

## بهینه‌یابی زمان و دمای ساخت سد در جهت آنالیز حرارتی سد بتنی غلتکی

علیرضا مردوخ پور<sup>۱</sup>  
رامتین صبح خیز<sup>\*۲</sup>  
فروزان صابری<sup>۳</sup>

### چکیده

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 سدهای بتن غلتکی، معمولاً مقادیر زیادی از بتن در مدت‌زمان کوتاهی ریخته می‌شود که حرارت تولیدشده در اثر هیدراتاسیون سیمان، منجر به افزایش دما در بدنه سد شده که در نتیجه شیب حرارتی زیادی ایجاد می‌شود. در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای تحلیل حرارتی سد در حین ساخت و بتن‌ریزی و سپس از الگوریتم شبکه پرسپترون جهت بهینه‌یابی زمان ساخت بر اساس دمای حداکثر در بتن و تنش آن استفاده شده است. نحوه اعمال تغییرات حرارتی بدین شکل است برای سازه لایه‌های ۵۰ سانتی‌متری فرضی در نظر گرفته می‌شود که هر لایه ۷۲ ساعت زمان تحلیل را به خود اختصاص می‌دهد. به‌طور کلی مسئله مورد تحلیل، ۱۲ بار تحلیل می‌گردد. هر تحلیل بر اساس شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال در نظر گرفته می‌شود تا با جمع‌آوری اطلاعات و با استفاده از الگوریتم شبکه پرسپترون به بهینه‌ترین زمان برای ساخت حاصل شود. نتایج نشان می‌دهد که با نظر گرفتن وزن لایه‌ها در آنالیز تنش، مقادیر کرنش کششی به‌طور محسوسی کاهش به‌ویژه در بستر دارد. مطابق با این تحلیل شروع پروژه از دی‌ماه کمترین دمای بیشینه بتن در طول زمان احداث سد (براساس ماه) را نتیجه داد. همچنین با توجه به روند کاهش دمای قسمت مرکزی سد در تحلیل مربوط به ۵۲۰ روز بعد از اتمام اجرا و در دوره بهره‌برداری، پیش‌بینی می‌شود که زمان رسیدن دمای بدنه سد به حالت تعادل نهایی حدوداً یک دهه طول بکشد. البته نتایج بر اساس تحلیل یک سد انجام شده است و برای شرایط و سال‌های متفاوت می‌تواند تا حدی متفاوت باشد که از محدودیت‌های پژوهش است.

### واژه‌های کلیدی:

زمان ساخت سد، دمای ساخت سد، تحلیل سازه‌ای، بهینه‌یابی، سد بتنی غلتکی

۱. استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

\*۲. دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، sobhkhizarman@yahoo.co.uk

۳. کارشناس ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

## مقدمه

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح جهان شناخته‌شده و گستره وسیعی از سازه‌های ساختمانی، سازه‌های دریایی، پل‌ها، تونل‌ها، سدها، روسازی‌ها را تشکیل می‌دهد. از طرفی در چند دهه اخیر، احداث زیرساخت‌ها به‌شدت گسترش یافته و در این میان سازه‌های بتنی سهم قابل توجهی را به خود اختصاص داده‌اند. پیشرفت حاصل در تکنولوژی بتن حجیم به‌منظور کاهش درصد سیمان منجر به پیدایش روش بتن غلتکی گردیده است. در این بین، بتن غلتکی در مقایسه با بتن متعارف، امکان دست‌یابی به‌سرعت زیادتری را فراهم می‌سازد که مزایای اقتصادی چون صرفه‌جویی در قیمت واحد حجم بتن و کاهش عمده در زمان ساخت و همچنین در قالب‌بندی و غیره را در پی خواهد داشت. این نوع از بتن‌ها در جاهایی که امکان بتن‌ریزی لایه‌ای با نسبت بالای سطح به ضخامت وجود دارد، بسیار مناسب تشخیص داده شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به کاربرد این نوع از بتن در سدها و جاده‌ها اشاره کرد. بتن غلتکی روشی نوین برای ساخت اقتصادی سازه‌های حجیم از جمله سدهای وزنی است. در این نوع بتن ترکیبی از ویژگی‌های تکنولوژی بتن و خاک به کار گرفته‌شده و با استفاده از ماشین‌آلات ساخت سدهای خاکی حمل، پخش و متراکم می‌شود؛ بنابراین بتن‌ریزی سریع‌تر و هزینه اجرا به‌شدت کاهش می‌یابد (نعمتی و همکاران ۱۳۸۵).

به دلیل اهمیت تحلیل حرارتی سد، مطالعات زیادی در زمینه شبیه‌سازی رفتار حرارتی سد در مدت‌زمان اجرا و دوره بهره‌برداری انجام گرفته است

خواص بتن را تابع زمان در نظر گرفته‌شده و پیشنهادشده که اگر اجرای سد در فصل‌های خنک انجام شود، دمای پیشینه‌ی سد کاهش خواهد یافت (لونا و وو<sup>۱</sup> ۲۰۰۰).

دمای بتن بر اثر حرارت بالای تولیدشده در طی واکنش هیدراتاسیون سیمان در سازه‌های حجیم و در کنار تأثیر عوامل محیطی و تغییرات حجمی سازه بررسی شده است. نتایج نشان

می‌دهد که مهم‌ترین عامل در ایجاد تنش کششی و ترک-خوردگی در سدها، وجود عامل محدودکننده‌ای است که در مقابل کاهش حجم بتن ناشی از انقباض، مقاومت می‌کند. (حیدری و احمدی ۱۳۹۰).

تحقیقات در زمینه حرارت سدها انجام شده است که بررسی توزیع دما در بدنه سد بتنی وزنی و آنالیز حرارتی برای سد بتن غلتکی به‌منظور بررسی پاسخ حرارتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس<sup>۲</sup> می‌توان اشاره کرد (ملکاوی<sup>۳</sup> ۲۰۰۳).

سد بتنی وزنی با توجه به رفتار غیرخطی ویسکوالاستیک<sup>۴</sup> و مقایسه با رفتار واقعی سد به‌صورت عددی بررسی شده است. نتایج مدل پیشنهادی تطابق خوبی با رفتار واقعی سد به لحاظ توزیع تنش و ترک نشان داد. همچنین به بررسی راستای گسترش ترک در سد بتنی غلتکی پرداخته‌شده و نشان داده‌شده که بحرانی‌ترین وضعیت برای گسترش ترک در امتداد محور سد است. (کوزمانوویچ و همکاران<sup>۵</sup> ۲۰۱۵).

تغییرات تنش‌های حرارتی و توزیع تنش‌ها در سد کینتا<sup>۶</sup> را بعد از ساخت و در طول بهره‌برداری بررسی شده است. نتایج نشان داد که همواره یکی از مشکلات مدل‌سازی سیستم سد جهت تحلیل حرارتی، اعمال دمای محیط متناسب با زمان اجرای هر لایه‌ی بتن‌ریزی است (خانزائی و همکاران<sup>۷</sup> ۲۰۱۵). ساخت سد بتن غلتکی در شرایط آب هوایی خشک بررسی شده است. نتایج نشان داد که فناوری سد RCC می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مطمئن و جایگزین جهت قرار دادن و کاهش دمای قرارگیری در دو طرف بالادست و پایین‌دست برای غلبه بر خطر ترک‌های حرارتی استفاده شود (به‌یعقوب و باگاما<sup>۸</sup> ۲۰۱۹).

شبیه‌سازی حرارتی سد بتنی غلتکی و تأثیرات مدل هیدراتاسیون<sup>۹</sup> و کنش محیط زیستی و میدان حرارتی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که مدل هیدراتاسیون تأثیر مهمی بر دما در حین ساخت و میزان تولید گرما دارد. علاوه بر این، روند هیدراتاسیون و ارزیابی دما متأثر از شرایط آب و هوایی هستند. (فارفن و همکاران<sup>۱۰</sup> ۲۰۲۰).

<sup>6</sup> Kinta

<sup>7</sup> Khanzaei et al

<sup>8</sup> Bayaghoob and Bamaga

<sup>9</sup> Hydration

<sup>10</sup> Farfan et al

<sup>1</sup> Luna and Wu

<sup>2</sup> Ansys

<sup>3</sup> Malkawi

<sup>4</sup> Viscoelastic

<sup>5</sup> Kuzmanovic et al

درجه حرارت در داخل توده بتنی، روش مناسب و دقیق انجام آنالیز حرارتی توده بتنی، استفاده از روش اجزاءمحدود است. معادله پخش گرما در حالت کلی یک معادله دیفرانسیلی مشتقات جزئی غیر همگن 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 (منفرد و والامنش ۱۳۸۷).

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

T دمای ناحیه برحسب [K]، ρ چگالی برحسب [kg/m<sup>3</sup>]  
 K<sub>x</sub>, K<sub>y</sub>, K<sub>z</sub> ضرایب هدایت حرارتی جسم برحسب [W/m<sup>2</sup>.K]  
 C، گرمای ویژه برحسب [J/kg.K] و Q نرخ تولید حرارت داخلی برای واحد حجم جسم برحسب [W/m<sup>3</sup>] است. (منفرد و والامنش ۱۳۸۷)

### 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. در اختیار داشتن شرایط مرزی در مسائل غیردائمی مانند پژوهش حاضر بسیار مهم است، چراکه زمان عامل مؤثر در تعیین پاسخ‌های مسئله است. شرایط مرزی استفاده شده در این پژوهش به صورت زیر می‌باشند (منفرد و والامنش ۱۳۸۷).

**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 می‌آید. شکل کلی آن به ترتیب در فرایند گرمایش و سرمایش به صورت معادله ۲ است که در آن مکانی معلوم بوده که تبادل حرارتی در آن صورت می‌گیرد:

شبيه‌سازی آزمایشگاهی و عددی بر رژیم دما بتن غلتکی در ساخت سد ترکیب شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر دمای سد بتنی غلتکی بر اساس شدت بتن‌ریزی و دمای اختلاط بتن است. به طوری در میزان بتن‌ریزی ۰/۶ متر بر روز و دمای اختلاط بتن ۲۰ درجه سلسیوس<sup>۱</sup> باشد آنگاه حداکثر دما در ناحیه مرکزی سد بعد از ۱۸۰۰ ساعت از شروع ساخت سد حدود ۳۶ درجه است. همچنین نتایج از ساخت ایمن و بادوام سد RCC در آینده پشتیبانی می‌کند (تانگ و همکاران<sup>۲</sup> ۲۰۲۰) یکی از مشکلات مدل‌سازی سیستم سد جهت تحلیل حرارتی، اعمال دمای محیط متناسب با زمان اجرای هر لایه‌ی 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 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 به صورت مجزا در نظر گرفته شده و وارد مسئله می‌شود. همچنین یکی دیگر از موارد برجسته تحقیق نشان دادن قابلیت نرم‌افزار آباکوس به همراه بهینه‌یابی در تحلیل حرارتی سد بتنی غلتکی است که به لحاظ زمان تحلیل و مطالعات پارامتری دارای کارایی بسیار مناسب 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 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

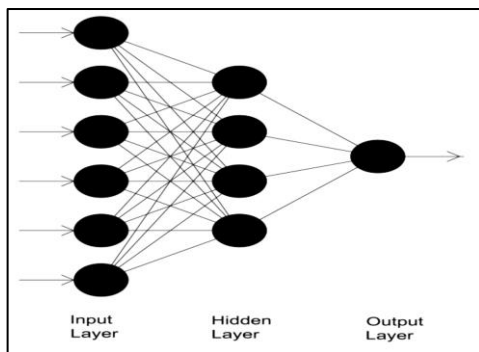
<sup>2</sup> Tang et al

<sup>1</sup> Celcius

شبکه‌بندی بستگی نداشته باشد. یکی از روش‌های کنترل کیفیت مش بندی، استفاده از کانتور خطا است که نشان‌دهنده تغییرات سریعاً در المان‌های مجاور است؛ بنابراین می‌توان گفت دستور خطا قادر به شناسایی مناطقی از مدل است که در محاسبه تنش دارای خطای بالایی هستند و اینکه در چه نقاطی نیاز به ریزتر نمودن المان بندی 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 (ایشیکاوا<sup>۳</sup> ۱۹۹۱)

### معرفی شبکه پرسپترون

شبکه مصنوعی عصبی<sup>۴</sup> یک برنامه نرم‌افزاری یا تراشه نیمه‌هادی است که بتواند همانند مغز انسان عمل نماید. در واقع یک شبکه عصبی مصنوعی ایده‌ای است برای پردازش اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش می‌پردازد. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی به نام نرون تشکیل شده است که برای حل یک مسئله باهم هماهنگ عمل می‌کند. ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی به وسیله الگوی ارتباط بین گره‌ها، مدت تعیین وزن‌های ارتباطی و تابع فعالیت، معرفی می‌شود، ساختار عادی یک شبکه عصبی مصنوعی، معمولاً از لایه ورودی، لایه‌های میانی (پنهان) و لایه خروجی تشکیل شده است. (ایشیکاوا ۱۹۹۱)



شکل (۳): یک نمونه از شبکه مصنوعی MLP با یک لایه پنهان

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

$h$  ضریب همرفت برحسب  $[\frac{W}{m^2K}]$  و معرف دما است. انتقال حرارت از طریق همرفت پدیده پیچیده‌ای است و در تحلیل‌های عددی از متغیرهای بسیاری تأثیر می‌پذیرد که شامل شکل سطح، نرمی و زبری سطح، لزجت و سرعت سیال دارای مرز مشترک با جسم است. با این وجود فرمول‌های پیشنهادی زیر می‌توانند 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 برحسب  $[\frac{m}{s}]$  است.

ب- شرط مرزی لایه مشترک: در لایه مشترک دو جسم  $A$  و  $B$  که در تماس باهم 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:

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

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

که در آن  $x$  مکان لایه مشترک، زمان و  $K$  ضریب هدایت گرمایی است.

### مواد و روش‌ها

برای آنالیز حرارتی از نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> و روش شبکه عصبی پرسپترون<sup>۲</sup> که مبتنی بر روش چندلایه 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 زمان بندی اجرای کل مجموعه سد و فونداسیون، همچنین زمان اجرای هر لایه‌ی بتن ریزی انجام شده است. به طوری که درجه حرارت هر لایه بتن ریزی تحت تأثیر شرایط اعمال شده دچار تغییر می‌شود. هنگامی که پاسخ‌ها در نرم‌افزار به تعداد

<sup>3</sup> Ishikawa

<sup>4</sup> ANN

<sup>1</sup> Matlab

<sup>2</sup> Perceptron

در ماه را داراست. سامانه انتقال با توجه به ظرفیت و هد پمپاژ دینامیک حدود ۹۰۰ متر، جزء بزرگترین سامانه‌های انتقال آب در سطح کشور است. شکل (۶) نمایی از سد ژاوه نشان می‌دهد. مشخصات فنی سد ژاوه در جدول (۱) ارائه شده است.

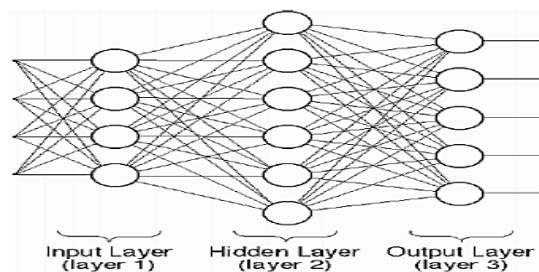


شکل (۶): نمایی از سد ژاوه (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)  
جدول (۱) مشخصات فنی سد ژاوه (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

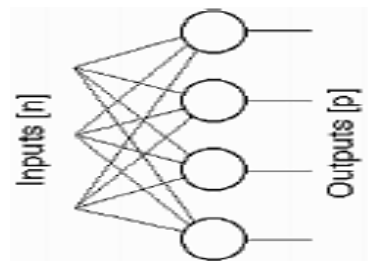
مقادیر	مشخصات فنی سد
۸۶/۵ متر	ارتفاع سد
۳۰۰ متر	طول تاج
۲۰۰۰ متر	ارتفاع از سطح دریا
۶ عدد	تعداد ایستگاه پمپاژ
۱۲۳ میلیون مترمکعب	حجم آب
۸ مترمکعب در ثانیه	حداکثر ظرفیت سد
۲۰۰۰ میلی‌متر	قطر لوله‌گذاری
۳۲/۲۸۸ کیلومتر	طول لوله‌گذاری
۱:۱	شیب پایین دست

در این تحلیل دمای اولیه بتن ۱۵ و دمای متوسط سالیانه ۸/۱۳ درجه سانتی‌گراد است. همچنین فاصله زمانی بین 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<sup>۱</sup> فرض می‌شوند. با توجه به اینکه هدف اصلی تحقیق بررسی تحلیل حرارتی سد بتنی است، از این رو سیستم سد و فونداسیون به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و خاک

در شبکه‌های عصبی چندلایه، یک لایه ورودی وجود دارد که اطلاعات را دریافت می‌کند، تعدادی لایه مخفی وجود دارد که اطلاعات را از لایه‌های قبلی می‌گیرد و در نهایت یک لایه خروجی وجود دارد که نتیجه محاسبات به آن‌ها رفته و خروجی آن، خروجی نهایی شبکه است (ایشیکاوا ۱۹۹۱).



شکل (۴): نمونه‌ای از یک شبکه سه لایه



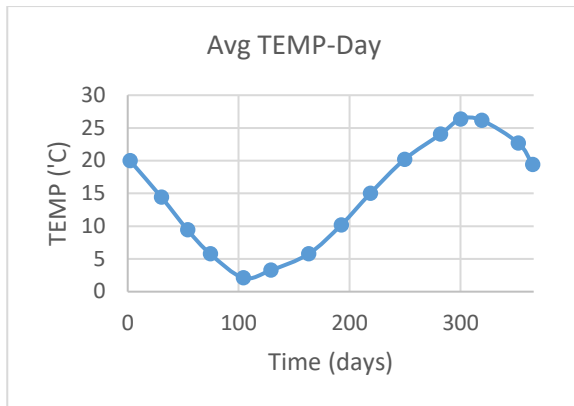
شکل (۵): نمونه‌ای از یک شبکه تک لایه

الگوریتم پرسپترون یک الگوریتم تکرارشونده است، به این صورت که در ابتدا بردار وزن به نحوی مقداردهی می‌شوند و سپس در هر مرحله، الگوریتم با توجه به نقاطی که درست دسته‌بندی نشده‌اند مقادیر وزن و بایاس را تغییر می‌دهد تا این نقاط به درستی دسته‌بندی شوند. اگر نقاط داده شده به صورت خطی تفکیک‌پذیر نباشند الگوریتم پرسپترون پایان نمی‌یابد اما در صورتی که نقاط خطی تفکیک‌پذیر باشند الگوریتم در تعداد متناهی مرحله پایان می‌یابد. (ایشیکاوا ۱۹۹۱)

### معرفی مشخصات سد مورد مطالعه

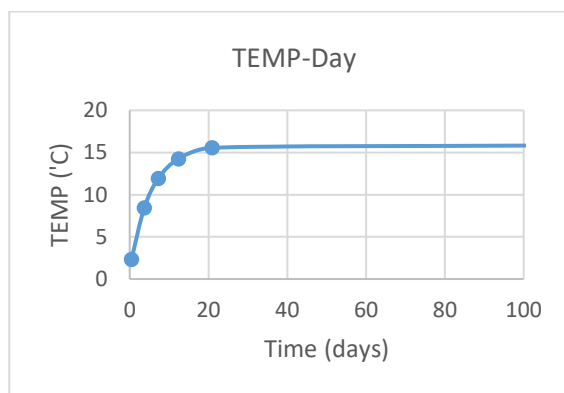
سد انتخابی برای پژوهش حاضر سد بتنی ژاوه است. این سد در استان کردستان و بر روی رودخانه ژاوه احداث گردیده است. این سد بزرگ‌ترین سد بتن غلتکی ساخته شده در کشور بوده و رکورد بتن‌ریزی به میزان ۱۲۱۰۰۰ مترمکعب

<sup>1</sup> Isotropic



شکل (۸): تغییرات دمای سالیانه در محل سد ژاوه (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

نمودار افزایش دمای آدیاباتیک<sup>۳</sup> مخلوط بتن غلتکی سد همراهِ با ۲۵ درصد پوزولان<sup>۴</sup> به صورت شکل (۹) است.



شکل (۹): دمای آدیاباتیک بتن در سد ژاوه (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

### صحت سنجی

برای صحت سنجی، 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 مقایسه می‌شود. به این منظور، ابتدا تغییرات دمای سالیانه در محل سد نتایج ارائه شده در محل ساخت با نتایج حاصل از این پژوهش به صورت شکل (۱۰) و (۱۱)، برای تراز ۴ متری در زمان ۹۰ و ۱۵۰ روز پس از شروع اجرا مقایسه می‌شود (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

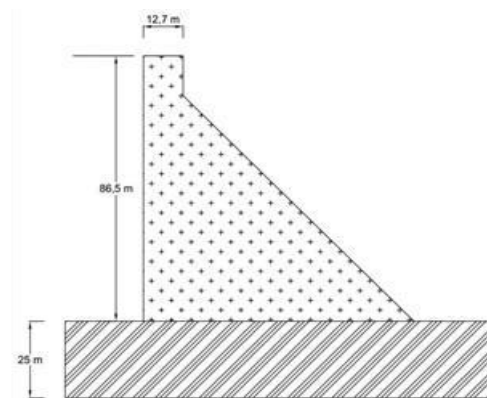
زیر فونداسیون سد صلب فرض شده و تأثیر تغییرات درجه حرارت بر بتن بدنه مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۲) مشخصات مکانیکی مصالح بتنی در مقطع سد نشان می‌دهد

جدول (۲) مشخصات مکانیکی بتن (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

چگالی	$2450 (Kg/m^2)$
مدول الاستیسته <sup>۱</sup>	$2/96 (Gpa)$
ضریب پواسون <sup>۲</sup>	۰/۳
مقاومت فشاری بتن	۲۵ مگاپاسکال

جدول (۳) مشخصات حرارتی بتن (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

ضریب همرفت	$1500000 J/(m^2 day \cdot C)$
گرمای ویژه	$970 (J/Kj \cdot C)$
ضریب هدایت حرارتی	$2/96 (W/m \cdot C)$

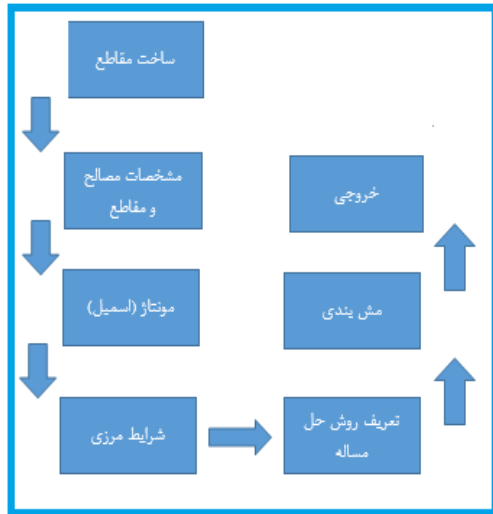


شکل (۷): مقطع عرضی سد بتن غلتکی ژاوه (شرکت ساختمانی ژیان ۱۳۸۵)

از طرفی دمای هوا در ساختگاه سد ژاوه با توجه به گزارش‌های به شرح شکل (۸) است

<sup>3</sup> Adiabatic  
<sup>4</sup> Pozzolan

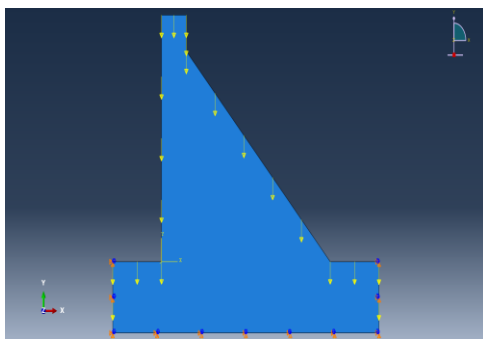
<sup>1</sup> Young moduls  
<sup>2</sup> Poisson ratio



شکل (۱۲): فلوجارت مراحل کار در نرم افزار آباکوس

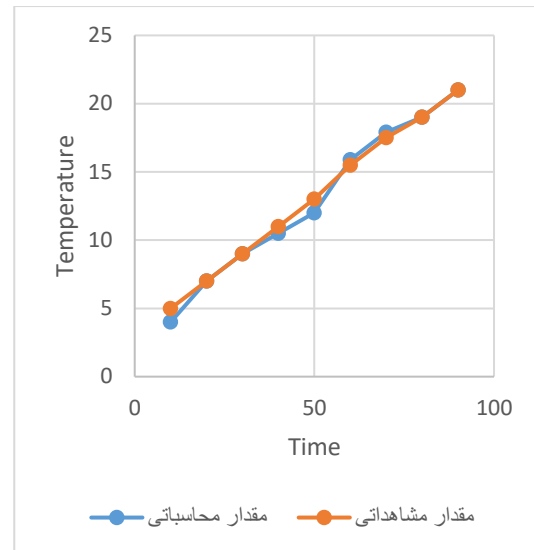
### بارگذاری

در ماژول بارگذاری تأثیر گرانش بر روی جرم بتنی به منظور لحاظ کردن وزن لایه‌ها و همچنین شرایط مرزی مقطع سد معرفی می‌گردد.

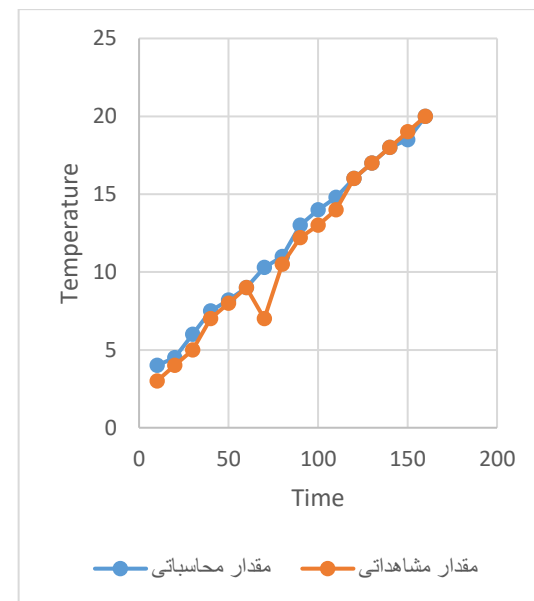


شکل (۱۳): گرانش

نحوه اعمال تغییرات حرارتی بدین شکل است برای سازه لایه‌های ۵۰ سانتی‌متری فرضی در نظر گرفته می‌شود که هر لایه ۷۲ ساعت (۲۵۹۲۰۰ ثانیه) از زمان تحلیل را به خود اختصاص می‌دهد که در این زمان لایه فرضی بتن در حال ایجاد حرارت هیدراتاسیون بوده درعین حال در همان لایه و لایه‌های قبلی حرارت ایجاد شده پخش و همچنین در مرز هوا و بتن نیز انتقال حرارت بر اساس میزان انتقال حرارت هوا و همچنین اختلاف دمای هوا و بتن اتفاق می‌افتد. برای ساده‌سازی حل و کاهش زمان آن به‌جای مدل‌سازی هوا از



شکل (۱۰): دمای نقاط واقع بر تراز ۴ متری در پایان دی‌ماه

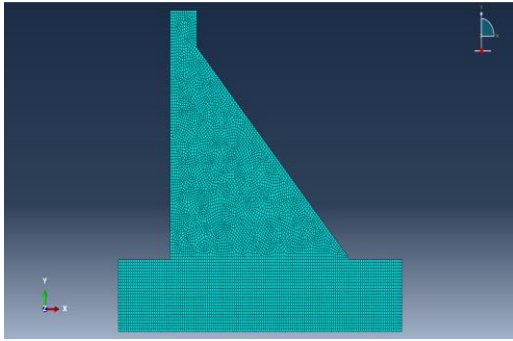


شکل (۱۱): دمای نقاط واقع بر تراز ۴ متری در پایان بهمن‌ماه

### مدل‌سازی سد در آباکوس

برای آنالیز سازه‌ای این پژوهش از نرم‌افزار قدرتمند آباکوس<sup>۱</sup> بهره گرفته شده است لذا مراحل آنالیز و تحلیل حرارتی در این نرم‌افزار به شرح فلوجارت زیر است:

<sup>۱</sup> Abaqus



شکل (۱۵): مش بندی سازه سد بتنی

### روش حل مسئله

در ماژول استپ<sup>۱</sup> نوع تحلیل و یا تحلیل‌هایی که مورد استفاده پژوهش و توسط نرم‌افزار آباکوس قابل انجام است در قالب تعریف استپ، تعیین می‌گردد. در واقع هر تحلیل منفرد در قالب یک استپ انجام می‌شود. در این پژوهش از تحلیل کوپل دما-جابجایی<sup>۲</sup> برای اعمال تغییرات حرارت بتن و از تحلیل عمومی استاتیکی<sup>۳</sup> برای اعمال نیروهای ثقیلی و هیدرواستاتیک پس از دوره ساخت استفاده می‌گردد. تحلیل در هر دو حالت در محدوده خطی است.

زمان تحلیل در زمان ساخت سد ۵۱۹ روز معادل ۴۴۸۴۱۶۰۰ ثانیه است. همچنین زمان تحلیل استاتیکی پس از دوره ساخت ۲ ثانیه در نظر گرفته شده که در واقع زمان اعمال بار هیدرواستاتیک است. به‌طور کلی مسئله مورد تحلیل، ۱۲ بار تحلیل می‌گردد. هر تحلیل بر اساس شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال در نظر گرفته می‌شود تا بدین ترتیب با جمع‌آوری اطلاعات و با استفاده از الگوریتم شبکه پرسپترون به بهینه‌ترین زمان برای ساخت بر اساس دمای حداکثر در بتن سد و تنش‌های ایجاد شده در اثر آن دست پیدا کنیم.

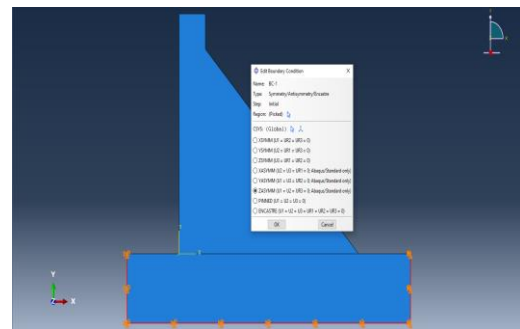
### تجزیه و تحلیل نتایج نرم‌افزار آباکوس

آنالیز و تحلیل نتایج در سه مجموعه شکل ارائه می‌شود به‌طوری که پارامترهای حداکثر دمای تولید شده در تراز مختلف بوده، تغییرات دمای بتن در ماه‌های مختلف، حداکثر تنش

تعریف میزان انتقال حرارت هوا و دمای متوسط هوا در زمان تحلیل (ساخت) استفاده نمود و به مرز مشترک بتن و هوا اختصاص داد.

### شرایط مرزی در اجزاء محدود

روش اجزاء محدود و نرم‌افزارهای مبتنی بر این شیوه حل عددی را باید در حکم ابزارهای مهندسی دانست که فراخور مهارت و دقت نظر کاربران می‌تواند منجر به ارائه نتایج با ارزش و جلوگیری از صرف هزینه‌های اقتصادی فراوان گردد. لذا شرایط مرزی فونداسیون سد نیز با قید گیردار (دوبعدی) تعریف می‌گردد.



شکل (۱۴): شرایط مرزی پی سد

### اصول مش بندی سازه‌ها

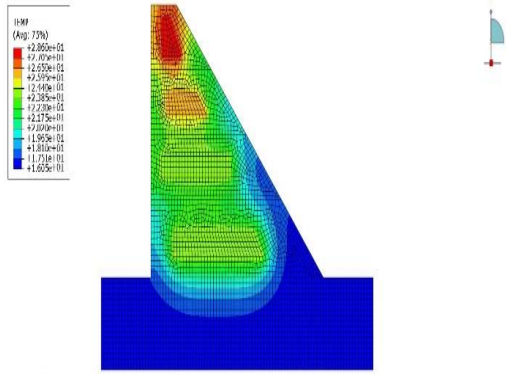
از روش‌هایی که به‌منظور ارزیابی مناسب بودن ابعاد المان‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، بررسی نتایج المانی در مدل است. وجود ناپیوستگی‌ها و پرش‌های بزرگ نتایج در یک المان مؤید دقت کم آنالیز خواهد بود. البته نرم‌افزارهای المان محدود مانند آباکوس می‌توانند نواحی را که در آن‌ها خطای تحلیل بالا است شناسایی نمایند که به این روش تخمین خطا گفته می‌شود. در فرایند مش بندی و تولید المان‌های مورد نیاز برای تمامی مدل‌های سازه‌ها مش بندی با دقت صورت گرفته و کیفیت المان‌ها مورد تأیید قرار گرفته است.

<sup>3</sup> Static-General

<sup>1</sup> Step

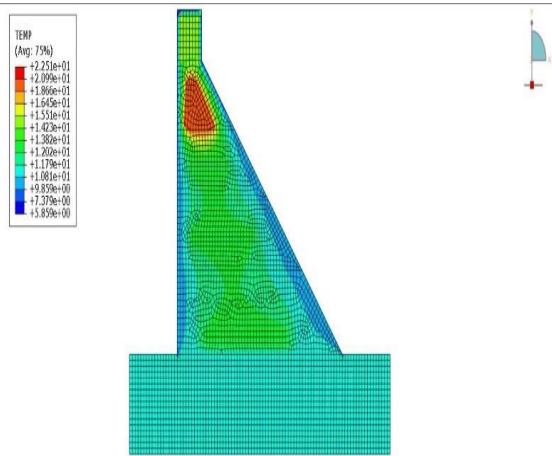
<sup>2</sup> Coupled Temp-Displacement





شکل (۱۸): حداکثر دمای تولیدشده در تراز ۶۰ متری (۱۲۰ لایه) - شروع پروژه از مهر

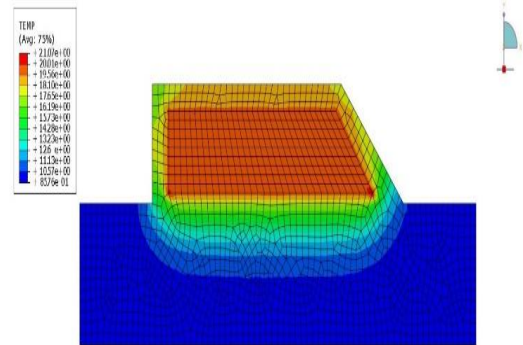
شکل (۱۹) نشان دهنده کانتور حرارت بتن تا لایه ۱۷۳ ام با شروع پروژه از مهرماه است (پایان بتن ریزی). حداکثر دمای بتن ۲۲/۵۱ درجه سانتی گراد است.



شکل (۱۹): حداکثر دمای تولیدشده در تراز ۸۶/۵ متری (۱۷۳ لایه) - شروع پروژه از مهر

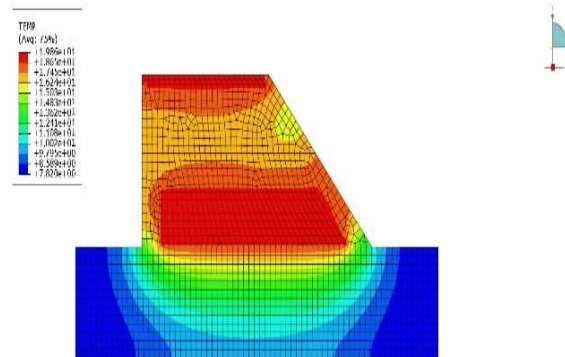
شکل (۲۰) نشان دهنده تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماههای مهر، آبان و آذر است. بر اساس نمودار به دست آمده حداکثر دمای تولیدشده بین در بتن با شروع پروژه از ماههای مهر، آبان و آذر حدود ۳۰ درجه و با شروع پروژه از مهرماه است. کمترین دمای تولیدشده در بتن نیز حدود ۱۰ درجه و با شروع پروژه از آذرماه است. کمترین دمای بیشینه مربوط به نمودار شروع پروژه از آذرماه است.

کششی بتن، حداکثر دمای بتن مورد بررسی قرار می گیرد. شکل (۱۶) نشان دهنده کانتور حرارت بتن تا لایه ۳۰ ام با شروع پروژه از مهرماه است. حداکثر دمای بتن ۲۱/۰۷ درجه سانتی گراد است.



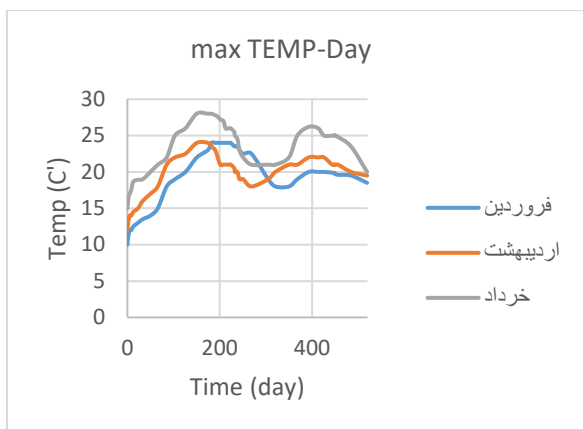
شکل (۱۶): حداکثر دمای تولیدشده در تراز ۱۵ متری (۳۰ لایه) - شروع پروژه از مهر

شکل (۱۷) نشان دهنده کانتور حرارت بتن تا لایه ۶۰ ام با شروع پروژه از مهرماه است. حداکثر دمای بتن ۱۹/۸۶ درجه سانتی گراد است.



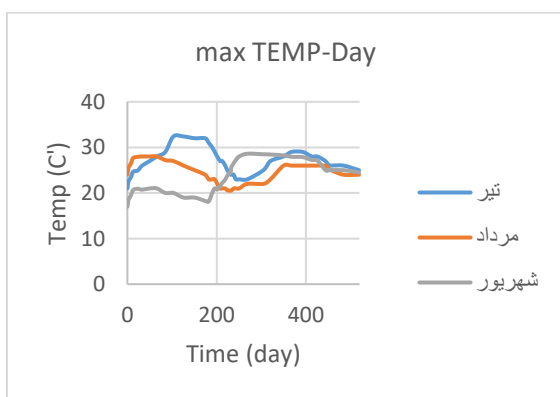
شکل (۱۷): حداکثر دمای تولیدشده در تراز ۳۰ متری (۶۰ لایه) - شروع پروژه از مهر

شکل (۱۸) نشان دهنده کانتور حرارت بتن تا لایه ۱۲۰ ام با شروع پروژه از مهرماه است. حداکثر دمای بتن ۲۸/۶۰ درجه سانتی گراد است.



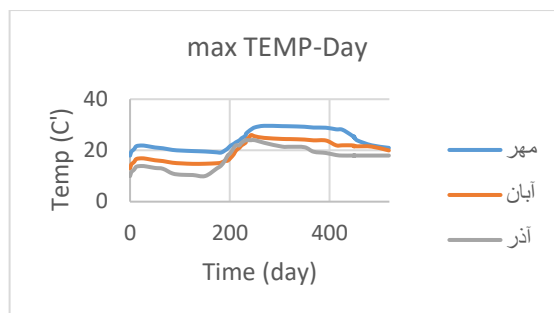
شکل (۲۲): نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد

شکل (۲۳) نشان‌دهنده تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های تیر، مرداد و شهریور است. بر اساس نمودار به‌دست‌آمده حداکثر دمای تولیدشده بین در بتن با شروع پروژه از ماه‌های دی، بهمن و اسفند، ۳۲ درجه و با شروع پروژه از تیرماه است. کمترین دمای تولیدشده در بتن نیز حدود ۱۶ درجه و با شروع پروژه از شهریورماه است. کمترین دمای بیشینه مربوط به نمودار شروع پروژه از شهریورماه است.



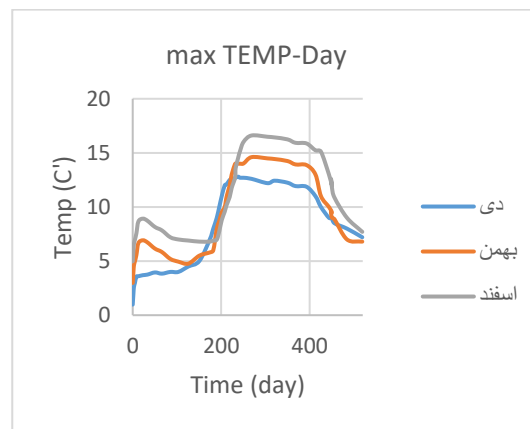
شکل (۲۳): نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های تیر، مرداد و شهریور

شکل (۲۴) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای حداکثر دمای بتن با شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال است. مطابق این نمودار حداکثر دمای تولیدی با شروع پروژه در ماه‌های مختلف سال، ۳۲ درجه سانتی‌گراد و با شروع پروژه از تیرماه است و کمترین دمای بیشینه تولیدشده نیز ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد و با شروع پروژه از دی‌ماه اتفاق می‌افتد.



شکل (۲۰): نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های مهر، آبان و آذر

شکل (۲۱) نشان‌دهنده تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های دی، بهمن و اسفند است. بر اساس نمودار به‌دست‌آمده حداکثر دمای تولیدشده در بتن با شروع پروژه از ماه‌های دی، بهمن و اسفند، ۱۷ درجه و با شروع پروژه از اسفندماه است. کمترین دمای تولیدشده در بتن نیز حدود ۲ درجه و با شروع پروژه از دی‌ماه است. کمترین دمای بیشینه مربوط به نمودار شروع پروژه از دی‌ماه است.

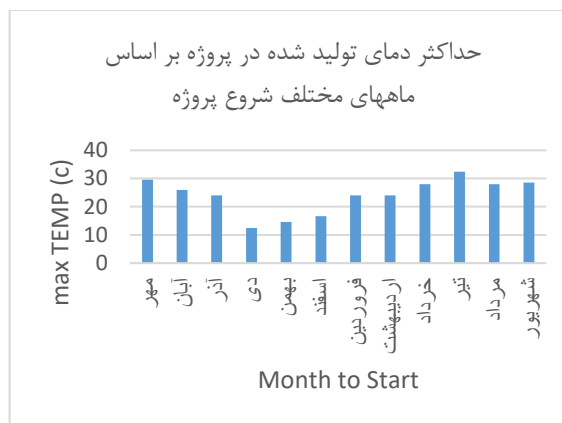


شکل (۲۱): نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های دی، بهمن و اسفند

شکل (۲۲) نشان‌دهنده تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد است. بر اساس نمودار به‌دست‌آمده حداکثر دمای تولیدشده بین در بتن با شروع پروژه از ماه‌های دی، بهمن و اسفند، ۲۸ درجه و با شروع پروژه از خردادماه است. کمترین دمای تولیدشده در بتن نیز حدود ۱۰ درجه و با شروع پروژه از فروردین‌ماه است. کمترین دمای بیشینه مربوط به نمودار شروع پروژه از فروردین‌ماه است.

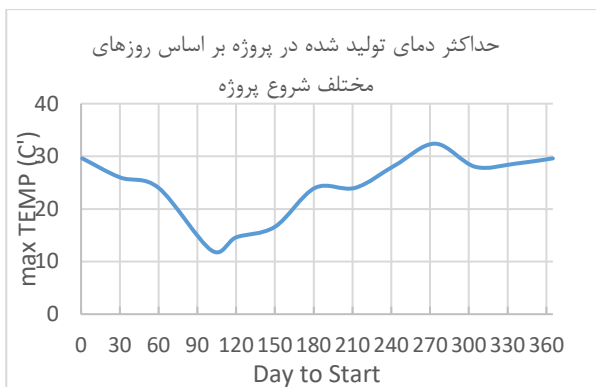
نرون های ۴، ۴، ۸، ۸ و ۱۶ به ترتیب از لایه اول تا لایه پنجم مناسب است. ۱۰۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۰ درصد داده‌ها برای آزمون انتخاب می‌شود. پس از آموزش شبکه نتایج حاصل برای باقی روزهای سال (۱۲-۳۶۵) به‌عنوان روز شروع پروژه با طول ۵۱۹ روز به دست آمد و با مقایسه نتایج مشخص گردید که در صورت شروع پروژه از روز ۱۱ ام دی کمترین دمای بیشینه بتن را خواهیم داشت.

شکل (۲۶) نشان‌دهنده نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از روزهای مختلف در طول سال (۳۶۵ روز) است که توسط نرم‌افزار متلب و با الگوریتم پرسپترون با بازسازی اطلاعات به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل آباکوس برای شروع پروژه از روز اول هرماه به‌دست‌آمده است که نتیجه این بازسازی داده‌ها ایجاد اطلاعات برای شروع پروژه از هرروز از ۳۶۵ روز سال است. مطابق این روز با شروع پروژه از روز ۱۰۱ ام (معادل ۱۱ دی) کمترین دمای بیشینه تولیدشده در بتن در طول پروژه ۵۱۹ روزه احداث سد را شاهد هستیم.

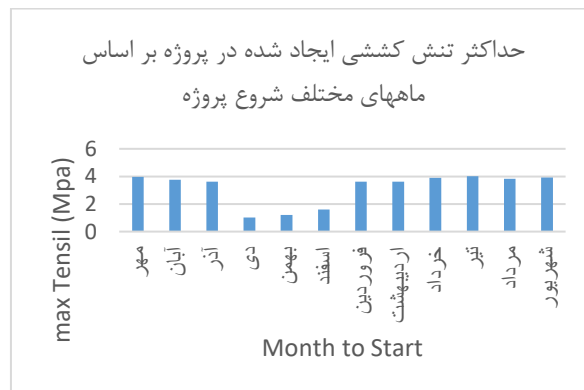


شکل (۲۴): نمودار حداکثر دمای بتن با شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال

شکل (۲۵) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای حداکثر تنش کششی بتن با شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال است. مطابق این نمودار حداکثر تنش کششی با شروع پروژه در ماه‌های مختلف سال، ۴/۱۲ مگاپاسکال و با شروع پروژه از تیرماه است و کمترین تنش کششی بتن نیز ۱/۰۲۸ مگاپاسکال و با شروع پروژه از دی‌ماه اتفاق می‌افتد.



شکل (۲۶): نمودار تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از روزهای مختلف در طول سال



شکل (۲۵): نمودار حداکثر تنش کششی بتن با شروع پروژه از ماه‌های مختلف سال

شکل (۲۷) نشان‌دهنده تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از روز ۱ ام و ۱۱ ام دی است. نمودار تغییرات حرارت بتن برای روز اول دی‌ماه از نتایج آباکوس به دست آمد و نمودار تغییرات حرارت بتن برای شروع پروژه از روز ۱۱ ام توسط نرم‌افزار متلب و با الگوریتم پرسپترون<sup>۲</sup> به‌دست‌آمده است. بر

### نتایج مدل‌سازی در شبکه پرسپترون

ورودی روز و خروجی دما برای هر ۱۲ ماه برای تشکیل ۱۲ شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با الگوریتم یادگیری لوبنبرگ - مارکارد<sup>۱</sup> مختلف داده می‌شود. با در نظرگیری تعداد لایه‌های مختلف مشخص شد که در هر شبکه تعداد ۵ لایه با تعداد

<sup>1</sup> Levenberg marquardt algorithm

لایه‌ها در واقعیت تأثیر دارد می‌بایست این اثر در تحلیل کرنش‌های ایجادشده در نظر گرفته شود.

۳- با تحلیل حرارتی سد در آباکوس می‌توان نتایج تحلیل حرارتی را برای سد بتنی غلتکی برای ۱۲ ماه سال با شروع پروژه از روز اول هرماه به دست آورد. مطابق با این تحلیل شروع پروژه از دی‌ماه کمترین دمای بیشینه بتن در طول زمان احداث سد (براساس ماه) را نتیجه داد.

۴- با استفاده از الگوریتم پرسپترون و آموزش ماشین بر اساس داده‌های ورودی و خروجی آباکوس حاصل از ۱۲ تحلیل حرارتی سد برای شروع از اول هرماه، می‌توان داده‌های جدیدی از تحلیل حرارتی برای تمام روزهای سال به دست آورد و طبق آن بهینه‌ترین روز سال برای شروع پروژه را تعیین نمود. به عبارتی با استفاده از تحلیل حرارتی و الگوریتم پرسپترون در پژوهش حاضر با شروع پروژه از روز یازدهم دی‌ماه کمترین دمای بیشینه بتن در طول زمان احداث سد (بر اساس روز) را نتیجه داد.

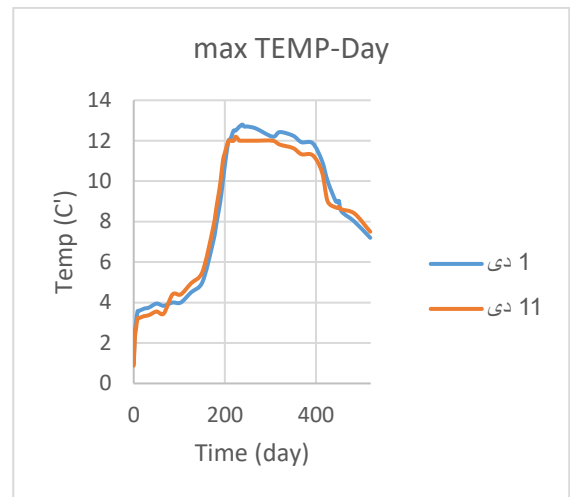
۵- در این پژوهش با توجه به روند کاهش دمای قسمت مرکزی سد در تحلیل مربوط به ۵۲۰ روز بعد از اتمام اجرا و در دوره بهره‌برداری، پیش‌بینی می‌شود که زمان رسیدن دمای بدنه سد به حالت تعادل نهایی حدوداً یک دهه طول بکشد

۶- درخصوص محدودیت تحقیق می‌توان اشاره کرد که نتایج مذکور اگرچه تنها بر اساس تحلیل یک سد انجام شده است و برای شرایط و سال‌های متفاوت می‌تواند تا حدی متفاوت باشد؛ ولی از نظر اعتبار کلی و کاربردی قابل اطمینان است.

## مراجع

- ۱- نعمتی، مهدی؛ شکرچی زاده، محمد؛ نورزاد، اسداله؛ کاشی، غلامرضا (۱۳۸۵)، بررسی ترک‌خوردگی حرارتی در سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش اجزای محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران
- ۲- حیدری، نادر، احمدی، محمدتقی (۱۳۹۰) تحلیل پیشرفته‌ی اثر حرارت محیطی و هیدراتاسیون سیمان در یک سد بتنی غلتکی با در نظر گرفتن فرایند ساخت، مجله مهندسی عمران مدرس، جلد ۸۸، شماره ۱، صفحات ۱۳-۱۸

اساس نمودار به دست آمده حداکثر دمای تولیدشده در بتن با شروع پروژه از اول دی‌ماه ۱۳۷۷ سانتی‌گراد است در صورتی که پروژه از روز ۱۱ ام دی‌ماه شروع گردد حداکثر دمای تولیدشده بتن ۱۲/۱ سانتی‌گراد است.



شکل (۲۷): نمودار مقایسه تغییرات دمای حداکثر بتن با شروع پروژه از اول و یازدهم دی‌ماه

## نتیجه‌گیری

هر پژوهش، تلاشی منطقی، سازمان‌یافته و علمی برای دستیابی به پاسخ یک پرسش یا راه‌حل برای یک مسئله است. برای رسیدن به پاسخ‌ها و راه‌حل‌ها که در حقیقت هدف‌های اصلی یک پژوهش هستند، یکی از مشکلات مدل‌سازی سیستم سد جهت تحلیل حرارتی، اعمال دمای محیط متناسب با زمان اجرای هر لایه‌ی بتن‌ریزی است خلاصه نتایج عبارت‌اند از:

۱- 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 غیریکنواخت 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.

۲- در نظر گرفتن وزن لایه‌ها در آنالیز تنش، سبب می‌شود مقادیر کرنش کششی به‌طور محسوسه کاهش یابد و به‌ویژه این کاهش در بستر نمود بیشتری دارد. با توجه به این که وزن

۳- منفرد، محمدحسین، والامنش، وحید (۱۳۸۷) آنالیز حرارتی برای سد بتنی وزنی اووه، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های برق آبی کشور، تهران

۴- شرکت ساختمانی ژیان (۱۳۸۹) گزارش تحلیل حرارتی ۴ متری از سد مخزنی ژاوه

- 5- 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.
- 6- Kuzmanovic, V. Savic, L. Mladenovic, N. (2015). Thermal-Stress Behaviour of RCC Gravity Dams, FME Transactions. 43, 30-34.
- 7- 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), 592609.
- 8- Bayaghoob, Kh, Bamaga.O (2019) Construction of Roller Compacted Concrete Dams in Hot Arid Regions, Journal of Materials, 12(19), 30-64; <https://doi.org/10.3390/ma12193064>
- 9- Farfan,C, Santillan,D, Miguel,A, Toledo,T (2020). Thermal Simulation of Rolled Concrete Dams: Influence of the Hydration Model and the Environmental Actions on the Thermal Field, Journal of water .12,858
- 10- Tang.V, Nguyen,T, Igorevich,B, Pha,N, Huynh,T (2020). A Combined Experiment -Simulation Study on Temperature Regime of RCC Applying for Dam Construction, Journal of Thermal Engineering, 6(5), 772-785
- 11- Ishikawa, M. (1991). Thermal stress analysis of a concrete dam. Computers and Structures. 40(2), 347-352.
- 12- 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.

## Optimization of time and temperature of dam construction for thermal analysis of RCC dam

Alireza Mardokhpour<sup>1</sup>  
Ramtin Sobhkhiz Foumani<sup>2\*</sup>  
Forouzan Saberi<sup>3</sup>

### Abstract

The growing number of roller compacted concrete dams built around the world demand good methods to reduce the risk of thermal cracks. In roller compacted concrete dams, usually, large amounts of concrete are poured in a short time and the heat generated by the hydration of the cement, leads to an increase in temperature in the body of the dam, which results in a significant heat slope. In this research, Abaqus software, a finite element software, was used for thermal analysis of the dam during construction and concreting. The method of applying thermal changes is as follows. For the structure, hypothetical 50 cm layers are considered, each layer takes up 72 hours of analysis time. In general, the problem under analysis is analyzed 12 times. Each analysis is based on the start of the project from different months of the year to achieve the optimal constructing time based on the maximum temperature in the concrete of the dam and the stresses created by it by collecting the information and using the perceptron network algorithm.

### Keywords:

Dam construction time, dam construction temperature, structural analysis, optimization, RCC dam

---

1-Assistance Professor of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

\*2-PhD Student of Civil Engineering Department, University of Qom, Qom, Iran (Corresponding Author)

3-M.sc of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran