

بررسی طول یکپارچگی در سدهای RCC با توجه به تحلیل تنش‌های حرارتی

جعفر عسگری مارنانی^۱

مهرزاد منتظری^{۲*}

هومن حاجی کندی^۳

چکیده

در ساخت یک سد بتن غلتکی، حرارت ناشی از هیدراسیون سیمان یکی از مشکلاتی است که تا به امروز راه‌های زیادی برای کنترل آن پیشنهاد و اجرا شده است. یکی از راهکارها برای کنترل گرادیان حرارتی و تنش‌های ناشی از آن، آزادسازی انرژی حرارتی با ایجاد درزهای انقباضی در بدنه سد است. با تعیین فاصله مناسب بین این درزها می‌توان حرارت هیدراسیون و تنش‌های کششی ایجادشده را پیش‌بینی و کنترل کرد. در این تحقیق تأثیر طول و عمق حجم‌های بتن‌ریزی سد در کنترل حرارت زایی بتن غلتکی و تنش‌های ایجادشده مورد بررسی قرار گرفته و روابط تحلیلی برای آن ارائه شده است. بر اساس روابط ارائه‌شده، در مقاطع با عمق بتن‌ریزی مختلف، می‌توان برحسب کنترل حرارت زایی و تنش‌های ایجادشده پیشینه، فاصله بین درزهای انقباضی یا همان طول یکپارچگی را تعیین نمود. این امر نه تنها باعث افزایش سرعت اجرای سد می‌شود، بلکه هزینه‌های اجرایی را به مراتب کاهش خواهد داد.

واژه‌های کلیدی

سدهای بتن غلتکی، درزهای انقباضی، طول یکپارچگی، تنش‌های حرارتی.

۱. عضو هیأت علمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، mehrzadmontazeri@yahoo.com

۳. عضو هیأت علمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

مقدمه

ایجاد گردیدن های حرارتی که بر اثر هیدراسیون سیمان رخ می دهند، یکی از مهم ترین موضوعات مورد بررسی در ساخت سدهای بتن غلتکی است. علت این اهمیت در ایجاد تنش های کششی حاصل از گرادیان های حرارتی است. این تنش ها که از آن ها به عنوان تنش های حرارتی یاد شده، می توانند باعث ایجاد ترک هایی در سطوح سد و در نهایت تخریب آن گردند. به منظور کنترل ترک های ناشی از تنش های حرارتی، درزهای انقباضی در این نوع سدها تعبیه می شوند. فاصله بین این درزها که از آن ها به عنوان طول یکپارچگی^۱ یاد می شود، بستگی به موارد مختلفی دارد؛ اما اگر بتوان با حفظ ایمنی طرح این طول را به بیشینه ممکن رساند، هزینه ساخت و مدت پروژه به مقدار زیادی کاهش پیدا خواهد کرد.

در سال های اخیر تحقیقات بسیاری در مورد بتن غلتکی و سدهای ساخته شده با این فناوری انجام شده است. این مطالعات بسیار گسترده بوده و جنبه های گوناگونی در مورد بتن غلتکی و سازه های ساخته شده با آن را مورد بررسی قرار می دهد.

جافر^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به تحلیل حرارتی سدهای بتن غلتکی با روش اجزاء محدود پرداختند. تحلیل حرارتی سدهای بتن غلتی نقش مهمی در طراحی و ساخت آن ها ایفا می کند. در این پژوهش، جافر با توسعه یک برنامه کامپیوتری مبتنی بر روش اجزاء محدود به تعیین درجه حرارت موجود در بدنه سد پرداخته است. تحلیل ها در مقیاس واقعی برای برداشت پاسخ های حرارتی سد انجام شد و نتایج نشان داد که با تغییر در برنامه های اجرایی سد تا حدی می توان حرارت ایجاد شده را کنترل کرد، به طوری که شروع ساخت سد RCC در فصل گرما باعث گسترش حرارت در قسمت های پایینی سد می شود. با توجه به نتایج تحقیق ایشان، می توان حرارت درون بدنه سد را به کمینه رسانده و باعث کاهش تنش های کششی در نقاط حیاتی سازه شد.

رحیمی^۳ (۲۰۱۲) به ارزیابی گرمای هیدراسیون در سدهای بتن غلتکی در مراحل مختلف ساخت پرداخت. در این تحقیق

از یک مدل المان محدود برای توزیع دما نسبت به زمان در سدهای بتن غلتکی استفاده شد و پس از آن با استفاده از نرم افزارهای توسعه یافته، سد بتن غلتکی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که شرایط دمایی محیط، تولید حرارت هیدراسیون و تنوع هندسه سد در تحلیل آن نقش مهمی دارند. همچنین مشخص شد که در پوسته سد که حرارت کمتر است، بتن تحت کشش بوده و هسته سد تنش فشاری را تحمل می کند.

کوزمانوویک^۴ و همکاران (۲۰۱۳)، مقاله ای با عنوان محاسبه تنش های حرارتی و تعیین فاصله درزهای انقباضی در سدهای RCC ارائه کردند. در این مطالعه یک روش جدید در مدل سازی عددی سه بعدی برای تجزیه و تحلیل تنش حرارتی در هر مرحله از ساخت سد ارائه شد. در نهایت رابطه بین دما، طول یکپارچگی و تنش های کششی سد RCC وزنی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و طول یکپارچگی مورد نیاز به منظور حالت بهینه تخمین زده شد.

عبدالرازق^۵ و همکاران (۲۰۱۴)، مطالعاتی با موضوع آنالیز حرارتی و ساختاری سدهای RCC دو قوسی انجام دادند. این پژوهش بر توسعه استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی برای تجزیه و تحلیل حرارتی یک سد بتن غلتکی، متمرکز شده بود و فناوری RCC به عنوان یک روش جایگزین برای کاهش هزینه های پروژه پیشنهاد گردید. این مطالعه نشان داد که تمرکز تنش کششی بیشتر در قسمت های پایینی و مرزهای تکیه گاهی سد مشاهده می شود.

در سال های اخیر ایجاد گرادیان های حرارتی که بر اثر هیدراسیون سیمان رخ می دهند، یکی از مهم ترین موضوعات مورد تحقیق توسط بسیاری از پژوهشگران بوده است. ایجاد تنش های کششی حاصل از گرادیان های حرارتی که از آن ها به عنوان تنش های حرارتی یاد می شود، می توانند باعث ایجاد ترک هایی در سطوح سد شده و اثر تخریبی بر آن داشته باشد. برای کنترل ترک های ناشی از تنش های حرارتی، درزهای انقباضی در سدها تعبیه می شوند. فاصله بین این درزها که از آن ها به عنوان طول یکپارچگی یاد می شود، بستگی به موارد

⁴ Kuzmanovic⁵ Abdulrazeg¹ Monolith length² Jaafar³ Rahimi

سد، با توجه به اینکه امکان تغییر شکل آن توسط پی گرفته شده است، موجب بروز تنش‌های کششی درون بدنه سد می‌شود؛ بنابراین هرگونه ترکی که در رویه سد اتفاق بیفتد، به سمت داخل سد پیشروی کرده و منتشر می‌شود. در نگاه اول ممکن است بتوان در نظر گرفت که این ترک‌های حرارتی تأثیر مستقیمی بر پایداری سد ندارند. این ترک‌ها تقریباً عمودی هستند و به مقدار ناچیزی باز می‌شوند. همچنین به صورتی غیرمنظم اتفاق می‌افتند و زبری آن‌ها انتقال تنش‌های برشی را تضمین می‌کند؛ اما اشکال عمده‌ای که این ترک‌ها می‌توانند به وجود آورند، تأثیر نامطلوبی است که بر آب‌بندی سد می‌گذارند. نشت آب از بدنه سد ممکن است موجب بروز مشکلات متعددی شود. در این زمینه می‌توان به فرسوده شدن زود هنگام سد، خطر فرسایش مصالح با در نظر گرفتن تشدید فزاینده جریان نشتی، ایجاد نمای نامناسب که سبب ایجاد ذهنیت ناپایداری سد می‌شود و ... اشاره کرد. علاوه بر موارد بالا، چنانچه زهکشی بدنه سد به اندازه کافی تأمین نشده باشد، انتشار ترک‌های حرارتی به منطقه پایین‌دست، ممکن است اثری نامطلوب بر پایداری سازه سد داشته باشد.

در اولین سدهای بتن غلتکی اجرا شده، غیر از آن‌هایی که در ژاپن اجرا گردیدند، هیچ درز انقباضی به کار گرفته نشد، چراکه تصور بر این بود که اجرای این درزها بسیار هزینه‌بر و گران است. مشاهدات به عمل آمده روی این سدها مزایای استفاده از درزهای انقباضی را در محدود کردن ترک‌خوردگی و کنترل آب‌بندی اثبات می‌کنند. امروزه درزهای انقباضی به صورتی مشخص و جاافتاده در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. هم‌اکنون در این زمینه روش‌های متعددی با هزینه‌های قابل توجیه اجرایی در چندین پروژه به کار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

مدل عددی مورد استفاده و راستی‌آزمایی

در این پژوهش از مدل اجزای محدود سه‌بعدی برای ارزیابی توسعه‌ی دما و تنش‌های حرارتی در داخل بدنه‌ی سد، استفاده شده است. همچنین در این پژوهش فرض شده که انتقال

مختلفی دارد؛ اما اگر بتوان با حفظ ایمنی طرح، این طول را به بیشینه ممکن رساند، هزینه ساخت و مدت اجرای پروژه به مقدار زیادی کاهش پیدا خواهد کرد.

هدف از این مطالعه، بررسی طول‌های یکپارچگی مختلف و رابطه میان طول و عمق مقاطع بتن‌ریزی شده است، اگر بتوان طول یکپارچگی را با توجه به عمق مقطع بتن‌ریزی شده و بیشینه تنش کششی ایجاد شده افزایش داد، موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه پروژه خواهد شد.

رفتار حرارتی - مکانیکی سد بتن غلتکی

بتن غلتکی (RCC)^۱، عبارت است از بتنی که اسلامپ آن صفر بوده و به منظور حمل، پخش و تراکم آن از ماشین‌آلات عملیات خاکی استفاده می‌شود. در این روش به کمک غلتک، بتن متراکم شده‌ای به وجود می‌آید که از نظر روش‌های اجرا، ویژگی مصالح، کنترل هزینه‌ها و ... بسیار متفاوت از بتن معمولی است.

گرچه محتوای مواد سیمانی بتن غلتکی به میزان قابل توجهی کمتر از مقدار نظیر در بتن متعارف است و در نهایت به محدود شدن حرارت تولید شده می‌انجامد، ولی از طرفی وجود امکانات ویژه به منظور ایجاد سرعت اجرای نسبتاً زیاد، دلیل بر پیدایش گرادیان حرارتی بین بخش‌های درونی سد و رویه‌های آن در چند هفته اول پس از اجرا می‌شود. به این ترتیب که بخش‌های درونی بدنه سد به آرامی درجه حرارت خود را از دست می‌دهد و کماکان گرم است، حال آن‌که بتن نزدیک به رویه‌ها بیشتر تمایل به تبعیت از درجه حرارت محیط خارج دارد. در عمل، منطقه سرد در مجاورت رویه‌ها از انبساط آزاد بخش گرم درونی جلوگیری می‌کند و در نتیجه موجب بروز تنش‌های کششی در رویه و پیدایش تنش‌های فشاری، درون بدنه می‌شود. وضعیت مشابهی نیز در مجاورت پی سد اتفاق می‌افتد. چراکه تغییر دما در پی سد به آهستگی صورت می‌گیرد و در نتیجه مانع تغییر شکل سد می‌شود.

علاوه بر گرادیان حرارتی که در زمان بتن‌ریزی و اجرای سد و سپس طی اولین زمستان پس از خاتمه عملیات اجرایی بتن غلتکی اتفاق می‌افتد، دمای کل سازه در سال‌های اولیه پس از اجرا، پیوسته کاهش می‌یابد. این سرد شدن متمادی بدنه

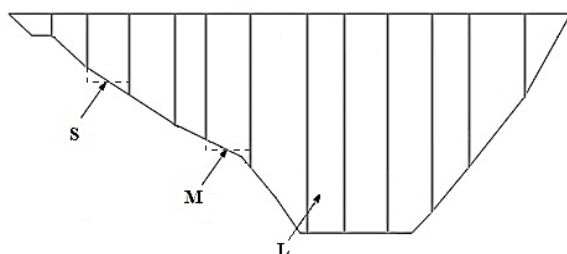
^۱ Roller Compacted Concrete

است. به عبارت دیگر روند لایه لایه ساخته شدن سد در مدل مورد تحلیل مدنظر قرار گرفته است.

دمای محیط پیرامون سد و دمای سنگ بستر با توجه به داده های موجود ۱۳ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. همچنین دمای بتن تازه مطابق با میانگین دمای سالیانه محیط فرض شده است. لازم به ذکر است که تبادل حرارتی با محیط اطراف از سطح های بالادست، پایین دست و تاج سد و همچنین در داخل گالری ها صورت می گیرد و با توجه به نحوه اجرای سد از تبادل حرارت از سطوح بین درزهای انقباضی صرف نظر شده است.

در مرحله آخر مش بندی مدل انجام شد. مش ها به شکل مکعبی با ابعاد دو در دو در یک متر هستند که تعداد المان ها در بزرگ ترین مدل به ۲۲۱۷۰ و تعداد گره ها به ۲۵۸۷۲ عدد می رسد.

تحلیل انجام شده به وسیله نرم افزار ABAQUS و به روش کوپل دما و جابه جایی انجام گرفت. برای بررسی اثر ارتفاع، تحلیل بر روی سه مقطع سد با عمق های مختلف و برای هر ارتفاع با پنج طول یکپارچگی متفاوت که در کل شامل ۱۵ مدل مختلف است انجام شده است.



شکل (۱): مقطع طولی سد مورد بررسی و محل های درزهای انقباضی

در شکل (۱) محل قرارگیری هر یک از مقاطع انتخاب شده ارائه شده است. همان طور که در شکل مشخص است، یک مقطع عمیق (L)، یک مقطع با عمق متوسط (M) و مقطعی با عمق کم (S) انتخاب شده که هر یک از این مقاطع با طول های یکپارچگی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر مورد بررسی قرار گرفته اند.

حرارتی در بعد سوم صورت نمی گیرد. این فرض با روش اجرای بتن غلتکی در لایه های متوالی، معقول است.

در این مطالعه سه مقطع مختلف از سد با عمق های مختلف و هرکدام با پنج طول یکپارچگی متفاوت در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده و نتایج گرادیان حرارتی و تنش ها مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سازی سد با توجه به مشخصات هندسی مقطع اختیاری، شامل ۹۵ لایه یک متری است و قسمت پایین آن به سنگ بستر با دمای ثابت محدود شده است. المان ها نیز به صورت مکعب های هشت گره ای با ابعاد دو متر در دو متر در یک متر هستند و برای المان های مرزی که با سنگ بستر یا هوای آزاد در ارتباط هستند، تبادل حرارت در نظر گرفته شده است. همان گونه که اشاره شد به دلیل روش های اجرایی ساخت سدهای بتن غلتکی، از تبادل حرارت در بعد سوم صرف نظر شده است زیرا طی بررسی های انجام شده مقدار اتلاف حرارت از این بعد کمتر از پنج درصد است.

مشخصات بتن مصرفی مدل مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول (۱): مشخصات بتن غلتکی مصرفی در سد مورد مطالعه

مقدار	ویژگی بتن مصرفی
۲/۳۶	ρ جرم واحد حجم [10^3 kg/m^3]
۱/۸	λ ضریب انتقال حرارت [$\text{W/(m}^\circ\text{C)}$]
۰/۹۵	c گرمای ویژه [$10^3 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$]
۱/۱۵	α_c ضریب انبساط حرارتی [10^{-5}]

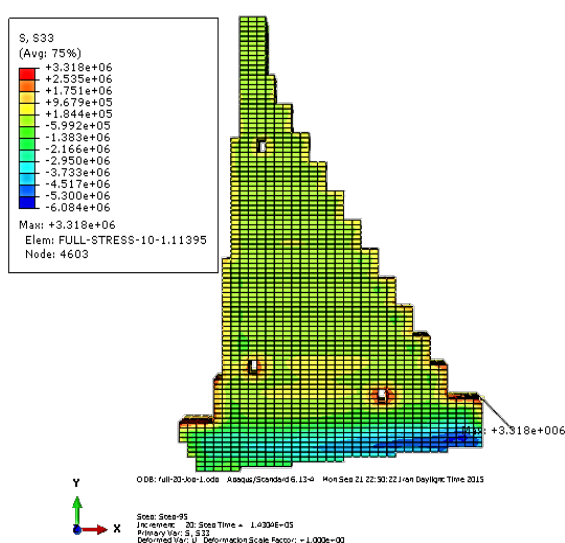
با تعریف هندسه سد و با اعمال مشخصات مکانیکی و حرارتی طبق مقادیر جدول (۱) در نرم افزار، در مرحله بعدی با توجه با تعداد لایه ها، مرحله های محاسباتی^۱ تعریف شدند. این مراحل در واقع قسمت اصلی محاسبات را در برمی گیرند. تعداد مراحل محاسباتی با فرض لایه های یک متری بیشینه به ۹۵ بار در عمیق ترین مقطع رسید و در هر مرحله حرارت زایی بتن تازه و آغاز تبادل حرارت با محیط، مورد تحلیل قرار گرفته

¹ Step

نتایج

تحلیل مقطع با عمق زیاد

این مقاطع معمولاً مقطعی از سد هستند که در قسمت‌های میانی قرار می‌گیرند و بیشینه عمق بتن‌ریزی را در بین مقاطع مختلف دارند. ارتفاع مقطع این قسمت از سد با توجه به مدل موردبررسی در شکل (۱) به ۹۵ متر می‌رسد. این مقطع با پنج طول یکپارچگی مختلف شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر شبیه‌سازی و تحلیل شده که به‌عنوان نمونه نتایج تحلیل تنش یک مدل ۹۵ متری با طول یکپارچگی ۲۰ متر (L20) در شکل (۵) قابل مشاهده است.

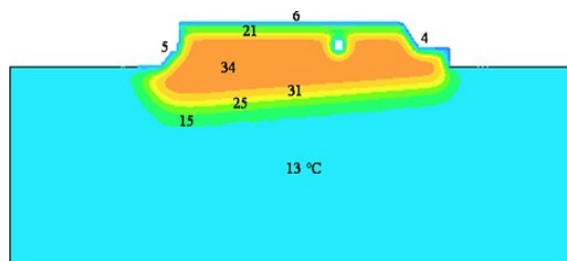


شکل (۵): بیشینه تنش کششی ناشی از هیدراسیون سیمان در مقطع عمیق سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (L20)

همان‌طور که در این شکل مشخص است، بیشینه تنش کششی که بر اثر هیدراسیون سیمان در مقطع عمیق سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر اتفاق می‌افتد برابر با ۳/۳۱ مگاپاسکال است. همچنین گرادیان حرارتی ایجادشده در زمان تنش کششی بیشینه، برای همین مدل در شکل (۶) ارائه شده است.

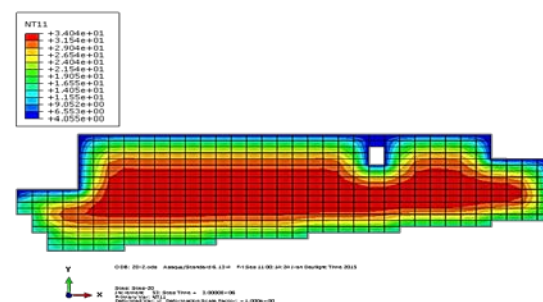
مقادیر بیشینه تنش کششی و دمای هیدراسیون ایجادشده در زمان ایجاد بیشینه تنش کششی برای پنج طول یکپارچگی اشاره‌شده، به ترتیب مطابق جداول (۲) و (۳) برای این مقطع محاسبه و ارائه شده است.

قبل از شروع تحلیل جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل از بررسی‌ها و مدل مورد استفاده، ابتدا تحلیل حرارتی انجام‌شده توسط کوزمانویک (۲۰۱۳) تهیه و مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل صورت گرفته توسط وی در شکل (۲) قابل مشاهده است.

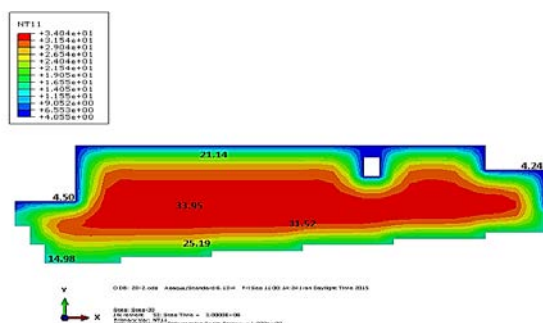


شکل (۲): تحلیل حرارتی که توسط ولادان کوزمانویک انجام گرفته

در شکل (۳) مش بندی مدل مورد استفاده جهت راستی‌آزمایی و در شکل (۴) نیز نتایج حاصل از تحلیل انجام‌شده در نرم‌افزار ABAQUS ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مدل از دقت بسیار مطلوبی برخوردار است.



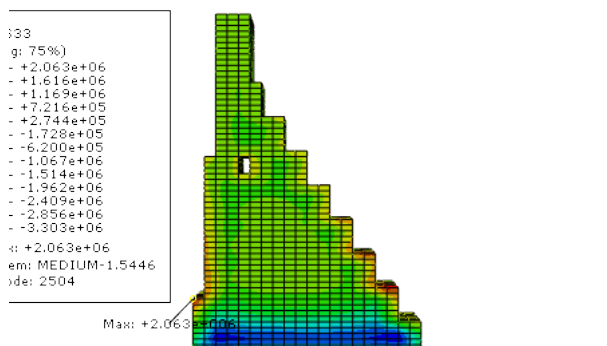
شکل (۳): مش بندی مدل مورد استفاده جهت راستی‌آزمایی



شکل (۴): تحلیل حرارتی انجام‌شده جهت راستی‌آزمایی

تحلیل مقطع با عمق متوسط

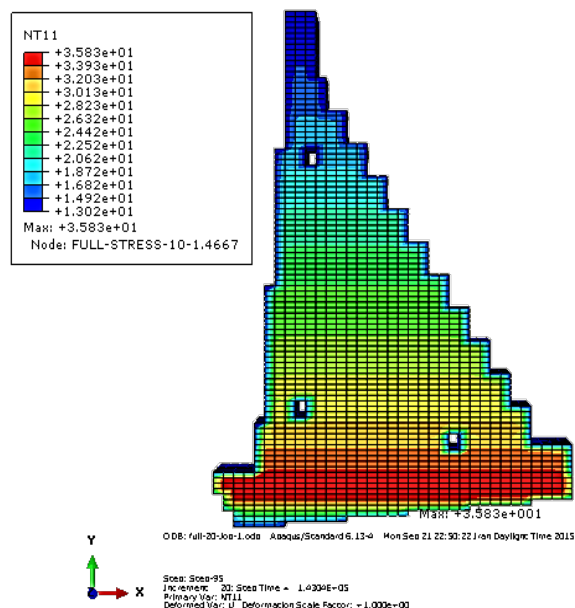
مقاطع با عمق متوسط، مقطعی از سد هستند که در قسمت‌های متمایل به کناره‌های سد قرار می‌گیرند و دارای عمق بتن‌ریزی متوسط در بین مقاطع مختلف سد هستند. در مدل مورد استفاده مطابق شکل (۱) ارتفاع مقطع این قسمت از سد ۵۹ متر است. مشابه حالت قبل این مقطع نیز با پنج طول یکپارچگی مختلف شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج مدل با طول یکپارچگی ۲۰ متر آن (M20) به‌عنوان نمونه در شکل (۷) قابل مشاهده است.



شکل (۷): بیشینه تنش کششی ناشی از هیدراسیون سیمان در مقطع با عمق متوسط سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (M20)

همان‌طور که از این شکل نیز مشخص است، بیشینه تنش کششی که بر اثر هیدراسیون سیمان در مقطع با عمق متوسط سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر اتفاق می‌افتد برابر با ۲/۰۶ مگاپاسکال است که گرادیان حرارتی ایجادشده در زمان رخداد تنش، در شکل (۸) ارائه شده است.

برای این مقطع نیز نتایج حاصل از تحلیل در جدول (۴) و (۵) آمده است.



شکل (۶): گرادیان حرارتی ناشی از هیدراسیون سیمان در زمان تنش کششی بیشینه در مقطع عمیق سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (L20)

جدول (۲): مقادیر بیشینه تنش کششی برای مدل‌های عمیق

نام مدل	ارتفاع مقطع موردبررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	بیشینه تنش کششی ایجادشده (MP)
L10	۹۵	۱۰	۱/۳
L15	۹۵	۱۵	۲/۴۸
L20	۹۵	۲۰	۳/۳۱
L25	۹۵	۲۵	۴/۶۶
L30	۹۵	۳۰	۶/۰۴

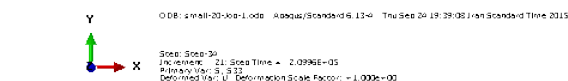
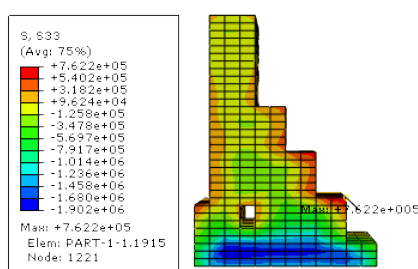
جدول (۳): مقادیر دما در زمان تنش کششی بیشینه برای

مدل‌های عمیق

نام مدل	ارتفاع مقطع موردبررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	دمای حاصل از هیدراسیون در زمانی که تنش کششی به بیشینه می‌رسد (°C)
L10	۹۵	۱۰	۲۴/۳
L15	۹۵	۱۵	۲۹/۹
L20	۹۵	۲۰	۳۵/۸
L25	۹۵	۲۵	۴۱/۴
L30	۹۵	۳۰	۴۷/۱

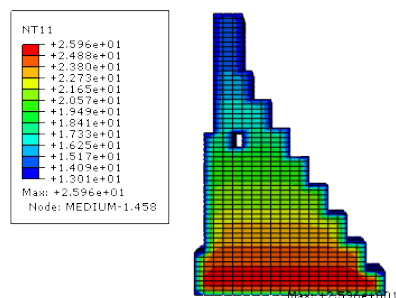
تحلیل مقطع با عمق کم

این مقاطع در قسمت‌های نزدیک به انتهای تاج سد قرار می‌گیرند و دارای عمق بتن‌ریزی کمتری در بین مقاطع مختلف سد هستند. برای این مدل مطابق شکل (۱) مقطعی با ارتفاع ۳۳ متر انتخاب شده که برای پنج طول یکپارچگی مختلف شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از تحلیل مدل با طول یکپارچگی ۲۰ متر از این مقطع (S20) نیز به‌عنوان نمونه در شکل (۹) قابل مشاهده است:



شکل (۹): بیشینه تنش کششی ناشی از هیدراسیون سیمان در مقطع با عمق کم سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (S20)

بیشینه تنش کششی که بر اثر هیدراسیون سیمان در مقطع نشان داده شده در شکل (۹) به وقوع می‌پیوندد برابر با ۰/۷۶ مگاپاسکال است. همچنین گرادیان حرارتی ایجادشده در زمان تنش کششی بیشینه برای این مدل، در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. نتایج حاصل از تحلیل این مقطع با طول یکپارچگی‌های مختلف در جدول‌های (۶) و (۷) ارائه شده است.



شکل (۸): گرادیان حرارتی ناشی از هیدراسیون سیمان در زمان تنش کششی بیشینه در مقطع با عمق متوسط سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (M20)

جدول (۴): مقادیر بیشینه تنش کششی برای مدل‌های با عمق متوسط

نام مدل	ارتفاع مقطع موردبررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	بیشینه تنش کششی ایجادشده (MP)
M10	۵۹	۱۰	۰/۶۱
M15	۵۹	۱۵	۱/۴۳
M20	۵۹	۲۰	۲/۰۶
M25	۵۹	۲۵	۲/۴۵
M30	۵۹	۳۰	۳/۰۶

جدول (۵): مقادیر دما در زمان تنش کششی بیشینه برای مدل‌های با عمق متوسط

نام مدل	ارتفاع مقطع موردبررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	دمای حاصل از هیدراسیون در زمانی که تنش کششی به بیشینه می‌رسد (°C)
M10	۵۹	۱۰	۱۹/۵
M15	۵۹	۱۵	۲۲/۷
M20	۵۹	۲۰	۲۵/۹
M25	۵۹	۲۵	۲۸/۹
M30	۵۹	۳۰	۳۱/۴

تدوین روابط کلی

با بررسی نتایج حاصل از این مطالعه بر روی مدل‌های تشریح شده در قبل، بیشینه تنش کششی حاصل از هیدراسیون سیمان (σ_{max}) و دمای حاصل از هیدراسیون در زمان رخداد تنش کششی بیشینه (T) برحسب عمق مقطع بت‌ریزی شده (L) و طول یکپارچگی (X) مطابق روابط (۱) و (۲) به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

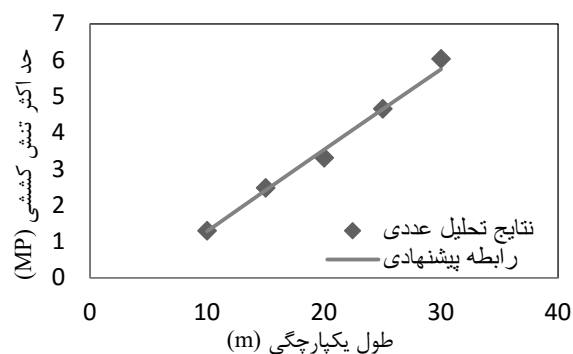
$$\sigma_{max} = \frac{L-100}{3 \times 10^4} X^2 + 23.6 \times 10^{-3} \sqrt{L} X - 1 \quad (۱)$$

$$T = 4.83 \times 10^{-3} L^{1.2} X + 12.9 \quad (۲)$$

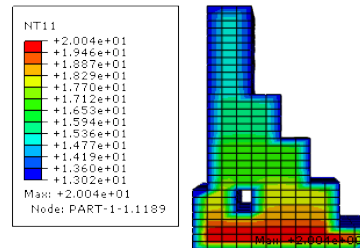
این روابط بر اساس تحلیل‌های بسیار زمان‌بر، بر روی مقاطع مختلف سد که سه نمونه از آن در بخش‌های قبلی تشریح شد و بر اساس بهترین برازش بر روی نمونه‌های عددی به دست آمده‌اند.

در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) منحنی رابطه (۱) با مقادیر حاصل از تحلیل عددی، به ترتیب برای مقاطع با عمق زیاد، متوسط و کم ارائه و مقایسه شده است. این شکل‌ها نشان‌دهنده دقت بسیار مطلوب رابطه ارائه شده است.

همچنین در شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) نیز منحنی رابطه (۲) با مقادیر حاصل از تحلیل عددی مقایسه و ارائه شده است. با توجه به دقت بسیار بالای روابط ارائه‌شده، طراحان در محاسبه طول یکپارچگی برحسب عمق مقطع قادر به استفاده از روابط ارائه‌شده هستند.



شکل (۱۱): مقایسه مقادیر تنش‌های به دست آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع عمیق (L)



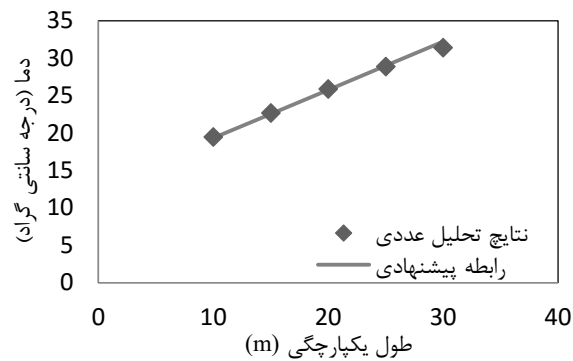
شکل (۱۰): گرادینان حرارتی ناشی از هیدراسیون سیمان در زمان تنش کششی بیشینه در مقطع با عمق کم سد با طول یکپارچگی ۲۰ متر (S20)

جدول (۶): مقادیر بیشینه تنش کششی برای مدل‌های با عمق کم

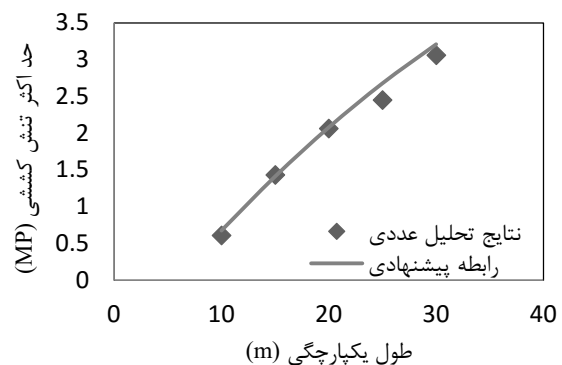
نام مدل	ارتفاع مقطع مورد بررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	بیشینه تنش کششی ایجاد شده (MP)
S10	۳۳	۱۰	۰/۳۲
S15	۳۳	۱۵	۰/۵۷
S20	۳۳	۲۰	۰/۷۶
S25	۳۳	۲۵	۰/۹۲
S30	۳۳	۳۰	۱/۰۷

جدول (۷): مقادیر دما در زمان تنش کششی بیشینه برای مدل‌های با عمق کم

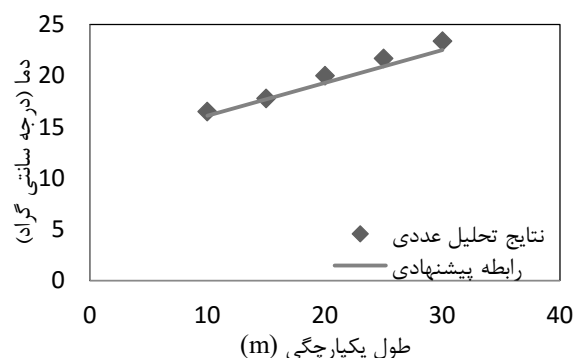
نام مدل	ارتفاع مقطع مورد بررسی (m)	طول یکپارچگی (فاصله بین درزهای انقباضی) (m)	دمای حاصل از هیدراسیون در زمانی که تنش کششی به بیشینه می‌رسد (°C)
S10	۳۳	۱۰	۱۶/۵
S15	۳۳	۱۵	۱۷/۸
S20	۳۳	۲۰	۲۰
S25	۳۳	۲۵	۲۱/۷
S30	۳۳	۳۰	۲۳/۴



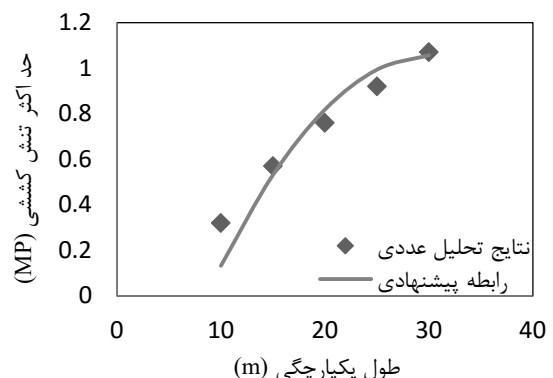
شکل (۱۵): مقایسه مقادیر دمای به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع با عمق متوسط (M)



شکل (۱۲): مقایسه مقادیر تنش‌های به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع با عمق متوسط (M)



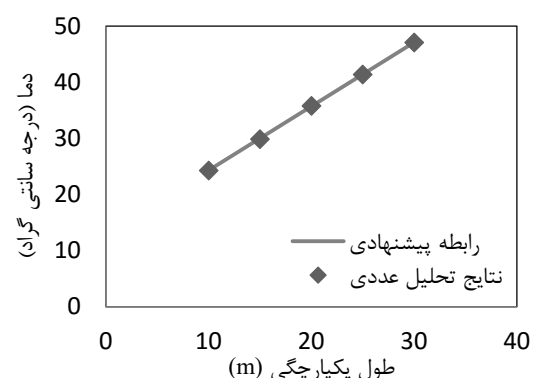
شکل (۱۶): مقایسه مقادیر دمای به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع با عمق کم (S)



شکل (۱۳): مقایسه مقادیر تنش‌های به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع با عمق کم (S)

لازم به ذکر است که در تحقیقاتی که در گذشته انجام شده است، تنها به عمق لایه‌های بتن غلتکی، فصل شروع بتن‌ریزی، فواصل زمانی بین اجرای هر لایه و مسائلی از این قبیل جهت کنترل تنش‌های حرارتی پرداخته شده است. همچنین در مواردی مانند تحقیقات کوزمانویک (۲۰۱۳)، به بررسی طول‌های یکپارچگی مختلف اما با یک عمق ثابت توجه شده است. این در حالی است که در تحقیق حاضر، اثر ارتفاع مقاطع بتن‌ریزی در طول یکپارچگی سد مورد بررسی قرار گرفته و در روابط ارائه‌شده، این پارامتر که قبلاً به آن کمتر پرداخته شده، لحاظ شده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان گام جدیدی در کنترل تنش‌های حرارتی و کاهش هزینه ساخت سدهای بتن غلتکی برداشت.

لازم به ذکر است که روابط پیشنهادی را نمی‌توان با استفاده از برآزش بر اساس تنها یک متغیر به دست آورد، چراکه این‌ها توابعی چند متغیره هستند.



شکل (۱۴): مقایسه مقادیر دمای به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی در مقطع عمیق (L)

نتیجه گیری

در این تحقیق، تحلیل حرارتی سد بتن غلتکی در حالات مختلف طول یکپارچگی و عمق حجم های بتن ریزی سد انجام شد و تأثیر این ابعاد بر حرارت زایی بتن غلتکی و تنش های ایجاد شده در بدنه سد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می شود که در مقاطع با عمق بتن ریزی کمتر می توان طول یکپارچگی را افزایش داد. به عبارت دیگر در قسمت های نزدیک به کناره های سد که تعداد لایه های بتن غلتکی و در نتیجه حجم بتن ریزی کمتر است، می توان فاصله بین درزهای انقباضی را بیشتر کرد. این امر نه تنها باعث افزایش سرعت اجرای سد می شود، بلکه هزینه های اجرایی را به مراتب کاهش می دهد. این مطالعات نشان می دهد که طول یکپارچگی یا همان فاصله بین درزهای انقباضی در سدهای بتن غلتکی را می توان با توجه به عمق هر قسمت تعیین و اجرا کرد. این طول را می توان برحسب بیشینه مقاومت کششی بتن و یا گرادیان حرارتی مطابق روابط (۱) و (۲) کنترل نمود. این طول می تواند برای هر سد با توجه به بیشینه مقاومت کششی بتن مصرفی و حرارت زایی آن متفاوت باشد.

همچنین با دقت بر روی محل وقوع بیشینه تنش های کششی در این مطالعه، می توان به این نکته پی برد که این تنش ها که دلیل اصلی ترک های حرارتی هستند، در قسمت های پایینی سد و به خصوص در گوشه های هندسی سد که یکنواختی شکل از بین رفته، به وقوع می پیوندند؛ بنابراین لازم است در مراحل اولیه اجرا که بتن ریزی از لایه های پایین شروع می شود، در نحوه بتن ریزی و پرهیز از گوشه های تیز دقت بیشتری را به عمل آورد. این مسئله در طراحی ابعاد بدنه سد و شکل و محل سازه های داخل آن نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

مراجع

- ۱- بهبودی، م و نعمت اللهی، م. (۱۳۹۱). "بتن غلتکی در سدسازی (RCC) با نگاهی گذرا به سد هایقر". انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- ۲- چی زاده، م. و قاسمی، ه. (۱۳۸۱). "بتن غلتکی در سدسازی". موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- ۳- وراینهارد، ه. (۱۳۷۶). "سدهای بتن غلتکی". ترجمه دالی بندار. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.

- 4- Abdulrazeg, A. A., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., Khanehzaei, P. and Mohamed, T. A. (2014). "Thermal and Structural Analysis of RCC Double - Curvature Arch Dam." *Journal of Civil Engineering and Management*. 20(3), 434-445.
- 5- Jaafar, M. S., Bayagoob, K. H., Noorzaei, J. and Thanoon, A. M. W. (2007). "Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams." *Advances in Engineering Software*. 38(11-12), 886-895.
- 6- Rahimi, A. (2012). "Evaluation on Heat of Hydration in Roller Compacted Concrete Dams during Construction Phases." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 6(6), 151-156.
- 7- Kuzmanovic, V., Savic, L. and Mladenovic, N. (2013). "Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams". *Journal of Thermal Stresses*. 36(2), 112-134.