

تحلیل گام به گام زمانی تنش های حرارتی در سدهای وزنی بتنی

محمد رضا یزدانی
کارشناس ارشد

محمود فغفور مغربی
استادیار

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

مطالعات حرارتی در سدها و بخصوص سدهای وزنی بتنی از پیچیدگی و اهمیت زیادی برخوردار است. اگر چه با یک فرض ساده کننده می توان توزیع دما را در طول بدنه سد خطی در نظر گرفت اما به دلیل پایین بودن ضریب پخش حرارتی بتن و متغیر بودن شرایط محیطی بر حسب زمان، توزیع درجه حرارت در داخل بدنه سد غیر خطی است و لذا فرض خطی بودن توزیع دما از دقت خوبی برخوردار نخواهد بود. عوامل مختلفی بر توزیع درجه حرارت در بدنه سد تأثیر می گذارد که می توان آنها را به دو دسته عوامل خارجی ناشی از تغییرات شرایط آب و هوایی و همچنین عوامل داخلی ناشی از حرارت هیدراتاسیون سیمان تقسیم کرد. این توزیع، نقش اساسی در شدت تنش های حرارتی تولید شده در بدنه سد ایفا می کند. در مقاله حاضر یک سد وزنی با استفاده از مدل دو بعدی اجزاء محدود در شرایط آب و هوایی شهرستان مشهد مورد تحلیل حرارتی قرار گرفته است. در تحلیل حالات مختلف بتن ریزی در هوای گرم و سرد، با خواص حرارتی متفاوتی از سیمان و سایر مواد تشکیل دهنده مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از بدست آوردن نتایج حاصل از تحلیل حرارتی، تنش ها و تغییر مکان ها در نقاط مختلف بدست آمد. نتایج نشان می دهد بحرانی ترین تنش ها در حالت بتن ریزی در هوای گرم، با حرارت هیدراتاسیون زیاد برای سیمان و ضریب انبساط حرارتی بالا برای مصالح ایجاد می شوند. این تنش ها در هسته مرکزی بدنه سد و بدور از گالری زهکش و همچنین در مجاورت پای سد حداکثر مقادیر خود را دارا هستند.

کلمات کلیدی

تنش های حرارتی، بتن حجیم، سد وزنی بتنی

Time Step Analysis of Thermal Stresses in Concrete Gravity Dams

M. F. Maghrebi
Assistant Professor

M. R. Yazdani
M. Sc Student

Civil Engineering Department,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Distribution of thermal stresses in dams, especially concrete gravity dams is a complex and significant subject in designing the dams. Although by the use of a simplified assumption, the temperature distribution along the cross section of a dam can be considered linearly, because of the low thermal diffusion coefficient for concrete and variance of atmospheric conditions with time, temperature distribution along the dam cross section is nonlinear. So, the assumption of linear distribution of temperature will not be an accurate one. A number of factors influence the temperature distribution along the dam cross section that can be divided into two groups: internal factors due to hydration of cement and external factors due to atmospheric variation. The temperature distribution along the dam cross section has a significant effect on the thermal stresses.

In the present paper a concrete gravity dam by the use of 2D finite element analysis in a climate condition similar to Mashhad were analyzed. In this analysis concreting in hot and cold weather with different types of cements (type I and type IV) were investigated. At the first step, the results of thermal analysis were obtained and then normal stresses and displacements at different nodes were extracted. The results show that the critical stresses are produced in the case of hot weather, with high thermal hydration for cement and high expansion coefficient for the materials. These stresses in the core of a dam cross-section and away from the drainage gallery and also adjacent to the toe and heel of the dam are maximum.

Key words

Thermal stresses, Mass concrete, Concrete gravity dam

$$q_{con} = -KA \frac{dT}{dn} \quad (1)$$

که در آن q_{con} شدت هدایت جریان حرارتی در جهت عمود بر سطح همدم n, A بردار عمود بر سطح، و T درجه حرارت سطح مورد نظر می باشد. معادله عمومی پخش حرارت در مختصات دکارتی بصورت زیر می باشد [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \frac{\partial T}{\partial t} \rho c \quad (2)$$

در صورتیکه ماده ایزوتروپ باشد، ضریب هدایت حرارتی به جهت مختصات وابسته نخواهد بود و معادله (۲) به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن $\alpha = \frac{K}{\rho c}$ ضریب پخش حرارتی (Thermal Diffusivity) ماده نامیده می شود. هر چه مقدار α بیشتر باشد، حرارت سریعتر در ماده پخش می شود.

انتقال حرارت به طریق جابجایی

انتقال حرارت به طریق جابجایی شامل دو مکانیزم است. بدین مفهوم که علاوه بر انتقال انرژی به واسطه حرکت تصادفی مولکول ها (پخش حرارت)، انرژی توسط حرکت توده سیال نیز انتقال می یابد. چنین حرکتی در حضور گرادیان دما، انتقال حرارت را زیاد خواهد کرد. در انتقال حرارت به طریق جابجایی، معادله نرخ انتقال حرارت به صورت زیر است:

$$q'' = h_c (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

که در آن q'' شدت جریان جابجایی بر حسب w/m^2 بوده و بستگی به اختلاف درجه حرارت های T_s (دمای سطح) و T_∞ (دمای سیال) دارد. فرمول فوق به نام «قانون سرمایش نیوتن» معروف است و کمیته h_c را ضریب انتقال حرارت به طریق جابجایی می نامند.

انتقال حرارت به طریق تشعشع

تشعشع حرارتی به نوعی از انرژی گفته می شود که از جسمی با دمای معین صادر می شود. برخلاف انتقال حرارت به طریق هدایت و جابجایی که مربوط به انتقال انرژی در یک محیط مادی هستند، تشعشع نیازمند چنین محیطی نیست.

سدها همواره تحت اثر عوامل آب و هوایی از جمله دمای هوا و تابش خورشید هستند. این عوامل بر توزیع درجه حرارت در بدنه سد اثر می گذارند. در طول یک روز آفتابی انرژی حرارتی خورشید به دیواره سد برخورد می کند که قسمتی از تابش خورشید از سطح بتن به محیط اطراف منعکس شده و بقیه جذب می شود. میزان تابش جذب شده توسط بدنه بطور عمده به رنگ و بافت سطح آن بستگی دارد. سطوح تیره و زبر تابش بیشتری را نسبت به سطوح براق و صاف جذب می نمایند. قسمتی از انرژی حرارتی از طریق جابجایی و تشعشع به محیط اطراف منتقل شده و مابقی از طریق هدایت به داخل بدنه انتقال می یابد. افت حرارتی بواسطه جابجایی عمدتاً به عواملی نظیر سرعت باد و اختلاف درجه حرارت بین سطح و هوا بستگی دارد.

از آنجائیکه سد وزنی جزء سازه های بتنی حجیم است، مقدار گرمایی بتن اثر زیادی در بوجود آمدن اختلاف دما در بدنه سد دارد که این موضوع باعث بوجود آمدن تنش های حرارتی زیاد و در نتیجه پیدایش ترک می شود. دما در وجه پایین دست سد عمدتاً توسط تابش خورشید و دمای هوا کنترل می شود و در وجه بالادست متأثر از دمای آب است [11].

به دلیل پایین بودن ضریب پخش حرارتی بتن و متغیر بودن شرایط محیطی برحسب زمان، منحنی توزیع درجه حرارت در بدنه سد غیر خطی است، که بصورت تقریبی می توان خطی در نظر گرفت. بعضی از عوامل مؤثر بر توزیع درجه حرارت عبارتند از: شدت، دوام و زاویه تابش خورشید به سطح، درجه حرارت محیط، فواصل زمانی بین دو بتن ریزی متوالی، درصد وزنی سیمان بکار رفته در بتن، درجه حرارت مواد تشکیل دهنده بتن، شکل و اندازه سنگدانه ها و سرعت باد.

مکانیزم های انتقال حرارت و معادلات حاکم

حرارت به سه طریق عمده منتقل می شود که عبارتند از: هدایت، جابجایی و تشعشع. بطور معمول وجود هر سه مکانیزم انتقال حرارت در سدها امکان پذیر است.

انتقال حرارت به طریق هدایت

در صورت وجود اختلاف دما در یک جسم، انتقال حرارت از ناحیه با دمای بالا به ناحیه با دمای پائین صورت می گیرد. در این حالت انرژی بطریق هدایت انتقال می یابد و فلاکس حرارت متناسب با گرادیان دما می باشد. این رابطه را با استفاده از ضریب تناسبی بنام K که ضریب هدایت حرارتی جسم نامیده می شود، می توان بصورت معادله (۱) بیان نمود:

در حقیقت، انتقال تشعشع درخلاً بهتر صورت می‌گیرد. این انتقال بواسطه پخش امواج الکترومغناطیس انجام می‌شود. محاسبه نرخ خالص تشعشع که بین سطوح انجام می‌گیرد، بطور کلی خیلی پیچیده بوده و خارج از بحث ما می‌باشد. حالت خاصی که در مسئله مورد نظر با آن مواجه هستیم، شامل انتقال خالص بین یک سطح کوچک (سطح بدنه سد) و یک سطح خیلی بزرگ (اتمسفر کره زمین) که کاملاً سطح کوچک را در برگرفته است، می‌باشد. به این منظور مقادیر متوسط روزانه کمیت‌های آماری مؤثر هواشناسی در تحلیل حرارتی (مأخوذه از سازمان هواشناسی) از قبیل درجه حرارت هوا، سرعت باد، شدت و زاویه تابش خورشید در شرایط آب و هوایی شهرستان مشهد بعنوان مقادیر اولیه و تأثیر گذار در روند ساخت سد مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. فرض بر آن است که سطح و محیط توسط گازی که هیچگونه تأثیری بر پدیده تشعشع نمی‌گذارد، جدا شده‌اند. همچنین فرض می‌شود که تمام انرژی حرارتی تشعشع یافته، از هوا عبور نماید. نرخ خالص تشعشع بین سطح و محیط که بر واحد سطح بیان می‌شود، عبارتست از:

$$q'' = \frac{q}{A} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (5)$$

در این رابطه A مساحت سطح، T_{sur} دمای محیط و ε ضریب انتشار (Emissivity) می‌باشد که مقدار آن برابر نسبت تشعشع جسم مورد نظر به تشعشع جسم سیاه است و برای بتن ۰/۹۴ است. در حالت خاصی که ذکر شد، سطح بتن و ضریب انتشار آن بر نرخ خالص انتقال حرارت تأثیری ندارند.

آنالیز تنش

چنانچه توزیع درجه حرارت در یک جسم ایزوتروپیک بصورت یکنواخت باشد و جسم بتواند آزادانه انقباض یا انبساط نماید، جسم مورد نظر متحمل هیچگونه تنش نخواهد شد، اما در صورتیکه تغییرات درجه حرارت غیر یکنواختی در جسم ایزوتروپیک رخ دهد و یا اینکه در مقابل تغییر شکل جسم قیودی وجود داشته باشد، تنش‌های حرارتی ظاهر می‌شوند. علت ایجاد تنش‌های حرارتی در یک جسم ایزوتروپیک با میدان درجه حرارت غیر یکنواخت، همساز نبودن تغییر مکان‌های حاصله در مرز مشترک اجزای فرضی در جسم مزبور می‌باشد. هرگاه جسم غیر ایزوتروپیک تحت اثر میدان حرارت قرار گیرد، اعم از اینکه تغییرات درجه حرارت در جسم یکنواخت و یا غیر یکنواخت باشد، در آن تنش‌های حرارتی بوجود می‌آیند. روابط اساسی تنش - کرنش برای یک جسم

ترموالاستیک که در میدان حرارتی قرار می‌گیرد بصورت زیر می‌باشد [10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x - \alpha T &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y - \alpha T &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z - \alpha T &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (6)$$

در این روابط ε_i و σ_i کرنش و تنش محوری در جهت i و ν ضریب پواسون است. واضح است که در این حالت کرنش‌های برشی در صفحات کارترین طبق روابط معادله (۷) بیان خواهد شد.

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad (7)$$

که در این روابط G مدول الاستیسیته برشی جسم و τ_{ij} تنش برشی در صفحه کرنش‌ها می‌باشد. برای تعیین تنش‌های حرارتی در یک ماده ایزوتروپیک باید توجه داشت که تغییرات درجه حرارت در هر نقطه از این ماده باعث پیدایش مؤلفه‌های محوری تغییر شکل نسبی می‌شود، در حالی که مؤلفه‌های برشی تغییر شکل نسبی صفر می‌باشد. با جمع نمودن روابط معادله (۶) خواهیم داشت:

$$e = \frac{1}{E} (1 - 2\nu) \theta + 3\alpha T \quad (8)$$

که در آن:

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (9)$$

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (10)$$

در روابط فوق e و θ بترتیب کرنش‌ها و تنش‌ها محوری کل می‌باشند. با استفاده از معادله (۸) و حل معادلات (۶) برحسب تنش‌ها، داریم:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda e + 2G\varepsilon_x - \frac{\alpha ET}{1-2\nu} \\ \sigma_y &= \lambda e + 2G\varepsilon_y - \frac{\alpha ET}{1-2\nu} \\ \sigma_z &= \lambda e + 2G\varepsilon_z - \frac{\alpha ET}{1-2\nu} \end{aligned} \quad (11)$$

که در روابط فوق داریم:

$$\lambda = \frac{vE}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (12)$$

بررسی روش های عددی در آنالیز حرارتی

در بسیاری از موارد کاربردی، هندسه و یا شرایط مرزی مسئله بنحوی است که دسترسی به یک راه حل تحلیلی غیر ممکن بوده و یا آنقدر پیچیده است که ارزیابی عددی را بسیار مشکل می کند. در این موارد، استفاده از روش های آنالیز عددی مفیدترین راه حل مسئله می باشد. روش تفاضل محدود ابزار سودمندی جهت تحلیل عددی انتقال حرارت است.

برخلاف راه حل های تحلیلی، که می توان توسط آن دمای هر نقطه در جسم را محاسبه کرد، حل عددی قادر است دمای نقاط مجزا را تعیین کند. اولین قدم در بر پا نمودن مدل عددی انتخاب این نقاط می باشد. این کار با تقسیم کردن جسم مورد نظر به چند ناحیه کوچکتر و مشخص کردن یک نقطه به عنوان مرکز هر ناحیه، انجام می شود. هر گره نماینده ناحیه خاصی است و دمای آن برابر دمای متوسط آن ناحیه است. انتخاب گره ها بندرت اختیاری می باشد و اغلب به شکل هندسی جسم و دقت مورد نیاز بستگی دارد. دقت محاسبات عددی به شدت به تعداد گره ها وابسته است.

بسته به دقت مورد نظر می توان از مدل های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در تحلیل استفاده نمود. انتخاب نهایی مدل به ارزیابی دقت، سرعت و توانایی آن بستگی دارد. مدل های یک بعدی بسیار سریع بوده و مدل سازی طرح های بزرگ را با صرف زمان کمی انجام می دهند. با ریزتر کردن مش بندی نیز می توان دقت مدل را تا حدودی افزایش داد. مدل های دو بعدی در تحلیل رفتار دو بعدی پدیده های مختلف

بسیار مؤثر و مفید هستند. گرچه مدل های سه بعدی قادر به تحلیل انواع مسائل سه بعدی با دقت قابل قبول هستند، اما عیب بزرگ مدل های سه بعدی فضای زیاد برای ذخیره سازی اطلاعات و وقت گیر بودن انجام محاسبه است. مقایسه بین مدل های دو بعدی و سه بعدی نشان می دهد که در یک سد وزنی با هندسه ای تقریباً شبیه به آنچه در این مقاله به آن پرداخته شده است، در تحلیل حرارتی تنها اختلافی حدود 1°C در تاج سد ایجاد می شود که این اختلاف نیز در حدود یکسال پس از شروع ساخت اتفاق می افتد. این اختلاف درجه حرارت نمی تواند منجر به ایجاد اختلاف تنش های فاحش در تحلیل دو مدل گردد. در جدول ۱ انواع مدل های عددی از حیث ابعادی جهت انجام مطالعات مختلف پیشنهاد شده است [5]. از جدول ۱ می توان دید که مدل های دو بعدی قادر هستند تقریباً تمامی پدیده های گرمایی را که در طی ساخت یک سد حادث می شوند (به استثناء اثر درزها) تحلیل نمایند.

از آنجاییکه تحلیل مورد نظر که بر روی سد انجام می شود تحلیلی است زمانی که در گام های زمانی بسیار کوچک (در مقایسه با زمان کل ساخت سد) اجرا می شود، می توان تصور نمود که چه حجم عظیمی از اطلاعات در حین اجرای برنامه ایجاد می شود. به منظور کاستن از حجم اطلاعات حاصل از تحلیل حرارتی بدون از دست دادن دقت مورد نظر، استفاده از یک تحلیل دو بعدی مناسب تشخیص داده شد.

بررسی دقت نتایج نرم افزار (NISA)

از نرم افزار NISA برای تحلیل حرارتی و تنش ها استفاده می شود. به منظور بررسی دقت نتایج این نرم افزار در مقایسه با حل دقیق آن، مسأله ای فرضی با استفاده از دو روش تحلیل می شود. یک منشور بتنی به ابعاد مقطع $1\text{m} \times 1\text{m}$ از سه

جدول (۱) مدل های پیشنهادی در تحلیل مطالعات يك سد [5].

نوع مطالعه	سدهای قوسی	سدهای وزنی	سدهای پشت بنددار
مطالعه اولیه	دو بعدی	یک بعدی	یک بعدی
تحلیل دما در طی ساخت	دو بعدی	یک بعدی / دو بعدی	یک بعدی / دو بعدی
مرحله طرح	دو بعدی	یک بعدی	یک بعدی
تحلیل تغییرات دما	یک بعدی / دو بعدی	یک بعدی / دو بعدی	یک بعدی / دو بعدی
مطالعه خنک کردن	دو بعدی / سه بعدی	یک بعدی / دو بعدی	یک بعدی / دو بعدی
مرحله اجرای سد	دو بعدی / سه بعدی	یک بعدی با شبکه بندی ریز	یک بعدی با مش ریز
تحلیل تنش های کششی ناشی از حرارت	سه بعدی	دو بعدی / سه بعدی	دو بعدی / سه بعدی

طرف شامل وجوه طرفین و بالایی در دمای 500K قرار دارد و سطح چهارم در تماس با هوای 300K است. با فرض $h=10\text{w/m}^2\cdot\text{K}$ گرمای هیدراسیون سیمان برابر $100\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ و $\Delta x = 0.25\text{m}$ با استفاده از مش بندی به ابعاد $\Delta y =$ نتایج در شکل (۱) آمده است. می توان دید که ماکزیمم خطای حاصله بین دو روش حدود $1/95\%$ است که در مسائل مهندسی قابل قبول است [8]. لازم به توضیح است در تمامی کنتورهای ترسیم شده همانند شکل ۱ فاصله بین حداقل و حداکثر مقادیر کنتور به ده قسمت مساوی تقسیم می شود.

بکارگیری مدل در تحلیل حرارتی یک سد وزنی بتنی

سد مورد نظر دارای ارتفاع ۲۸ متر، عرض پایه ۳۲ متر و عرض تاج ۱۰ متر بوده و دارای دو گالری در ارتفاع های ۶ و ۲۶ متری است. ابعاد این گالری ها $2\text{m} \times 2\text{m}$ است. سد از نوع وزنی بتنی است و در شرایط آب و هوایی شمال استان خراسان (شهرستان مشهد) ساخته می شود (شکل ۲ - ب). در این مطالعه ۵ حالت مختلف مورد تحلیل واقع شده که هم شرایط مرزی و هم خصوصیات بتن در آنها مورد تغییر قرار گرفته است.

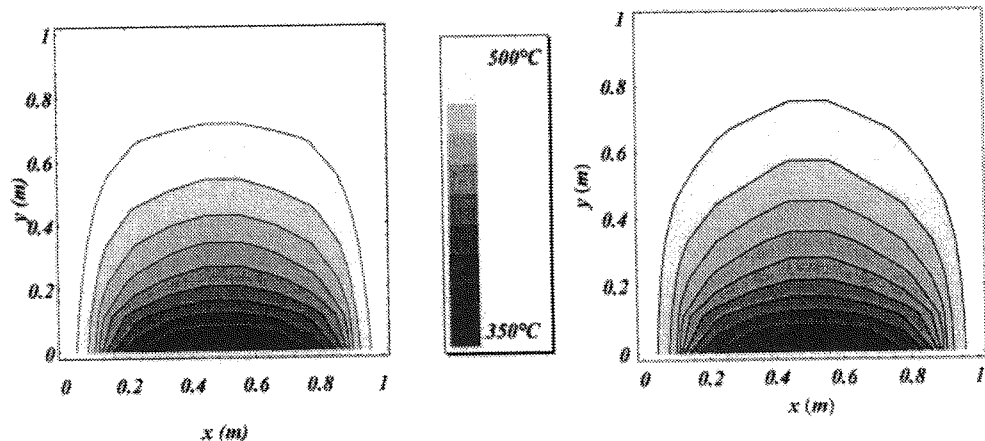
حالت ۱: بتن ریزی در فصل گرم (مرداد ماه) با استفاده از سیمان معمولی نوع I. این حالت در نمودارها و نتایج گرفته شده حالت تحلیل 'S' نامیده می شود. لازم به ذکر است که گرمای هیدراسیون سیمان پارامتری وابسته به زمان است و برای هر سه روز متوالی از یک مقدار ثابت استفاده می شود. جهت اطلاعات بیشتر به مرجع شماره [3] مراجعه شود.

حالت ۲: بتن ریزی در فصل سرد (دی ماه) سیمان معمولی. بقیه پارامترها مثل حالت قبل انتخاب شده است تا بتوان دقیقاً تأثیر پارامترها را بررسی کرد [9]. این حالت به نام 'W' نامگذاری شده است.

حالت ۳: این حالت مشابه حالت ۲ است با این تفاوت که در این حالت ضریب انتقال حرارت بتن از $K = 2.5 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{C}}$ به $K = 1.8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{C}}$ تبدیل شده است. با این کار تأثیر تغییرات K بررسی شده است. این حالت به نام 'K' نامیده می شود.

حالت ۴: این حالت مشابه حالت ۲ با گرمای هیدراسیون کم است. فرض بر آن است که در ساخت سد از سیمان نوع IV استفاده شود. این حالت تحلیل 'Q' نامگذاری شده است. حالت ۵: بعد از ساخت سد در هنگام آبیگری شوک حرارتی کاهش دما از دمای محیط به 1C (درجه حرارتی که منجر به یخ زدن آب نمی گردد) به مقطع وارد می شود.

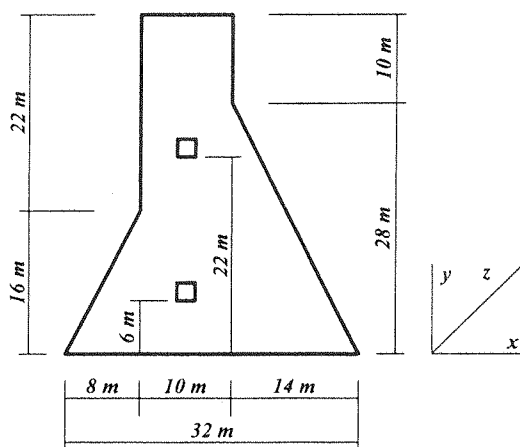
در نرم افزار NISA از یک روش عددی تفاضل محدود با فرمول بندی ضمنی برای تحلیل دما استفاده می شود [4]. نخست مقطع بتن ریزی شده شبکه بندی می شود. دمای بتن در مجاورت هوا دمای هوا فرض می شود. آنگاه تحلیل حرارتی در مقطع مورد نظر در هر ۱۰۰ ثانیه یکبار انجام می شود. اینکار تا انجام بتن ریزی بعدی ادامه می یابد. فرض می شود بین دو بتن ریزی متوالی سه روز فاصله باشد. در این مدت تمامی بلوک ها به ارتفاع یکسانی می رسند. بدین ترتیب کل زمان تحلیل به حدود دو ماه می رسد. پس از تحلیل حرارتی هر مقطع بتنی، دماهای نهایی به عنوان مقادیر اولیه به مقطع بتنی در هر مرحله منتقل شده و بتن تازه ریخته شده که همدمای محیط است بر روی مقطع قبلی قرار داده می شود و دوباره تحلیل زمانی هدایت حرارتی انجام می شود. تعداد گره ها و المان های بکار رفته در هر مرحله از تحلیل متفاوت است ولی در حالت ساخت کامل سد تعداد المان ها ۸۵۰ و تعداد گره ها ۵۴۲۰ می باشد. المان ها از نوع ۴ ضلعی با ۸ گره و ۳ ضلعی با ۶ گره می باشد که در هر گره تنها درجه آزادی دما وجود دارد. شبکه بندی مقطع سد بعد از اجرای



شکل (۱) توزیع درجه حرارت در یک منشور بتنی با استفاده از (الف) حل دقیق (ب) نرم افزار NISA.

استفاده از سرعت باد محلی در زمان تداوم آن منجر به یک ضریب انتقال جابجایی می شود که با ضریب انتقال جابجایی آزاد که در حالت سکون رخ می دهد میانگیری وزنی شده و از یک مقدار متوسط $21 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ استفاده شده است. لازم به ذکر است استفاده از مقادیر دقیق تر محاسبات را بسیار پیچیده می سازد. بعنوان مثال این ضریب به شدت به شکل مقطعی که در معرض خنک شدن قرار می گیرد، وابسته است. - مسأله تابش خورشید از عواملی است که تأثیر کمتری بر توزیع دما در بدنه سد دارد. بعلت عدم وجود آمار کافی از روابط تجربی ارائه شده در [۱] با اعمال طول و عرض جغرافیایی مشهد از مقدار متوسط $152/65 \text{ w/m}^2$ بعنوان تابش رسیده به سطح استفاده می شود که از این مقدار با توجه به رنگ و سطح بتن تنها مقدار ۷۵٪ آن جذب می شود که مقدار ناچیزی است و از کمترین مقدار حرارت هیدراسیون سیمان که در روزهای آخر تحلیل تولید می شود کمتر است. - حرارت هیدراسیون سیمان عامل اصلی ایجاد تنش های حرارتی، است. کل حرارت هیدراسیون تولید شده الزاماً مهم نبوده بلکه روند ایجاد حرارت حائز اهمیت است. چنانچه کل حرارت در محدوده زمانی طولانی تر تولید گردد، افزایش کمتری در درجه حرارت بتن خواهیم داشت. این روند به شدت به درجه حرارت بتن بستگی دارد. مثلاً حرارت هیدراسیون تولید شده برای سیمان معمولی در درجه حرارت $4^\circ C$ تقریباً نصف همان نوع سیمان در درجه حرارت $32^\circ C$ است. شکل عمومی تابع حرارت تولید شده بر حسب زمان به صورت یک تابع نمایی می باشد:

$$Q = Q_0 (1 - e^{-t/\lambda}) \quad (14)$$



(ب)

کامل آن در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. بمنظور در نظر گرفتن مسائل تبادل حرارتی در پای سد المان بندی در پی به عمق ۶ متر ادامه یافت.

پس از انجام تحلیل حرارتی نوع المان عوض شده و مدل دوباره مش بندی می شود چون همان طور که گفته شد المان های بکار رفته در تحلیل حرارتی در این برنامه فقط درجه آزادی دما را قبول می کنند. مدل المان بندی اجزاء محدود دقیقاً منطبق بر شبکه نشان داده شده در شکل (۲-الف) می باشد. سپس دماهای محاسبه شده روی گره ها قرار می گیرد و با استفاده از روش عددی اجزاء محدود تحلیل تنش انجام شود.

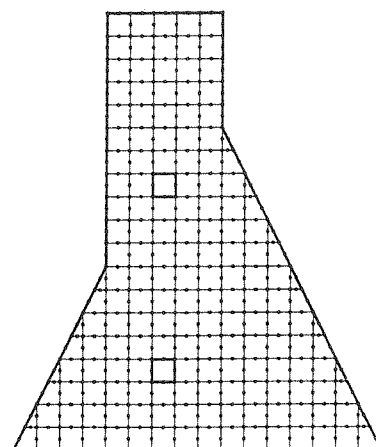
شرایط محیطی و خواص مصالح

- با داشتن درجه حرارت های حداقل و حداکثر روزانه مقدار درجه حرارت در هر لحظه از رابطه تقریبی زیر محاسبه می شود [۲]:

$$T = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) + \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) \cdot \sin \left[\frac{2\pi (t - 32400)}{86400} \right] \quad (13)$$

که در این رابطه T درجه حرارت هوا در زمان t (برحسب ثانیه) بوده و Tmax و Tmin به ترتیب درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه هستند. فرض بر آن است که حداکثر درجه حرارت در ساعت ۳/۰۰ بعد از ظهر و حداقل آن در ساعت ۳/۰۰ بامداد رخ دهد.

- سرعت باد محلی بر انتقال حرارت از طریق جابجایی مؤثر است که چنین حالتی را جابجایی اجباری می گویند.



(الف)

شکل (۲) المان بندی مقطع سد و مشخصات هندسی آن.

$$K = 2.9 \frac{w}{m \cdot ^\circ C}, c = 1.02 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$$

در روابط فوق α, ν, c و E به ترتیب گرمای ویژه، ضریب پواسون، ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیسیته می باشند.

نتایج تحلیل حرارتی

در ادامه، نتایج مربوط به تحلیل حالات مختلف آورده شده است. البته نتایج تحلیل برای هر دو متر بتن ریزی محاسبه شده است ولی به علت حجم زیاد اطلاعات، تنها چند حالت از آن نمایش داده شده است.

در اشکال ۳- (الف) و (ب) بترتیب توزیع درجه حرارت در دو حالت 'S' و 'Q' حین اجرای سد (تا ارتفاع ۲۴ متری) نمایش داده شده است. الگوی حرارتی نشان داده شده، مؤید ایجاد درجه حرارت بالا در داخل بدنه سد می باشد با حداکثر درجه حرارت $62/98^\circ C$ که این حداکثر در روی گالری زهکش تحتانی متمایل به وجه پایین دست سد رخ می دهد. در شکل ۳- (ب) حالت (Q) در مقایسه با شکل ۳- الف حداکثر دماها به مقادیر بسیار کمتری محدود می شوند. همان طور که مشاهده می شود حداکثر درجه حرارت به $29/16^\circ C$ می رسد. با گذشت زمان و کامل شدن اجرای سد مجدداً توزیع حرارتی در داخل بدنه سد ۳ روز بعد از اتمام عملیات اجرایی در شکل ۴ نشان داده شده است. حداکثر درجه حرارت به $63/08^\circ C$ می رسد و الگوی توزیع حرارتی در داخل بدنه سد از همان الگوی مشاهده شده در اشکال ۳ پیروی می کند. عدم تغییرات زیاد درجه حرارت در داخل بدنه سد در حین ساخت و بعد از ساخت معرف آن است که دمای داخل سد

که در آن Q کل حرارت ایجاد شده تا زمان t، Q_0 هیدراسیون، t زمان برحسب ساعت از شروع اختلاط بتن و نمایی X ثابت زمانی است. این معادله نمایی را می توان با چند تقریب خطی جایگزین نمود. در این تقریب ها شیب این خطوط از اهمیت ویژه ای برخوردار است. حرارت هیدراسیون ایجاد شده به پنج بازه از ۰ تا ۳، ۳ تا ۷، ۷ تا ۲۸، ۲۸ تا ۹۰، ۹۰ تا ۳۶۰ روز تقسیم می شود. براساس خواص حرارتی سیمان های نوع I و نوع IV (سیمان با حرارت هیدراسیون کم) در هر یک از این بازه ها از مقادیر حرارت هیدراسیون تولید شده ذیل در تحلیل استفاده می شود [9].

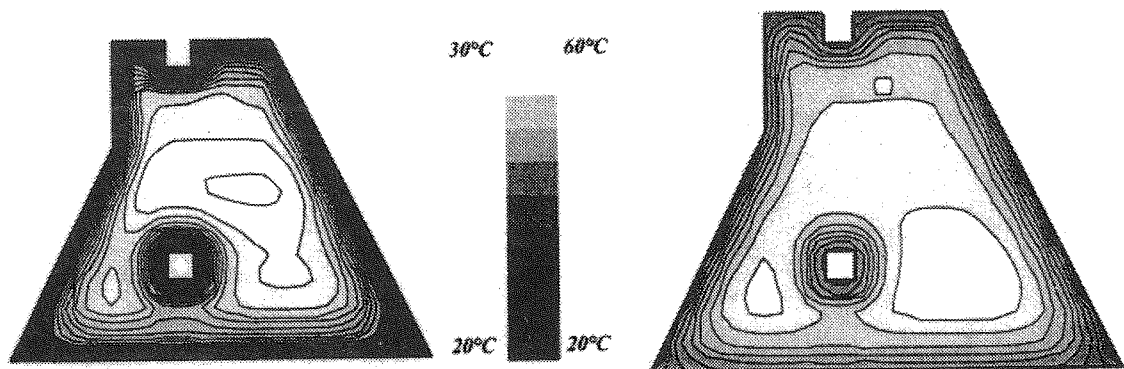
نوع I	$H_1 = 221.8 \text{ J/m}^3 \cdot s$	نوع IV	$H_1 = 150.9 \text{ J/m}^3 \cdot s$
	$H_2 = 53.2 \text{ J/m}^3 \cdot s$		$H_2 = 26.62 \text{ J/m}^3 \cdot s$
	$H_3 = 8.86 \text{ J/m}^3 \cdot s$		$H_3 = 8.86 \text{ J/m}^3 \cdot s$
	$H_4 = 1.3 \text{ J/m}^3 \cdot s$		$H_4 = 1.30 \text{ J/m}^3 \cdot s$
	$H_5 = 0.3 \text{ J/m}^3 \cdot s$		$H_5 = 0.3 \text{ J/m}^3 \cdot s$

- طرح مخلوط بتن مورد استفاده در تحلیل از رابطه $0.4:1:2:4$ تبعیت می کند. جهت سایر اطلاعات مورد نیاز بتن از مقادیر زیر استفاده می شود.

$$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3, K = 1.8, 2.5 \frac{w}{m \cdot ^\circ C}, c = 1.045 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}, \nu = 0.18$$

$$\alpha = (7.2, 10.6) \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ C}, E = 2.6 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$$

همچنین برای خواص حرارتی سنگ پی از مقادیر زیر استفاده شده است.

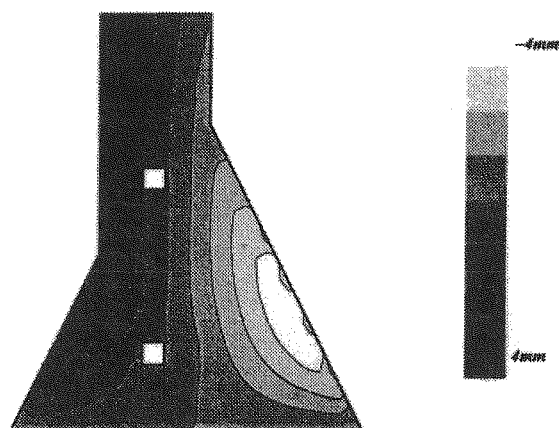


(ب)

(الف)

شکل (۳) توزیع دما در مقطعی به ارتفاع ۲۴ متر در دو حالت (الف) S و (ب) Q.

از شدت تنش کاسته می شود. همچنین مقادیر اندکی از تنش کششی در دیواره پایین دست و در تراز تاج سد قابل ملاحظه است.



شکل (۵) تغییر مکان ها در جهت x سه روز پس از پایان ساخت سد در حال S.

در شکل های ۷ و ۸ می توان تنش های حرارتی تولید شده σ_x و σ_y را سه روز بعد از اتمام بتن ریزی در حالت S مشاهده نمود. تنش های حرارتی در جهت y تقریباً از الگویی شبیه به تنش های حرارتی در جهت x پیروی می کنند. بیشترین تنش های فشاری در جهت z را می توان در حدفاصل وجه پایین دست سد و گالری زهکش پایینی مشاهده نمود، جایکه بیشترین حجم از بتن محصور شده وجود دارد. یادآوری می شود تنش های عمودی در جهت z براساس فرض کرنش ثابت برای هر المان بدست آمده است.

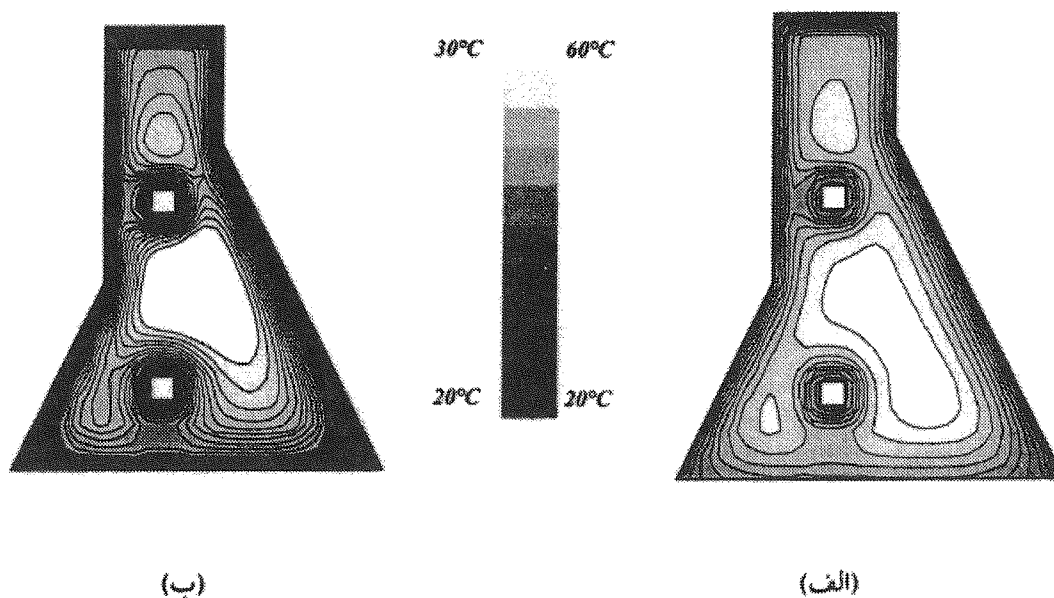
بعد از رسیدن به یک حداکثر نسبی از تغییرات چندانی برخوردار نیست و تقریباً از یک رژیم یکنواخت تولید و انتشار پیروی می کند. در قسمت گالری ها به علت تماس بتن با هوا مقداری گرما تلف می شود و از تمرکز دما در مقطع سد کاسته می شود و همچنین باعث راندن موقعیت حداکثر دما به پایین دست حد فاصل بین گالری و وجه پایین دست می شود.

نتایج تحلیل تنش و تغییر مکان

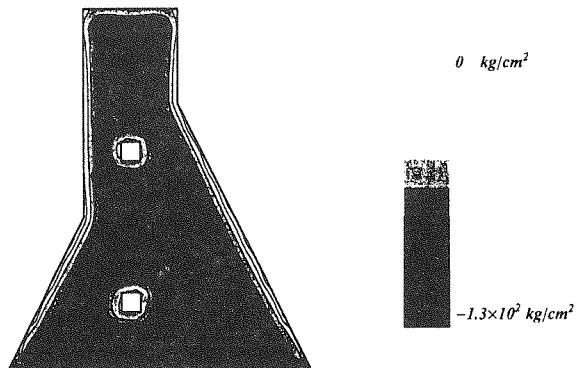
با مشخص شدن توزیع دما در بدنه سد می توان تنش ها و تغییر مکان های ناشی از اختلاف دماها را در بدنه سد بدست آورد. علت تولید این تنش ها و تغییر مکان ها انبساط حرارتی بتن است.

تغییر مکان های ایجاد شده در المان های تشکیل دهنده مقطع سد متناظر با شکل (۴-الف)، در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل می توان تصور نمود که خطی فرضی مقطع سد را تقریباً از وسط به دو قسمت بالا دست و پایین دست تقسیم نموده که در طرف پایین دست بعلت وجود هسته حرارتی داغ تغییر مکان های مثبت ایجاد شده و در طرف مقابل آن تغییر مکان های منفی در بالا دست را سبب می شود. حداکثر تغییر مکان های مثبت و منفی به ترتیب برابر $3/3$ و $4/3$ میلیمتر می باشند.

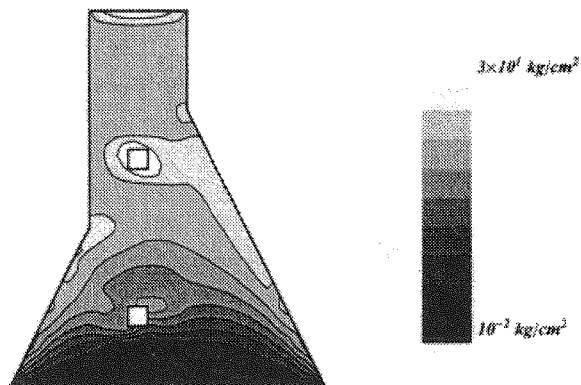
در شکل ۶ تنش محوری در جهت x (σ_x) سه روز پس از اتمام بتن ریزی در حالت S نشان داده شده است. از شکل می توان دید که تنش های حرارتی فشاری در مجاورت پای سد از شدت بیشتری برخوردار است و در قسمت های بالاتر



شکل (۴) توزیع دما سه روز پس از پایان ساخت سد در حالت (الف) S و (ب) Q.



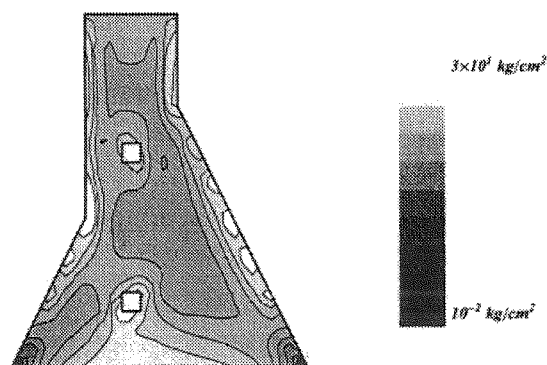
شکل (۸) توزیع تنش σ_x سه روز پس از اتمام بتن ریزی در حالت S.



شکل (۶) توزیع تنش σ_x سه روز پس از پایان ساخت سد در حالت S.

بررسی سایر حالات تحلیل

با در نظر گرفتن عوامل خارجی و داخلی مؤثر در رفتار حرارتی سد همانطور که اشاره شد پنج حالت تحلیل بوجود می آید. بمنظور مقایسه چهار حالت 'S'، 'W'، 'K' و 'Q' نتایج حاصل از تحلیل در موقعیت های زمانی مشابه از زمان اجرای سد و در موقعیت های مکانی مشخص مثلاً در سه نقطه A(6,4)، B(13,32) و C(22,6) با پراکندگی نسبی یکنواخت که نسبت به میداء واقع در پاشنه برحسب متر بیان شده اند، با یکدیگر مقایسه شده اند. لازم به ذکر است از آنجایی که بررسی نتایج حاصل از حالت پنجم نشان می دهد که این حالت نقش زیادی در تغییر تنش های حرارتی نداشته است،



شکل (۷) توزیع تنش σ_y سه روز پس از اتمام بتن ریزی در حالت S.

جدول (۲) کمیت های حرارتی، تنش ها و تغییر مکان ها در سه نقطه از سد ناشی از تحلیل حالت های مختلف.

حالت	موقعیت نقطه	T (°C)	σ_x (kg/cm ²)	σ_y (kg/cm ²)	δ_x (mm)	δ_y (mm)
S	نقطه A	۵۵/۸	-۵۸/۵	-۱۴/۶	-۱/۹	۱/۹
	نقطه B	۶۲/۵	-۵۴/۹	-۱۱/۷	۱/۶	۳/۳
	نقطه C	۵۵/۵	-۲/۳۸	-۹/۴۳	-۱/۷	۱۴/۹
W	نقطه A	۳۲/۸	-۳۴/۴	-۱۱/۲	-۱/۱	۱/۰
	نقطه B	۳۸/۳	-۳۲/۵	-۱۰/۴	۱/۰	۱/۸
	نقطه C	۳۶/۰	-۲/۴۰	-۹/۴	-۱/۲	۹/۱
K	نقطه A	۳۵/۵	-۳۷/۷	-۱۲/۵	-۱/۲	۱/۱
	نقطه B	۳۹/۵	-۳۳/۹	-۹/۲۵	۱/۰	۱/۹
	نقطه C	۳۶/۵	-۲/۲۵	-۸/۴۶	-۱/۲	۹/۶
Q	نقطه A	۲۴/۴	-۲۶/۲	-۸/۱۰	۰/۸۴	۰/۷۹
	نقطه B	۲۸/۶	-۲۴/۳	-۶/۶۴	۰/۷۴	۱/۴
	نقطه C	۲۷/۲	-۱/۱۹	-۵/۸۵	-۰/۸۷	۷/۰

از آوردن نتایج آن جهت مقایسه با سایر حالات خودداری شده است.

مقایسه کمیت های مختلف در نقاط مشابه برای دو حالت S و W نشان می دهد که تا چه حد می توان از مشکلات ناشی از بتن ریزی در هوای گرم کاست. بطور متوسط تقریباً حدود ۴۰ و ۲۰ درصد از میزان تنش های محوری به ترتیب در جهات x و y در حالت W نسبت به حالت S کاسته شده است. تأثیر بکارگیری لوله های خنک کننده را نیز می توان با استفاده از همین دو حالت پیش بینی نمود.

افزایش ضریب هدایت حرارتی باعث خنک تر شدن سریعتر داخل بدنه سد می شود که بر روی تنش های ایجاد شده در سد تأثیر می گذارد. مقایسه نتایج نشان داده شده در جدول بین حالات W و K نشان می دهد که در زمان مشابه، شدت تنش ها برای حالت K که در آن ضریب هدایت حرارتی ۲۸ درصد نسبت به حالت W کاهش یافته، حدود ۱۰ درصد افزایش داشته است. این امر بدیهی است زیرا با توجه به ثابت بودن درجه حرارت المان های خارجی و نرخ انتشار کمتر حرارت تولید شده داخلی، افزایش درجه حرارت را در پی داشته که خود منجر به ایجاد تنش های بیشتر می شود.

از آنجاییکه گرمای هیدراسیون سیمان بعنوان مهمترین عامل داخلی نقش بسیار تعیین کننده ای در توزیع دما و ایجاد تنش دارد و اینکه تنش های حرارتی را می توان با استفاده از سیمان کندگیر نوع IV تا حدودی کنترل کرد، در آیین نامه های اجرایی ساخت سدهای بتنی و وزنی [3] نیز بر آن تأکید دارند. یکی دیگر از حالت های تحلیل استفاده از سیمان های با حرارت هیدراسیون کم است. دیاگرام های موجود حرارت هیدراسیون، مقدار کل حرارت تولید شده بوسیله واحد وزن سیمان را ارائه می کنند که پارامتری وابسته به زمان است. بمنظور استفاده دقیق تر از این دیاگرام ها میزان خالص حرارت تولید شده در هر بازه زمانی از دیاگرام ها محاسبه شده و در طول کل آن بازه بصورت ثابت بکار رفته است. دیاگرام مربوط به حرارت هیدراسیون برای سیمان های معمولی و کندگیر در مرجع شماره [9] آمده است.

مقایسه حالت W و Q نشان می دهد که دماها در سیمان های کندگیر بمقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافته و در نتیجه تنش های حرارتی ناشی از آن نیز کاهش می یابد بطوریکه در حال Q تنش های محوری در جهات x و y بطور متوسط به ترتیب حدود ۲۵ درصد و ۳۲ درصد نسبت به حالت W کاهش نشان می دهند.

سه فاکتور دیگر که به نظر می رسد در نتایج حاصل از تحلیل تأثیر گذار باشند عبارتند از دمای آب، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه بتن.

- هر چند دمای آب پشت سد شرایط بالادست را به کلی تغییر می دهد ولی از آنجایی که دمای آب دامنه خیلی متفاوتی با دمای هوا ندارد و تنها اختلاف فاز حرارتی بین آنها وجود دارد تأثیر این پارامتر خیلی کم است. در ضمن این تأثیر در دراز مدت اعمال می شود زیرا آبیگری سد یکباره انجام نمی شود و ممکن است آبیگری روزها به طول انجامد. موضوع دوم این است که به فرض تأثیر آب بر روی توزیع دما و تنش سرمایه گذاری روی آن برای کاهش تنش های ایجاد شده بی مورد است زیرا تغییر دمای آب عملاً غیر ممکن است [12].

- توزیع درجه حرارت در داخل بدنه مستقل از ضریب انبساط حرارتی است اما میزان تنش های ایجاد شده در داخل بدنه به شدت به این ضریب بستگی دارد. با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن، تنش های تولید شده به مقدار زیادی افزایش می یابند. نتایج حاصل از تحلیل نشان می دهد چنانچه ضریب انبساط حرارتی بتن از $10^{-6} \times 7/2$ به $10^{-6} \times 8/10$ بر درجه سانتیگراد تغییر کند یعنی افزایشی برابر ۵۰ درصد داشته باشد، درصد تغییر تنش ها و تغییر مکان های ناشی از آن نیز حدوداً به همان میزان افزایش خواهد داشت.

- گرمای ویژه مقدار گرمایی است که دمای یک کیلوگرم از یک ماده را 1°C افزایش می دهد. با تعریف مذکور هر چه گرمای ویژه بتن بیشتر باشد افزایش دمای کل بدنه کمتر است ولی چون همه نقاط تقریباً به یک میزان کاهش دما می دهند و این اختلاف دما بین نقاط مختلف است که باعث تولید تنش می شود در مجموع تأثیر چندانی بر تنش های ایجاد شده نمی گذارد.

نتیجه گیری

روند تغییرات حرارتی در داخل بدنه سد یک فرایند گام به گام زمانی است. بررسی نتایج نشان می دهد که حداکثر حرارت در بدنه سد در موقعیتی رخ می دهد که بیشترین حجم بتن آنرا فرا گرفته باشد. این الگو برای دو نوع بتن با سیمان معمولی و کندگیر تقریباً یکسان است. تنها تفاوت در مقدار درجه حرارت است که به میزان قابل توجهی برای بتن با حرارت هیدراسیون کم، کمتر می باشد. علاوه بر این بعد از گذشت زمانی که محدود به زمان ساخت سد است عملاً درجه حرارت هسته سد به مقدار حداکثر خود رسیده و در واقع روند تولید و اتلاف حرارت بعد از آن تفاوت ناچیزی با یکدیگر خواهند داشت.

همچنین تنش های محوری در جهت x در قسمت های تحتانی نزدیک به پای سد حداکثر بوده و با حرکت به سمت تاج سد از شدت آن کاسته می شود. تنش های محوری در

آمده، در هسته مرکزی و حد فاصل بین تاج و گالری فوقانی به حداکثر می‌رسد. نکته جالب توجه آنکه الگوی تنش‌های محوری در جهات y و z بسیار شبیه به الگوی توزیع درجه حرارت در بدنه سد است.

جهت y در گوشه‌های پای سد دارای بیشترین مقدار هستند و این تنش‌ها در حرکت از گوشه‌ها به سمت هسته مرکزی سد به آهستگی اندکی از شدت خود را از دست داده و دوباره در هسته مرکزی سد به مقدار حداکثر نسبی می‌رسد. مقدار تنش محوری در جهت z که براساس فرض کرنش ثابت بدست

مراجع

- [1] علیزاده، امین، اصول هیدرولوژی کاربردی، مشهد، آستان قدس رضوی، ۱۳۷۲.
- [2] قطبی، محمد حسن، هواشناسی عمومی، تهران، سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۶۱.
- [3] American Concrete Institute, ACI Manual of Concrete Practice, 207.1R-87, Detroit, Michigan, 1986.
- [4] EMRC, Manual of NISA, EMRC, 1984.
- [5] Salet, E. and Lancha, J.C., "Concrete Dams: Models for the Analysis of the Thermal Behaviour During Construction and Use", Dam Engineering Vol. VII, Issue 3, 1997.
- [6] Herzog, M.A.M., Practical Dam Analysis, Thomas Telford services LTD, 1 Heron Quay, London, 1999.
- [7] Incropera, F. and Dewitt, D., Introduction to Heat Transfer, John Wiley and Sons. 1985.
- [8] Lewis, R.W., Morga, K. and Schrefler, B.A., Numerical Methods in Heat Transfer, New York, J.Wiley 1981.
- [9] Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitman Publishing Company, New York. 1972.
- [10] Santurjian, O. "Thermal Studies of Concrete Dams", Dam Eng. Vol. IV, Issue 1, 1993.
- [11] Timoshenko, S.P. and Goodier, G.N., "Theory of Elasticity", Mc. Graw Hill Book Company, 1956.
- [12] Bofang, Z. "Prediction of Water Temperature in Deep Reservoirs", Dam Eng. VIII, Issue 1 Vol. VIII, Oct. 1996.