

# تحلیل پیشرفته‌ی اثر حرارت محیطی و هیدراسیون سیمان در یک سد بتن غلتکی با در نظر گرفتن فرایند ساخت

نادر حیدری<sup>۱</sup>، محمدتقی احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش‌آموخته مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران

mahmadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۰۸/۱۷

**چکیده**- بتن ماده‌ای است که ذاتاً در برابر کشش، ضعیف است و به دلیل تغییر حجم ناشی از تغییر دما، در آن تنش‌های کششی ظاهر می‌شود که در حالات بحرانی سبب بروز ترک می‌شود. به همین دلیل موضوع تنش‌های حرارتی و ترک‌های ناشی از آن در سدهای بتن غلتکی اهمیت ویژه‌ای دارد. از ویژگی‌هایی که در بررسی این مسئله بسیار مهم است ولی کمتر به آن توجه شده، لحاظ کردن تغییرات ضریب هدایت حرارتی و مدول الاستیسیته بتن نسبت به دما، تغییرات مقاومت بتن لایه‌ها نسبت به عمر آن‌ها، مدل‌سازی میزان تولید حرارت هیدراسیون سیمان به صورت متغیر با زمان، مدل‌سازی برنامه زمانی اجرای سد و در نظر گرفتن شرایط مرزی همرفت و تابش برای سطوح شامل تابش خورشیدی است. این پژوهش از موارد نادری است که در آن سعی شده به همه این ویژگی‌ها افزودن بر مسئله‌ی اثر حرارت محیطی، به‌طور هم‌زمان توجه شود تا با اعتماد بیشتری بتوان در مورد ساخت ایمن و اقتصادی این نوع سدها تصمیم گرفت. سرعت‌های مختلف اجرا، شروع اجرا در فصول گرم و سرد سال و توقف اجرا در ماه‌های سرد و گرم سال، پیش‌سرد کردن مصالح به عنوان پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی و تحلیل گذرا و همراه اندرکنش انتقال حرارت و توسعه تنش از نرم‌افزار المان محدود (انسیس ۶/۱) به‌گونه‌ای ویژه بهره گرفته شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان به پایین بودن راندمان پیش‌سرد کردن، مؤثر بودن وقفه در ماه‌های گرم سال در کنترل ترک حرارتی و تأثیر ناچیز وقفه در ماه‌های غیر از فصل گرما در توزیع نهایی دما و بیشینه‌ی دمای بدنه سد اشاره کرد. همچنین اگر از یخ‌زدگی مصالح جلوگیری شود، شروع بتن‌ریزی و اجرا در زمستان، نسبت به فصول دیگر مناسب‌تر است. بحرانی‌ترین زمان شروع اجرای بتن‌ریزی، فصل گرما است.

**کلیدواژه‌گان:** سد بتن غلتکی، انتقال حرارت، شرایط محیطی، المان محدود، تنش کششی، ترک حرارتی، هیدراسیون سیمان

## ۱- مقدمه

است که موارد بالا را تهدید می‌کند. بنابراین هر روش جدید در سدسازی باید شامل تمهیداتی باشد که بتوان به کمک آن احتمال ترک‌خوردگی را کم کرد.

نیاز اساسی در طراحی سدهای بتنی، تضمین یکپارچگی، آب‌بندی و دوام سازه سد است. ترک‌خوردگی بتن عاملی

تعداد فزاینده سدهای بتن غلتکی که در دنیا ساخته شده و در حال ساخت است، روش‌های مناسبی را برای کاهش خطر ایجاد ترک‌های حرارتی مطالبه می‌کند. در ساختمان یک سد بتن غلتکی، بتن‌ریزی بدنه سد روی سطح وسیعی که شامل چندین بلوک است، انجام می‌شود که بعد از ریختن بتن، درزهای عرضی<sup>۱</sup> ایجاد می‌شوند و درزهای طولی<sup>۲</sup> اجرا نمی‌شوند. همچنین در این سدها معمولاً از سیستم خنک‌کننده با لوله‌های آب استفاده نمی‌شود. در نتیجه موارد بالا، سرعت اجرا بالا رفته و زمان اجرا کاهش می‌یابد. بنابراین در سدهای بتن غلتکی، معمولاً مقادیر زیادی از بتن در مدت زمان کوتاهی ریخته می‌شود که حرارت تولیدشده در اثر هیدراسیون سیمان، منجر به افزایش دما در بدنه سد شده که در نتیجه شیب حرارتی قابل توجهی ایجاد می‌شود. این موضوع در بعضی مواقع باعث بروز تنش‌های کششی بزرگ‌تر از مقاومت کششی بتن و در نتیجه بروز ترک‌های حرارتی می‌شود؛ بنابراین برنامه‌ریزی و مدیریت در ساخت این نوع سدها در کاهش و یا کنترل ترک‌های حرارتی بسیار مؤثر است.

شبیه‌سازی رفتار سد از نظر حرارت در مدت زمان ساخت و سال‌های بعد از آن به کمک مجموعه‌ای از مدل‌های ریاضی بر پایه روش اجزای محدود انجام می‌شود. مدل‌های یک، دو و سه‌بعدی در حوزه‌های مختلف مکان و زمان و با اهداف مختلف به کار رفته که در تمام مدل‌ها، انجام آنالیز حرارتی در هر بازه زمانی بر حل معادله انتقال حرارت فوریه استوار است. مدل یک‌بعدی برای تعیین دمای نقاط دور از وجوه سد به کار می‌رود ولی از آنجا که نحوه اجرای سد باعث حذف سطوح جانبی سد می‌شود و می‌توان فرض کرد که هیچ‌گونه شار حرارتی در امتداد محور سد وجود ندارد، کافی است مدل دوبعدی و یا مقطع

عرضی سد بررسی شود.

از مطالعات انجام‌شده در داخل کشور می‌توان به مدل صباغ یزدی و باقری درباره‌ی تحلیل حرارتی اشاره کرد که در این مدل معادلات حاکم بر پدیده تولید و انتقال حرارت در جسم بتنی به صورت دوبعدی، گسسته‌سازی می‌شوند. این مدل طوری تدوین شده است که تحلیل حرارتی کامل سد با هر نوع شکل دره و پی سنگی انجام می‌دهد. همچنین رضانیان‌پور پژوهش ارزشمندی برای تعیین سرعت بهینه اجرا با مدل ریاضی و مطالعه آزمایشگاهی ارائه داد. قائمیان نیز درباره‌ی تحلیل حرارتی سدهای بتنی با در نظر گرفتن شرط مرزی تابش خورشیدی به مطالعه پرداخت [۱، ۲، ۳].

لونا و یونگ و<sup>۳</sup> خواص بتن را تابع زمان در نظر گرفتند و پیشنهاد دادند که اگر اجرای سد در فصل‌های خنک انجام شود، دمای بیشینه‌ی سد کاهش خواهد یافت. طبق مدل هینکس<sup>۴</sup> و کوپلی<sup>۵</sup> که اثر تابش خورشیدی را نیز در نظر گرفته‌اند، سرعت اجرایی کمتر از سرعت برنامه‌ریزی شده در هوای گرم، باعث می‌شود دماهای بالاتری نسبت به دماهای پیش‌بینی شده ایجاد شود و با کاهش طول بلوک، افت سریعی در تنش‌های بیشینه دیده نمی‌شود. در این حالت، حتی دوبرابر کردن تعداد درزها نیز نمی‌تواند مانع تنش‌های طولی درازمدت غیرمجاز شود. طبق نظر سرورا<sup>۶</sup> اگرچه پیش سرد کردن بتن قبل از ریختن در محل، آشکارا باعث می‌شود دما پس از توزیع نهایی، مقدار کمتری داشته باشد، ولی بازده روش بسیار محدود است و برای سد مطالعه شده تنها ۲۰ درصد ارزیابی شده است و بدترین حالت ممکن نیز شروع اجرا در تابستان است [۵-۸].

3- R. Luna, Yong Wu

4- J. L. Hinks

5- A. F. Copley

6- Cervera

1- Transverse joint

2- Longitudinal joints

برابر دمای محیط در زمان اجرای آن لایه) است.  
 $q_c$  شدت جریان همرفتی<sup>۱</sup> است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$q_c = h_c(T - T_a) \quad (5)$$

$q_r$  شدت جریان تشعشعی خروجی از سطح<sup>۲</sup> است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$q_r = \epsilon C_s(T^* - T_a^*) \quad (6)$$

$h_c$  ضریب همرفت محیط است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$h_c = 5/V + 2/8V \quad (V) \quad V \text{ (m/sec) سرعت باد:}$$

$T$  دمای مرز  $\Gamma_q$  (سطح بتن در مجاورت هوا)،  $T_a$  دمای هوا،  $\epsilon$  ضریب صدور سطح<sup>۳</sup> (برای بتن در حدود ۰/۸۸ تا ۰/۹۴) و  $C_s$  ثابت استفان-بولتزمان ( $5/669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ ) است.

$q_a$  شدت جریان واردشده به سطح ناشی از تابش خورشیدی<sup>۴</sup> است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$q_a = a \bar{H} \quad (8)$$

$a$  ضریب جذب سطح<sup>۵</sup> (برای بتن ۰/۸ است) و  $\bar{H}$  کل انرژی خورشیدی رسیده به سطح است. (به علت تفصیل زیاد، روابط مربوط به  $\bar{H}$  ذکر نشده است) [۱۰].

از آنجایی که سطوح در معرض محیط با روند رشد اجرای سد، تغییر می کند و دمای محیط در طول اجرا و در زمانهای مختلف، متفاوت است، لازم است در هر مرحله

در این پژوهش، علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات خواص بتن نسبت به زمان، روند اجرای سد نیز مدل شده است. برای سطوح مختلف نیز شرایط مرزی تابش، همرفت محیط و تابش خورشیدی و برای مرز پی، شرط آدیباتیک در نظر گرفته شده است. در این پژوهش ابتدا آنالیز حرارتی دوبعدی، سپس آنالیز تنش و تعیین ضریب اطمینان کششی انجام و در نهایت میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر خطر وقوع ترکهای حرارتی بررسی شده است.

## ۲- انتقال حرارت

انتقال حرارت هدایتی را برای یک حالت دوبعدی، گذرا و ایزوتروپیک می توان به صورت ریاضی در مختصات کارتزینی مطابق معادله زیر توصیف کرد [۹].

$$K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$T$  دمای جسم،  $\rho$  چگالی،  $c$  گرمای ویژه،  $K$  ضریب هدایت حرارتی جسم و  $Q$  نرخ تولید حرارت داخلی (هیدراسیون سیمان) در واحد حجم است. شرط اولیه:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

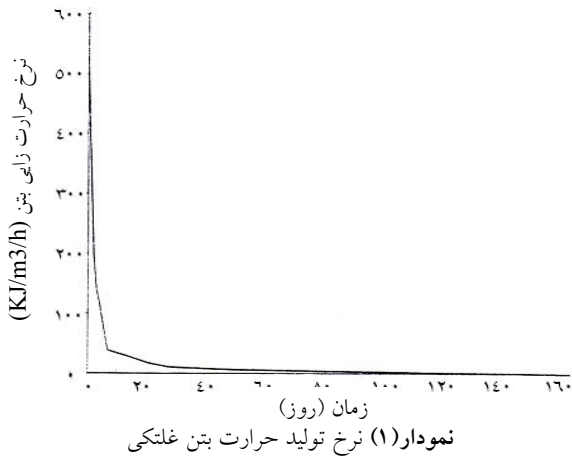
شرایط مرزی:

$$T = \bar{T} : \Gamma_T \text{ روی} \quad (3)$$

$$-K \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) = q_c + q_r - q_a : \Gamma_q \text{ روی} \quad (4)$$

$\Gamma_T$  مرز مشترک سد و بستر،  $\bar{T}$  دمای بستر(پی به صورت دمای ثابت و برابر دمای متوسط سالیانه در نظر گرفته شده است)،  $\Gamma_q$  مرز روباز بتن،  $n_x$  و  $n_y$  بردارهای نرمال سطح و  $T_0$  دمای اولیه بتن ریزی (دمای اولیه لایه،

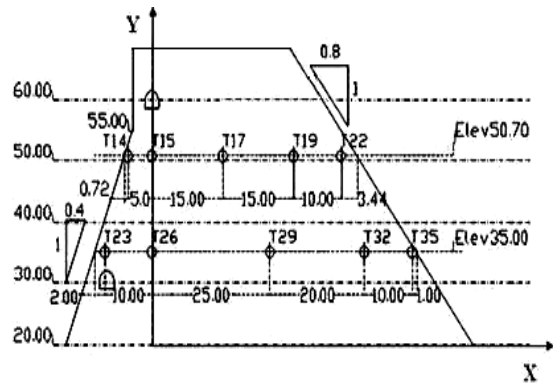
1- heat flux through convection  
 2- outgoing long-wave radiation  
 3- surface emissivity  
 4- incoming short-wave radiation  
 5- surface absorptivity



از اجراء، سطوح در معرض محیط شناسایی و دمای محیط در آن لحظه از اجراء، اعمال شود.

### ۳- مدل سازی و مطالعه موردی

برای بررسی و تحلیل، سد تادان<sup>۱</sup> انتخاب و مدل شده است که هندسه این سد و مشخصات مصالح به کاررفته، از هفتمین کارگاه آموزشی آیکولد<sup>۲</sup> که در کشور رومانی و در سال ۲۰۰۳ برگزار شده بود در دسترس است. سد تادان واقع بر رودخانه ناکون-نایون<sup>۳</sup> در شمال شرق بانکوک در کشور تایلند، یک سازه وزنی از بتن غلتکی<sup>۴</sup> متشکل از ۱۶۰ لایه به ضخامت ۳۰ سانتی متر است [۱۱].



شکل (۱) مقطع عرضی سد تادان تا تراز ۶۸ متر

$$K = 1.0 / 0.076 [1 / 0.5 - 0.025 T] \text{ (KJ/mh } ^\circ\text{C)} \quad (9)$$

- جرم حجمی  $2400 \text{ kg/m}^3$ ، گرمای ویژه بتن غلتکی  $1000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$  و ضریب پواسون برابر مقدار  $0.17$  در نظر گرفته می شود [۱۳].

- مقاومت کششی:  
رابطه تغییرات مقاومت فشاری نسبت به زمان به شکل رابطه زیر است [۱۴].

$$f_c(t) = \frac{t}{\delta/6 + 0.18t} f_c(28) \quad (10)$$

مقدار مقاومت کششی برای اطمینان، از کمترین مقدار به ازای روابط زیر به دست می آید [۱۵-۲۰]:

$$f_t = 0.32 f_c^{2/3} \quad (11)$$

$$f_t = \beta^{2/3} f_{t(28)} \quad (12)$$

$$\beta = \exp \left[ 0.38 \left( 1 - \frac{\delta/3}{t^{0.5}} \right) \right]$$

$$f_t = \begin{cases} 0.115 f_c - 0.022 & : f_c < 20 \\ 0.105 (f_c - 20)^{1/3.9} + 2/28 & : f_c > 20 \end{cases} \quad (13)$$

- مدول الاستیسیته:

با داشتن رابطه تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به زمان

### ۳-۱- خواص مکانیکی-حرارتی بتن غلتکی

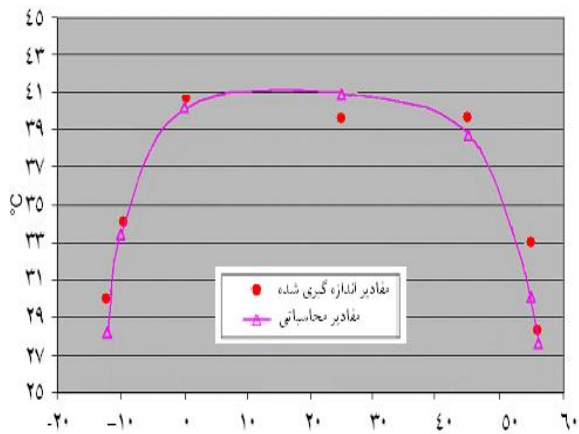
- نرخ تولید حرارت هیدراسیون سیمان در بتن در شرایط آدیاباتیک و در دمای متوسط سالیانه در نمودار (۱) نشان داده شده است [۱۱].

- ضریب هدایت حرارتی بتن غلتکی به صورت تابعی از دما به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است [۱۲]:

- 1- THA-DAN
- 2- ICOLD
- 3- Nakon-Nayon
- 4- RCC

این تحلیل، صلب فرض شده است. مدل از ۱۱۸۷۷ گره و ۱۱۵۲۰ المان تشکیل شده و گام زمانی برای آنالیز حرارتی، ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. در تحلیل تنش، المان خطی چهارگره‌ی<sup>۳</sup> به کار رفته است [۲۰]. بعد از اتمام اجرای هر لایه، تحلیل حرارتی و بعد از اتمام هر ۱۰ لایه با در نظر گرفتن وزن لایه‌ها و اعمال دمای گره‌ها در زمانی متناسب با زمان آنالیز به صورت یک بار حجمی، تحلیل تنش انجام می‌شود. برای تعیین ضریب اطمینان<sup>۴</sup> باید توجه کرد که در هر مرحله از اجرا مقدار مقاومت هر لایه متفاوت و متناسب با عمر بتن لایه است.

برای صحت‌سنجی، نتایج آنالیز حرارتی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل، مقایسه شد که نمونه‌ای از آن در شکل ۲ مشهود است و تطابق نزدیک آن‌ها گویای اعتماد به درستی نتایج آنالیز است [۴].



شکل (۲) پروفیل عرضی دمای نقاط تراز ۳۵ متری در تاریخ ۲۰۰۲/۸/۸

مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مرجع [۱۱] نیز موجود است.

#### ۴-۱- حساسیت‌سنجی پارامترهای مختلف

برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای مختلف مانند زمان شروع اجرا در فصول سرد و گرم سال، توقف عملیات

و رابطه تغییرات دما نسبت به زمان، رابطه تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به دما به دست می‌آید.

برای سنین اولیه بتن از رابطه (۱۳)، برای درازمدت از رابطه (۱۵) و در غیر این صورت از رابطه (۱۴) استفاده شده است [۱۵-۱۸].

$$E = 4790 \alpha \sqrt{f_c(t)} \quad (14)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.73 & t < 3 \text{ روز} \\ 0.87 & 3 \text{ روز} < t < 4 \text{ روز} \\ 1 & t > 4 \text{ روز} \end{cases}$$

$$E = \beta_1^{1/5} E(28) \quad (15)$$

$$\beta_1 = \exp \left[ 0.38 \left( 1 - \frac{5/3}{t^{1/5}} \right) \right]$$

$$E(t) = E_0 (1 - \exp(-m_1 t)) \quad (16)$$

$E_0$  مدول الاستیسیته نهایی بتن است و  $m_1$  برای بتن غلتکی با عیار ۱۰۰، ۰/۰۶ و برای بتن غلتکی با عیار ۱۵۰، ۰/۰۷۴ است.

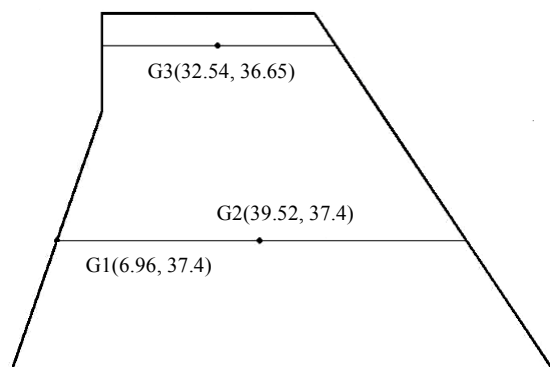
#### ۴- آنالیز حرارتی و تنش

برای آنالیز از برنامه‌ای مبتنی بر روش المان محدود انسیس ۶/۱ استفاده شده است. این برنامه همه‌ی قابلیت‌های لازم برای آنالیز حرارتی و مدل‌سازی مراحل اجرای سد را دارد. با توجه به قابلیت برنامه‌نویسی<sup>۱</sup>، برنامه‌ای برای آنالیز حرارتی دوبعدی نوشته شده است. برنامه قابلیت آن را دارد که هندسه سد را از طریق وارد کردن نقاط گوشه‌ای، رسم کرده و با توجه به میزان ضخامت هر لایه، سد را لایه‌بندی کرده و با توجه به تعداد المان در هر راستا، بدنه سد را مش‌بندی کند. برای تحلیل حرارتی بدنه سد از المان‌های خطی چهارگره‌ی<sup>۲</sup> استفاده شده است. پی‌به‌خاطر سختی کافی در

3- Plane182  
4- Safety Factor

1- APDL  
2- Plane77

نقطه G1 از تغییرات دمای محیط را تأیید می‌کند و به‌عکس، با مقایسه نتایج دمایی نقاط وسط بدنه سد درمی‌یابیم که تغییرات دمایی این نقاط، به دمای محیط وابستگی چندانی ندارد؛ چرا که میزان افزایش دمایی نقاط G2 یا G3 برای حالات ۷ و ۸ که در فصول تابستان و زمستان اجرا شده، اختلاف کمی دارند (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل (۳) محل و مختصات نقاط G

کاهش دمای اولیه مصالح سبب کاهش دمای نقاط داخلی می‌شود که البته کاهش چشم‌گیری نیست؛ چرا که روند تغییرات دمای نقاط داخلی متأثر از هیدراسیون سیمان است و به دلیل تبادل حرارتی لایه‌های بتن‌ریزی‌شده با محیط پیرامون، تأثیر پیش سرد کردن مصالح کاهش می‌یابد. با مشاهده روند تغییر دمایی نقطه G2 یا G3 به ازای حالات مختلف ۹ و ۱۰ در می‌یابیم به ازای هر ۵ درجه پیش سرد کردن مصالح، تقریباً معادل ۱ درجه در نقاط داخلی بدنه سد، کاهش دما خواهیم داشت (شکل‌های ۸ و ۹).

با توجه به شکل ۱۰ و نحوه تغییر دمای لایه‌ای که در تیرماه و در حالت ۲ اجرا شده است و مقایسه آن با لایه‌ای که در تیرماه و در حالت مرجع اجرا شده است، مشاهده می‌شود در حالت مرجع در مدت ۷/۶ ماه افزایشی معادل ۱۰/۵ درجه داشته‌ایم، در صورتی که در حالت ۲ که سرعت دوبرابر شده است این افزایش معادل ۱۴ درجه

اجرای در فصول سرد و گرم سال، بتن‌ریزی در ضخامت‌ها و با سرعت‌های گوناگون و اثر پیش سرمايش، حالت‌های مختلف آنالیز طبق جدول (۱) در مقایسه با حالت مرجع در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱) حالات مختلف آنالیز

حالت	زمان شروع اجرا	ضخامت لایه‌ها (m)	زمان اجرای هر لایه (hr)	توقف در اجرا	پیش سرمايش
مرجع	فروردین	۰/۳	۴۸	-	-
۲	فروردین	۰/۳	۲۴	-	-
۳	فروردین	۰/۳	۷۲	-	-
۴	فروردین	۰/۲	۴۸	-	-
۵	فروردین	۰/۳	۴۸	دی - بهمن	-
۶	فروردین	۰/۳	۴۸	تیر - مرداد	-
۷	تیر	۰/۳	۴۸	-	-
۸	دی	۰/۳	۴۸	-	-
۹	فروردین	۰/۳	۴۸	-	-۵
۱۰	فروردین	۰/۳	۴۸	-	-۱۰

#### ۴-۲- نتایج آنالیز حرارت

برای بررسی و تحلیل نتایج، تغییرات دمایی نقاط G1، G2 و G3 که موقعیت آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است و همچنین کانتور توزیع دمای مقطع سد در مقاطع مختلف زمانی و برای حالات مختلف بررسی می‌شود.

با توجه به شکل ۴ مشهود است که تغییر زمان اجرای هر لایه یا تغییر ضخامت لایه‌ها سبب ایجاد تغییرات یکسانی در دمای نقاط بدنه سد می‌شود. بنابراین آنچه اهمیت دارد سرعت اجرا (سرعت افزایش ارتفاع بدنه برحسب سانتی‌متر در روز) است. در واقع با افزایش سرعت اجرا، اختلاف دمای بتن‌ریزی و دمای نهایی بیشتر می‌شود؛ چرا که در سرعت‌های بالا فرصت زیادی برای اتلاف حرارت هیدراسیون موجود نیست و شرایط تقریباً آدیاباتیک است.

نحوه تغییر دمایی نقطه G1 در شکل ۵ متأثر بودن دمای

با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ مشاهده می‌شود که در زمان‌های مختلف اجرای سد، تنش‌های کششی در رویه و بستر اتفاق می‌افتد. علت ایجاد تنش‌های کششی در رویه‌های بالادست و پایین‌دست، 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 ۳ تا ۴ متری از 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 شده، سریع‌تر اتفاق می‌افتد. طی مراحل اجرا، بیشینه‌ی تنش کششی زمانی دیده می‌شود که سد در فصل سرد سال اجرا می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۱۵ و ۱۷ مشاهده می‌شود وقتی وقفه‌ای در ماه‌های دی و بهمن داشته باشیم (حالت ۵)، لایه‌هایی که بعد از زمان وقفه اجرا شده، نسبت به حالت مرجع، تنش‌های بیشینه‌ی کششی بالاتری دارد و در مجاورت لایه دارای وقفه، تنش‌های کششی بالاتری دیده می‌شود. محل تراز وقفه در شکل ۱۷ در لحظه اتمام اجرا مشخص است؛ جایی که در هسته سد، بیشینه‌ی تنش کششی نقاط بدنه سد، صفر است.

در حالت ۷ که زمان شروع اجرای بتن‌ریزی در فصل گرما است، با توجه به شکل ۱۸، مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تنش کششی در هر لحظه از اجرا، در بستر و نزدیکی رویه‌های پایین‌دست و بالادست است. مقدار بیشینه تنش کششی در طول اجرا در محل بستر در حالت مرجع حدود ۰/۳ مگاپاسگال است. این درحالی است که مقدار بیشینه‌ی تنش کششی در حالت ۷ و در طول اجرا، از

ظرف مدت ۲/۳ ماه است. بنابراین مشاهده می‌شود که سرعت بالای اجرا سبب افزایش چشم‌گیر دمای نقاط داخلی سد می‌شود؛ با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ سرعت بالای اجرا سبب می‌شود وسعت منطقه دمای بیشینه بیشتر شود و نیز محل دمای ماکزیمم به سمت بالاتری هدایت شود و به عکس؛ چرا که دمای بیشینه در بدنه سد به میزان حرارت‌زایی ناشی از هیدراسیون و مدت زمان مجاورت با محیط (سرعت اجرا) بستگی دارد.

با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مشاهده می‌شود دمای بیشینه در بدنه سد در محل لایه‌هایی دیده می‌شود که در فصل گرما ریخته شده است؛ بنابراین بسته به زمان شروع اجرا، محل دمای بیشینه در بدنه سد متغیر خواهد بود. در حالت مرجع، لایه‌ای که در ماه دی اجرا شده است (شکل ۱۴)، در لحظه اتمام اجرای سد، دمای ۱۵ درجه دارد که لایه مشابه آن در حالت ۵ که وقفه دو ماهه دی و بهمن بعد از اجرای آن رخ داده است، در زمانی مشابه، به دمای ۵/۶ درجه می‌رسد که به علت وقفه کاهش یافته است؛ اما بعد از این زمان، به علت اجرای لایه‌های بالایی، دمای این لایه شروع به افزایش می‌کند؛ پس این وقفه در نتیجه نهایی تأثیر چشم‌گیری ندارد.

#### ۴-۳- نتایج آنالیز تنش

برای بررسی و مقایسه نتایج، کانتور تنش در مقطع سد در مقاطع مختلف زمانی و برای حالات مختلف در نظر گرفته شده است.

در همه‌ی حالات اصلی آنالیز تنش، وزن لایه‌ها لحاظ شده است. برای حالت خاصی که از وزن لایه‌ها چشم‌پوشی شود نیز آنالیز انجام شد. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود در نظر گرفتن وزن لایه‌ها سبب کاهش مقادیر تنش‌های کششی به خصوص در بستر شده است.

۲/۵ تا ۴/۲ مگاپاسگال متغیر است.

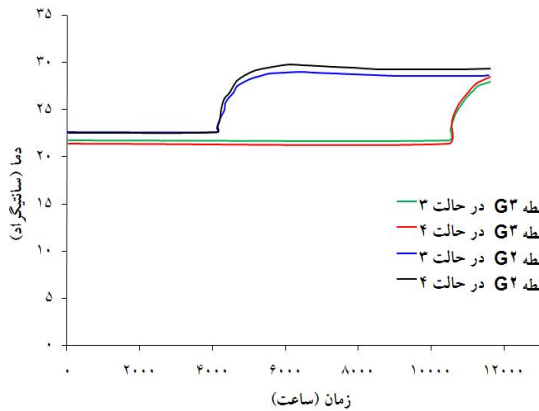
رویه‌های پایین و بالادست شاهد وقوع ترک خواهیم بود که با در نظر گرفتن درز انقباض می‌توان بر این مسئله فائق شد.

#### ۴-۴- تحلیل خرابی (آنالیز ضریب اطمینان)

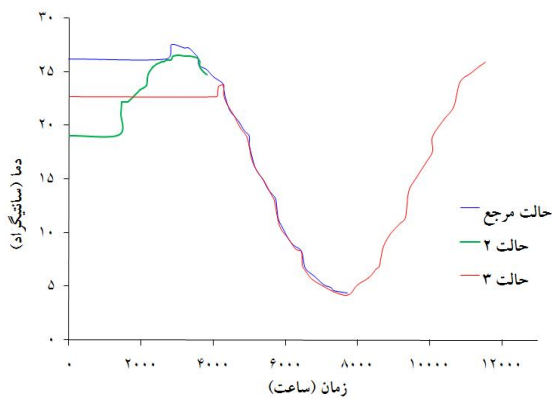
برای بررسی تأثیر هر پارامتر در میزان ترک‌های حرارتی بدنه سد، لازم است تغییرات ضریب اطمینان نقاط مختلف بدنه سد در نظر گرفته شود.

با توجه به شکل‌های ۲۰ تا ۲۵ دیده می‌شود:

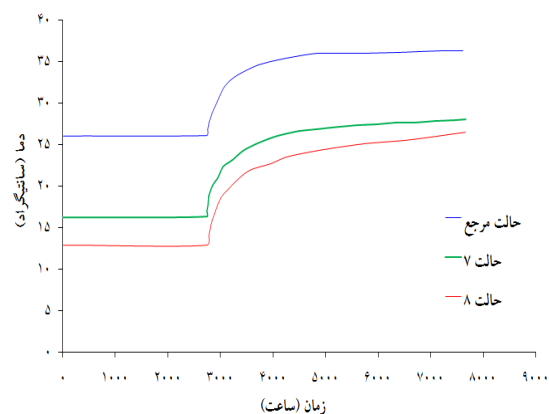
در حالت ۲ در همه‌ی مراحل اجرا، شاهد وقوع ترک در سطح بالایی لایه‌ها هستیم و در لحظه پایان اجرا در رویه‌های پایین‌دست و بالادست نیز ترک مشاهده می‌شود. در حالت ۳، در هیچ مرحله‌ای از اجرا تنش‌های کششی از مقدار مجاز مقاومت کششی تجاوز نمی‌کند، بنابراین در هیچ مرحله‌ای شاهد ترک در کل سازه سد نیستیم و ضرایب اطمینان در همه‌ی مراحل اجرایی تقریباً برابر و یا بیشتر از یک است. در حالت ۵، وجود وقفه در لای‌های بالایی سبب می‌شود در این تراز خطر ایجاد ترک به مراتب کاهش یابد و نیز سبب کاهش مقدار ضریب اطمینان نقاط در مجاورت رویه‌های بالادست و پایین‌دست و سطح بالایی لایه‌ها نسبت به حالت مرجع می‌شود. در حالت ۶ در مراحل مختلف اجرا و در رویه‌های سد، ترک مشاهده نمی‌شود. تنها در پایان اجرا در سطح بالایی لایه بالا، ضریب اطمینان کمتر از ۰/۵ و در نتیجه ترک مشاهده می‌شود که به دلیل تازه بودن بتن و در نتیجه مقاومت کششی کم این لایه است. در حالت‌های مرجع، ۷ و ۸، با توجه به شکل‌های ۲۰، ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌شود از نظر ترک و خرابی، شروع بتن‌ریزی در فصل تابستان به مراتب نسبت به دو حالت دیگر بحرانی‌تر است و حالت ۸ نسبت به حالت مرجع مناسب‌تر است. بنابراین، شروع بتن‌ریزی در فصل زمستان، ترجیح داده می‌شود. هر چند در پایان اجرا، در



شکل (۴) اثر سرعت اجرا در نتایج دمایی نقاط G2 و G3

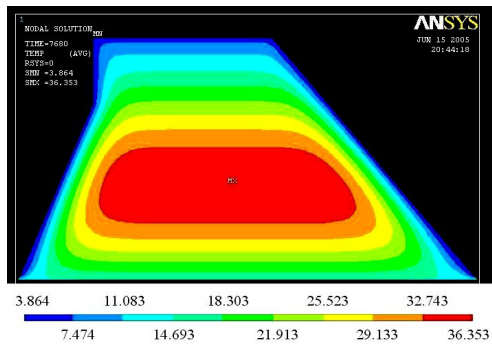
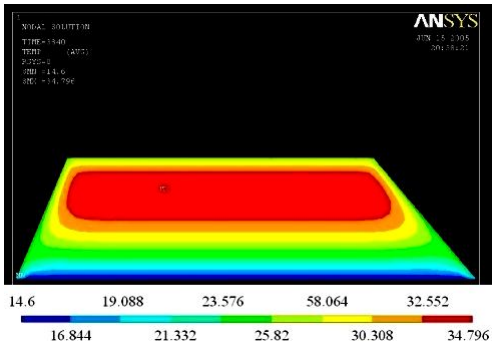


شکل (۵) اثر زمان اجرای هر لایه در نتایج دمایی نقطه G1

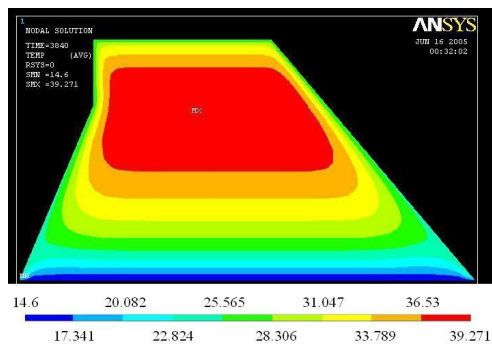
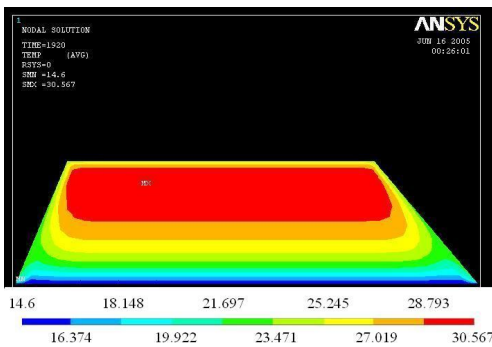


شکل (۶) اثر زمان شروع اجرا در نتایج دمایی نقطه G2

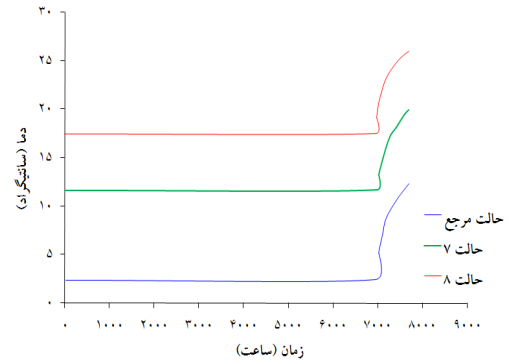




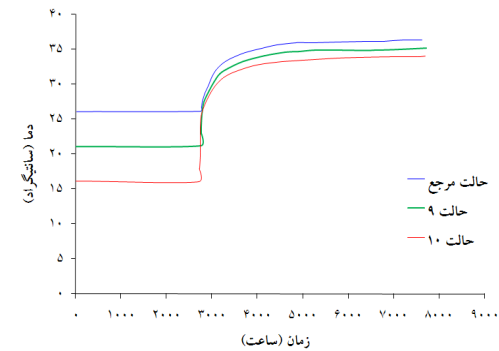
شکل (۱۱) توزیع دمایی نقاط بدنه سد برای حالت مرجع بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



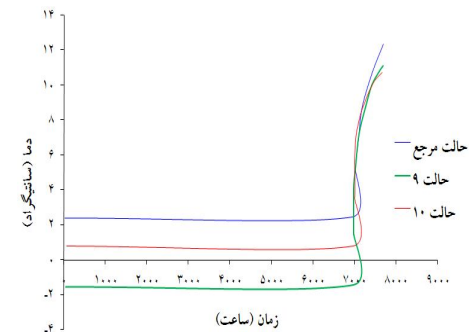
شکل (۱۲) توزیع دمایی نقاط بدنه سد برای حالت ۲ بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



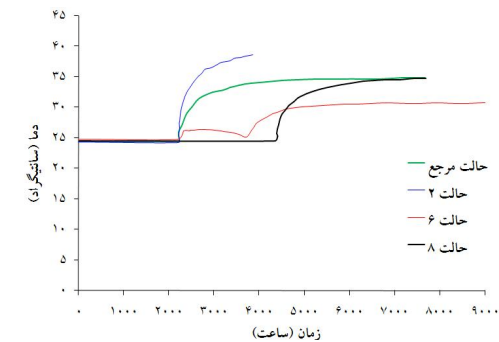
شکل (۷) اثر زمان شروع اجرا در نتایج دمایی نقطه G3



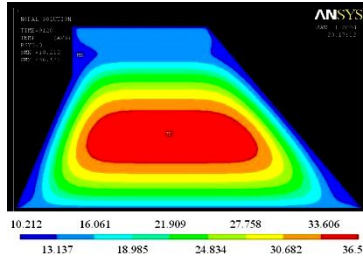
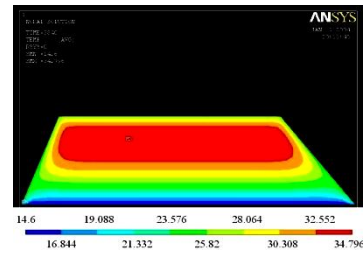
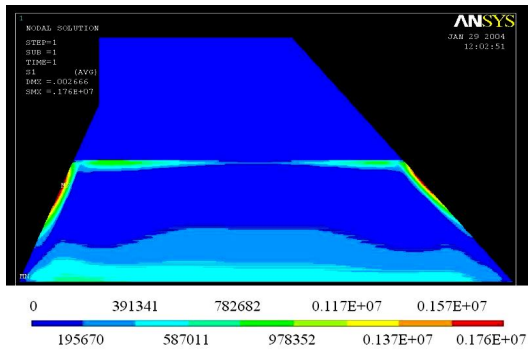
شکل (۸) اثر پیش سرد کردن لایه‌ها در نتایج دمایی نقطه G2



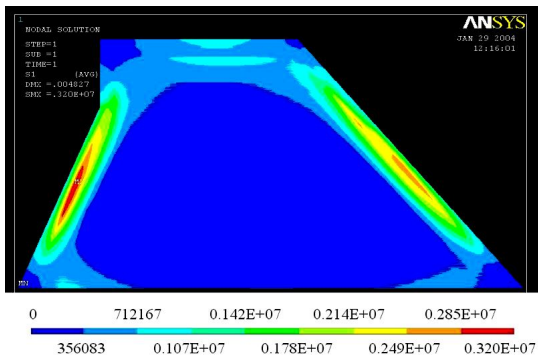
شکل (۹) اثر پیش سرد کردن لایه‌ها در نتایج دمایی نقطه G3



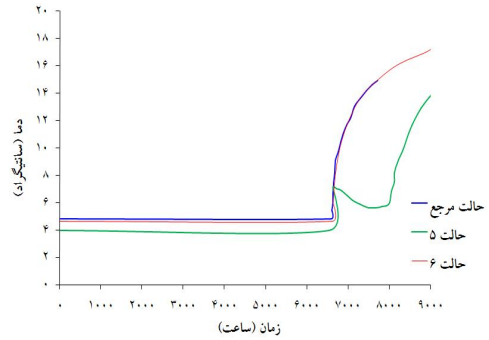
شکل (۱۰) نتایج دمایی لایه اجراشده در ماه تیر



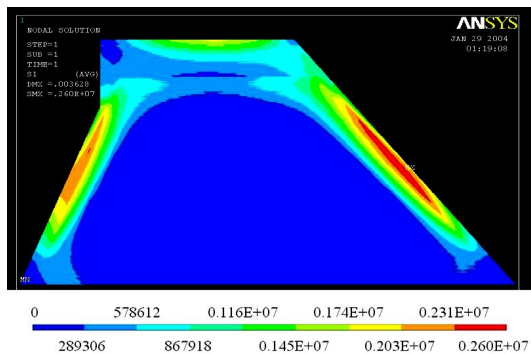
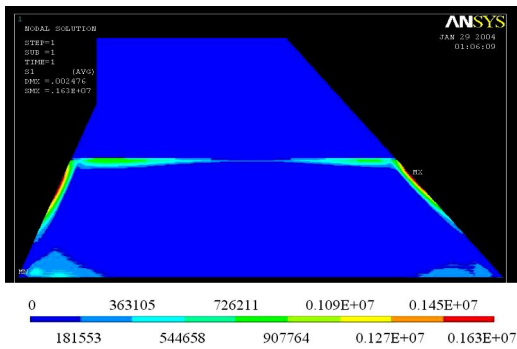
شکل (۱۳) توزیع دمایی نقاط بدنه سد برای حالت ۶ بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



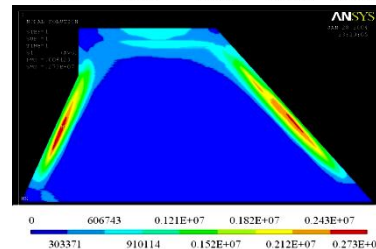
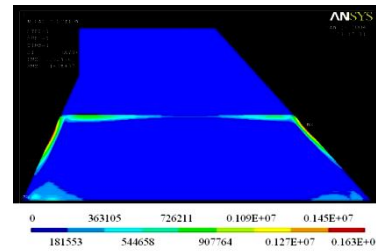
شکل (۱۶) تنش کششی بیشینه برای حالت مرجع بدون در نظر گرفتن وزن لایه‌ها بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



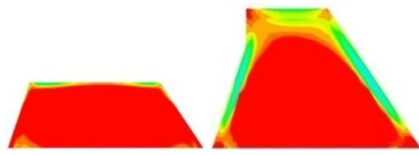
شکل (۱۴) نتایج دمایی لایه اجراشده در ماه دی



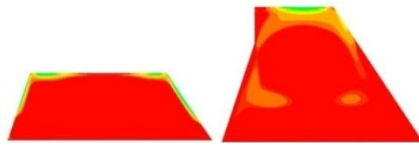
شکل (۱۷) تنش کششی بیشینه برای حالت ۶ بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



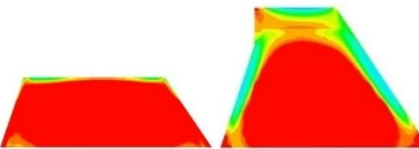
شکل (۱۵) تنش کششی بیشینه برای حالت مرجع بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



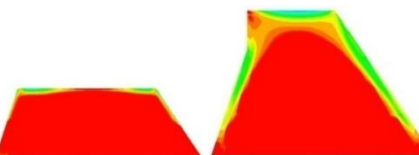
شکل (۲۰) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت مرجع بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



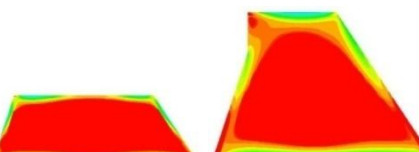
شکل (۲۱) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت ۴ بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



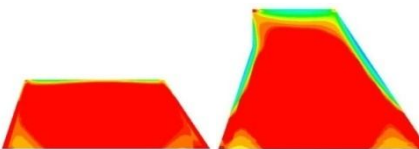
شکل (۲۲) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت ۶ بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



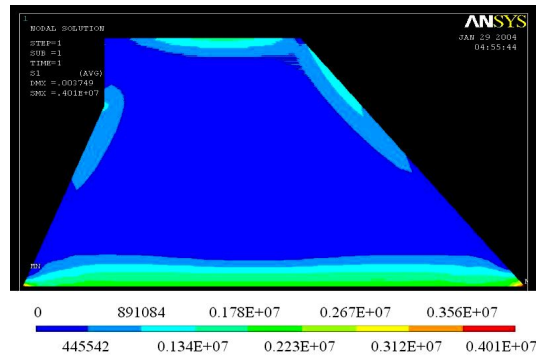
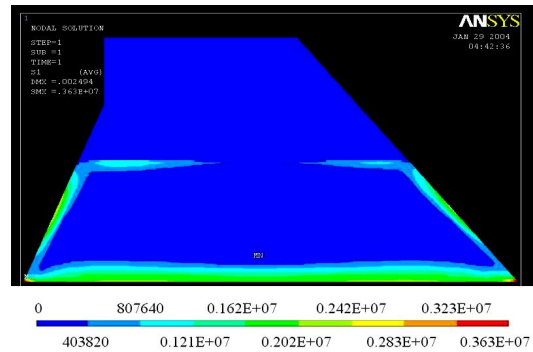
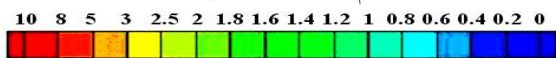
شکل (۲۳) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت ۷ بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



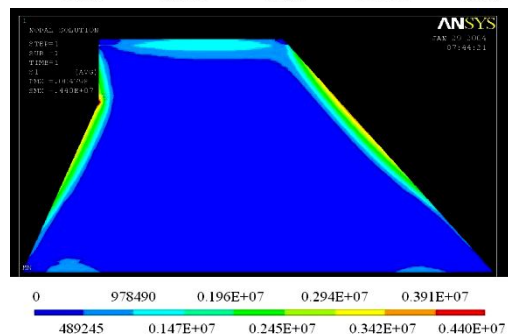
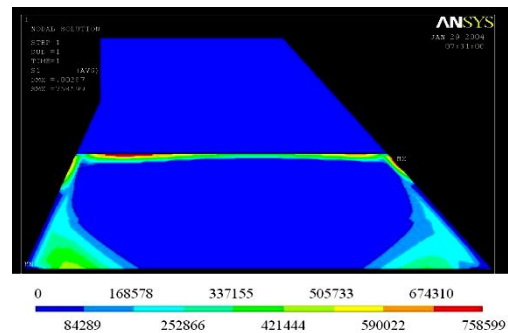
شکل (۲۴) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت ۱۰ بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



شکل (۲۵) ضریب اطمینان بدنه سد برای حالت ۱۱ بعد از اجرای لایه ۱۶۰ (اتمام سد) و بعد از اجرای لایه ۸۰



شکل (۱۸) تنش کششی بیشینه برای حالت ۱۰ بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)



شکل (۱۹) تنش کششی بیشینه برای حالت ۱۱ بعد از اجرای لایه ۸۰ و ۱۶۰ (اتمام سد)

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مدل‌سازی‌ها و تحلیل پیچیده انجام‌شده که در آن حرارت محیطی و هیدراسیون سیمان و تغییرات خواص بتن در طول زمان و وابسته به دما به صورت تفصیلی و هم‌زمان در نظر گرفته شده است مطالعه شرایط واقعی یک سد با ICOLD یافته‌های کاربردی مهمی به دست می‌دهد:

۱. در سد مطالعه شده، به ازای هر ۵ درجه پیش سرد کردن مصالح، کاهش معادل ۱ درجه در دمای نقاط داخلی و ۰/۳ مگاپاسگال در تنش‌های کششی شاهد هستیم. بنابراین عمل پیش‌سرمایش در سدهای بتن غلتکی به تنهایی کافی به نظر نمی‌رسد و این کار فقط زمانی می‌تواند مناسب باشد که ضخامت لایه‌ها زیاد و یا سرعت بتن‌ریزی بالا باشد. در چنین شرایطی می‌توان به کمک پیش‌سرمایش، مدت توقف هر لایه را بعد از بتن‌ریزی کاهش داد. همچنین با کمک آن می‌توان بتن‌ریزی در ماه‌های گرم سال را تسهیل کرد.

۲. اگر از انجماد و یخ زدگی مصالح جلوگیری شود، شروع بتن‌ریزی و اجرا در زمستان نسبت به فصول دیگر مناسبتر است. بحرانی‌ترین حالت برای شروع اجرا، شروع در فصل گرم سال است. چرا که در این حالت تنش‌های کششی بزرگی در نزدیکی بستر دیده شده و بنابراین ترک‌های ناشی از قید خارجی در مجاورت بستر ظاهر می‌شود.

۳. در زمان‌های مختلف اجرا، تنش‌های کششی در بستر و در رویه خارجی به ترتیب ناشی از قید خارجی و قید داخلی (گیرداری ناشی از تغییرات دمای محیط و تولید غیر یکنواخت دما) اتفاق می‌افتد و چون هدایت حرارتی بتن پایین است، شیب حرارتی ناشی از اختلاف دمای داخلی بتن و محیط به فاصله ۳ تا ۴ متری از سطح بتن محدود می‌شود. ۴. هرچه سرعت اجرا بیشتر شود اختلاف دمای بتن

ریزی و دمای نهایی بتن بیشتر می‌شود؛ چرا که در سرعت‌های بالا، اتلاف حرارت از سطوح بالایی لایه‌ها کمتر شده و دمای لایه‌ها به دمای آدیاباتیک نزدیک‌تر می‌شود. هرچه سرعت اجرا کمتر شود، هسته سد سردتر و وسعت منطقه دمای بیشینه، کمتر شده و این منطقه به سمت بستر حرکت می‌کند.

۵. در نظر گرفتن وزن لایه‌ها در آنالیز تنش، سبب می‌شود مقادیر تنش کششی به طور محسوسی کاهش یابد و به‌ویژه این کاهش در بستر نمود بیشتری دارد.

۶. وقفه در فصل گرم سال سبب کاهش دمای بیشینه در هسته سد می‌شود. همچنین با توجه به کانتور ضریب اطمینان تنش کششی، مشاهده می‌شود در هر حالتی از زمان شروع اجرا، وقفه در ماه‌های گرم سال در کنترل ترک حرارتی بسیار مؤثر است و این امکان را فراهم می‌کند که لایه‌های بعدی و بالاتر در زمانی سردتر نسبت به حالت بدون وقفه اجرا شوند. وقفه در ماه‌هایی غیر از فصل گرم سال در توزیع نهایی دما و بیشینه دمای بدنه سد تأثیر چندانی ندارد.

نتایج بالا اگرچه تنها بر اساس تحلیل یک سد انجام شده است و برای شرایط و سدهای متفاوت می‌تواند تا حدی متفاوت باشد؛ ولی از نظر اعتبار کلی و کاربردی بسیار قابل بهره‌برداری است.

## ۶- تشکر و قدردانی

لازم است از بخش سازه شرکت مشاور مهاب قدس، به‌ویژه آقای دکتر مجتبی فرخ تشکر و قدردانی کنیم.

## ۷- مراجع

[۱] محمودی‌خالدآبادی، محمد، "مدل عددی سه‌بعدی تولید و توزیع حرارت در سدهای بتن غلتکی در حین

- Workshop on Numerical Analysis of Dams, Bucharest, Sep. 2003, PP. 121-133
- [12] Kim K. H., Jeon S. E., Kim J. K., and S. Yang, "An experimental study on thermal conductivity of concrete", *Cement and Concrete Research* 33 (2003), PP. 363-371
- [13] Andriolo F. R., "The use of Roller Compacted Concrete", 1<sup>st</sup> Edition, 1998, Oficina de Textos
- [14] ACI Committee 209R-92, "Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures" *ACI Manual of Concrete Practice*, Farmington Hill, USA, 1989
- [15] ACI Committee 207, "Mass Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice*, Farmington Hill, USA, 1989, PP. 5R/1-5R/89
- [16] Bofang Z., Ping X., "Thermal stress in Roller Compacted Concrete gravity dams", *Dam Engineering*, Vol VI, Issue 3, 1995, PP. 199-220
- [17] Jurgen G., Minghao Q., Walter M., "Realistic computational efficient evaluation of temperature and stress development in large RCC dams", University of Stuttgart, Germany
- [18] Bittencurt R. M., Andrade W. P., Andriolo F. R., "Thermal analysis of Roller Compacted Concrete", *Roller Compacted Concrete Dams*, Berga et al. (eds), 2003, PP. 547-553
- [19] Yuan Y., Wan Z.L., "Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal drying and creep behavior", *Cement and Concrete Research* 32 (2002), PP. 1053-1059
- [20] Zhang Z., Garga V.K., "Temperature and temperature induced stresses for RCC dams", *Dam Engineering*, Vol VII, Issue 2, 1995, PP. 129-154
- [21] ANSYS Manuals (Theory manual, User's guide Element manual), Release 6.1, Copyright 1998, SAS IP
- و بعد از ساخت"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر، ۱۳۸۳
- [۲] حسن‌خانی، علی، "بررسی اثر سرعت بتن‌ریزی در حرارت ایجاد شده در سدهای بتنی غلتکی با استفاده از مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی روش اجرا"، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳
- [۳] شیبانی، فرخ، "تحلیل تنش‌های حرارتی در سدهای بتنی قوسی تحت تأثیر کنش‌های محیطی"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۲
- [۴] حیدری، نادر، "تحلیل اثر حرارت محیطی و هیدراسیون سیمان در سدهای بتنی غلتکی با در نظر گرفتن فرایند ساخت"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴
- [5] Luna R. and Wu Y., "Simulation of temperature and stress field during RCC dam construction", *Journal of Construction Eng. and Management*, ASCE Sep. /Oct. 2000, PP. 381-388
- [6] Hinks J.L., Copley A.F., "Thermal analysis for RCC dams", *RCC Conf.*, Chegdu, China, 1999, PP. 473-484
- [7] Cervera M., Oliver J., Prato T., "Simulation of construction of RCC dams: I- temperature and aging, II: stress and damage", *J. Struc. Eng.*, ASCE, Sep. 2000, PP. 1053-1069
- [8] Cervera M., Goltz M., "A modified 1-D strip model for thermo-mechanical analysis of RCC dams", *Roller Compacted Concrete Dams*, Berga et al. (eds) 2003 Swets & Zeitlinger, PP. 579-588
- [9] Duffie J., Beckman W., "Solar engineering of thermal processes", John Wiley & Sons, 1980, PP. 1-140
- [10] Holman J. P., "Heat transfer", McGraw-Hill, New York, 2002
- [11] Bouyge B., "RCC dam construction state of the art in 2003", 7th International Benchmark

# Advanced Analysis of Ambient and Cement Hydration Thermal Effects on a RCC Dam Considering Construction Schedule

N. Heydari<sup>1</sup>, M. T. Ahmadi<sup>2\*</sup>

1- Graduate in Hydraulic Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

mahmadi@modares.ac.ir

## Abstract:

Mass concretes including roller-compact concrete are materials with poor tensile behavior. When subjected to shrinkage or heat in their very early ages such concretes may easily crack. Thus for controlling and minimizing the risk of thermal cracks, it is crucial to study the effects of such parameters as the rate of concrete pouring in construction layers, seasons of start, pause of construction, and the extent of pre-cooling of concrete materials. Therefore, thermal stresses and probable cracks should be controlled based on a sound construction schedule. In practice, most cases are dealt with using a simple one-dimensional analysis pertaining only internal concrete evolution and thus disregarding the surface concrete story. At the same time, the induced surface stresses are not accounted for in such analyses.

However, as a minimum requirement, a two dimensional model of the dam body across its vertical section is needed to account for the main effects mentioned above. Despite that many analyses have been carried out by others so far, in this research, concrete thermal conductivity coefficient is considered as a function of concrete temperature throughout a transient heat conduction analysis. The material is assumed as isotropic in both thermal and mechanical senses. The topology of model as well its top boundaries are continuously updated according to the construction schedule. Furthermore, accounting for the dam construction schedule, heat generation due to both ambient and cement hydration phenomena, as well as inclusion of convection and radiation boundary conditions due to solar effects are considered. In addition, when dealing with stress analyses and safety evaluation against cracks, the dependencies of concrete elasticity modulus on time and temperature, and concrete compressive as well as tensile strengths on time (i.e., the ages of layers) are all considered. Indeed, the thermal analyses are carried out after performing each single layer. Also after every 10 layers are performed, a full stress analysis is conducted under the current thermal and gravity loads. Safety factors are calculated considering the material properties and strength available at the same instance in each layer.

To study the effect of these parameters on heat generation, and the subsequent thermal stresses in the body of RCC dam, "THA-DAN" dam in Thailand was chosen as a benchmark introduced by ICOLD. This dam has been built of 160 layers of 30 centimeter thickness. Program ANSYS-6.1 was employed in a special manner to allow such a coupled transient

---

**Abstracts**

---

analysis for both thermal and stress parts.

Initially, a basic verification of calculated temperatures versus the measured ones (as provided by ICOLD) was done for the layered construction at the dam site. The results of this study showed that maximum hydration temperature occurs at the layers poured in the hottest season. The efficiency of pre-cooling techniques is rather low, because by each 5°C pre-cooling, only 1°C drop in the temperature of internal concrete and 0.3 MPa drop in tensile stresses are gained. Tensile stresses are concentrated on the free surfaces of the concrete as well as on the ground interface due to constraints. This happens at a 3-4 meter thick layer there due to the high thermal gradients. Inclusion of gravity load in the stress analyses helps reducing the tensile stresses, particularly near the ground. Furthermore, if the frost of concrete materials could be avoided, winter would be the most efficient season for starting the construction. The most critical case is to start the construction in summer. Elongated construction pause in hot seasons is very effective for controlling the thermal cracks, although it has only negligible effect in cold season on the final distribution of heat and the maximum temperatures induced in the dam body. It is interesting to notice that the lower is the speed of concrete pouring, the cooler the core concrete becomes. At lowest speeds the warm core approaches to the ground surface. Although the above observations were found through a single dam being investigated, but they could also be mostly true for most of the gravity type RCC dams.

**Keywords:** RCC Dam, Heat conduction, Environmental condition, Finite element, Tensile stress, Thermal cracks, Cement hydration