

بررسی و تحلیل مکانیزم تولید و انتقال حرارت در سنین اولیه بتن های حجیم

حمید پریش¹، ویدا الوانی²

1-مدرس دانشگاه علمی کاربردی واحد نی ریز، ایران

hamidparish@yahoo.com

2-کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه ukm مالزی

Vida_alvani@yahoo.com

چکیده

یکی از ویژگی های مهم که بتن حجیم را از سایر بتن های سازه ای مجزا می کند، رفتار حرارتی آن است. ابعاد نسبتا بزرگ سازه های بتنی حجیم باعث ایجاد گرادیان حرارتی بین داخل و سطح خارجی بتن می گردد. این گرادیان، سبب ایجاد تغییر حجم متفاوت و در نتیجه ایجاد تنش می گردد. تنش تولید شده می تواند باعث ایجاد ترک در بتن گردد. در این مقاله تلاش شده است تا مدلی که برای تحلیل حرارت توزیع شده در داخل جسم بتنی به صورت دو بعدی تدوین شده است، با توجه به نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا معادلات حاکم بر تولید و انتقال حرارت در بتن مورد بررسی قرار می گیرد و از اطلاعات آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات حرارت زایی بتن استفاده می گردد. سپس شرایط اولیه و مرزی ارائه می شود. معادله حاکم به وسیله روش اجزاء محدود با استفاده از قابلیت برنامه نویسی نرم افزار ANSYS حل می شود. نتایج پیش بینی شده در مدل دو بعدی دیوار حائل تدوین شده انطباق خوبی با نتایج تجربی اندازه گیری شده توزیع دما در دیوار حائل دارد.

واژه های کلیدی: بتن حجیم، تولید و پخش دما، حل عددی، روش اجزاء محدود، نرم

افزار ANSYS

1- مقدمه

بتن حجیم به بتنی اطلاق می‌شود که تغییرات دمای ناشی از حرارت زایی بتن تمهیداتی جهت جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی لازم نماید. حرارت زایی بتن به علت واکنش هیدراسیون سیمان بوده که واکنشی گرمازا است. هنگامی که بتن حجیم در برابر اتمسفر عایق نشده باشد، گرادیان حرارتی اتفاق می‌افتد زیرا درون بتن داغ می‌شود در حالیکه سطح آن حرارت خود را به اتمسفر می‌دهد. این گرادیان، سبب ایجاد تغییر حجم متفاوت و در نتیجه ایجاد تنش می‌گردد. همچنین قیدهای داخلی ناشی از گرادیان‌های حرارتی ایجاد شده روی انقباض بتن در حین افت دما از دمای حداکثر به دمای ثابت نهایی، تنش‌های کششی قابل توجهی در بتن ایجاد می‌نماید. از آنجائیکه بتن در مقابل تشه‌ای فشاری قوی و در کشش ضعیف عمل می‌کند، تنش تولید شده می‌تواند باعث ایجاد ترک در بتن گردد. بنابراین تعیین روندی برای تخمین نحوه توزیع حرارت تولید شده در بتن و همچنین تاریخچه زمانی آن الزام آور به نظر می‌رسد.

2- خواص حرارتی بتن

بتن ماده‌ای ناهمگن، که از خواص حرارتی متفاوتی تشکیل یافته است، می‌باشد. بنابراین خواص حرارتی بتن از فاکتورهای متفاوتی از قبیل نوع مواد معدنی، نسبت‌های حجم سنگدانه، دمای بتن، حجم آب، تخلخل و غیره تاثیر می‌پذیرد.

1-2- ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی هر جسم مقدار گرمایی است که در هر ثانیه از هر سانتیمتر مربع از مقطع آن جسم که گرادیان دمایی باشد عبور می‌نماید. واحد ضریب هدایت حرارت $(W/m^{\circ}C)$ یا $(J/mh^{\circ}C)$ می‌باشد. انجمن بتن آمریکا، ضریب هدایت حرارتی بتن را در محدوده $1/7-2/35 Kcal/mh^{\circ}C$ و انجمن بتن ژاپن، این ضریب را در محدوده $2/15-2/51 Kcal/mh^{\circ}C$ تعریف می‌کنند [1 و 2].

2-2- حرارت ویژه

حرارت ویژه، یک پارامتر اصلی در ظرفیت حرارتی می‌باشد. حرارت ویژه طبق تعریف، مقدار حرارتی است که دمای واحد جرم یک ماده را به میزان 1°C افزایش می‌دهد. انجمن بتن آمریکا، حرارت ویژه بتن را در محدوده $0/22-0/24 \text{ Kcal/Kg}^{\circ}\text{C}$ و انجمن بتن ژاپن، حرارت ویژه بتن را در محدوده $0/27-0/31 \text{ Kcal/Kg}^{\circ}\text{C}$ تعریف می‌کنند [2و1].

2-3- قابلیت نفوذ حرارتی

قابلیت نفوذ حرارتی، کمیتی است که در حالت عدم توزیع یکنواخت دما، معرف سرعت انتقال حرارت از نقطه ای به نقطه دیگر آن است. هر چه قابلیت نفوذ حرارتی جسم بیشتر باشد انتقال دما در جسم سریعتر صورت می‌گیرد. این پارامتر مستقل نبوده و برابر $\alpha = k/\rho c$ با واحد m^2/s یا m^2/hr می‌باشد.

2-4- ضریب انتقال حرارت در سطح بتن در تماس با هوا

مقدار ضریب انتقال حرارت سطح بتن بستگی به عواملی نظیر سرعت جریان هوا دارد. در برخی منابع، این ضریب (Atmosphere Convection) در محدوده $8-11 \text{ Kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$ آورده شده است [2].

قابل ذکر است محدوده های ذکر گردیده در زمانی است که سرعت باد در محدوده $2-3 \text{ m/s}$ قرار داشته باشد. اوزاوا پیشنهاد کرد که ضریب انتقال حرارت سطح بتن، ha ، از تابع ذیل بر اساس سرعت باد بدست آید [2] که در آن V سرعت باد بر حسب m/s می‌باشد.

(1)

$$ha = 9.6 + 1.12V$$

3- معادلات حاکم بر تولید و انتقال حرارت

فعل وانفعالات شیمیایی سیمان و آب، واکنشی حرارت زاست. مقدار گرمایی، زمان گیرش و مقاومت سیمان بستگی به ترکیبات و اجزاء تشکیل دهنده سیمان دارد [3].

معادله اساسی حاکم بر تولید و انتقال حرارت در یک جسم صلب به صورت ذیل می باشد :

(2)

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\alpha}{k} \dot{Q} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

که در آن $\alpha = k / \rho C$ را قابلیت پخش (Diffusivity) تعریف می نمایند. پارامترهای معادله فوق به ترتیب ρ (جرم حجمی) (Kg / m^3) ، C (گرمای ویژه، $Kj / hm^{\circ}C$)، و k (ضریب هدایت حرارتی و دما در هر نقطه از سازه بتنی، $W / m^{\circ}C$ or $KJ / hm^{\circ}C$)، \dot{Q} (روند تولید حرارت در واحد حجم سازه می باشد. با توجه به اینکه در سازه های حجیم بتنی، عمده تبادل حرارتی با محیط از وجوه عمود بر مقطع عرضی سازه می باشد، کاربرد رابطه فوق در محاسبه پروفیل های دما در بدنه سازه عموماً به شکل دو بعدی مطرح می گردد.

در معادله (1) نحوه محاسبه آهنگ حرارت زایی \dot{Q} مورد نظر می باشد. مقدار حرارت تولید شده در بتن عمدتاً به مقدار و نوع مواد سیمانی بستگی دارد. با استفاده از روابط سرعت نسبی واکنش هیدراسیون نظیر رابطه زیر [4]، که توسط آرنیوس ارائه گردیده است زمان های معادل t_e مربوط به

(3)

$$H(T) = \exp \left\{ \frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T} \right) \right\}$$

دمای مرجع T_r از روی اطلاعات آزمایشگاهی حرارت زایی محاسبه می گردند. در رابطه فوق T (دمای بتن، T_r دمای مرجع و E انرژی فعالیت می باشد.

$$T > 20^{\circ}C \quad \text{برای دمای بتن}$$

$$E = 33500$$

$$T \leq 20^{\circ}C \quad \text{برای دمای بتن}$$

$$E=33500+1440(20-T)$$

R ثابت گاز مولار می باشد که مقدار آن 8/314 در نظر گرفته می شود.

این رابطه را به صورت گسسته چنین می توان نوشت:

(4)

$$t_e = \sum_{k=1}^M H(T) \Delta t_k$$

توابع متفاوتی که عمدتاً توابع توانی هستند جهت تعریف حرارت زایی بتن بر حسب زمان معادل t_e در دمای مرجع T_r توسط محققین به کار رفته اند [4]. رابطه پیشنهاد شده توسط مرجع [4] برای تعریف حرارت زایی بر حسب زمان به شکل زیر می باشد :

(5)

$$Q(t_e) = Q_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t_e}{t_0}} \right)$$

که در آن Q_{\max} بیشترین حرارت تولید شده و t_0 مشخصه زمان می باشد. پارامترهای فوق بر اساس روابط چند فازی که توسط یانگ و ماینرز (1981) ارائه گردیده است [5]، قابل محاسبه می باشد. این روابط، ماکزیمم حرارت تولید شده در سنین معادل 3 و 7 روز ملات سیمان را با توجه به اجزاء تشکیل دهنده آن مطابق ذیل بدست می آورد [5]:

(6)

$$Q_3 = 240(C_3S) + 50(C_2S) + 880(C_3A) + 290(C_4AF)$$

(7)

$$Q_7 = 360(C_3S) + 55(C_2S) + 895(C_3A) + 295(C_4AF)$$

با استفاده از روابط 5 و 6 و Q_{\max} و t_0 قابل محاسبه می باشد. از طرفی با مشتق گیری از روابط تعیین شده برای حرارت زایی بتن روند تولید حرارت در زمان های معادل را نیز می توان تعیین نمود:

(8)

$$Q(t_e) = \frac{dQ(t_e)}{d(t_e)} \cdot \frac{d(t_e)}{dt} = \left(\frac{Q_{\max}}{t_0} \right) \cdot e^{\left(\frac{-t_e}{t_0} \right)} \exp \left\{ \frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T} \right) \right\}$$

با استفاده از چنین رابطه ای می توان برای نقاط مختلف بدنه بتنی در هر زمان مورد نظر نرخ حرارت زایی بتن را به صورت تابعی از زمان معادل به دست آورد.

4- شرایط اولیه و شرایط مرزی

به عنوان شرط اولیه، لازم است دمای اولیه بتن جهت شروع محاسبات تعیین پروفیل های دمای مشخص باشد. این دما بر اساس شرایط خاص هر پروژه قابل تخمین است و به عنوان اطلاعات ورودی برنامه در نظر گرفته می شود.

شرایط مرزی در سطح خارجی بتن، برای مسایل دو بعدی به شکل زیر در نظر گرفته می شود [6]:

(9)

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) + q = 0$$

که در آن n_x و n_y کسینوسهای هادی بردار عمود بر سطح بتن و q تبادل حرارت توسط انتقال سطح می باشد که به اختلاف دمای محیط و سطح بتن بستگی دارد. بنابراین:

(10)

$$q = h_c (T_s - T_{air})$$

T_c دمای سطح بتن، T_{air} دمای هوا ($^{\circ}C$) و h_c ضریب انتقال حرارتی ($W / m^2 \cdot C$) می باشند. مقدار h_c بستگی به عواملی نظیر سرعت جریان هوا دارد.

جهت لحاظ نمودن وجود قالب بندی یا عایق بندی روی سطح بتن در پدیده انتقال حرارت بین محیط و بتن رابطه ای به صورت زیر ارائه شده است:

(11)

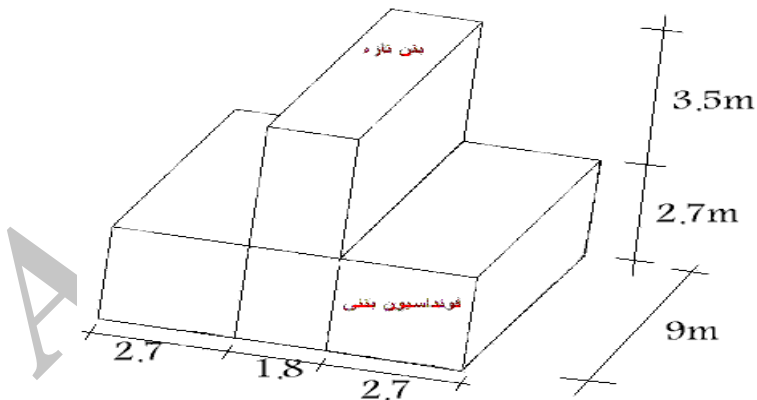
$$h_c = \left[\frac{1}{h_c} + \left(\frac{e}{\lambda} \right)_{\text{Isolation}} \right]$$

که در آن e ضخامت عایق بندی بر حسب m است. ضریب هدایت حرارتی عایق بندی یا قالب بندی $(KJ/m^2h^\circ C)$ می باشد.

5- مدل ساخته شده در آزمایشگاه

مدل دوبعدی ساخته شده توسط نرم افزار اجزاء محدود ANSYS 5.4 [8]، یک شبیه سازی از مدل آزمایشگاهی که توسط هاونک سانگ و همکارانش [7] انجام گردیده، می باشد. سازه بتن حجیم مورد نظر یک دیوار حائل بتنی با ضخامت $1/8$ متر، ارتفاع $3/5$ متر و طول 9 متر می باشد که بر روی پی بتنی که در گذشته ساخته شده، قرار گرفته است (شکل 1).

طرح مخلوط بتن دیوار حائل در جدول 1 (مورد استفاده توسط هاونک سانگ و همکارانش [7])، خصوصیات حرارت زایی سیمان در جدول 2 [3] و خواص حرارتی مورد نیاز در جدول 3 [1] آورده شده است.



شکل 1 - دیوار حائل بتنی (شبیه مدل آزمایشگاهی مدل شده توسط هاونک سانگ و همکارانش [7])

جدول 1 - طرح مخلوط بتن [7]

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Admixtures (%)	
		C	W	S	G	WR	AE

52	43	348	181	746	1060	0.3	0.007
----	----	-----	-----	-----	------	-----	-------

جدول 2- اجزاء تشکیل دهنده سیمان و خصوصیات حرارت زایی آن [3]

نوع سیمان	C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF (%)	Q3 (KJ/Kg)	Q7 (KJ/Kg)	Q _{max} (KJ/Kg)	t ₀ (h _r)
تیپ 1	58.4	13.9	9.1	10	256.1	331.6	347	53.76

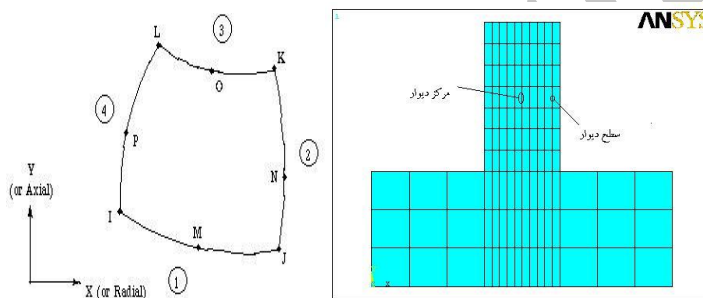
جدول 3- خواص حرارتی مورد نیاز [1]

وزن واحد حجم بتن $\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$	2335
گرمای ویژه بتن $C \left(\frac{KJ}{Kg \cdot C} \right)$	1
ضریب هدایت حرارتی بتن $K \left(\frac{KJ}{m \cdot h_r \cdot C} \right)$	9.8
ضریب هدایت حرارتی قالب بندی $\left(\frac{KJ}{m^2 \cdot h_r \cdot C} \right)$	2.5
ضریب انتقال حرارت سطح بتن $\left(\frac{KJ}{m^2 \cdot h_r \cdot C} \right)$	57
دمای بتن ریزی ($^{\circ}C$)	20
میانگین دمای محیط ($^{\circ}C$)	15

6- مدل دو بعدی شبیه سازی شده

مدل ساخته شده در آزمایشگاه دارای تقارن محوری می باشد. با توجه به تقارن در هندسه و بارگذاری می توان گفت که در امتداد عمود بر محور مرکزی عرضی جریان حرارتی نداریم و شرط مرزی آدیاباتیک در امتداد محور مرکزی حاکم است. مدل المان محدود دیوار حائل که در واقع برشی در راستای طولی از دیوار حائل می باشد در شکل (2) آورده شده است.

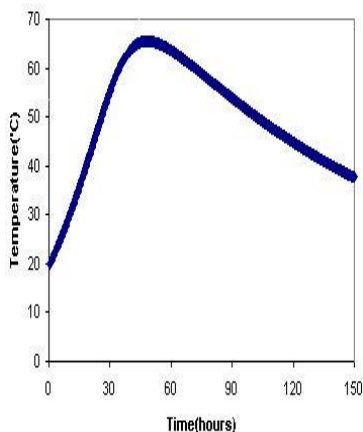
مدلسازی با استفاده از نرم افزار عمومی اجزاء محدود ANSYS 5.4 همراه با ماکرو اختصاصی توسعه یافته، ارائه شده است. برای مدلسازی مسئله هدایت گرمایی از المان دو بعدی PLANE77 استفاده



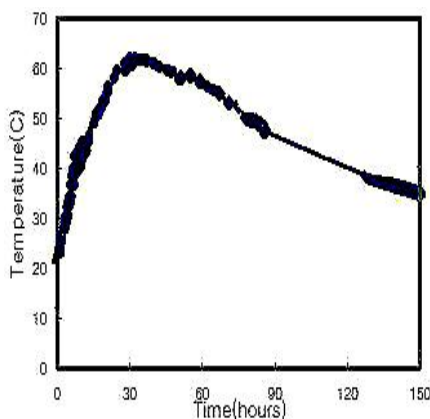
شکل 2- مدل دو بعدی شبیه سازی شده شکل 3- المان هشت گره ای PLANE77

[13]

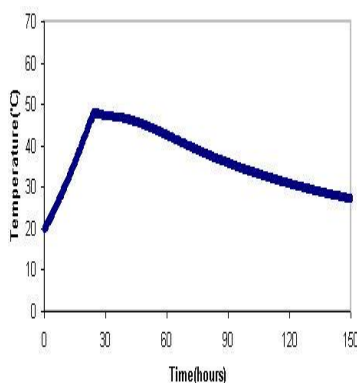
گردیده است شکل (3). این المان هشت گره دارد که هر گره تنها دارای یک درجه آزادی (دما) می باشد. برای اعمال شرایط مرزی گرادیان دما بر روی سطح بتن، حداقل و حداکثر دمای محیط به ترتیب 8°C و 25°C و دمای محیط در زمان بتن ریزی 17°C می باشد. بلوک بتنی در سایه بوده و تابش آفتاب اثری بر آن نداشته است. به دلیل در نظر نگرفتن انتقال حرارت از طریق تشعشع میانگین دمای محیط در طول کل آنالیز 15°C در نظر گرفته شده است که 2 درجه کمتر از میانگین واقعی دما است. قالب بندی پس از 24 ساعت از اطراف بلوک برداشته شده و پس از آن کل بلوک در تماس با هوا می باشد. در تحقیقات هاونک سانگ و همکارانش تاریخچه حرارت بتن در دو نقطه از دیوار حائل (در مرکز و یک نقطه مجاور سطح بتن) برای مدت 150 ساعت آورده شده است (اشکال 4 و 6). منحنی نتایج حاصل از مدل عددی نیز در همان دو نقطه در شکل های 5 و 7 آورده شده است.



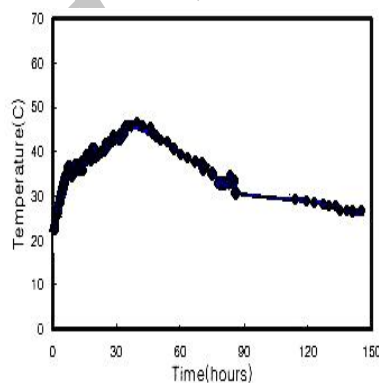
شکل 5- نتایج آنالیز عددی در مرکز دیوار حائل



شکل 4- نتایج اندازه گیری دما در مرکز دیوار حائل [12]



شکل 7- نتایج آنالیز عددی در سطح دیوار حائل



شکل 6- نتایج اندازه گیری دما در سطح دیوار حائل [12]

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل تحلیلی دما، دیده می شود که در اکثر مواقع نتایج حاصل از دو مدل انطباق خوبی دارند. بیشترین خطا مربوط به دمای ماکزیمم است که مقدار خطا در حدود 2°C می باشد. برای توجیه میزان خطای مذکور می توان دلایل ذیل را ذکر کرد:

الف- دقت دستگاه اندازه گیری دمای بتن حدود 1°C می باشد. لذا اختلاف های 1°C یا کمتر بین نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی قابل صرف نظر کردن هستند.

ب- از تغییرات روزانه دمای محیط در مدل عددی صرف نظر شده و دمای محیط یک مقدار ثابتی فرض شده است.

7- نتیجه گیری و پیشنهاد

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل تحلیلی دما نشان می‌دهد که رابطه ای که برای نرخ تولید حرارت ارائه شده است، می‌تواند بخوبی روند تغییرات دما را پیش بینی نماید. مقادیر دما در هر نقطه از مدل در هر زمان قابل محاسبه است. محاسبه روند تغییرات دما تا زمانیکه دما در بتن حجیم به دمای پایدار نهایی کاهش یابد، دارای اهمیت است. مدل دو بعدی ارائه شده می‌تواند بطور دقیق توزیع قائم دما در داخل دیوار حائل را پیش بینی نماید. لیکن این مدل نمی‌تواند اطلاعاتی در زمینه گرادین های حرارتی مقاطع نزدیک تکیه گاه بدهد، جایی که در جهت امتداد طولی دیوار شار حرارتی وجود دارد که آن شار را نمی‌توان در مدل عددی دو بعدی در نظر گرفت. در برنامه استفاده شده می‌توان با انجام مطالعه پارامتریک اثر بعضی از متغیرهای اصلی فرایند ساخت، نظیر دمای بتن ریزی، دمای محیط، نوع و مقدار سیمان را در توزیع و روند تغییرات دما مطالعه کرد.

8- مراجع

- [1] ACI Committee 207, Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 207.1, 1994. pp. 21-3
- [2] JCI Committee on the thermal stress. The state of the art report of thermal stress evaluation in massive concrete, 1985. pp. 5-9
- [3] قربانی، ابراهیم؛ عراقیان، حمیدرضا. "پیش بینی مقاومت و زمان گیرش سیمان هیدرولیکی از روی اجزاء تشکیل دهنده آن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، مجموعه مقالات همایش بین المللی سیمان، صفحه 198 الی 212، تهران، مهرماه 1383
- [4] Gotfredson H.H., Idorn G.M. , "Curing Technology at the faroe Bridge; Denmark", ACI S.P. 95, PP17-33, 1986.
- [5] Pennington, R., H., "Computer Methods and Numerical Analysis ", John-Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- [6] Branco F. A., Mendes P. A., Mirambell E., "Heat of Hydration Effects in concrete structures," ACI Material Journal, March-April 1992. pp139-145
- [7] Private Communication: Song H-W., Cho H-J., Park S-S., Byun K-J., "Early -age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structures," Department of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, KOREA
- [8] ANSYS 5.4 User Manual