

تحلیل حرارتی سد بتن غلتکی در طول دوره ساخت با استفاده از مدل اجزای محدود

مجید پاسبانی خیاوی*^۱محمد موسوی^۲مرتضی علی قربانی^۳

چکیده

تغییرات درجه حرارت بتن در زمان ساخت و در زمان بهره‌برداری سدهای بتن غلتکی (RCC) به دلیل ایجاد تنش‌های کششی و ترک در مطالعه تنش‌های حرارتی این‌گونه سدها بسیار مهم است. در این مقاله به بررسی تأثیر تغییر درجه حرارت بر روند ایجاد و توزیع تنش‌های کششی در سدهای بتنی غلتکی پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی و تحلیل از نرم‌افزار Ansys که مبتنی بر روش اجزای محدود است، استفاده می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که شروع اجرا در فصول سرد سال و استفاده از روش پیش سرد کردن مصالح به‌منظور کاهش حرارت حداکثر سازه در زمان اجرا در ماه‌های گرم سال، سبب کاهش تنش‌های حرارتی تولیدشده در بدنه سد می‌شود. همچنین نتایج حاصل از تحلیل نشان‌دهنده کاهش مقدار تنش‌ها در هنگام در نظر گرفتن وزن لایه‌ها در آنالیز بوده و ایجاد توقف در اجرا برای ماه‌های گرم سال جهت کاهش دمای بیشینه هسته سد دارای راندمان بالایی در کاهش میزان تنش‌های حرارتی است.

واژه‌های کلیدی

سد بتن غلتکی، انتقال حرارت، روش اجزای محدود، تنش کششی، ترک حرارتی

۱. دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، pasbani@uma.ac.ir

۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

مقدمه

محدود بررسی کردند. آن‌ها برای محاسبه حرارت ناشی از هیدراتاسیون از یک تابع نمایی وابسته به زمان استفاده کرده و نرخ افزایش دمای آدیاباتیک را محاسبه کردند. از پژوهش‌های دیگر در این زمینه می‌توان به مدل آگولو^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۵ اشاره کرد. آن‌ها رفتار حرارتی سدها را در طول مدت بهره‌برداری بررسی کردند و تأثیر پارامترهایی نظیر اثر دمای محیط، دمای آب رودخانه و ضریب انتقال حرارت روی حرارت ایجادشده در سد بتنی را نشان دادند. هینکس^۶ و کوپلی^۷ در سال ۱۹۹۹ با در نظر گرفتن اثر تابش خورشیدی نشان دادند که انتخاب سرعت اجرایی کمتر از سرعت برنامه‌ریزی شده در هوای گرم، باعث می‌شود که دمای بالاتری نسبت به دماهای پیش‌بینی شده ایجاد شود. در صورتی که طول بلوک‌های بتن‌ریزی کمتر شود، افت سریعی در تنش‌های بیشینه سد دیده نمی‌شود. در ادامه، نتیجه تحقیق لونا^۸ و وو^۹ در سال ۲۰۰۰ نشان داد که اگر اجرای سد در فصول سرد سال انجام شود، دمای حداکثر سد کاهش پیدا می‌کند. طبق مطالعه سرورا^{۱۰} در سال ۲۰۰۳ می‌توان دریافت که پیش سرد کردن بتن قبل از اجرا دارای کارایی مطلوب به لحاظ کنترل تنش‌های حرارتی نیست. همچنین از تحقیقات انجام‌شده در زمینه حرارت سدها می‌توان به بررسی توزیع دما در بدنه سد بتنی وزنی و آنالیز حرارتی برای سد بتن غلتکی RCC به‌منظور بررسی پاسخ حرارتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ANSYS که توسط ملکاوی^{۱۱} در سال ۲۰۰۳ انجام شده است، اشاره کرد. در این پژوهش تغییرات حرارت بدنه سازه و نحوه توزیع آن مورد بررسی قرار گرفت. کوزمانوویچ^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل عددی سه‌بعدی را با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی ویسکوالاستیک برای سد بتنی

دمای بتن بر اثر حرارت بالای تولیدشده در طی واکنش هیدراتاسیون^۱ سیمان در سازه‌های حجیم و در کنار آن تأثیر عوامل محیطی و تغییرات حجمی سازه باعث تولید تنش‌های کششی در بتن می‌شود. مهم‌ترین عامل در ایجاد تنش کششی و ترک‌خوردگی در سدها، وجود عامل محدودکننده‌ای است که در مقابل کاهش حجم بتن ناشی از انقباض، مقاومت می‌کند. به دلیل اهمیت تحلیل حرارتی سد، مطالعات زیادی در زمینه شبیه‌سازی رفتار حرارتی سد در مدت‌زمان اجرا و دوره بهره‌برداری انجام‌گرفته است (حیدری و احمدی، ۱۳۹۰).

در ایران نعمتی و همکاران در سال ۱۳۸۵ با استفاده از مدل اجزای محدود، خطر ترک‌خوردگی حرارتی را در سدها مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها تولید و توزیع حرارت در بتن حجیم بررسی شده و با بررسی روند ایجاد تنش‌های حرارتی و عوامل مؤثر بر آن‌ها، روش‌های کنترل تنش‌های حرارتی مانند استفاده از لوله‌های پس‌سرمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها تأثیر پیش‌سرمایش و پس‌سرمایش را در کنترل ترک‌خوردگی حرارتی نشان می‌دهد. همچنین تحلیل اثر حرارت محیطی و هیدراتاسیون سیمان در یک سد بتن غلتکی توسط حیدری و احمدی در سال ۱۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات خواص بتن نسبت به زمان، روند اجرای سد نیز مدل شده است. برای سطوح مختلف؛ همچنین شرایط مرزی تابش، همرفت محیط و تابش خورشیدی و برای مرز پی، شرط آدیاباتیک^۲ در نظر گرفته شده است. ایشیکاوا^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۱ تحلیل حرارتی سد بتنی وزنی را با استفاده از نرم‌افزار ادینا^۴ انجام دادند و با توجه به افزایش مدول الاستیسیته بتن با زمان، روند توزیع دما و تنش‌های ناشی از حرارت را با استفاده از روش اجزای

۵. Agullo

۶. Hinks

۷. Copley

۸. Luna

۹. Wu

۱۰. Cervera

۱۱. Malkawi

۱۲. Kuzmanovic

۱. Hydration

۲. Adiabatic

۳. Ishikawa

۴. Adina

می‌تواند جامد یا سیال باشد وجود داشته باشد از واژه هدایت برای معرفی نوع انتقال گرمای این محیط استفاده می‌شود. در این تحقیق اثرات توزیع دما که به روش انتقال حرارت هدایتی انجام می‌گیرد مورد بررسی قرار گرفته است. در انتقال هدایتی، جابجایی گرما به وسیله تماس مستقیم ذرات یک ماده صورت می‌پذیرد به عبارت دیگر گرما زمانی از طریق هدایت انتقال می‌یابد که اتم‌های مجاور در یک ماده در برابر هم مرتعش شوند و یا الکترون‌ها از اتمی به اتم دیگر حرکت کنند. برای یافتن توزیع درجه حرارت در داخل توده بتنی، روش مناسب و دقیق انجام آنالیز حرارتی توده بتنی، استفاده از روش اجزاء محدود است.

معادله پخش گرما در حالت کلی یک معادله دیفرانسیلی مشتقات جزئی غیرهمگن و مرتبه دو است که با حل آن به کمک شرایط مرزی و اولیه، توزیع دما در جسم به دست می‌آید. توزیع دما رابطه‌ای است که دما را به مکان و زمان ارتباط می‌دهد به طوری که با معلوم بودن مختصات نقطه در هر زمان به کمک این رابطه می‌توان دما را در آن نقطه تعیین کرد. معادله پخش گرما و شار حرارتی در مختصات دکارتی به صورت زیر است (بجان^۲، ۲۰۰۴):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

T دمای ناحیه برحسب [°k]، ρ چگالی برحسب [kg/m³]. K_x، K_y و K_z ضرایب هدایت حرارتی جسم برحسب [w/m²°k]، C گرمای ویژه برحسب [J/kg°k] و Q نرخ تولید حرارت داخلی برای واحد حجم جسم برحسب [w/m³] می‌باشد.

شرایط مرزی و اولیه

حل معادله دما مستلزم داشتن دو شرط مرزی به ازای هر مختصات مکانی (چون نسبت به مکان از مرتبه دوم است) و یک شرط اولیه است چون نسبت به زمان از مرتبه اول است می‌باشد. در اختیار داشتن شرایط مرزی در مسائل

وزنی ارائه دادند و با رفتار واقعی سد مقایسه کردند. نتایج مدل پیشنهادی آن‌ها تطابق خوبی با رفتار واقعی سد به لحاظ توزیع تنش و ترک نشان داد. در ادامه مطالعات، کوزمانوویچ و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی راستای گسترش ترک در سد بتنی غلتکی پرداختند و نشان دادند که بحرانی‌ترین وضعیت برای گسترش ترک در امتداد محور سد است. خانزائی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به تغییرات تنش‌های حرارتی و توزیع تنش‌ها در سد کینتا^۱ را بعد از ساخت و در طول بهره‌برداری بررسی کردند و نشان دادند که تنش‌های حرارتی در زمان بهره‌برداری افزایش می‌یابد ولی موقعیت و روند توزیع آن‌ها معمولاً مشابه است. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که همواره یکی از مشکلات مدل‌سازی سیستم سد جهت تحلیل حرارتی، اعمال دمای محیط متناسب با زمان اجرای هر لایه‌ی بتن‌ریزی می‌باشد. در واقع تاکنون در بسیاری از مدل‌سازی‌ها اثر دمای محیط به صورت عدد ثابت در نظر گرفته شده است که در واقعیت این چنین نیست و هر قشر بتن‌ریزی دارای شرایط محیطی خاص خود است؛ بنابراین هر لایه بسته به زمان اجرا و شرایط محیطی در همان مقطع زمانی باید در مدل وارد شده و مورد تحلیل قرار گیرد. با توجه به موارد ذکر شده، در این مقاله مدل‌سازی حرارتی گذرا و بررسی توزیع تنش با استفاده از نرم‌افزار Workbench که یکی از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار Ansys بوده و مبتنی بر روش اجزای محدود است، انجام می‌شود. این نرم‌افزار قابلیت اعمال دما و شرایط محیطی را با دقت کافی برای هر لایه بتن‌ریزی به صورت مجزا دارا است.

انتقال حرارت و معادلات حاکم

انتقال حرارت (گرما) جریان انرژی ناشی از اختلاف دماست. هنگامی که اختلاف دما در یک محیط یا بین اجسام وجود داشته باشد انتقال گرما بایستی رخ دهد. انواع مختلف فرایندهای انتقال گرما شیوه‌های انتقال حرارت نامیده می‌شوند. اگر گرادیان دما در محیط ساکنی که

که در آن λ مکان لایه مشترک، t زمان و K ضریب هدایت گرمایی می باشد.

مدل سازی و مطالعه موردی

سیستم مورد مطالعه شامل مدل سد و فونداسیون است. از سد بتنی وزنی ژاوه^۱ که از نوع بتن غلتکی RCC است و در استان کردستان، روی رودخانه ژاوه قرار دارد، به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. مقطع عرضی این سازه که دارای ارتفاع ۸۶/۵ متر و عرض تاج ۱۲/۷ متر می باشد در شکل (۱) نمایش داده شده است (شرکت ساختمانی ژیان، ۱۳۸۹).

مدل عددی به کاررفته جهت آنالیز حرارتی دوبعدی در این تحقیق یک مدل اجزای محدود است که بدنه سد از ۱۷۳ لایه (لایه بتن ریزی)، هر کدام به ضخامت ۵۰ سانتیمتر تشکیل شده است. هر لایه در جهت افقی بین ۴۰ (در لایه های بالایی) تا ۲۸۰ قسمت (در لایه های پایینی) و در جهت قائم به ۳ قسمت تقسیم شده است. لذا مدل ۲۴۱۹۱۲ گره و ۶۳۰۹۲ المان دارد. همچنین گام زمانی برای آنالیز حرارتی هر لایه سه شبانه روز (۷۲ ساعت) در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مدل برای حالات مختلف، آنالیز خواهد شد مش بندی بدنه سد به صورت پارامتری در نظر گرفته شده است؛ یعنی در ابتدای برنامه مشخصات هندسه سد و نیز ضخامت لایه بتن ریزی و تعداد تقسیم بندی هر بعد سد برای مش بندی به برنامه به عنوان پارامتر ورودی داده می شود تا تغییرات پاسخ های بحرانی سازه نسبت به اندازه المان ها مشخص گردد.

غیردائمی مانند پژوهش حاضر بسیار مهم است. چراکه زمان عامل مؤثر در تعیین پاسخ های مسئله است. شرایط مرزی استفاده شده در این پژوهش به صورت زیر می باشند (بجان، ۲۰۰۴).

الف- شرط مرزی جابجایی: این حالت از موازنه انرژی در سطح ماده که در آن گرمایش یا سرمایش توسط انتقال حرارت جابجایی وجود دارد به دست می آید. شکل کلی آن به ترتیب در فرایند گرمایش و سرمایش به صورت معادله ۲ می باشد که در آن x مکانی معلوم بوده که تبادل حرارتی در آن صورت می گیرد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h[T(x, t) - T_{\infty}] \quad (2)$$

که در آن که در آن h ضریب همرفت بر حسب $[w/m^2 \cdot k]$ و معرف دما می باشد.

انتقال حرارت از طریق همرفت پدیده پیچیده ای است و در تحلیل های عددی از متغیرهای بسیاری تأثیر می پذیرد که شامل شکل سطح، نرمی و زبری سطح، لزجت و سرعت سیال دارای مرز مشترک با جسم است. با این وجود فرمول های پیشنهادی زیر می توانند در حرارت انتقال یافته از طریق همرفت با دقت مناسب به کار روند.

$$h = 5.7 + 3.8V \quad (3)$$

$$h = 2.8 + 3V \quad (4)$$

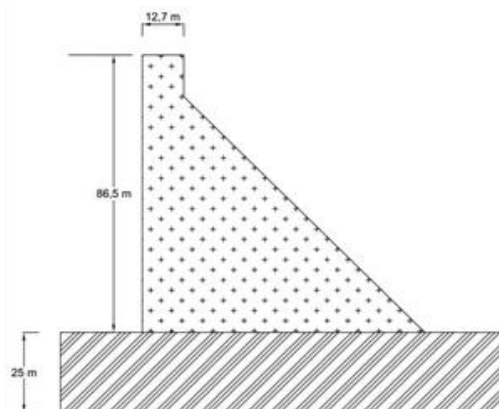
در این روابط، V سرعت هوا در محیط اطراف بر حسب $[m/sec]$ می باشد.

ب- شرط مرزی لایه مشترک: در لایه مشترک دو جسم A و B که در تماس با هم قرار دارند هر دو عامل دما و نرخ انتقال حرارت باید یکسان باشند؛ بنابراین شرایط مرزی در مرز مشترک دو قشر بتن ریزی شده به صورت زیر خواهد بود.

$$T_A(x, t) = T_S(x, t) \quad (5)$$

$$-K_A \frac{\partial T_A(x, t)}{\partial x} = -K_S \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} \quad (6)$$

اجرای دولایه متوالی ۳ شبانه‌روز در نظر گرفته شده است. برای تحلیل مدل مورد نظر، مصالح سد بتنی و پی دارای رفتار همگن، خطی و ایزوتروپیک فرض می‌شوند. با توجه به اینکه هدف اصلی تحقیق بررسی تحلیل حرارتی سد بتنی می‌باشد، از این رو سیستم سد و فونداسیون به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و خاک زیر فونداسیون سد صلب فرض شده و تأثیر تغییرات درجه حرارت بر بتن بدنه مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه ابعاد براساس سیستم SI است. مدول الاستیسیته، وزن واحد حجم و ضریب پواسون برای بتن بدنه سد به ترتیب ۲۵ گیگا پاسکال، ۲۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، خواص حرارتی مخلوط RCC مانند هدایت حرارتی، گرمای ویژه و ضریب همرفت محیط مطابق با جدول (۱) انتخاب شده است.

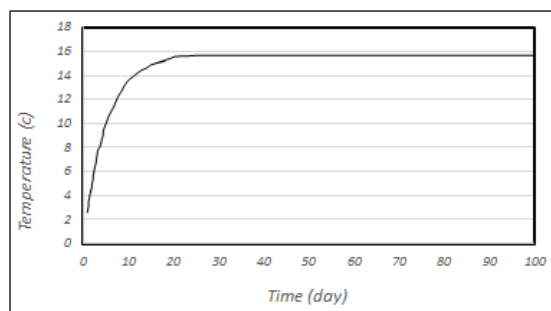


شکل (۱): مقطع عرضی سد بتن غلتکی زاوه

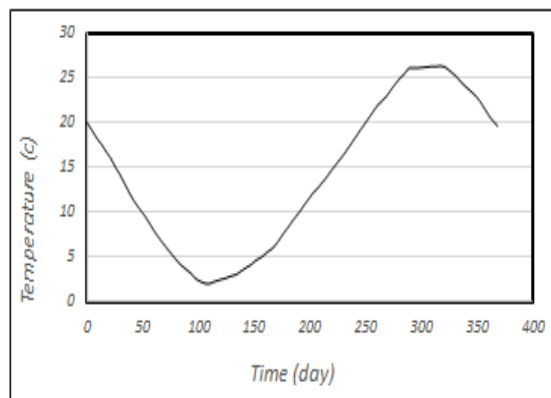
در طرح اختلاط مخلوط RCC زاوه از سیمان ارومیه استفاده شده است. نمودار افزایش دمای آدیباتیک مخلوط سد زاوه همراه با ۲۵ درصد پوزولان به صورت شکل (۲) است (منفرد و والامنش، ۱۳۸۷).

جدول (۱): خواص حرارتی مخلوط بتن غلتکی

پارامتر	مقدار	واحد
ضریب هدایت حرارتی (K)	۲/۹۶	$W/m^{\circ}C$
گرمای ویژه (C)	۹۷۰	$J/kg^{\circ}C$
ضریب همرفت (h)	۱۵۰۰۰۰۰	$J/m^2 * day^{\circ}C$



شکل (۲): نمودار افزایش دمای آدیباتیک مخلوط برای سد زاوه همچنین دمای هوا در ساختگاه سد زاوه با توجه به گزارش‌های بخش منابع آب شرکت مشانیر، به صورت منحنی شکل (۳) است.



شکل (۳): نمودار تغییرات دمای هوا در ساختگاه سد زاوه

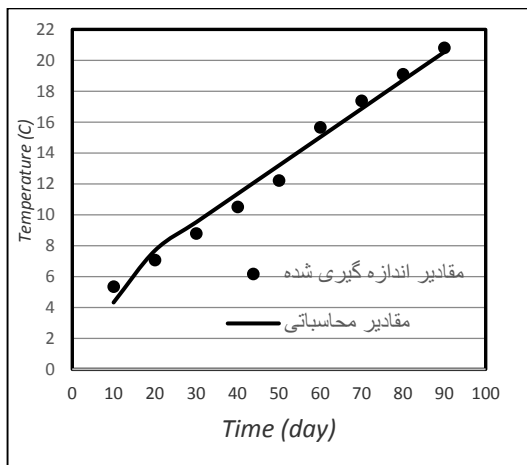
تحلیل حرارتی
برای آنالیز حرارتی از نرم‌افزار Ansys که مبتنی بر روش اجزای محدود است، استفاده شده است. این برنامه همه قابلیت‌های لازم جهت تحلیل حرارتی در طول اجرای سد را دارا است. آنالیز حرارتی مدل با توجه به زمان‌بندی اجرای کل مجموعه سد و فونداسیون، همچنین زمان اجرای هر لایه‌ی بتن‌ریزی انجام شده است. به طوری که درجه حرارت هر لایه‌ی بتن‌ریزی تحت تأثیر شرایط اعمال شده دچار تغییر می‌شود.

شبکه‌بندی بهینه

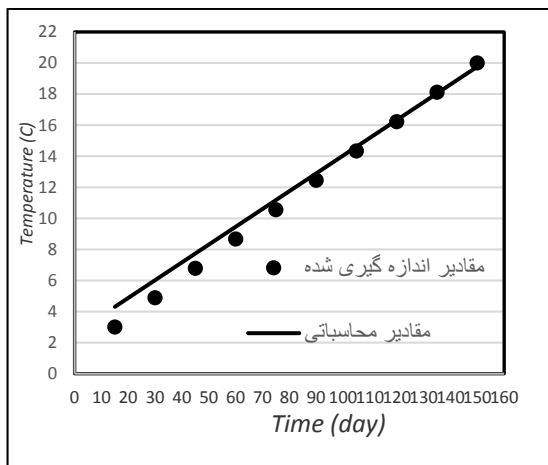
هنگامی که پاسخ‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود به تعداد شبکه‌بندی بستگی نداشته باشد، یعنی با انتخاب

در این تحلیل دمای اولیه بتن ۱۵ و دمای متوسط سالیانه ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد است. همچنین فاصله زمانی بین

برای صحت‌سنجی، نتایج آنالیز حرارتی در این مقاله با مقادیری که از کانتورهای حرارتی ارائه شده که توسط شرکت ساختمانی ژیان در سال ۱۳۸۹ برای تراز ۴ متری از سد ژاوه گزارش شده است (هینکس و کوپلی، ۱۹۹۹)، مقایسه می‌شود. به این منظور، نتایج ارائه شده در محل ساخت با نتایج حاصل از این پژوهش به صورت شکل (۵) و (۶)، برای تراز ۴ متری در زمان‌های ۹۰ و ۱۵۰ روز پس از شروع اجرا مقایسه می‌شود.



شکل (۵): دمای نقاط واقع در تراز ۴ متری (پایان دی‌ماه)

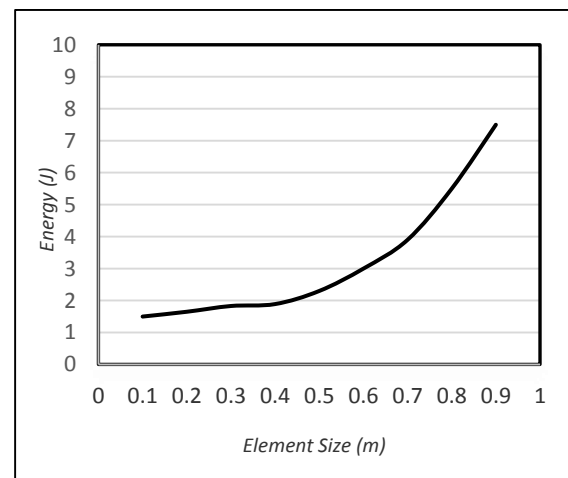


شکل (۶): دمای نقاط واقع در تراز ۴ متری (پایان بهمن‌ماه)

نوآوری پژوهش

همواره یکی از مشکلات مدل‌سازی سیستم سد جهت تحلیل حرارتی، اعمال دمای محیط متناسب با زمان اجرای هر لایه بتن‌ریزی است. در برخی از مدل‌سازی‌ها اثر دمای محیط به صورت عدد ثابت در نظر گرفته شده است که در واقعیت چنین نیست و هر قشر بتن‌ریزی دارای

شبکه‌بندی کوچک‌تر تأثیری در پاسخ‌ها مشاهده نشود، شبکه‌بندی (مش‌بندی) ایده‌آل گفته می‌شود و مدل موردنظر به استقلال از شبکه‌بندی رسیده است. یکی از روش‌های کنترل کیفیت مش‌بندی، استفاده از کانتور Error است که نشان‌دهنده تغییرات سریع انرژی در المان‌های مجاور است؛ بنابراین می‌توان گفت دستور Error Error قادر به شناسایی مناطقی از مدل می‌باشد که در محاسبه تنش دارای خطای بالایی هستند و اینکه در چه نقاطی نیاز به ریزتر نمودن المان‌بندی است تا جواب دقیق‌تری حاصل شود. بهبود شبکه‌بندی باعث کاهش تغییرات سریع مقدار انرژی در المان‌های مجاور می‌شود. با کوچک شدن المان‌ها از تغییرات انرژی در المان‌های مجاور به حد کافی کاسته شده و به مقدار قابل قبولی می‌رسد که در نتیجه مش سطح موردنظر بهبود یافته است. برای این منظور شبکه‌بندی‌های مختلف برای مدل مورد مطالعه انجام شده است تا بهترین حالت برای شبکه‌بندی به دست آید.

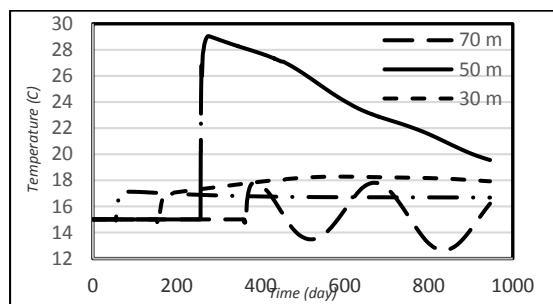


شکل (۴): نمودار تغییرات مقدار تبادل انرژی نسبت به اندازه المان‌ها

در شکل (۴) رسیدن به معیار مناسب از لحاظ شبکه‌بندی برای انرژی منتقل شده بین المان‌ها در حالت حداکثر انرژی براساس ژول ارائه شده است. با توجه به موارد فوق، برای شبکه‌بندی مدل مورد مطالعه، مقدار ۰/۳ متر برای اندازه المان‌ها در نظر گرفته شده است؛ زیرا در این حالت تغییرات مقادیر پاسخ‌های بحرانی سازه، بسیار ناچیز است و نمودار آن به ثبات و همگرایی رسیده است.

صحت‌سنجی

برای المان‌های واقع در مرکز لایه‌ها برای ترازهای مختلف در شکل (۷) آورده شده است.



شکل (۷): روند تغییرات حرارت سد در ترازهای مختلف در طول ساخت

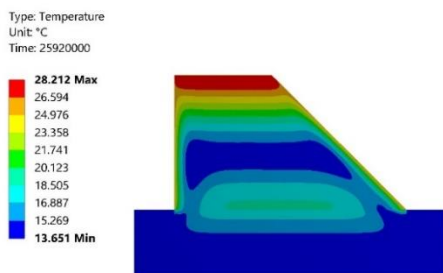
شکل (۷)، نمودارهای توزیع دما در بدنه سد برحسب روز را در ترازهای ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ متر در انتهای زمان آنالیز، برای المان‌های واقع در میانه‌ی لایه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت که در طول دوره ساخت، هر قشر اجراشده حتی قشرهای زیرین همواره تحت تأثیر حرارت لایه‌های جدید بتن‌ریزی شده قرار می‌گیرند. در هر نمودار قسمت ابتدایی آن دارای دمای ثابت برابر با ۱۵ درجه سانتی‌گراد، همان دمای اولیه مدل‌سازی است که این دمای ثابت تا زمان اجرای هر لایه ادامه دارد. برای مثال نمودار حرارت المان واقع در تراز ۳۰ متری که شامل ۶۰ لایه بتن‌ریزی می‌باشد و با توجه به اینکه زمان لازم جهت اجرای هر لایه ۳ شبانه‌روز است در نتیجه این نمودار تا ۱۸۰ روز بعد از شروع اجرا دارای دمای ثابت برابر با دمای اولیه خواهد بود.

همچنین این نمودارها نشان می‌دهند در لایه‌های ابتدایی مراحل ساخت (ترازهای پایین) که در فصل پاییز اجرا می‌شوند و دمای محیط نسبتاً کم است، لایه‌ها ابتدا به دلیل حرارت بالای مخلوط در دمای بالاتری قرار دارند. سپس با وارد شدن به فصل زمستان که دمای هوای محیط به حداقل خود می‌رسد، نمودار تغییرات دمای لایه‌ها، روند کاهشی دارد که این مسئله در نمودار تراز ۱۰ متری مشهود است. لایه‌هایی که در ترازهای میانی سازه قرار دارند مانند تراز ۳۰ و ۵۰ متری عمدتاً در شش‌ماهه‌ی دوم ساخت، یعنی در بهار و تابستان اجرا می‌شوند. در این دوره دمای محیط نسبتاً بالا است، به‌طوری‌که دمای سازه در

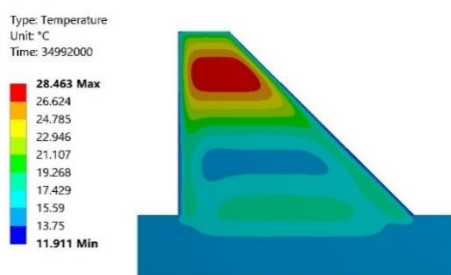
شرایط محیطی خاص خود است؛ بنابراین هر لایه بسته به زمان اجرا و شرایط محیطی در همان مقطع زمانی باید وارد مسئله شده و مورد تحلیل قرار گیرد. در این تحقیق دما و شرایط محیطی با دقت کافی و برای هر لایه بتن‌ریزی به‌صورت مجزا در نظر گرفته‌شده و وارد مسئله می‌شود. همچنین یکی دیگر از موارد برجسته تحقیق، نشان دادن قابلیت نرم‌افزار Ansys در تحلیل حرارتی سد بتنی غلتکی می‌باشد که به لحاظ زمان تحلیل و مطالعات پارامتری دارای کارایی بسیار مناسب است.

نتایج تحلیل حرارتی

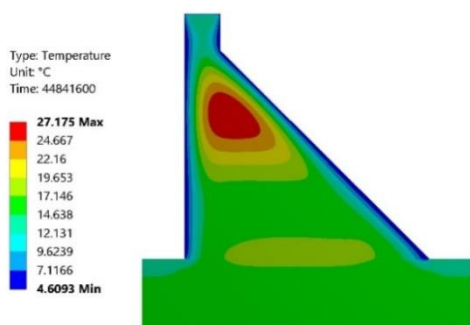
پروژه اجرای سد شامل یک دوره ۵۱۹ روزه است. شروع بتن‌ریزی روز یکم مهرماه سال ۱۳۸۶ در نظر گرفته‌شده است. با توجه به این موضوع، روند اجرای سد (عملیات بتن‌ریزی) سه دوره شش‌ماهه را شامل می‌شود. ابتدا مراحل اجرا در یک شش‌ماهه‌ی سرد (پاییز و زمستان ۸۶) قرار دارد و تحت تأثیر دمای پایین محیط قرار می‌گیرد. سپس با ادامه پیدا کردن روند اجرا، وارد شش‌ماهه‌ی اول سال ۸۷ می‌شود. این شش‌ماه دارای درجه حرارت به‌مراتب بالاتری است و در این زمان می‌توان تأثیر دمای محیط بالاتر را به‌صورت مشخص روی درجه حرارت لایه‌ها ملاحظه کرد. به‌طوری‌که بعد اتمام اجرای سد، لایه‌های یک‌سوم میانی سازه که در این دوره شش‌ماهه اجراشده‌اند دارای حرارت بیشتری هستند. در ادامه، اجرا و بتن‌ریزی لایه‌های بدنه سد وارد شش‌ماهه‌ی سوم (پاییز و زمستان ۸۷) می‌شود. در این دوره نیز دمای هوای محیط کاهش‌یافته و تأثیر مستقیمی بر حرارت لایه‌ها دارد، به‌طوری‌که سد در لایه‌های یک‌سوم بالایی خود دماهای پایین‌تری را تجربه می‌کند. اجرا و بتن‌ریزی سد در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۰۲ پایان می‌یابد. علاوه بر شبیه‌سازی رفتار حرارتی سد در مدت‌زمان اجرا، اطلاع از روند تغییرات حرارتی، میزان تنش‌ها و تغییر شکل‌ها، در سال‌های بعد از ساخت و در طول دوره بهره‌برداری نیز بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل در این پژوهش روند تحلیل و مدل‌سازی سد برای ۴۵۰ روز بعد از اتمام مراحل ساخت نیز انجام‌گرفته است. در ادامه نمودارهای تغییرات حرارت



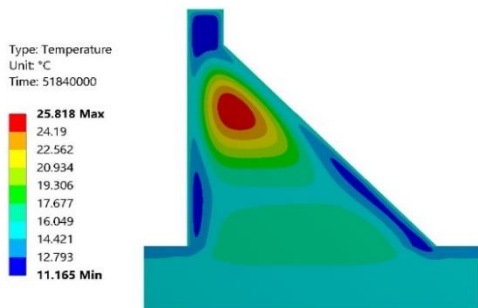
شکل (۱۰): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۷/۰۳/۲۷



شکل (۱۱): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۷/۰۷/۰۳



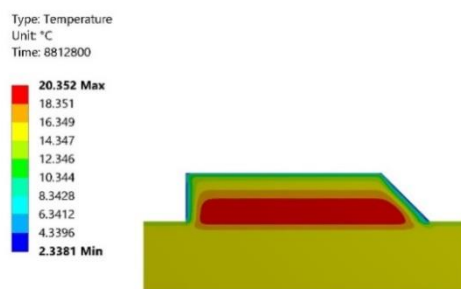
شکل (۱۲): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۰۲



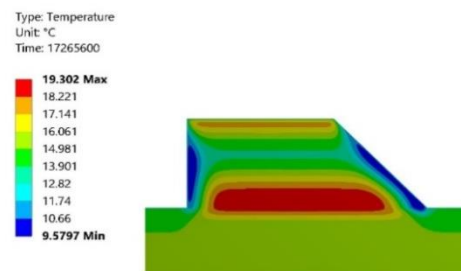
شکل (۱۳): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۸/۰۱/۲۳

اولین تابستان به حداکثر مقدار خود می‌رسد؛ بنابراین بسته به زمان شروع اجرا، محل دمای بیشینه در بدنه سد نیز متغیر خواهد بود. وجود حرارت بالا در لایه‌های یک‌سوم میانی (مانند نمودار تراز ۵۰ متری که شامل ۱۰۰ لایه بتن‌ریزی شده بوده و در شروع تابستان اجرا شده است) باعث می‌شود تا در مرداد ۸۷ سازه سد بیشترین میزان حرارت یعنی ۲۹ درجه سانتی‌گراد را داشته باشد. همچنین مشاهده می‌شود که روند نزولی نمودارها نسبتاً کند است و در آخرین زمان آنالیز، حداقل مقدار آن‌ها از ۱۸ درجه سانتی‌گراد کمتر نمی‌شود. لایه‌هایی که در ترازهایی بالایی سازه قرار دارند به دلیل اجرا شدن در فصل پاییز و درجه حرارت بالای لایه‌های زیرین آن‌ها (لایه‌های که در تابستان اجرا شدند)، در ابتدا درجه حرارت بالا است که با گذشت زمان تحت تأثیر تغییرات دما در فصول مختلف قرار می‌گیرند.

در شکل‌های (۸) تا (۱۵)، تغییرات حرارت لایه‌های بتن‌ریزی برحسب درجه سانتی‌گراد و همچنین روند اجرای سد در فواصل زمانی در حدود ۱۰۰ روز و در تاریخ‌های مشخص در مدت‌زمان ساخت به‌صورت کانتور ارائه شده است.

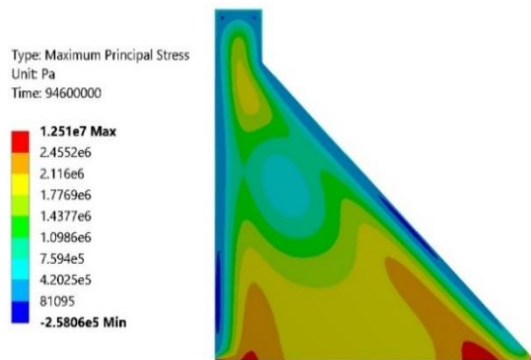


شکل (۸): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۶/۱۰/۱۲



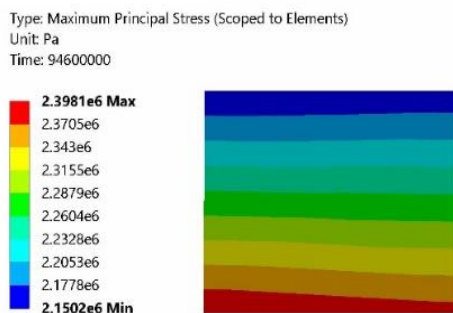
شکل (۹): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۷/۰۱/۲۴

سطوح بتن محدود می‌شوند. با کاهش دما، تنش‌ها در رویه‌های سد از فشاری به کششی تبدیل می‌شوند. این پدیده در ترازهایی که در فصل گرما بتن‌ریزی شده‌اند، سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

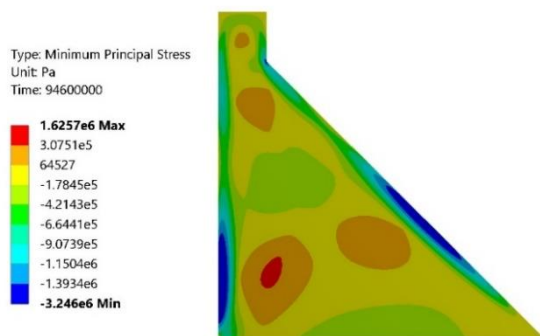


شکل (۱۶): کانتور توزیع تنش کششی حداکثر در بدنه سازه

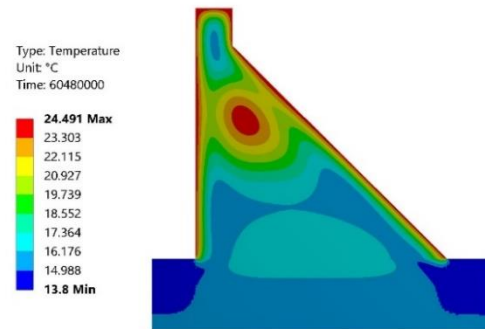
سد



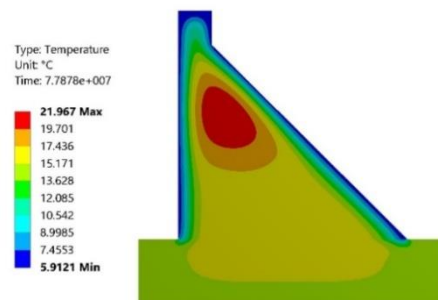
شکل (۱۷): کانتور توزیع تنش کششی حداکثر المان‌های نقاط بحرانی



شکل (۱۸): کانتور توزیع تنش کششی حداقل در بدنه سد



شکل (۱۴): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۸/۰۵/۰۱

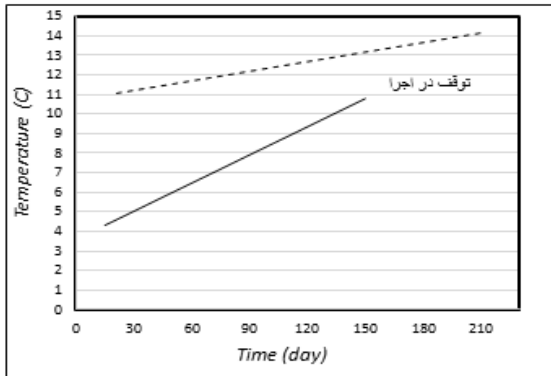


شکل (۱۵): کانتور توزیع حرارت لایه‌ها در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲۰

نتایج پاسخ‌های تنش و تغییر مکان

برای بررسی نتایج تنش، کانتور تنش در مقطع سد در مقاطع مختلف زمانی و برای حالات مختلف برای نقاط بحرانی با بیشترین پاسخ، در نظر گرفته شده است. در تمامی حالات اصلی آنالیز تنش، از وزن لایه‌ها صرف‌نظر شده است تا فقط تنش‌های ناشی از تغییر درجه حرارت مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) مشاهده می‌شود که در زمان‌های مختلف اجرای سد، تنش‌های کششی حداکثر در رویه و بستر اتفاق می‌افتد. علت ایجاد تنش‌های کششی در رویه‌های بالادست و پایین دست، گیرداری ناشی از تغییرات گرمایی محیط و تنش‌های کششی بستر به علت قید خارجی است. نوسان‌های فصلی دمای محیط و توزیع و تولید غیریکنواخت دما سبب ایجاد کرنش کششی به علت قید داخلی در رویه‌ها می‌شود که به خاطر پایین بودن هدایت حرارتی بتن، شیب‌های حرارتی ناشی از اختلاف دمای داخلی بتن و محیط اطراف به فاصله ۶ تا ۱۰ متری از

برای بررسی اثر توقف در اجرا، در انتهای بهمن ماه یک وقفه دوماهه در عملیات اجرای سد در نظر گرفته می شود. شکل (۲۰)، اثر توقف ۶۰ روزه در اجرا را بر روی نمودار تغییرات حرارت لایه پنجاهم بتن ریزی و لایه های زیرین آن را در زمان ۲۱۰ روز پس از شروع اجرا، در دو حالت بدون توقف و همراه با توقف را برای لایه ۵۰ نمایش می دهد.

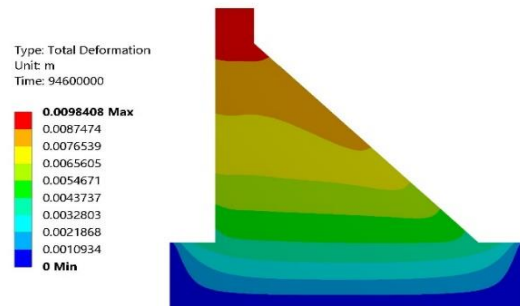


شکل (۲۰): نمودار توزیع حرارت ۵۰ لایه ای اجرا شده تا انتهای بهمن ماه

در شکل (۲۰)، هر دو نمودار تغییرات حرارت لایه ها در زمان انتهای فروردین ارائه شده است. این نمودارها نشان می دهند زمانی که در مدل سازی توقف در اجرا اعمال شده است، دمای لایه پنجاهم که به مدت دو ماه در معرض دمای هوای محیط قرار گرفته است ۱/۵ درجه سانتی گراد کمتر از حالت بدون وقفه که لایه پنجاهم تنها سه روز در معرض هوای محیط بوده است. این کاهش دما برای حالت همراه با وقفه، برای لایه های زیرین بیشتر است. شیب نمودار تغییرات حرارت لایه های ریخته شده (لایه پنجاهم و لایه های زیرین آن) نسبت به حالت بدون وقفه بسیار تندتر است و میزان کاهش دما بیشتر شده است. بیشترین حالت این کاهش مربوط به لایه های تحتانی و حدود ۸ درجه سانتی گراد می باشد. در حالت بدون وقفه یعنی زمانی که لایه های بالایی بتن ریزی بعد از سه روز بر روی لایه پنجاهم قرار داده شده است تغییرات حرارت لایه ها کمتر بوده و نمودار شیب ملایم تری دارد. با توجه به موارد فوق می توان دریافت که وقفه در اجرا تأثیر اندکی بر روی نتیجه پایانی خواهد داشت؛ اما اعمال توقف در اجرا می تواند در ماه های گرم سال نتیجه مطلوبی داشته باشد زیرا ایجاد این

در هر مرحله از تحلیل تنش، مقادیر تنش کشش اصلی (حداکثر) به صورت خروجی، دریافت می شود. اگر تنش کششی مجاز بتن در مدل سازی برابر ۲/۵ مگاپاسگال در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه حداکثر مقدار تنش کششی تولید شده در بدنه حدود ۴ مگاپاسگال است می توان گفت که تنش های ناشی از حرارت می توانند در بعضی از نقاط سد، سبب به وجود آمدن ترک های کششی گردند. همچنین باید توجه داشت که ترکیب تنش های ناشی از حرارت همراه با تنش های حاصل از بارهای اصلی دیگر نظیر زلزله، می تواند بسیار حائز اهمیت باشد چراکه تنش های حرارتی می توانند به تشدید تنش های حاصل از سایر بارها کمک کنند و در نتیجه باعث ایجاد ترک و کاهش دوام سازه سد گردند. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه هدف اصلی مقاله، بررسی رفتار حرارتی سد بتن غلتکی در طول دوره ساخت سد است در مدل سازی و تحلیل ها، مشخصات مکانیکی مصالح ثابت در نظر گرفته شده است.

همان طور که انتظار می رفت مقدار حداکثر تغییر شکل برای بدنه سازه، ناشی از حرارت ایجاد شده در طول بتن ریزی (بدون در نظر گرفتن وزن لایه ها) در ناحیه تاج سد اتفاق می افتد و در بیشینه ترین حالت خود، مقداری برابر با ۹/۸۴ میلی متر را دارد. در شکل (۱۹) میزان تغییرات تغییر شکل کلی بدنه سد آورده شده است. همچنین برای انجام آنالیز با دقت بیشتر، تغییر شکل المان های واقع در نواحی بحرانی سازه از جمله تاج سد مورد بررسی قرار می گیرند.

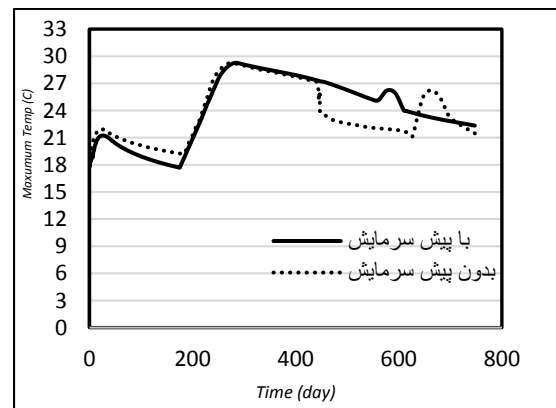


شکل (۱۹): کانتور توزیع تغییر شکل در بدنه سد

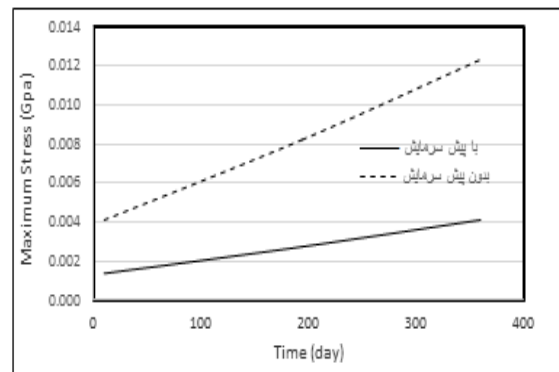
شکل (۲۱) نشان می‌دهد که در روزهای ابتدایی شروع بتن‌ریزی، پیش سرد کردن مصالح حدود ۱ درجه سانتی‌گراد دمای بیشینه سازه را کاهش می‌دهد. برای مثال دمای حداکثر سازه در روز ۱۰۲ ام بعد از شروع اجرا، یعنی زمانی که لایه‌ی ۳۴ ام سازه بتن‌ریزی می‌شود از دمای $20/36^{\circ}\text{C}$ به $19/20^{\circ}\text{C}$ کاهش می‌یابد. این کاهش دما تا روزهای پایانی زمان ساخت سد نیز ادامه پیدا می‌کند اما مقدار بسیار ناچیزی است. به طوری که در روز ۲۰۴ ام بعد از شروع ساخت، اثر پیش‌سرمایش بر روی دمای بیشینه کمی بیشتر از قبل و حدود $1/5$ درجه سانتی‌گراد است. همچنین اثر پیش‌سرمایش مصالح بر روی دمای کمینه لایه‌های زیرین و نزدیک بستر نمود بیشتری دارد. در انتهای زمان ساخت سد، اثر پیش‌سرمایش مصالح بر روی حرارت ایجادشده در بدنه سد بسیار کمتر از روزهای ابتدایی است و به طور کلی می‌توان دریافت که پیش‌سرمایش مصالح، بیشتر باعث کاهش دما در بستر سد می‌شود و تأثیر آن بر روی دمای بیشینه بدنه سد که دمای بحرانی و مهم در تحلیل ترک و دوام سازه است، اندک بوده و بین ۱ تا $1/6$ درجه سانتی‌گراد به ازای ۱۰ درجه پیش سرد کردن مصالح می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۲۴) که نمودار توزیع تنش در مدت ۳۶۵ روز را نشان می‌دهد می‌توان گفت که پیش‌سرمایش مصالح باعث می‌شود که مقدار تنش ماکزیمم در بدنه سد، بین $0/002$ تا $0/008$ گیگاپاسکال کاهش پیدا کند که مقدار قابل توجه‌ای محسوب می‌شود. از این تحلیل می‌توان دریافت که پیش سرد کردن مصالح با توجه به هزینه‌ها و دشواری‌های اجرا، به تنهایی کافی نیست و نمی‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش حرارت ایجادشده در حین ساخت سد باشد، زیرا روند تغییرات دمایی نقاط داخلی سد بیشتر متأثر از دمای محیط و البته حرارت هیدراتاسیون سیمان است. از روش پیش سرد کردن مصالح می‌توان به عنوان یک محرک بسیار خوب برای کاهش زمان توقف لایه‌ها و نیز تسهیل روند اجرا در فصول گرم سال استفاده کرد.

وقفه باعث کاهش دمای بیشینه در هسته سد می‌شود؛ و این موضوع در کنترل ترک‌ها مؤثر خواهد بود. همچنین وقفه در ماه‌های گرم سال، این امکان را فراهم می‌آورد که لایه‌های بعدی و بالاتر در زمانی سردتر (پاییز) نسبت به حالت بدون وقفه اجرا شوند...

یکی از راهکارهای قابل پیش‌بینی جهت کاهش حرارت ایجادشده در بدنه سازه در طول ساخت، پیش سرد کردن مصالح مخلوط RCC است. اگر دمای اولیه مصالح مورداستفاده در مخلوط با اعمال پیش‌سرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد در این صورت، تغییرات حرارت و تنش‌های سازه در زمان‌های مختلف به صورت شکل‌های زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (۲۱) و (۲۲)، نمودار تغییرات حرارت بیشینه و تنش سازه را در طول زمان در نقاط بحرانی با حداکثر دما، برای دو حالت با پیش‌سرمایش و بدون پیش‌سرمایش مصالح نشان می‌دهند.



شکل (۲۱): تغییرات حرارت بیشینه سد در طول دوره ساخت



شکل (۲۲): تغییرات تنش کششی بیشینه مصالح

در این مقاله تحلیل حرارتی سد بتن غلتکی ژاوه به ارتفاع ۸۶/۵ متر در طی زمان ساخت، با استفاده از نرم افزار Ansys مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آنالیز دقیق، تغییرات دمایی محیط به تفکیک روز کاری در طی اجرای سد به مدل اعمال شده و نتایج زیر به دست آمد:

۱- اگر تمهیدات لازم جهت جلوگیری از انجماد و یخ زدگی مصالح صورت گیرد، شروع بتن ریزی و اجرا در زمستان نسبت به فصول دیگر بهتر است. بحرانی ترین حالت برای شروع اجرا، شروع در فصل گرم سال است. چراکه در این حالت تنش های کششی بزرگی در نزدیکی بستر دیده شده و بنابراین ترک های ناشی از قید خارجی در مجاورت بستر ظاهر می شود.

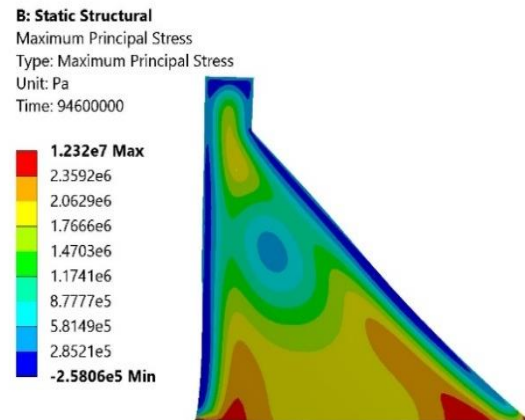
۲- هرچه سرعت اجرا و بتن ریزی لایه ها بیشتر شود اختلاف دمای بتن ریزی و دمای نهایی بتن بیشتر می شود؛ زیرا وقتی بتن ریزی با سرعت بیشتری انجام می گیرد اتلاف حرارت از سطوح بالایی لایه ها کمتر شده و حرارت لایه ها به دمای آدیاباتیک نزدیک تر می شود. هرچه سرعت اجرا کمتر شود، قسمت مرکزی سد سردتر و وسعت منطقه دمای بیشینه نیز، کمتر شده و این منطقه به سمت لایه های زیرین حرکت می کند.

۳- پیش سرمایه مصالح می تواند به عنوان یک محرک قوی و مناسب برای تسهیل روند ساخت و ساز و ایجاد وقفه در ماه های گرم سال در دستور کار قرار گیرد. چراکه به تنهایی نمی تواند راندمان بالایی برای کاهش حرارت در حین ساخت سد داشته باشد علاوه بر این، هزینه و دشواری های پیش سرد کردن مصالح نیز قابل توجه است.

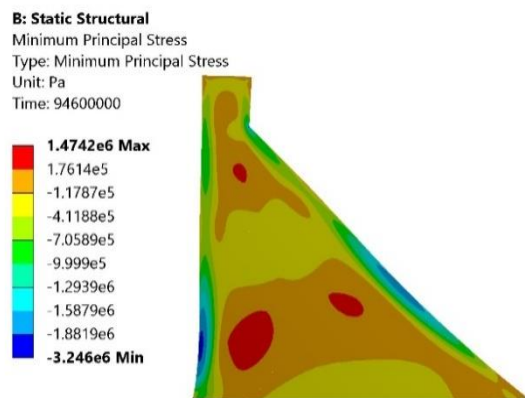
۴- در نظر گرفتن وزن لایه ها در آنالیز تنش در مدل مورد مورد مطالعه، باعث کاهش مقادیر تنش کششی بیشینه و کمینه شده است. این کاهش در لایه های زیرین و خصوصاً در بستر نمود بیشتری دارد.

۵- در این پژوهش با توجه به روند کاهش دمای قسمت مرکزی سد در تحلیل مربوط به ۴۵۰ روز بعد از اتمام اجرا و در دوره بهره برداری، پیش بینی می شود که زمان رسیدن دمای بدنه سد به حالت تعادل نهایی حدوداً یک دهه طول بکشد.

در تمامی حالات اصلی آنالیز تنش در شکل های فوق، از وزن لایه ها صرف نظر شده است و نتایج حاصله برای تنش، تنها ناشی از حرارت سازه بود. برای حالتی که وزن لایه ها نیز در نظر گرفته می شود تحلیل تنش انجام گرفته است که تغییرات نتایج تنش نسبت به حالت اصلی آنالیز در شکل های (۲۳) و (۲۴) مشاهده می شود.



شکل (۲۳): کانتور توزیع تنش بیشینه سازه سد با در نظر گرفتن وزن لایه ها



شکل (۲۴): کانتور توزیع تنش بیشینه سازه سد با در نظر گرفتن وزن لایه ها

شکل های (۲۳) و (۲۴) نشان می دهند که در نظر گرفتن وزن لایه ها سبب کاهش مقادیر تنش های کششی بیشینه و کمینه به خصوص در لایه های ابتدایی اجرا و نزدیک به بستر شده است.

نتایج

- مراجع**
۱. حیدری، نادر و احمدی، محمدتقی. (۱۳۹۰). تحلیل پیشرفته‌ی اثر حرارت محیطی و هیدراتاسیون سیمان در یک سد بتن غلتکی با در نظر گرفتن فرایند ساخت، مجله مهندسی عمران مدرس، جلد ۱۱، شماره ۴، صفحات ۲۹-۴۱.
 ۲. شرکت ساختمانی ژیان. (۱۳۸۹). گزارش تحلیل حرارتی ۴ متری از سد مخزنی ژاوه.
 ۳. نعمتی، مهدی، شکرچی زاده، محمد، نورزاد، اسداله، کاشی، محسن غلامرضا، (۱۳۸۵). بررسی ترک خوردگی حرارتی در سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش اجزای محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
 ۴. منفرد، محمدحسین و والامنش، وحید. آنالیز حرارتی برای سد بتنی وزنی ژاوه، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های برق‌آبی کشور، ۱۳۸۷، تهران
 5. Agullo, L, Aguado. (1995). Thermal behavior of Concrete Dam Due to Environmental Action, *Dam engineering*, 6, 3-21.
 6. Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer*. Duke University, 4th Edition. USA, Wiley, 2013.
 7. Cervera, M, Goltz, M. (2003). A modified 1-D strip model for thermo-mechanical analysis of RCC dams. 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Spain, Madrid. 579-588.
 8. Hinks, J.L. Copley, A.F. (1995). Thermal analysis for RCC dams. *International Symposium on*
9. Ishikawa, M. (1991). Thermal stress analysis of a concrete dam. *Computers and Structures*. 40(2), 347-352.
 10. Khanzaei, P. Abdolrazeg, A. A. Samali, B. Ghaedi, K. (2015). Thermal and Structural Response of RCC Dams During Their Service Life. *Journal of Thermal Stresses*. 38(6), 592-609.
 11. Kuzmanovic, V. Savic, L. Mladenovic, N. (2013). Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams, *Journal of Thermal Stresses*. 36 (2), 113-134.
 12. Kuzmanovic, V. Savic, L. Mladenovic, N. (2015). Thermal-Stress Behaviour of RCC Gravity Dams, *FME Transactions*. 43, 30-34.
 13. Luna, R. and Wu, Y. (2000). Simulation of temperature and stress field during RCC dam construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(5), 381-388.
 14. Malkawi, A. I. H. Mutasher, S.A. and Qiu, T. J. (2003). Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam, *Journal of Performance of constructed facilities*, ASCE, 17(4), 177-187.

Thermal analysis of roller compacted concrete dams during construction using finite element method

Majid Pasbani Khiavi*¹

Mohammad Musavi²

Mortaza Ali Ghorbani³

Abstract

Variation of the degree of concrete heat during construction and operation is very important problem because of induced thermal stresses and cracks in study of thermal stresses. In this paper, the effect of temperature variation on inducing process and distribution of tensile stress in roller compacted concrete dam is investigated. The Ansys software has been used for modeling and transient analysis. According to the results of this study, it can be concluded that the start of construction in the cold season of year and the use of pre-cooling of materials in the warm months of the year in order to reduce the maximum temperature of the structure reduce the induced thermal stresses in dam body. Also, the results of the analysis indicate a decrease in the amount of tensions with considering of the weight of the layers and¹ interrupt in the operating in warm months of the year has a high efficiency in reducing of thermal stresses.

Keywords

RCC dams, heat transfer, finite element method, tensile stress, thermal cracking

1.* Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, pasbani@uma.ac.ir

2. M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran