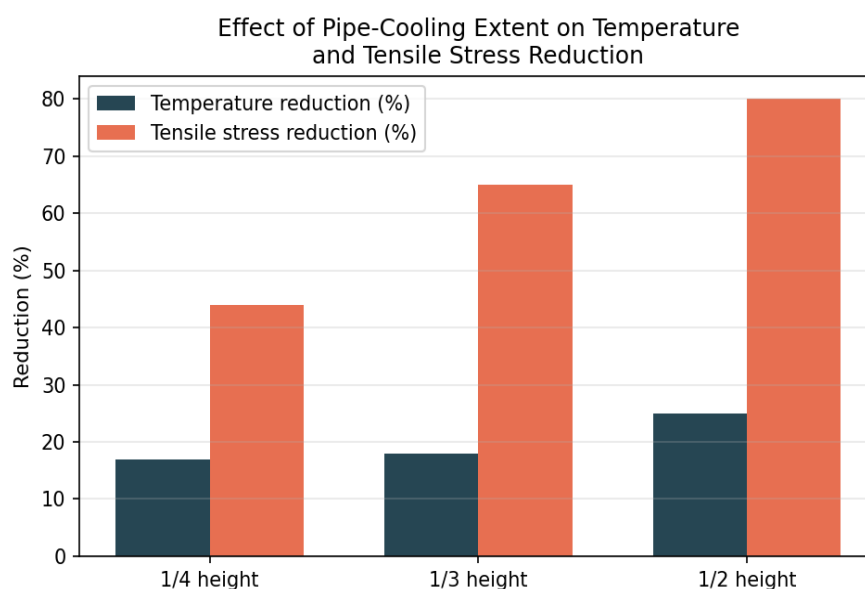
دمای محیط نیز به‌عنوان یک عامل زیست‌محیطی، تأثیر قابل‌توجهی بر دمای درونی و تنش‌های ناشی از آن دارد. بررسی عددی برای دماهای محیطی ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس نشان داد حداکثر دمای درون سد به‌ترتیب به ۳۳، ۳۸، ۴۳، ۴۸ و ۵۳ درجه سلسیوس می‌رسد و اختلاف تنش‌های حاصل تا ۵۳ درصد متغیر بوده است؛ این یافته نشان می‌دهد دمای محیط عاملی مهم‌تر از محتوای سیمان در کنترل حرارت هیدراتاسیون است.

Effect of Ambient Temperature on Dam Core Temperature
(Muzdalifa Dam, KSA)



شکل ۸- اثر دمای محیط بر حداکثر دمای هسته بتنی سد مزدلفه.

به‌منظور کاهش دمای اوج و تنش‌های حرارتی، امکان استفاده از سامانه لوله‌های خنک‌کننده آب نیز به‌صورت عددی بررسی شده است. نتایج نشان داد فاصله میان لوله‌ها نسبت به قطر آن‌ها اثر مهم‌تری در کاهش دما دارد. اجرای لوله‌های خنک‌کننده تا یک‌چهارم، یک‌سوم و نیمی از ارتفاع سد، به‌ترتیب کاهشی در حدود ۱۷، ۱۸ و ۲۵ درصد در دمای بیشینه و کاهشی در حدود ۴۴، ۶۵ و ۸۰ درصد در تنش کششی بیشینه (نسبت به حالت بدون خنک‌سازی لوله‌ای) ایجاد کرده است.



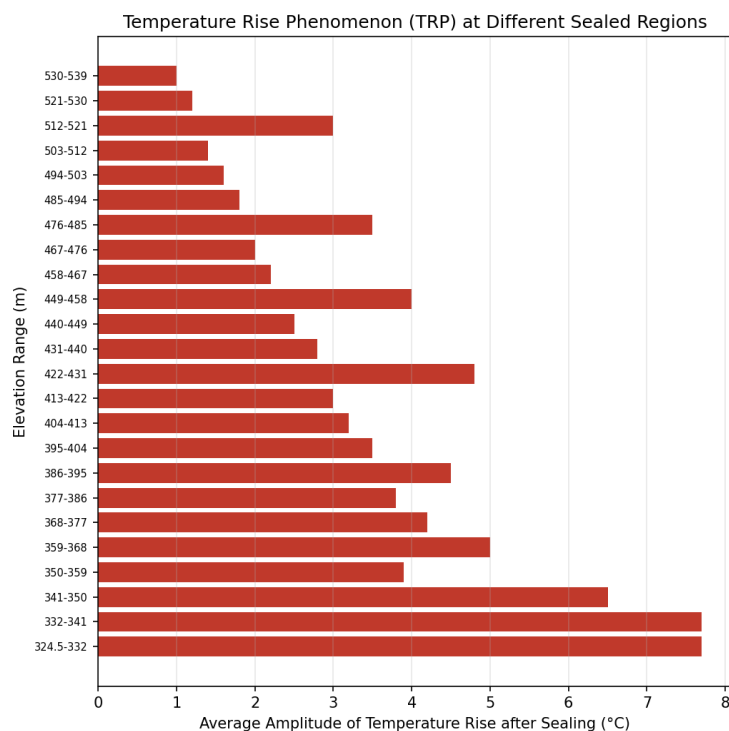
شکل ۹- اثر گسترش سامانه لوله‌های خنک‌کننده تا ارتفاع‌های مختلف سد مزدلفه بر درصد کاهش دما و تنش کششی.

۴.۳. پدیده افزایش دما پس از آب‌بندی: سد قوسی زیلودو (چین)

سد زیلودو، سدی قوسی گنبدی به ارتفاع ۲۸۵٫۵ متر و طول تاج ۷۰۰ متر در رودخانه جینشا است که ساخت آن از سال ۲۰۰۹ آغاز و آب‌گیری اولیه مخزن از سال ۲۰۱۲، هم‌زمان با ادامه ساخت، صورت گرفت. پیکره سد از ۳۱ بلوک تشکیل شده و درزهای انقباضی به‌صورت مرحله‌ای و لایه‌به‌لایه آب‌بندی می‌شوند. داده‌های دماسنج‌ها، کرنش‌سنج‌ها و درزسنج‌های مدفون در بتن نشان داد که پس از آب‌بندی هر منطقه، دمای بتن به‌تدریج و به‌طور مستمر افزایش می‌یابد؛ این پدیده «افزایش دما پس از آب‌بندی» یا TRP نامیده شده است.

علت اصلی این پدیده، بالاتر بودن دمای محیط (میانگین سالانه حدود ۲۰ درجه سلسیوس) و دمای عمقی پی (حدود ۲۵٫۶ درجه سلسیوس) نسبت به دمای بست درزها (۱۲ تا ۱۳ درجه سلسیوس) است؛ به این ترتیب، لایه بیرونی سد که دمای میانگین بالاتری نسبت به دمای بست دارد، به‌تدریج گرمای خود را به هسته داخلی بتن منتقل می‌کند. بیشینه

دامنه افزایش دما در مناطق پایینی و نزدیک به گالری‌ها و دریچه‌های تخلیه مشاهده شد؛ در دو منطقه نخست آب‌بندی‌شده، میانگین افزایش دما تا حدود ۷۰۷ درجه سلسیوس، یعنی نزدیک به دو برابر منطقه چهارم، ثبت شد.



شکل ۱۰- روند تغییرات دامنه پدیده افزایش دما پس از آب‌بندی (TRP) بر حسب تراز مناطق آب‌بندی‌شده در سد زیلودو.

مدل عددی توسعه‌یافته با در نظر گرفتن هم‌زمان مرحله ساخت (گرمای هیدراتاسیون، اثر لوله‌های خنک‌کننده) و مرحله بهره‌برداری (جابجایی هوا و آب، تابش خورشید)، انطباق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان داد و فرضیه بالاتر بودن دمای محیط نسبت به دمای بست درزها را به‌عنوان علت اصلی TRP تأیید کرد. این یافته نشان می‌دهد که وجود گالری‌ها و دریچه‌های تخلیه، با تماس مستقیم هوای گرم‌تر با سطح بتن، روند افزایش دما را تسریع می‌کند.

۵. بحث و جمع‌بندی مقایسه‌ای

نتایج نشان می‌دهد، تفاوت بنیادین رفتار حرارتی سدها را در دو فاز بهره‌برداری و ساخت، و همچنین در دو مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (فصلی) و بلندمدت (چند دهه‌ای)، آشکار می‌سازد.

- در فاز بهره‌برداری سد قوسی تایلند، در اقلیمی با دامنه نوسان دمایی محدود، بارهای حرارتی ناشی از دمای آب، هوا و تابش خورشیدی سهم بسیار کمی در تنش‌ها و تغییر شکل کلی سد دارند و ترک‌خوردگی حرارتی محتمل نیست.

- در مقابل، در سد ایدوکی (هند) و سد موسته (اسلوونی)، بار حرارتی در مقیاس فصلی و بلندمدت می‌تواند جهت جابه‌جایی تاج را کاملاً معکوس کند؛ ترکیب دمای بالا با تراز پایین آب مخزن، مخاطره‌آمیزترین حالت بارگذاری برای ایجاد تنش کششی و جابه‌جایی پایدار به سمت مخزن است.
 - در فاز ساخت سدهای توده‌ای و غلتکی (سدهای داسو و مزدلفه)، حرارت هیدراتاسیون سیمان منبع اصلی افزایش دما است و توالی، فاصله زمانی بتن‌ریزی، محتوای سیمان و دمای محیط، عوامل کنترل‌کننده دمای اوج و تنش‌های کششی احتمالی هستند؛ دمای محیط در مقایسه با محتوای سیمان اثر نسبتاً بزرگ‌تری دارد.
 - در سد زیلودو (چین)، تمرکز بر دوران گذرای پس از ساخت نشان می‌دهد که حتی پیش از ورود سد به دوره بهره‌برداری کامل، اختلاف میان دمای بست درزها و دمای محیط می‌تواند به‌طور پیوسته دمای درونی بتن را افزایش دهد (پدیده TRP).
 - سامانه‌های لوله‌ای خنک‌کننده، ابزاری مؤثر برای کاهش دمای اوج و کنترل تنش‌های کششی در سدهای توده‌ای در حال ساخت به شمار می‌روند و فاصله لوله‌ها نقش مهم‌تری نسبت به قطر آن‌ها ایفا می‌کند؛ در سدهای موجود نیز پوشش‌های بازتابنده حرارتی سطح پایین‌دست توانسته‌اند روند جابه‌جایی فزاینده تاج را متوقف یا معکوس کنند.
 - شرایط مرزی حرارتی (هدایت، جابجایی، تابش خورشیدی و تابش گسیل‌شده) اساس مشترک مدل‌سازی اجزای محدود را تشکیل می‌دهند، هرچند منبع اصلی حرارت و مقیاس زمانی حاکم در هر فاز متفاوت است؛ افزودن پارامترهایی مانند سایه‌اندازی توپوگرافی و سرریز آب (سد موسته) دقت پیش‌بینی میدان دمایی را افزایش می‌دهد.
- نکته مشترک در هر شش پژوهش، اهمیت راستی‌آزمایی مدل عددی با داده‌های پایش میدانی (دماسنج، پاندول، کولیماسیون، کرنش‌سنج و درزسنج) است. بدون این تطبیق، نتایج تحلیل خطی-الاستیک ساده - که برخی راهنماهای بین‌المللی مانند FERC نیز آن را به‌عنوان گام نخست ارزیابی ایمنی توصیه می‌کنند - ممکن است در برآورد بزرگی و جهت جابه‌جایی و توزیع تنش، دچار خطای قابل‌توجه شود.

۶. نتیجه‌گیری

- رفتار حرارتی سدهای بتنی قوسی و وزنی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل محیطی و ساختی قرار دارد که با ابزار تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی گذرا قابل شبیه‌سازی است.
- در سدهای بهره‌برداری‌شده در اقلیم گرمسیری با نوسان دمایی محدود (مانند سد تایلند)، بار حرارتی نقش فرعی در رفتار سازه‌ای سد دارد؛ اما بار حرارتی، مستقل از بار ثقلی و هیدرواستاتیک، می‌تواند در مقیاس بلندمدت جهت جابه‌جایی تاج سدهای قوسی نازک را کاملاً معکوس کند.
- تداوم هم‌زمانی دمای حدی بالا و تراز پایین مخزن در بلندمدت می‌تواند به تنش کششی فزاینده در نواحی حساس مانند گالری‌ها و سطح تماس سد-پی و در نهایت به مخاطرات ایمنی منجر شود.

- در سدهای در حال ساخت، مدیریت حرارت هیدراتاسیون از طریق کنترل فاصله زمانی بتن‌ریزی، محتوای سیمان، دمای بتن‌ریزی و در صورت نیاز استفاده از سامانه‌های لوله‌ای خنک‌کننده، نقشی تعیین‌کننده در جلوگیری از ترک‌خوردگی حرارتی زود هنگام ایفا می‌کند.
- پدیده افزایش دما پس از آب‌بندی درزهای انقباضی، ناشی از اختلاف دمای محیط و دمای بست درز است و در نواحی دارای گالری و دریچه تخلیه شدت بیشتری دارد؛ این پدیده باید در برنامه‌ریزی زمان‌بندی آب‌بندی و کنترل کیفیت ساخت سدهای قوسی در حال احداث مورد توجه قرار گیرد.
- اقدامات کاهنده مانند پوشش بازتابنده حرارتی سطح پایین‌دست و در نظر گرفتن اثرات سایه‌اندازی توپوگرافی و سرریز آب، گزینه‌هایی عملی و کم‌هزینه برای بهسازی سدهای قوسی موجود و افزایش دقت مدل‌سازی به شمار می‌روند.
- توصیه می‌شود در طراحی و اجرای سدهای بتنی، تحلیل حرارتی-تنشی جفت‌شده همراه با پایش مستمر میدانی (دماسنج، پاندول مستقیم و معکوس، کولیماسیون تاج، کرنش‌سنج و درزسنج)، به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایند طراحی، ساخت و ارزیابی ایمنی بلندمدت سدهای بتنی قوسی و وزنی مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

- [1] Bui, K.A., Sanchaen, P., Tanapornraweevit, G., Tangtermsirikul, S., & Nanakorn, P. (2019). An evaluation of thermal effects on behavior of a concrete arch dam. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 41(5), 1059-1068.
- [2] Afzal, J., Yihong, Z., Aslam, M., & Qayum, M. (2022). A study on thermal analysis of under-construction concrete dam. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01206.
- [3] Sayed-Ahmed, E.Y., Abdelrahman, A.A., & Embaby, R.A. (2017). Concrete dams: thermal-stress and construction stages analysis. *Dams and Reservoirs* (ICE Publishing).
- [4] Panicker, J.P.K., Nagarajan, P., & Thampi, S.G. (2026). Study of structural response and safety of an existing double-curvature concrete thin arch dam under extreme temperature loads. *Infrastructures*, 11, 86.
- [5] Li, Q., Liang, G., Hu, Y., & Zuo, Z. (2014). Numerical analysis on temperature rise of a concrete arch dam after sealing based on measured data. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 602818.
- [6] Žvanut, P., Turk, G., & Kryžanowski, A. (2021). Thermal analysis of a concrete dam taking into account insolation, shading, water level and spillover. *Applied Sciences*, 11, 705.