

ارزیابی پایداری سد تحت شرایط مختلف دمایی، مطالعه موردی: سد مخزنی کرج

محمود محمد رضاپور طبری^{*۱}

چکیده

تغییرات درجه حرارت در سدهای بتنی، تأثیر مستقیمی بر خواص ترموالاستیسیته بتن دارد. این تغییرات، تنش و کرنش‌های ناشی از آن بایستی ارزیابی شدند تا به عنوان بارگذاری اولیه در آنالیز پایداری سد به کار روند. در این پژوهش، برای تعیین پاسخ حرارتی سد بتنی تحت تأثیر تغییرات دما، تابش‌های خورشیدی و آب پشت مخزن سد، از مدل المان محدود سه‌بعدی آباکوس استفاده شد. برای المان‌بندی سازه از المان بلوکی چهاروجهی بیست گرهی با شش درجه آزادی که قابلیت تحلیل تنش و تغییر مکان را دارد، استفاده شد. نتایج پارامترهای به دست آمده از تحلیل سه بعدی، همانند جابجایی تاج سد، عمق مناطق ترک خورده و بررسی اثر تغییرات درجه حرارت، نشان دهنده توانایی بالای این روش برای ارزیابی پایداری سد است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حداکثر درجه حرارت و گرادیان دمایی در ناحیه کم‌عمقی از سطح پایین‌دست رخ می‌دهد. همچنین اختلاف درجه حرارت بین نقاط مختلف سطح پایین‌دست با نقاط هم‌تراز اطراف به دلیل آثار تابش‌های خورشیدی قابل توجه است، لذا بی‌توجه به بهره‌برداری از مخزن سد، می‌تواند منجر به بروز ناپایداری و ایجاد ترک در کل بدنه سد شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی، از دقت مناسبی در پیش‌بینی رفتار حرارتی سد تحت کنش‌های محیطی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: المان محدود، بار حرارتی، پایداری، تغییرات حرارتی، جابجایی سد، سد بتنی قوسی.

ارجاع: محمد رضاپور طبری م. ۱۳۹۶. ارزیابی پایداری سد تحت شرایط مختلف دمایی، مطالعه موردی: سد مخزنی کرج. مجله پژوهش آب ایران. ۲۴: ۸۵-۹۵.

۱- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

*نویسنده مسئول: mrtabari@eng.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸

مقدمه

افزایش دمای سطح زمین و تغییرات در الگوهای بارندگی، پدیده‌های قالب در تغییر اقلیم هستند که این دو تقریباً بخش‌های دیگر چرخه آب راتحت تأثیر قرار می‌دهند. این پدیده، روی سدها که همواره در دوران ساخت و بهره‌برداری تحت تأثیر حرارت و تغییرات ناشی از آن قرار دارند، نیز اثر می‌گذارد (ردی و گارتلینگ، ۲۰۰۱). ترک‌های ایجاد شده در اثر درجه حرارت در سدهای بتنی اجتناب‌ناپذیر است (بوفانگ، ۱۹۹۷)؛ لذا تغییرات درجه حرارت، تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از آن باید به عنوان بارهای اولیه در آنالیز پایداری سد، به منظور اطمینان از پایداری و یا انجام اقدامات ترمیمی احتمالی در نظر گرفته شوند (دافی و بخمن، ۱۹۸۰). وجود آب پشت سد باعث می‌شود در روزهای سرد سال، دمای پایین‌دست سد کمتر از دمای بالادست بدنه سد شود و به عکس در روزهای گرم سال درجه حرارت پایین‌دست سد بیشتر از دمای بالادست شود (مهندسين ارتش آمریکا، ۱۹۹۴). این تغییر دما از بالادست به پایین‌دست، تغییر شکل‌های ناهمگون و گاه پیچش را در سدهای بتنی و به خصوص قوسی به وجود می‌آورد. هندسه سد قوسی باعث می‌شود سهم تابش دریافتی خورشیدی در نواحی مختلف سطح سد، متفاوت و در نتیجه در جهت طول سد نیز اختلاف دما موجود باشد (تیناوی و همکاران، ۱۹۹۴). بیشتر ترک‌های سطحی سازه‌های بتنی نیز به دلیل تغییرات درجه حرارت محیط اطراف به وجود می‌آیند (لگر و همکاران، ۱۹۹۳). در سدهای بتنی قوسی این ترک‌ها معمولاً به طور مستقیم در پایداری لغزش یا واژگونی سد مؤثر نیستند؛ ولی گسترش آن‌ها هنگام ترکیب بارهای حرارتی با بارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی آب و سیکل مداوم یخ بستن و ذوب شدن آب قطعی است و در نتیجه پایداری کلی سد را به خطر می‌اندازد (آگولو و همکاران، ۱۹۹۶). نخستین گام برای تحلیل حرارتی با تحقیقات استکی و درون (۱۹۵۷) با استفاده از فرمول‌های تحلیلی آغاز شد. لگر و همکاران (۱۹۹۳) روش المان محدود دو بعدی برای محاسبه رفتار حرارتی سد بتنی وزنی را ارائه کردند. آن‌ها دریافتند که به دلیل گرادیان شدید حرارتی در نزدیکی سطح روباز بتن، سطح تنش‌های کششی این قسمت بالا می‌رود و امکان ترک خوردگی پیش می‌آید. آگولو و همکاران (۱۹۹۶) یک روش اختلاف محدود یک بعدی را

به کار بردند و یک فرمول تحلیلی برای یافتن رفتار حرارتی سد در مقاطع مختلف با ارتفاع معلوم و ضخامت متغیر ارائه کردند. ژانگ و گارجا (۱۹۹۶) با فرض انتقال یک بعدی حرارت و با استفاده از فرمول‌های تحلیلی، توزیع حرارت و تنش‌ها در سازه‌های حجیم بتنی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از اصل برهم نهی، فرمول‌های تحلیلی را برای شوک‌های حرارتی دمای هوا با تغییرات سینوسی و مثلثی به دست آوردند. مایر و مووت (۱۹۹۵) از یک روش المان محدود سه بعدی برای ارزیابی رفتار حرارتی و تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر مکان نقاط مختلف سد استفاده کردند. آن‌ها تغییرات تابش خورشیدی در طول سطح پایین‌دست را با تقسیم سطح پایین‌دست به سه لایه عمودی با ضریب جذب انرژی خورشیدی متفاوت، ساده کردند؛ بنابراین در آنالیز آن‌ها تغییرات سطح تابش خورشیدی در طول ارتفاع سد بر سطح پایین‌دست نادیده گرفته شد. دائودو و همکاران (۱۹۹۷) بر پایه تحقیقات گذشته یک روش عددی برای پیشگویی حرارت در سدهای بتنی وزنی ارائه دادند. آن‌ها از مدل اجزای محدود دو بعدی استفاده کردند و در تحلیل خود تغییرات دمای هوا، تابش خورشیدی، پوشش برف و گرادیان دمایی و نیز ضریب متفاوت هدایت حرارتی را در سد در نظر گرفتند و در نهایت دریافتند که تغییرات شدید گرادیان حرارتی دمایی در مرز مشترک مناطق اشباع و غیراشباع سد اتفاق می‌افتد که شامل دو لایه مجزا در بدنه سد می‌شود. شیبانی و قائمیان (۲۰۰۴) با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی عوامل مختلف محیطی را بر رفتار سد بتنی قوسی بررسی کردند و دریافتند که آب پشت سد اثر بیشتری را نسبت به هوا در چگونگی توزیع دما در ضخامت سد دارد. تعیین اثر تراز آب روی مشخصات دینامیکی سد قوسی را سویم و همکاران (۲۰۱۲) انجام دادند و دریافتند که فرکانس طبیعی سد قوسی در سطح آب تغییر نمی‌کند؛ ولی فرکانس طبیعی برای سطوح آب بالاتر از نصف ارتفاع سد بیش از حد کاهش می‌یابد (شیبانی و قائمیان، ۲۰۰۶). تنش‌های حرارتی در توده بتن را بوفانگ (۲۰۱۴) با انتشار کتابی تحلیل تنش‌های حرارتی در سازه‌های بتنی را بررسی کردند. بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که غیر از مباحث طراحی، هیچ دستوره‌عملی با توجه به شرایط پایداری مخزن سد تحت تنش‌های حرارتی برای بهره‌برداری از سد با توجه به

حرارتی بررسی شود مدل شکل گرفته در نرم‌افزار آباکوس نسخه ABAQUS 6.12 بر اساس تابش و همرفت است. داده‌های مورد نیاز عبارتند از: مقدار ضریب بازتابش زمین‌های اطراف، ضریب بازتابش سطح آب، میانگین سالانه سرعت باد، ثابت بولتزمن، درجه حرارت مطلق، ضریب همرفت.

نرم‌افزار آباکوس از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند مهندسی در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود است. تئوری کامل این نرم‌افزار مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته است. ویژگی‌ها و قابلیت‌های این نرم‌افزار عبارتند از: لحاظ کردن دمای هوا، دمای آب، تراز آب به صورت تراز آب روزانه و واقعی، تابش خورشیدی کل رسیده به یک سطح دل‌خواه در مدل‌سازی، محاسبه تابش‌های مستقیم و پراکنده در سطوح مختلف سد بتنی به صورت روزانه، تعیین دقیق تنش و تغییر مکان‌ها در هر نقطه از بدنه سد و استفاده از مدل ترک پخشی برای تحلیل غیرخطی و بررسی موقعیت و جهت ترک سدهای بتنی بر اساس تئوری مکانیک شکست. در بسیاری از موارد برای مقابله با مسأله ترک خوردگی در سازه‌ها آن‌ها را براساس معیارهای مقاومتی طراحی می‌کنند؛ اما مکانیزم گسیختگی کششی در مصالح بتنی، متفاوت با مفاهیم معمول مبتنی بر مقاومت است؛ به همین دلیل تلاش‌های اخیر در جهت تدوین معیارهایی بوده است که یک قادر به توجیح روند شکست مصالح بتنی باشند و دوم این‌که ناتوانی معیارهای مقاومت در پیش‌بینی رفتار گسیختگی سازه‌ها را برطرف کند.

در این مطالعه با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، دمای هوا که یکی از شرایط مرزی موجود در مسأله است، به طور دقیق و به صورت متوسط دمای هوای روزانه ساختگاه سد معرفی شد. همچنین دمای آب که از دیگر شرایط مرزی است و بر اساس روش ارائه شده توسط آقای بوفانگ برای پیش‌بینی دمای آب در اعماق مختلف تخمین زده شد. این روش قابلیت محاسبه دمای آب را در عمق‌های مختلف دارد. همچنین در این برنامه، تراز آب به صورت متوسط تراز آب روزانه وارد شد. مقدار جابجایی و ممان چرخشی در تراز پای سد به صورت تکیه‌گاه گیردار و برابر با صفر منظور شد که جزء شرایط مرزی ضروری مسأله است. انرژی خورشیدی کل رسیده به یک سطح دلخواه با جهت‌گیری دلخواه برابر با مجموع تابش‌های

مدل‌سازی‌های صورت گرفته ارائه نشده است تا به وسیله آن بتوان سیاست برداشت از مخازن را مشخص کرد؛ لذا در این مطالعه با استفاده از روش مدل‌سازی المان محدود، پاسخ‌های حرارتی و تنش‌های ایجاد شده در سد بتنی تعیین شد و بر اساس آن، شرایط مختلف بهره‌برداری از سد با توجه به این پاسخ‌ها و با لحاظ کردن پایداری سد بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

سد کرج (سد امیرکبیر) روی رودخانه کرج در شمال استان البرز و با هدف کنترل سیلاب‌های بهاره، تأمین آب شرب تهران، تنظیم آب برای مصارف آبیاری، کشاورزی و تولید انرژی برق آبی ساخته شده است. سد بتنی کرج در این مطالعه از نوع دو قوسی است که شعاع و زاویه داخلی قوس‌های آن در ترازهای مختلف متغیر است. در این مطالعه، به بررسی پاسخ سد کرج (جدول ۱) به تنش‌های حرارتی با استفاده از المان‌های حجمی پرداخته شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی سد کرج (متر)

ارتفاع سد	طول سد	عرض سد	عرض پایه سد	عرض تراز سد	عرض تراز سد
۱۶۸	۳۸۴	۱۶۰۰	۱۷۶۸	۳۲	۷/۸۵

ساختار رویکرد پیشنهادی

به طور کلی سازه سدهای بتنی تحت تأثیر دو نوع بار حرارتی قرار می‌گیرند: نوع اول، بار حرارتی ناشی از هیدراتاسیون سیمان و نوع دوم بارهای حرارتی ناشی از تغییرات دمای محیط در طول بهره‌برداری به علت نامعینی سازه سد (بوفانگ، ۲۰۱۴). در مطالعات حرارتی عوامل متعددی تأثیر گذار هستند که شناخت و در نظر گرفتن آن‌ها تأثیر قابل توجهی در خروجی مدل‌سازی خواهد داشت. هدف رویکرد پیشنهادی، تعیین پاسخ حرارتی سدهای بتنی تحت تأثیر تغییرات درجه حرارت است.

مراحل مدل‌سازی

مطابق شکل ۱، گام اول در مدل‌سازی، شناسایی داده‌های مورد نیاز است. از آنجا که در مدل‌سازی بایستی گرادیان

خورشیدی مستقیم و پراکنده رسیده به سطح مورد نظر است. در این برنامه، تابش‌های مستقیم و پراکنده در سطوح مختلف سد بتنی به صورت روزانه محاسبه شد که برای این منظور تمامی پارامترهای مؤثر در مقدار تابش رسیده لحاظ شده است. گفتنی است مقدار ضریب بازتابش زمین‌های اطراف بستگی به پوشش این سطوح دارد که برای سد امیرکبیر برابر با ۰/۲ فرض شد. ضریب بازتابش سطح آب بستگی به ارتفاع خورشید و شرایط آسمان از نظر ابری بودن دارد. از آنجا که ارتفاع خورشیدی در طول روز و در طول سال متغیر است؛ بنابراین بازتابش سطح آب در زمان‌های مختلف روز متغیر است. در تحلیل حرارتی سد امیرکبیر بازتابش سطح آب به طور متوسط برابر ۰/۱۵ و میانگین سالانه سرعت باد سه متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ تبادل‌های حرارتی مؤثر بر مطالعات حرارتی سدها در دوران بهره‌برداری نشان داده شده است. در بالادست سد که مرز مشترک سد و دریاچه است، دمای سد برابر با دمای دریاچه فرض می‌شود. باید توجه داشت که دمای سد به طور قابل توجهی تحت تأثیر دمای آب مخزن خود قرار دارد. در تمام مخزن سدها دمای آب در عمق و فصول سال متغیر است که در این مطالعه از روش پیشنهادی بوفانگ استفاده شده است. در مرز آزاد سد که مرز مشترک سد و هوای اطراف سد است، سد از طریق همرفتی و تشعشع و همچنین تابش خورشیدی تبادل حرارت دارد که قسمتی از این تابش جذب شده و باقی منعکس می‌شود. پیش‌بینی دمای هوای ساختگاه سد معمولاً بر اساس ایستگاه‌های هواشناسی موجود در ساختگاه یا نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی انجام می‌گیرد. در سدهای بتنی قوسی با توجه به ضخامت کم سد در مقایسه با سد بتنی وزنی از اثر گرمای هیدراتاسیون در دوره بهره‌برداری صرف نظر می‌شود. همچنین در مرز بین سد و فنداسیون به دلیل کم بودن سطح مشترک بین سد و سنگ، نسبت به مرزهای دیگر و ناچیز بودن تغییرات دمای فنداسیون نسبت به زمان و همچنین نبود اطلاعات لازم برای تعیین دمای زمین از اثر تبادل حرارتی سد و فنداسیون چشم‌پوشی شده است. مدل میرایی بتن با استفاده از معیار آسیب خمیری بتن با ضریب ۳ درصد در نظر گرفته شد. برای مصالح بتنی این معیار شامل سه بخش پارامترهای مورد نیاز برای رفتار پلاستیسیته بتن،

پارامترهای خرابی فشاری بتن و پارامترهای خرابی کششی بتن است. پارامترهای خرابی فشاری و کششی نقش عمده-ای در بررسی رفتار واقعی مصالح بتنی دارند؛ لذا تعیین مقدار آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خرابی در بتن با شروع رفتار غیرخطی در مصالح، آغاز می‌شود. در صورتی که هیچ‌گونه خرابی ایجاد نشده باشد، مقدار پارامترهای خرابی کششی و فشاری صفر است و با خرابی کامل به ۱ یا ۱۰۰ درصد خرابی می‌رسد. با دادن مقدار ۰/۲ برای ضریب پواسون، خواص الاستیک نیز تعریف می‌شود. نظر به اینکه سدهای قوسی به لحاظ شکل هندسی خاص خود و نحوه انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها به عنوان یک سازه پیوسته‌ای عظیم مطرح هستند، استفاده از المان‌های جامد^۱ در مدل‌سازی قابل توصیه است (لیبب‌زاده و خواجه دزفولی، ۲۰۱۰).

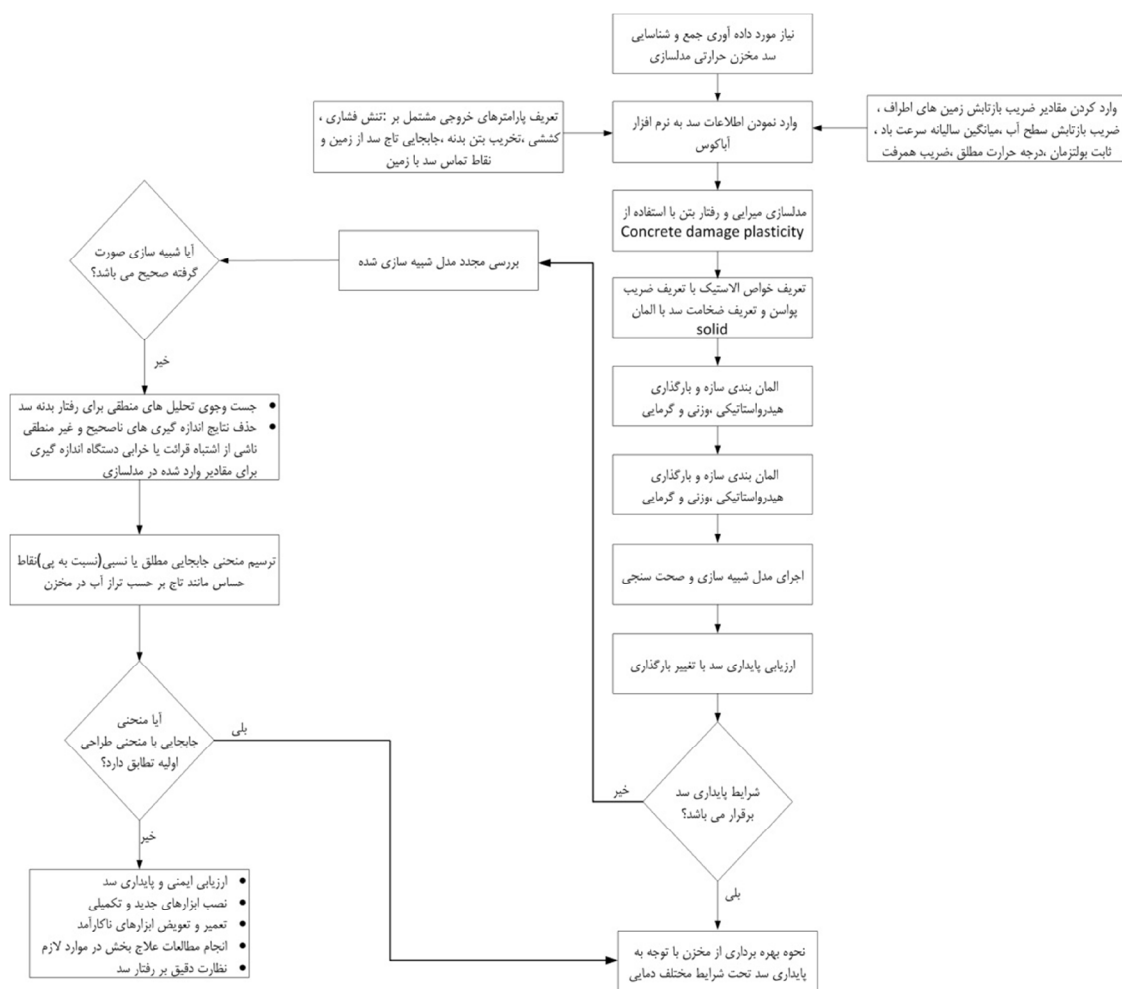
برای تعریف ضخامت سد به خصوص در تراز پی از المان‌های دارای ضخامت جامد استفاده شد. برای تشابه رفتار المان‌های فنداسیون و سد و به دلیل افزایش ضخامت بدنه سد در ترازهای نزدیک پی، در این مطالعه، شبیه‌سازی بدنه سد بتنی دو قوسی کرج با استفاده از المان بلوکی چهار وجهی بیست گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره صورت گرفته است که این درجات آزادی شامل آزادی حرکت در سه جهت X, Y, Z و همچنین آزادی چرخش حول محورهای X, Y, Z است و قابلیت نمایش تغییر شکل‌های بزرگ را دارد. انتگرال‌گیری عددی این المان به روش گوس انجام می‌شود. با این المان اندرکنش‌ها را نیز می‌توان مدل کرد. این المان برای تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، تحلیل خطی و غیرخطی پیچیده و همچنین برای زمانی که سیال در مدل وجود دارد، به کار می‌رود. تعداد کل المان‌ها در مدل بدنه سد ۳۶۴ المان جامد است که این المان انتخاب شده برای تحلیل تنش و تغییر مکان در زمانی که حرارت وجود دارد، در نظر گرفته شده است.

نحوه مدل‌سازی تکیه‌گاه سد

مدل‌سازی پی با توجه به نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به مدول الاستیسیته بتن بدنه سد انجام می‌گیرد. هر چقدر این نسبت بزرگ‌تر باشد؛ یا به عبارت دیگر هر چه سنگ بستر سخت‌تر باشد، ارتفاعی از فونداسیون که باید

سنگ و E_c : مدل الاستیسیته بتن برابر یا بیشتر از یک باشد، در مدل مکعبی ارتفاع پی سنگی در زیر سد (آخرین تراز سد) باید برابر با ارتفاع سد در نظر گرفته شود و برای مدل منشوری، شبکه‌ای به ارتفاع سد کفایت می‌کند و برای نسبت‌های E_r / E_c کوچک‌تر از یک تا دو برابر ارتفاع سد را برای مدل‌سازی پی در نظر می‌گیرند. تعداد کل المان‌ها در مدل تکیه‌گاه ۷۳۱ المان جامد است.

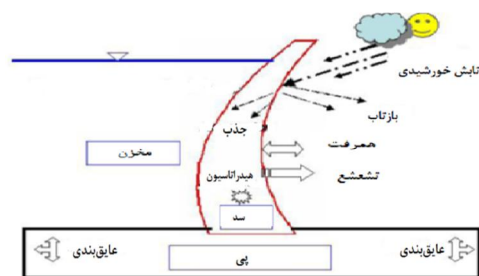
در مدل‌سازی لحاظ شود، کمتر می‌شود و هرچه سنگ بستر الاستیک‌تر و نرم‌تر باشد، باید ارتفاع بیشتری از فونداسیون مدل‌سازی شود تا اندرکنش پی و سد را بتوان بررسی کرد. عموماً پی سد را به دو صورت مدل‌سازی می‌کنند، مدل‌سازی منشوری و مکعبی که در اینجا از مدل مکعبی استفاده شده است. به عنوان یک معیار، چنانچه نسبت E_r / E_c که در آن مدل الاستیسیته



شکل ۱- مراحل مختلف ساختار مدل پیشنهادی

مدل‌سازی مخزن

در مدل‌سازی از المان‌های اکوستیک استفاده شده که این المان نیز از بهترین گزینه در مدل‌سازی آب پشت سد است. ورودی‌های مورد نیاز چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت صوت در سیال ۱۴۳۰ متر بر ثانیه است. به دلیل لحاظ کردن میرایی موج در مخزن، طول مخزن به اندازه سه برابر ارتفاع سد مدل شده است. در بررسی‌های انجام گرفته، معمولاً المان‌های سیال به تدریج



شکل ۲- تبادل حرارتی یک سد بتنی با محیط اطراف

در روابط فوق، K ماتریس سختی، D ماتریس الاستیسیته معرف رابطه تنش و کرنش، B ماتریس رابطه کرنش تغییر مکان، δ بردار تغییر مکان‌های گرهی، ε_{th} : بردار کرنش حرارتی، T بردار دماهای اولیه گرهی (دمای تزریق) و α ضریب انبساط حرارتی ماده است. گفتنی است در مدل‌سازی این مطالعه انتقال حرارت به دو شکل همرفت و تابش استفاده می‌شود. پس از استخراج نتایج بایستی با مقایسه مدل‌سازی با یک مدل واقعی صحت نتایج را ارزیابی کرد. پس از صحت‌سنجی می‌توان منحنی فرمان بهره‌برداری از سد را بر اساس معیارهای پایداری تعریف شده در شرایط مختلف دمایی ارائه کرد (کمیسون تنظیم مقررات انرژی فدرال، ۱۹۹۹). به این معنا که اطلاعات تغییر شکل بدنه در ارزیابی ایمنی سد به صورت‌های زیر رسم می‌شوند: ۱- جابه‌جایی افقی مطلق یا نسبی نقاط حساس مانند تاج بر حسب تراز آب در مخزن رسم شده، تغییرات این منحنی باید با منحنی به دست آمده از تحلیل و طراحی اولیه سد تطابق کلی داشته باشد. هرگونه تناسب نداشتن مستقیم ناگهانی این تغییر شکل با افزایش یا کاهش تراز آب مخزن باید به دقت بررسی شود. ۲- جابه‌جایی افقی نقاط حساس بر حسب تغییرات دمای محیط. در سدهای قوسی معمولاً با افزایش دما جابه‌جایی‌هایی به سمت بالادست ایجاد شده و با کاهش دما نیز تغییرات جابه‌جایی به سمت پایین‌دست با جابه‌جایی‌های ناشی از افزایش تراز آب همسو می‌شوند. رسم این منحنی برای تراز ثابت آب معنادار و قابل بررسی و قضاوت است. پوش جابه‌جایی‌ها در دماها و ترازهای مختلف بایستی برای ارزیابی پایداری رسم شود و مبنای بررسی نهایی قرار گیرد (بی‌نام، ۱۳۹۲).

نتایج و بحث

در بارگذاری حرارتی سدها، بارهای حرارتی حاصل از تغییر دمای فصلی محیط یا اختلاف دمای بالادست و پایین دست مهم است. در روزهای سرد سال درجه حرارت پایین دست سد کمتر از درجه حرارت بالا دست و در روزهای گرم برعکس است و این تغییر دما از بالا دست به پایین دست تغییر شکل‌های ناهمگون و گاه پیچشی را موجب می‌شود؛ لذا ارزیابی این بارگذاری مهم است. مدل‌سازی سد در محیط آباکوس برای بررسی اثر دما، یک مدل سازی حرارتی با توجه به پارامترهای همرفت و تابش است

از حالت قوسی به حالت خطی از وجه بالادست تا انتهای مخزن تغییر شکل می‌دهند، به شکلی که در انتهای مخزن یک صفحه مسطح تشکیل می‌دهند. به منظور لحاظ کردن بهتر آثار اندرکنش و کاهش خطای عددی در تحلیل، اندازه المان‌ها به تناسب از وجه بالادست تا انتهای مخزن افزایش می‌یابد. آثار اندرکنش در المان‌های در تماس با وجه سد و کناره‌های صلب فعال است. تعداد کل المان‌ها در مدل مخزن سد ۱۳۴۰ المان مایع است.

فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل مدل سد عبارتند از: الف) تحلیل در دامنه زمان صورت می‌گیرد. به این معنا که بازه زمانی حل مسأله از صفر تا زمان تناوب در نظر گرفته می‌شود. چنانچه تحلیل دینامیکی باشد، این زمان واقعی است و در حل معادلات وارد می‌شود؛ ولی اگر تحلیل استاتیکی باشد، زمان تناوب در یک زمان مجازی است و بسته به مقدار آن، زمان اجرای برنامه کم یا زیاد می‌شود. معمولاً برای حل مسایل غیرخطی پیچیده استاتیکی مانند مدل‌سازی صورت گرفته توصیه می‌شود که با حل گر صریح تحلیل شوند و پیشنهاد می‌شود که زمان کل تحلیل همواره بزرگ‌تر از دوره تناوب یا فرکانس طبیعی مربوط به اولین شکل مود ارتعاشی مسأله در نظر گرفته شود. از آنجا که در تحلیل دینامیکی زمان یا دوره تناوب لازم برای تحلیل سد قوسی معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ ثانیه است؛ لذا در این مطالعه این زمان از صفر تا ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. ب) ماده تشکیل دهنده سد، خطی، همگن و ویسکوالاستیک است.

معادلات حاکم

اثر حرارت در سازه‌های بتنی به خصوص سدهای قوسی و پایه‌دار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ لذا کلیه بارهای عادی در ترکیب با بارهای حرارتی باید در سدهای بتنی قوسی و پایه‌دار در نظر گرفته شوند. بعد از یافتن دمای گره‌های مدل المان سد، با استفاده از روش المان محدود برای مسایل الاستیسیته و با توجه به دمای مرجع می‌توان تنش‌های به وجود آمده را به صورت زیر محاسبه کرد (بوفانگ، ۲۰۱۴):

$$F_t = K \delta \quad (1)$$

$$K = \int \int \int DBB^t d\Omega \quad (2)$$

$$F_t = \int \int \int D\varepsilon_{th} B^t d\Omega \quad (3)$$

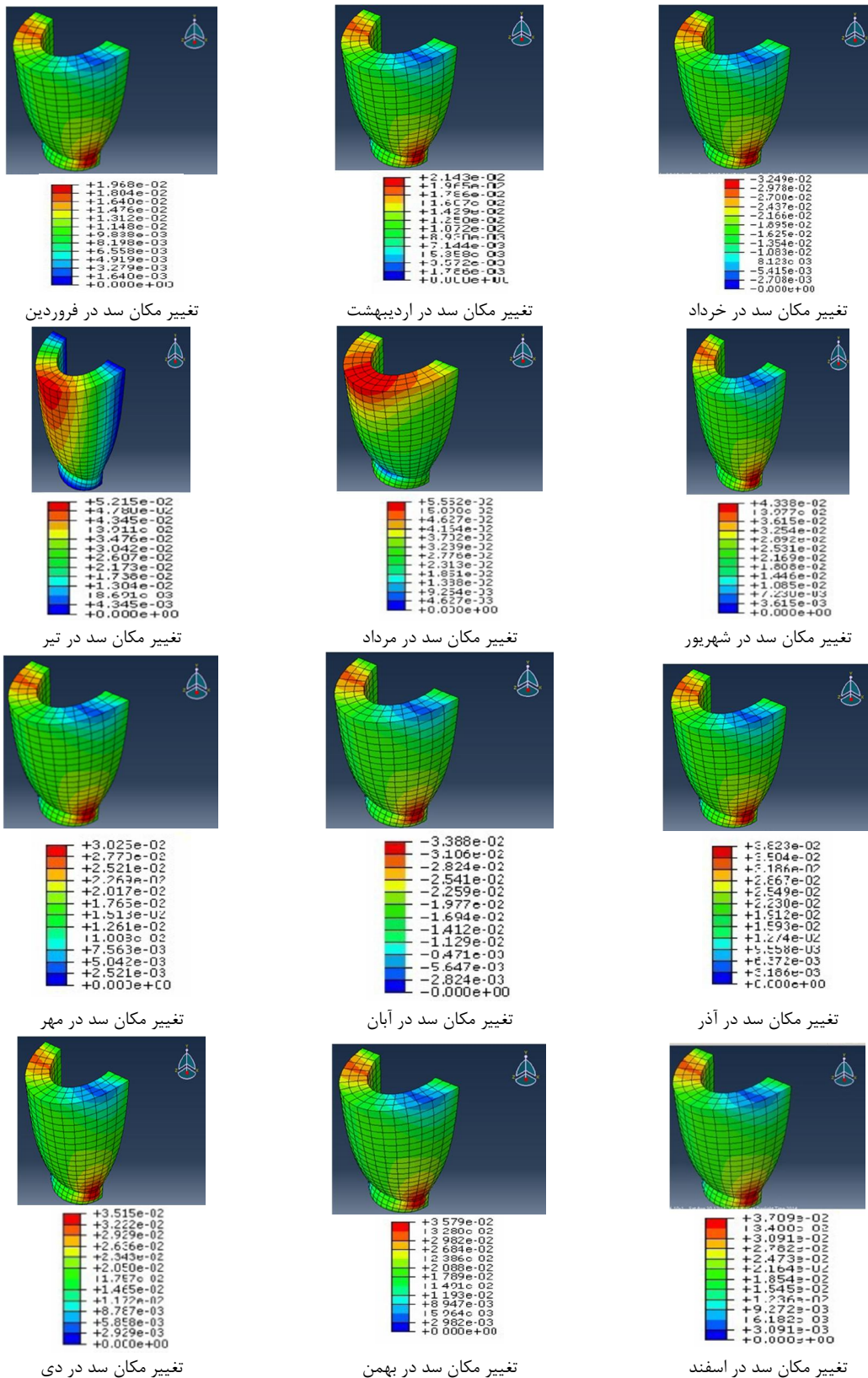
$$\varepsilon_{th} = \alpha (T - T_0) \quad (4)$$

حداقل بهره‌برداری ایمن، سطح تنش از حالت فشاری به کششی متمایل شده و باعث افزایش سطح تنش‌های اصلی کششی در بدنه سد شود.

لذا می‌توان بیان کرد که تأثیر دما در ایجاد حالت‌های بحرانی از اثر فشار آب بیشتر است. شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات جابجایی و تراز آب را در سد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سد در سال‌های ۷۸ تا ۸۸ در شرایط خشکسالی بهره‌برداری شده است. پوش جابه‌جایی در شرایط عادی بهره‌برداری مانند پوش جابه‌جایی ۷۱-۷۵ است؛ به طوری که پوش به صورت اریب و به سمت دو انتها باریک می‌شود.

تغییر مکان‌ها در سال ۸۸ در داخل محدوده تغییر مکان‌های دوره‌های ۸۱-۸۷ قرار گرفته‌اند، در حالیکه داخل پوش واقع نمی‌شوند. در این خصوص اختلاف ناشی از تأثیر غالب تغییرات درجه حرارت در اثر کاهش تراز آب مخزن است؛ بنابراین می‌توان گفت رفتار سد دارای روند منطقی و مطابق با تغییر مکان‌های صورت گرفته در طول بهره‌برداری است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، جابجایی‌ها، به ویژه در سال‌های کم‌آبی غالباً تابع تغییرات دمای هوا است؛ به گونه‌ای که سد به سمت بالادست حرکت کرده است؛ بنابراین در این شرایط، درزها در قسمت پایین‌دست فشرده می‌شوند و بالادست، به حالت کشش خواهد افتاد. بر اساس موارد بیان شده، می‌توان گفت به احتمال بسیار زیاد تغییر شکل شعاعی در جهت بالادست در تاج سد رخ خواهد داد که در این صورت بهره‌برداری از سد باید با دقت بیشتری صورت گیرد. همچنین در این مدت، به علت پایین بودن تراز آب مخزن در یک بازه زمانی به نسبت طولانی، سطح بیشتری از بدنه تحت تأثیر تابش مستقیم خورشید قرار می‌گیرد و اختلاف فاز زمانی بین دمای داخلی بتن و دمای هوا کاهش خواهد یافت. کاهش غیر منتظره سطح مخزن به زیر سطح تراز حداقل به دلیل شرایط آب و هوایی و خشکسالی‌های اخیر می‌تواند منبع ترک خوردگی روی پایین‌دست سد و گسترش ترک‌ها و نیز ترک کششی در پایین‌دست جریان و نزدیک به تاج سد شود، که باید از کاهش سطح آب مخزن به زیر سطح حداقل برای جلوگیری از ایجاد این ترک‌ها جلوگیری کرد.

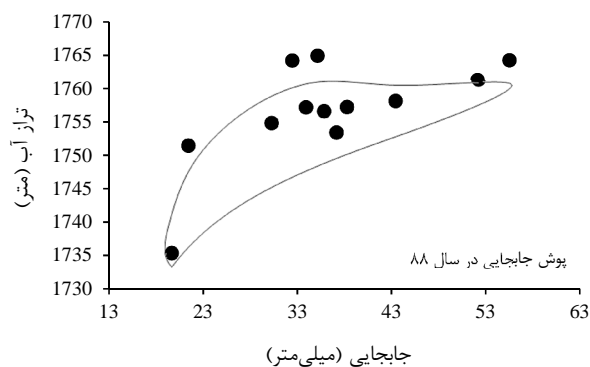
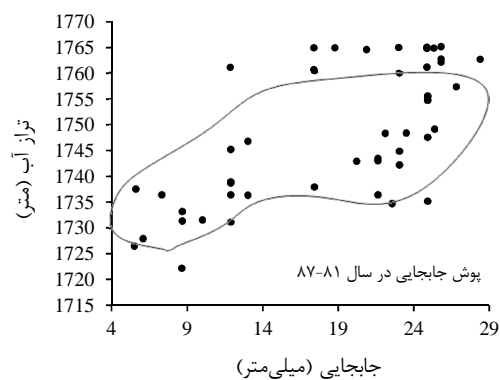
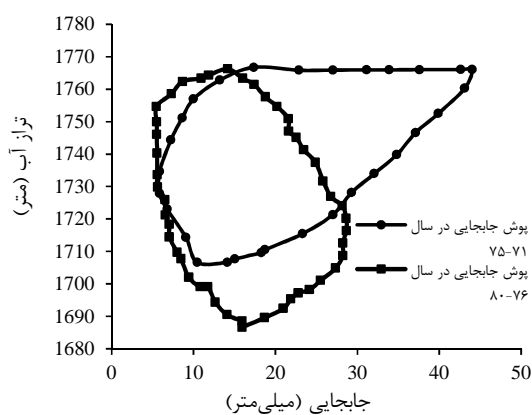
که خروجی حاصل از آن میزان جابه‌جایی تاج سد در شکل ۳ و جدول ۲ است. در این نتایج می‌توان مشاهده کرد که با مدل‌سازی حرارتی، جهت جابجایی نهایی به سمت مخزن است در حالیکه بدون تحلیل حرارتی و فقط با مدل‌سازی نیروی هیدرواستاتیکی، فشار هیدرواستاتیک تمایل به جابجایی سد در خلاف این جهت را دارد که این امر نشان‌دهنده اثر تغییرات حرارتی بر بدنه سد است که ضمن دفع اثر نیروی هیدرواستاتیکی باعث جابجایی بدنه به سمت مخزن می‌شود. بیشترین جابجایی در گرم‌ترین ماه، یعنی مرداد و به سمت مخزن است؛ بنابراین شیب تغییرات حرارت در نواحی نزدیک به تاج سد و نواحی آفتاب‌گیر پایین‌دست به دلیل تابش زیاد خورشیدی در حد بالایی قرار دارد. جابجایی‌های بدنه سد در ماه‌های گرم به سمت پایین‌دست بیشتر از ماه‌های سرد سال است که این به دلیل همزمان شدن تغییر مکان‌های ناشی از بارهای حرارتی و هیدرواستاتیکی در ماه‌های سرد سال است. جدول ۲ بیان مقدار عددی محاسبه شده در شکل ۳ حاصل از تغییرات تراز آب و دمای اعمال شده به بدنه سد در طول یک سال، برای داشتن درک بهتر آثار این تغییرات و تنش‌های اعمال شده، است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، آب پشت سد تأثیر بسیار زیادی بر توزیع دما در بدنه سد دارد و باعث کاهش تنش کششی در سطح بالادست سد می‌شود؛ بنابراین از ترک خوردن این ناحیه جلوگیری می‌کند و باعث کاهش تغییرات حرارتی و اثرات آن بر جابجایی می‌شود. بر این اساس می‌توان گفت به احتمال بسیار زیاد، تغییر شکل شعاعی در جهت بالادست در تاج سد کرج نیز رخ خواهد داد که در این صورت بهره‌برداری از سد باید با دقت بیشتری صورت گیرد. نتایج آنالیز اجزای محدود در دوازده ماه مختلف جدول ۲ نشان می‌دهد که تنش‌های کششی بالادست در حد پایینی قرار دارد و در نتیجه امکان بروز ترک به دلیل بارهای استاتیکی در این ناحیه منتفی است. از طرفی سطح حداقل آب در سد کرج^۱ ۱۶۹۲masl و تراز نرمال ۱۷۶۵masl است. این در حالی است که متوسط تراز مخزن در سال مورد بررسی (۱۳۸۸)، در حدود ۱۷۵۹masl بوده که کمی پایین‌تر از تراز نرمال است و منجر به ایجاد جابجایی تاج سد به میزان ۵۰ میلی‌متر می‌شود؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که با کاهش تراز آب به زیر تراز



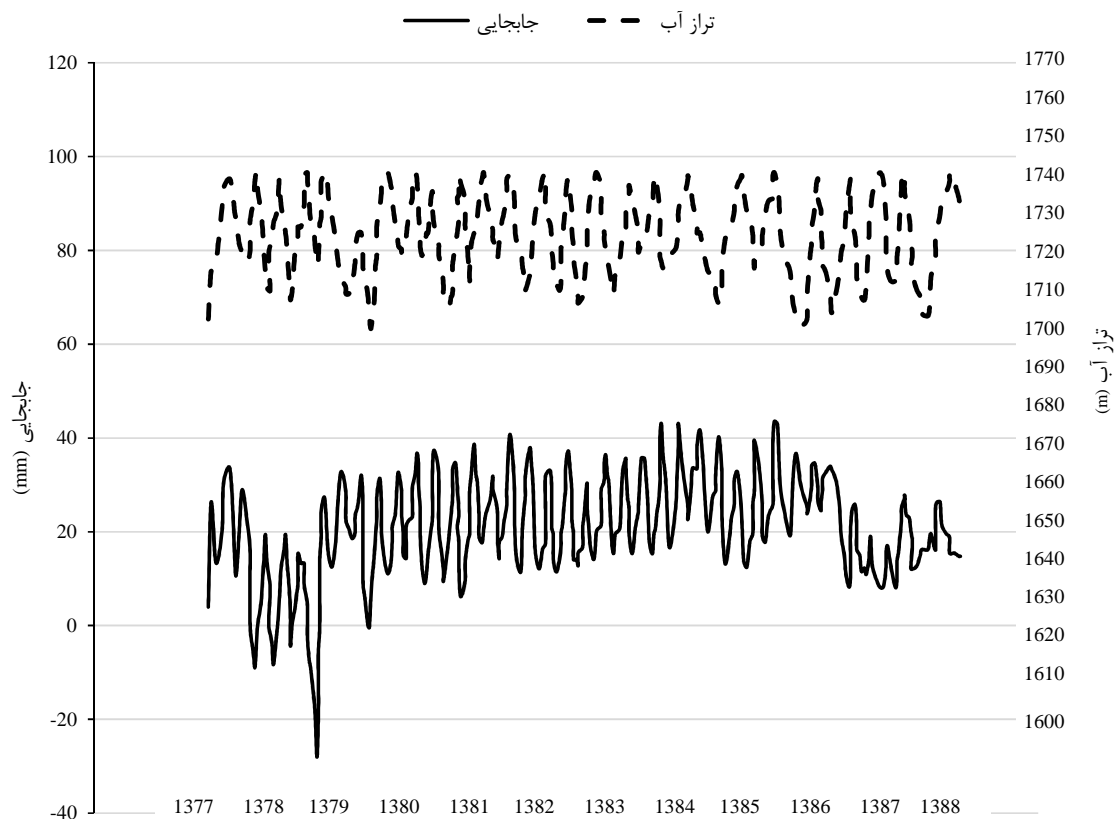
شکل ۳- نمایش تغییر مکان سد در یک سال (متر)

جدول ۲- نتایج آنالیز برای بلوک میانی تاج سد

ماه	متوسط دما (سانتی‌گراد)	متوسط تراز (متر)	جابجایی تاج سد (متر)	تنش کششی پایین دست (مگا پاسکال)	تنش کششی بالادست (مگا پاسکال)
فروردین	۸/۹۹	۱۷۳۵/۴۴	۰/۰۱۹	۲/۵۰×۱۰+۵	۲/۵۹۷×۱۰+۵
اردیبهشت	۱۴/۳۵	۱۷۵۱/۴۳	۰/۰۲۱	۲/۶۶۲×۱۰+۵	۲/۶۲۵×۱۰+۵
خرداد	۱۹/۹۲	۱۷۶۴/۲۱	۰/۰۳۲	۲/۴۲۳×۱۰+۵	۲/۴۲۸×۱۰+۵
تیر	۱۴/۵	۱۷۶۴/۸۹	۰/۰۳۵	۲/۴۹۶×۱۰+۵	۲/۴۲۶×۱۰+۵
مرداد	۲۴/۰۶	۱۷۶۴/۲۵	۰/۰۵	۷/۸۴۱×۱۰+۵	۷/۵۴۱×۱۰+۵
شهریور	۱۹/۶۳	۱۷۶۱/۲۷	۰/۰۵۲	۶/۹۹۲×۱۰+۵	۶/۰۳۲×۱۰+۵
مهر	۱۳/۹۷	۱۷۵۸/۰۴	۰/۰۳	۲/۰۹۹×۱۰+۵	۴/۰۴۰×۱۰+۵
آبان	۸/۳۸	۱۷۵۷/۱۵	-۰/۰۳۳	۵/۲۰۷×۱۰+۵	۵/۲۰۷۱×۱۰+۵
آذر	۲/۷۸	۱۷۵۶/۵۲	۰/۰۳۸	۴/۲۶۹×۱۰+۵	۲/۳۵۶×۱۰+۵
دی	۴/۰۳	۱۷۵۴/۴۷	۰/۰۳	۱/۴۶۰×۱۰+۵	۴/۳۵۴×۱۰+۵
بهمن	۱/۴۸	۱۷۵۳/۳۸	۰/۰۴	۲/۷۲۰×۱۰+۵	۴/۶۳۱×۱۰+۵
اسفند	۹/۸۷	۱۷۵۷/۱	۰/۰۳۷	۱/۱۵۷×۱۰+۵	-۲/۴۹۶×۱۰+۵



شکل ۴- پوش تغییرات جابجایی



شکل ۵- تغییرات جابجایی و تراز آب در طی دوره ۷۷-۸۸

نتیجه‌گیری

از جمله ویژگی‌های مهمی که سازه بتن حجیم را از سایر انواع بتن مجزا می‌کند، رفتار حرارتی آن است. ابعاد نسبتاً بزرگ سازه‌های بتن حجیم باعث ایجاد اختلاف دما بین سطوح داخلی و خارجی بتن می‌شود و در اثر این گرادیان، تغییر حجم متفاوت ایجاد و به همراه قیدی که وجود دارد کرنش و تنش کششی به وجود می‌آید که می‌تواند منجر به ترک خوردگی شود. در سدهای قوسی نباید ترک‌هایی عمود به محور سد ایجاد شود تا انتقال بار بتواند در امتداد محور سد صورت گیرد. سدهای بتنی، تحت فشار آب و درجه حرارت، انحرافی نسبت به خط قائم خواهند داشت. زمانی که تغییر شکل‌ها در حد معیارهای طراحی باشند، مشکلی نخواهد بود؛ ولی اگر مقدار جابجایی بیشتر از این معیار باشد، برای ارزیابی پایداری سد بایستی مورد توجه قرار گیرند. در این مطالعه به بررسی اثر تغییر دما روی جابجایی با در نظر گرفتن نوسانات تراز آب بر سد بتنی کرج (امیرکبیر) پرداخته شد. نتایج نشان داد که

جابجایی‌های بدنه سد در ماه‌های گرم به سمت پایین‌دست بیشتر از ماه‌های سرد سال است که این امر، به دلیل همزمان شدن تغییر مکان‌های ناشی از بارهای حرارتی و هیدرواستاتیکی در ماه‌های سرد سال است. همچنین جابجایی‌ها، به ویژه در سال‌های کم‌آبی غالباً تابع تغییرات دمای هوا است؛ به گونه‌ای که سد به سمت بالادست حرکت کرده است؛ بنابراین در این شرایط دروازه در قسمت پایین‌دست فشرده می‌شود و بالادست به حالت کشش خواهد افتاد. از طرفی با توجه به شرایط خشکسالی و کم‌آبی در ایران در سال‌های اخیر تراز سطح آب گاهی کمتر از سطح مینیمم بهره‌برداری بوده و ایجاد ترک حرارتی حاصل از افت آب در بدنه سد مشاهده می‌شود. سطح حداقل آب در سد کرج ۱۶۹۲ masl و تراز نرمال ۱۷۶۵masl است این در حالی است که متوسط تراز مخزن در سال مورد بررسی، سال ۱۳۸۸، در حدود ۱۷۵۹masl بوده که کمی بالاتر از تراز نرمال است. این امر منجر به ایجاد جابجایی تاج سد و ترک خوردگی تا عمق

- distributions in concrete gravity dams (part 1 & 2). Canadian Journal of Civil Engineering. 20(6): 999-1025.
11. Meyer T. and Mouvet L. 1995. Behavior analysis of the Vieux-Emosson arch-gravity dam under thermal loads. Dam Engineering. 6(4): 44:49.
 12. Reddi J. N. and Gartling D. K. 2001. The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics. CRC Press Boca Raton Fla. 108 p.
 13. Sevim B. Bayraktar A. Altunisik AC. Adanur S. and Akkose M. 2012. Determination of Water Level Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam Model using Ambient Vibration Testing. Experimental Techniques. 36(1): 72-82.
 14. Sheibany F. and Ghaemian M. 2004. Three Dimensional Thermal Stress Analysis of Concrete Arch Dams including earthquake effect. Proc of the 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, No. 488.
 15. Sheibany F. and Ghaemian M. 2006. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam. ASCE J Eng Mech. 132(5): 532-44.
 16. Stucky A. and Derron M. 1957. Problemes Thermiques Poses Por La Construction des Barrages - Reservoirs. École Polytechnique de Université de Lausanne. Publication n° 38. Scienciset Technique. Lausanne.
 17. Tinavi R. Marchand J. and Leger P. 1994. Three dimensional static, thermal and seismic analysis of polygonal gravity dams. Dam Engineering. 5(3): 29-57.
 18. Us Army Corps of Engineering. 1994. Arch dam design. Engineer Manual 110-2-2201. Chapter 8.
 19. Zhang Z. and Garga VK. 1996. State of temperature and thermal stress in mass concrete structures subjected to thermal shock. Dam Engineering. 9(4): 337-351.
- ۵۰ میلی‌متر می‌شود. همچنین تغییر شکل شعاعی در جهت بالادست نیز به علت پایین بودن تراز آب و کاهش اختلاف فاز زمانی بین دمای داخلی بتن و دمای هوا بسیار محتمل خواهد بود. بر این اساس کاهش غیرمنتظره سطح مخزن به زیر سطح تراز نرمال مخزن و تراز حداقل می‌تواند منبع ترک‌خوردگی روی پایین‌دست سد و گسترش ترک‌ها و نیز ترک کششی در پایین‌دست جریان و نزدیک به تاج سد شود که باید از کاهش سطح آب مخزن به زیر سطح حداقل با ارائه سیاست‌های مناسب خودداری شود.
- ### منابع
۱. بی‌نام. ۱۳۹۲. راهنمای ارزیابی ایمنی و اقدامات اضطراری در سدها و سازه‌های وابسته. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، نشریه شماره ۶۴۴
 2. ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User manual, Version 6.12, 2012.
 3. Agullo L. Aguado A. and Mirambell E. 1996. A model for the analysis of concrete dams due to environmental thermal effects. International Journal of Numerical Methods for heat and fluid flow. 6(4): 25-36.
 4. Bofang Z. 1997. Prediction of water temperature in deep reservoir. Dam Engineering. 9(1): 13-25.
 5. Bofang Z. 2014. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. China Institute of Water Resources and Hydropower Research and Chinese Academy of Engineering. Elsevier Inc. 470 p.
 6. Daoudu M. Galanis N. and Ballivy G. 1997. Calculation of the periodic temperature field in a concrete dam. Canadian Journal of Civil Engineering. 24: 772-84.
 7. Duffie J. and Beckman W. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons. 140 p.
 8. Federal Energy Regulatory Commission. 1999. Chapter 11 - Arch Dams. In Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects. Washington, DC 20426: Division of dam safety and inspections.
 9. Labibzadeh M. and Khajehdezfuly A. 2010. Hydro-thermal safety control of Karun-1 Dam under unusual reservoir level reduction. Journal of American Science. 6(11): 179-84.
 10. Leger P. Venturelli J. and Bhattacharjee S. 1993. Seasonal temperature and stress

