تحلیل و محاسبه دمای بتن حجیم

ضیاءالدین ایدی* ، دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
مسعود اسماعیلی، دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
پست الکترونیکی: z_aidi2000@yahoo.com

چکیده

گرما زایی ناشی از واکنش های مواد سیمانی در سازه های بتن حجیم منجر به افزایش دما شده و در صورت گیرداری سازه ممکن است باعث بروز ترک در این سازه ها شود.

از آنجا که ضریب هدایت حرارتی بتن نسبتا کم است، حرارت هیدراسیون ایجاد شده در سازه های حجیم بتنی به کندی آزاد خواهد شد مگر آنکه روشهایی نظیر پس سرمایش پیش بینی شده باشد. به عنوان مثال یک دیوار بتنی به ضخامت ۱۵ سانتی متر بعد از نیم ساعت به تعادل حرارتی با محیط خواهد رسید در حالیکه این زمان برای یک دیوار ۱/۵ متری، ۱۵متری و ۱۵۰ متری به ترتیب ۱هفته، ۲سال و ۲۰۰ سال خواهد بود. به طور کلی زمان لازم برای تعادل حرارتی، نسبت مستقیم با مربع کوچکترین بعد سازه دارد.

در کشور ما با توجه به تعداد زیاد پروژه های بتنی حجیم در حال اجرا و یا در حال مطالعه مثل سدها، نیروگاهها، جداره های ضخیم بتنی تونل ها، پرداختن به موضوع بتن حجیم و روش های کنترل مسائل حرارتی حایز اهمیت فراوان می باشد.

در این مقاله ضمن تبیین پارامترهای تاثیر گذار روی مسائل حرارتی سازه های بتنی حجیم، روش های تحلیل و محاسبه دمای بتن حجیم تشریح شده است و توصیه هایی جهت کاهش عواقب تولید گرمای بتن ارائه شده است.

کلید واژه ها: ***گرمای ویژه، بتن حجیم، کنترل دما، قابلیت انتشار، گرمای هیدراسیون***

۱-مقدمه

بتن حجیم در ACI116R به این صورت تعریف شده است: هر حجم بتن با اندازه های به حد کافی بزرگ، به طوری که نیازمند مراقبت در مقابل تولید گرمای هیدراسیون سیمان و مراقبت از تغییرات حجم برای رسیدن به کمترین ترک خوردگی است. طراحی سازه های بتن حجیم معمولا روی اصولی مثل دوام، اقتصاد و فعالیت های حرارتی آن پایه گذاری شده است و مقاومت در درجه دوم اهمیت قرار دارد. یک خصوصیت مهم که بتن حجیم را از دیگر بتن ها جدا می کند، رفتار حرارتی این نوع بتن است.[۱]

بیشتر بارهای ناشی از دمای شدید در یک سد بتنی، در حال ساخت ایجاد می شود. از این بابت باید ملاحظاتی در طول ساخت سد صورت گیرد تا اطمینان کافی از کم بودن اثر تنش های دمایی نسبت به استحکام بتن حاصل گردد.[۲]

بیشترین مقدار حرارت در روز های اولیه استقرار بتن حاصل می شود. در مقاطع بتنی نازک همچون روکش کف ها تقریبا به مجرد ایجاد حرارت بتن به همان سرعت نیز در محیط اطراف پراکنده می شود. در مقاطع بتنی ضخیم تر (بتن حجیم) حرارت بسیار آهسته تر از تولید آن در محیط اطراف پراکنده می شود و درنتیجه گرم شدن بتن حجیم را باعث می شود.[۳]

مدیریت کنترل دما جهت جلوگیری از صدمات حاصل از ترک خوردگی، به حداقل رساندن تاخیر برنامه کاری و رعایت مشخصات فنی پروژه الزامی می باشد.

۲-تولید گرما و نقش اجزاء بتن

حرارت ایجاد شده در بتن متاثر از عواملی می باشد همچون: دمای اولیه بتن، ظرفیت حرارتی و انتقال حرارتی بتن، حرارت هیدراسیون سیمان و مقدار سیمان، شکل هندسی سازه، خواص عایق بندی قالب، زمان باز کردن قالب، دمای محیط و سرعت باد، دمای مخصوص و انتقال حرارتی سازه های مجاور و موقعیت، ابعاد و درجه حرارت لوله های تبرید.[۴]

گرمای ویژه که طبق تعریف مقدار انرژی لازم جهت افزایش دمای واحد جرم یک ماده به میزان یک درجه سانتی گراد می باشد از عمده ترین پارامترهایی است که میزان تاثیر یک جزء روی دمای اولیه بتن را تعیین می کند.[۵]

آب دارای بالا ترین گرمای ویژه میان اجزاء بتن با مقدار $4/18\ kj/kgc^{\circ}$ می باشد. گرمای ویژه سیمان حدود $0/88\ kj/kgc^{\circ}$ در نظر گرفته می شود.[۶]

گرمای ویژه سنگدانه ها بستگی به نوع آنها دارد که برای انواع مختلف از ۰/۶۴ تا۰/۸۶متفاوت می باشد.

شایان توجه است که در تعیین گرمای ویژه سنگدانه ها، آب احتمالی موجود در آنها نظیر آب جذب شده یا آب سطحی در نظر گرفته نمی شود و در محاسبات نیز آب موجود در سنگدانه ها به صورت مجزا و با در نظر گرفتن گرمای ویژه مربوط به آب ملحوظ می شوند.[۵]

هر چند گرمای ویژه سنگدانه ها بسیار کمتر از گرمای ویژه آب می باشد، لیکن به علت مقدار بالای سنگدانه ها در بتن در مقایسه با دیگر اجزاء، تاثیر گرمازایی آن روی بتن بیشتر به چشم می آید. نوع سیمان عامل تعیین کننده ای در حرارت زایی آن می باشد. در ترکیبات سیمان، سه کلسیم آلومینات (C3A) بیشترین مقدار و آهنگ گرمازایی را دارا می باشد و بعد از آن سه کلسیم سیلیکات (C3S) و چهار کلسیم آلومینو فریت (C4A) قرار دارند. با توجه به تر کیبات هر نوع سیمان، عموما در پروژه های بتن حجیم از سیمان هایی که دارای کمترین مقدار این عناصر باشد مثل نوع ۲و۴ استفاده می شود.[۷]

وقتی نسبتی از سیمان با پوزولان جایگزین می شود، رشد دمای بتن ناشی از گرمازایی سیمان، بخصوص در سن های پایین، و به مقدار زیاد کاهش می یابد. البته اثر پوزولان ها متفاوت و بستگی به ترکیب و ریزی پوزولان و سیمان استفاده شده دارد. به طور تقریبی پوزولان به مقدار ۵۰ درصد کمتر از مقدار سیمانی را که جایگزین آن شده گرما تولید می کند.[۱]

۳-کنترل دما و روش های محاسباتی

از آنجا که یکی از مشکلات اصلی سازه های بتن حجیم نیاز به کنترل گرمای محبوس در آن به خاطر هیدراته شدن سیمان می باشد، محاسبات ریاضی منتج شده از خواص حرارتی بتن مهندسین را قادر به برآورد سریع سیستم کنترل دمای مورد نیاز بتن کرده است. فاکتوری که توانایی نسبی گرما را برای عبور از داخل جسم بتن تعیین می کند قابلیت انتشار حرارتی می باشد که به صورت زیر تعریف می شود.[۱]

$$h^2 = k / c\rho \qquad (۱)$$

که در آن:

h^2 : قابلیت انتشار حرارتی (m^2/hr)

k : قابلیت هدایت (kj/m)

c : گرمای ویژه$(kj/kg^{\circ}c)$

ρ : جرم مخصوص بتن(kg/m^3)

مقدار قابلیت انتشار به میزان زیادی به نوع سنگدانه بکار رفته در بتن بستگی دارد. جدول (۱) مقادیر قابلیت انتشار بتن ساخته شده از چند نوع مختلف سنگدانه را نشان می دهد.[۱]

جدول (۱) – *قابلیت انتشار و نوع سنگدانه*

سنگدانه درشت	قابلیت انتشار m^2/day	قابلیت انتشار $m^2/hr *10^{-3}$
کوارتز	0.129	5.4
سنگ آهک	0.113	4.7
دولومیت	0.111	4.6
گرانیت	0.096	4
ریولیت	0.078	3.2
بازالت	0.072	3

هر چه مقدار قابلیت انتشار بیشتر باشد، گرما سریعتر از جسم بتن خارج می شود. اگر نوع سنگدانه مشخص شده نباشد، می توان یک مقدار میانگین ۰/۰۹۳m^2/day را درنظر گرفت.[۱]

بتن حجیم می تواند تحت تاثیر حرارت محیط قرار گیرد. چنانچه تغییرات حرارت محیط به صورت تغییرات سینوسی در نظر گرفته شود و اگر مثلا در یک سد، حجم بتن به حد کافی ضخیم باشد به طوری که نوسان دمای داخلی در مقایسه با سطح خارجی قابل صرف نظر باشد، دامنه تغییرات درجه حرارت در داخل بتن از رابطه زیر بدست می آید.[۸]

$$\frac{R_X}{R_0} = e^{-x\sqrt{\pi / h^2 \gamma}} \qquad (۲)$$

که در آن :

R_X : دامنه تغییرات حرارت در فاصله x از سطح

R_o : دامنه تغییرات حرارت سطح بتن (x=0)

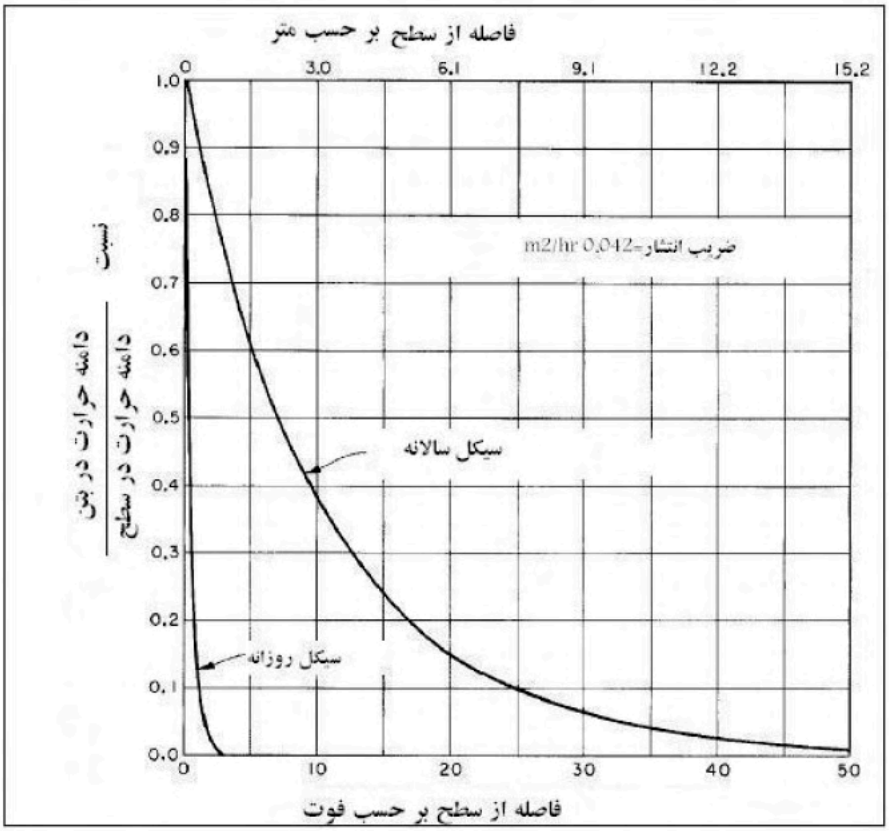
E : مبنای لگاریتم طبیعی (۲/۷۱۸)

X : فاصله از سطح (m)

H^2 : قابلیت انتشار حرارتی

γ : زمان دوره تغییرات دما بر حسب روز

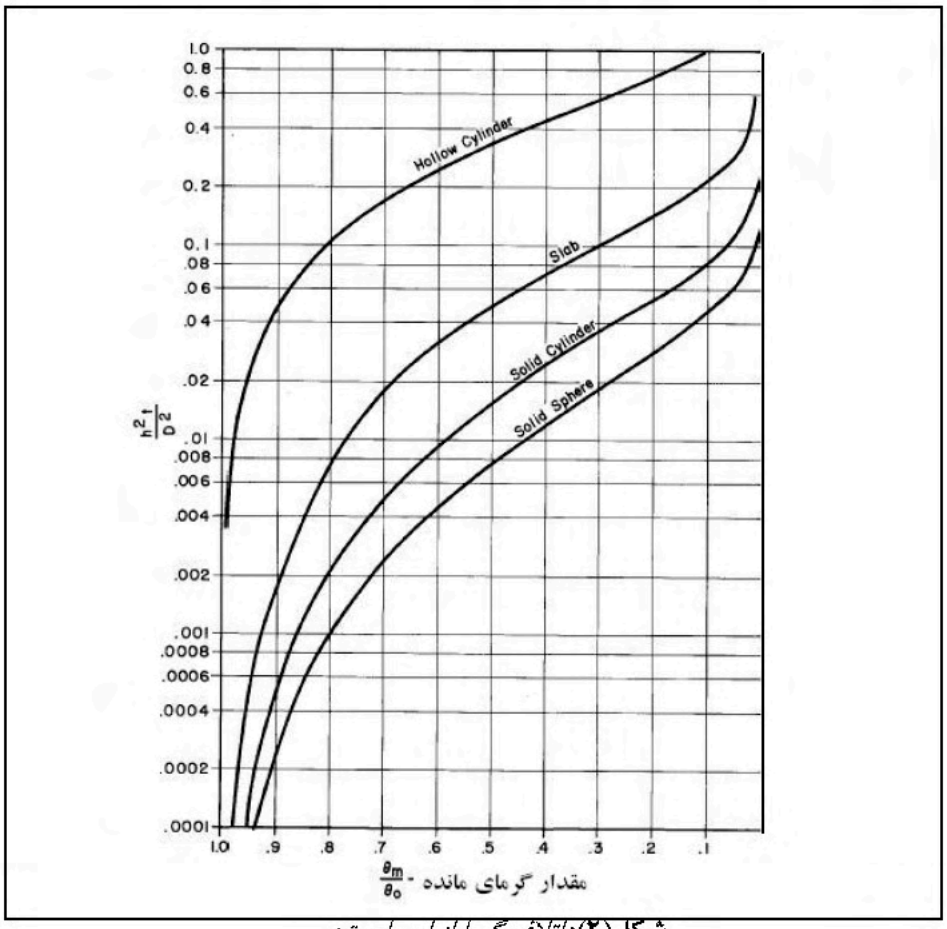
برای بتنی با قابلیت انتشار m^2/day ۰/۰۹۳ با استفاده از رابطه فوق منحنی تغییرات نفوذ حرارت برای سیکل های یک روزه و یکساله بدست آمده که در شکل (۱) نشان داده شده است:[۱]



شکل(۱) – *تغییرات حرارت در عمق بتن برای سیکل های مختلف حرارتی محیط*

مطابق این شکل سطح خارجی تحت تاثیرات کامل تغییرات روزانه حرارت قرار دارد حال آنکه در عمق تاثیر این تغییرات بسیار کمتر است. همچنین طبق این نمودار تاثیر تغییرات سالیانه حرارت نسبت به روزانه در عمق بتن کمتر می باشد.

مطالعات انتشار گرما در بتن حجیم می تواند توسط استفاده از نمودارها و گرافها یا توسط محاسبه دستی یا با برنامه های کامپیوتری اجزاء محدود انجام گیرد. هنگامی که سازه بتن حجیم را برای آنالیز بتوان به صورت یک شکل هندسی شناخته شده مدلسازی نمود، نمودارهایی را برای مطالعه انتشار گرما در بتن می توان استفاده کرد. شکل (۲) نموداری را نشان می دهد که برای تعیین اتلاف گرما در استوانه ها و دال های توخالی و توپر با یک یا دو سطح آزاد یا احجام کروی مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد مقادیر موجود دراین نمودار می تواند براحتی در گستره پهناوری از مسائل مثل سرد سازی در سد ها یا دال های ضخیم بتنی، سرد سازی سنگدانه های بتن، سرد سازی مصنوعی بتن حجیم توسط استفاده از لوله های مدفون در بتن و در سرد سازی پایه پلها مورد استفاده قرار گیرد.[۱]



شکل(۲): *اتلاف گرما از اجسام بتن*

t : زمان(روز)

h^2 : قابلیت انتشار(m^2/day)

D : ضخامت مقطع بتن(m)

θ_0 : تفاوت دمای اولیه بین بتن و مواد پیرامونی

θ_m : تفاوت دمای نهایی بین بتن و مواد پیرامونی

برای مثال اگر در یک تراز مشخص از یک سد قوسی دارای ضخامت m ۲۱/۳ و دمای میانگین $^{\circ}c$ ۳۸ در داخل حجم بتن باشیم. اگر سطح در معرض هوا دارای دمای $^{\circ}c$ ۱۸ باشد، زمانی که طول می کشد تا حجم بتن به اندازه $^{\circ}c$ ۲۱ خنک شود به ترتیب زیر بدست می آید:(فرض شده که$h^2=0.111m^2/day$ باشد).[۱]

$\theta_o = 38-18 = 20^o c$ تفاوت دمای اولیه

$\theta_m = 21-18 = 3^o c$ تفاوت دمای نهایی

$\theta_m/\theta_o = 3/20 = 0.15$ نسبت گرمای باقی مانده

ازنمودار شکل (۲) و از منحنی مربوط به دال، مقدار h^2t/D^2 مطابق با $\theta_m/\theta_o = 0.15$ برابر با ۰/۱۸ می باشد. پس :

$$t = \frac{0.18D^2}{h^2} = \frac{0.18(21.3)^2}{0.111} = 740day$$

۴-روش تحلیل اجزای محدود :

روش اجزای محدود از جمله روش های بسیار قدرتمندی است که جهت حل مسائل پیچیده مهندسی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. محققان زیادی از این روش در آنالیز حرارتی سازه های بتنی استفاده نموده اند.[۴]

مطالعات کامل حرارتی سازه های بتن حجیم به روش اجزای محدود و در دو مرحله انجام می گیرد. در قسمت اول مدل حرارتی سازه ایجاد می گردد و با اعمال شرایط محیطی و در نظر گرفتن مشخصات حرارتی بتن نظیر گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی و مهم تر از همه با در نظر گرفتن حرارت زایی بتن بر حسب زمان، پروفیل های دمایی سازه در بازه های مختلف زمانی تعیین می گردد.[۵]

در قسمت دوم مدل سازه ای اجزای محدود عضو بتنی ایجاد شده و پروفیل های دمایی تعیین شده در بخش اول به عنوان بار حرارتی به سازه وارد می شود. در این مرحله لازم است علاوه بر مشخصه های مکانیکی بتن و محیط اطراف نظیر فونداسیون، ضریب انبساط حرارتی بتن نیز به عنوان ورودی های برنامه داده می شوند. لازم به توجه است که با توجه به تغییر در مدول الاستیسیته بتن که در طی زمان افزایش می یابد، لازم است تحلیل به صورت مرحله ای در بازه های زمانی و با در نظر گرفتن این تغییرات انجام می گیرد. همچنین با توجه به تاثیر خزش روی تنش های ایجاد شده بایستی این تاثیر در محاسبات ملحوظ گردد.[۵]

۵-نتیجه گیری

از مهم ترین عواملی که مقدار سرمایش مورد نیاز را تعیین می کند، دمای حداکثر مجاز بتن در محل بتن ریزی می باشد. این دما باید با توجه به محاسبات تعیین پروفیل های دما و تنش های حرارتی پیش بینی شده، توسط طراح سازه بتن حجیم تعیین گردد. با توجه به هزینه های بالای سرد کردن بتن لازم است انتخاب دمای حداکثر مجاز بتن در زمان بتن ریزی توسط طراح به صورت دقیق و با محاسبات مربوطه انجام گیرد.

جهت کاهش هر چه بیشتر دمای بتن تازه باید از سیمان های دارای کمترین حد گرمازایی استفاده کرد که در این مورد استفاده از سیمان ها نوع ۲و۵ توصیه می شود، البته به دلیل عدم تولید سیمان تیپ ۵ می توان از سیمان تیپ ۴ نیز برای این منظور استفاده نمود.

کاربرد مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی و یا پوزولانهای طبیعی مناسب میتواند گرمای بتن را تقلیل دهد. گرمازایی پوزولان حدود نصف سیمان می باشد و بر این اساس جهت تقلیل قابل توجه درگرمازایی لازم است از حدود ۳۰درصد پوزولان استفاده کرد.

۶- منابع

[۱] ACI207.1R-96 ,"Mass Concrete" ,reported by ACI Committee 207 ,American Concrete Institute ,1996

[۲] شمسایی،ابوالفضل،"طراحی و ساخت سدهای مخزنی"،جلدسوم ، "سدهای بتنی" ، ۱۳۸۳

[۳] حسین ، عبدالله و عابدینی،محمد،"کنترل دمای بتن حجیم"، مجله تکنولوژی بتن ،سال نخست، شماره ۲ ،مرداد ماه ۱۳۸۲

[۴] نوشاد سهیلی ، سید سعید ، "ترک در سد های بتنی " ، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران ، کمیته فنی ترمیم و باز سازی سدها ، نشریه شماره۱۹ ، ۱۳۷۸

[۵]باقری، علیرضا و گرجی ، منصور،"سیستم های پیش سرد کن بتن پروژه های سد سازی"،کمیته ملی سدهای بزرگ ایران ، کمیته فنی مواد و مصالح سد های بتنی ، نشریه شماره ۳۰ ،۱۳۷۹

[۶] ACI207.4R-93 ,"Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete" ,Reported by ACI Committee207 ,American Concrete Institute ,1998

[۷]باقری،علیرضا،"نقش نوع مواد سیمانی در ترک خوردگی حرارتی سازه های بتن حجیم" ،مجله انجمن بتن ایران ،سال دوم ،شماره ۴ ،پاییز ۱۳۸۰

[۸]شکرچی زاده ،محمد ،"ترک خوردگی در بتن حجیم" ،مجله انجمن بتن ایران ،سال سوم ،شماره ۷ ،تابستان ۱۳۸۱