

بررسی عددی تاثیر رطوبت بتن در مقادیر فشار و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت شبیه سازی راکتورهای اتمی با در نظر گرفتن اندرکنش رطوبت و حرارت جهت طراحی و بهسازی سازه

وحید صداقت¹، عباس نعمتی²، ابراهیم ربیع پور³

1- کارشناس ارشد مهندسی سازه از دانشگاه زنجان

vs_114@yahoo.com

2- کارشناسی ارشد خاک و پی از دانشگاه گیلان

Abbas_nemati49@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه چالوس

ebrahimrabipour@yahoo.com

چکیده

راکتورهای اتمی سازه هایی هستند که تحت فشار و دمای بسیار زیادی قرار دارند لذا برای طراحی و همچنین ترمیم یا بهسازی این قبیل سازه ها باید جریان رطوبت و حرارت که عامل ایجاد گرادیان های حرارتی و رطوبتی هستند دقیقاً مورد توجه قرار گیرند، سازه های بتنی همواره در شرایط تهاجم آب های املاح دار، فرسایش ناشی از جریان شدید آب و گرادیان حرارتی بالا قرار دارند. بدین علت بتن این سازه ها تحت تهاجم سولفات ها و اختلاف حرارتی شدید قرار گرفته و خوردگی آرماتورها و افزایش حجم آنها باعث ترک خوردگی و ازهم پاشیدگی بتن می گردد. این آسیب دیدگی ها باعث آسیب های ناخواسته در خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی بتن گردیده و معمولاً با متلاشی شدن اجزای بتن همراه می باشد. تهاجم یونها، نفوذ عوامل خورنده و کلا ایجاد آسیب در داخل بتن توسط عوامل خارجی عموماً به نحوه انتقال و با انتشار این عوامل در داخل بتن وابسته است که مستقیماً متأثر از شرایط فیزیکی موجود در داخل شبکه منافذ بتن نظیر نحوه انتشار دما و رطوبت می باشد. از سوی دیگر جریان و توزیع رطوبت منفذی و حرارت در بتن مستقل از هم نبوده و بر مبنای مشاهدات صورت گرفته کاملاً به یکدیگر وابسته هستند عبارت دیگر برای برآورد و تخمین توزیع رطوبت و حرارت در بتن نیاز به تحلیل این دو جریان بطور همزمان می باشد، با توجه به اهمیت موضوع در این مقاله با استفاده از روش اجزای محدود جریان همزمان رطوبت و حرارت در بتن آنالیز شده است. برای این منظور پس از حل معادلات حاکم بر جریان همزمان رطوبت و حرارت در بتن برنامه تحلیل جریان در محیط MATLAB نوشته شده است. نتایج آنالیز عددی با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده که بیانگر انطباق مناسب این دو می باشد. رطوبت در بتن به عنوان یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار در انتقال رطوبت و حرارت به شمار می رود. در این مقاله نمونه های بتنی گوناگون با رطوبت نسبی مختلف تحت گرادیان های مختلف مورد آنالیز عددی قرار گرفتند

واژه های کلیدی: روش اجزای محدود، فشار منفذی، رطوبت در بتن، راکتور اتمی

1. مقدمه

بتن در 80 سال گذشته در بسیاری از رشته های ساختمانی کاربرد داشته و با عمر مفید طولانی خود، مصالح با دوامی را به اثبات رسانده است. بتنی که در پروژه های صنعتی بکار می رود ممکن است در معرض شرایط بسیار سخت محیطی قرار گرفته و دچار صدمات ساختاری و کاربردی را در طول عمر خود بشود که یکی از شرایط سخت می تواند پالایشگاههای کشورهای منطقه خلیج فارس که بیان کننده یک منبع اساسی درآمد مالی برای این کشورها بوده اند باشد. این تأسیسات بزرگ از سالهای 1950 توسط شرکتهای پیمانکار بین المللی از آمریکا و اروپا ساخته شده اند. بسیاری از این سازه های بتنی ساخته شده، هنوز در دست بهره برداری هستند و بسیاری نیز تعمیر و ترمیم یافته اند تا عمر مفید طولانی تری را به آنها بیفزایند.

یکی از عوامل این خرابی روزنه های اشباع و نیمه اشباع بسیار در بتن می باشد. هنگامیکه بتن در معرض حرارت قرار دارد در بتن جریان رطوبت و حرارت برقرار می شود. عامل ایجاد جریان رطوبت و حرارت گرادیان فشار و گرادیان حرارت می باشند. گرادیان فشار بر روی گرادیان دما اثر می گذارد که این تأثیر به صورت متقابل می باشد.

بسیاری از خواص حرارتی و رطوبتی بتن وابسته به فشار منفذی و دمای درون بتن می باشند. بعنوان مثال ظرفیت گرمایی آب تابعی از فشار و دما می باشد. بنابراین باید مسأله جریان رطوبت و حرارت به صورت توأم حل گردد.

رطوبت موجود در داخل مواد و تغییرات آن معمولاً به دو صورت رطوبت نسبی داخلی مواد و یا میزان رطوبت قابل تبخیر بیان می شود. به نسبت فشار بخار آب داخل به فشار بخار آب حالت اشباع رطوبت نسبی داخلی مصالح گفته می شود [4]. به نسبت فشار بخار آب در هوا به فشار بخار هوای اشباع در دمای ثابت رطوبت نسبی هوا گفته می شود [5]. رطوبت درون بتن به دو صورت آب شیمیایی و آب فیزیکی در ساختار بتن جای می گیرد. آب شیمیایی در فعل و انفعالات شیمیایی درگیر شده و جزء جدا نشدنی از ساختار جدید حاصل از واکنش ها می باشد.

2. مروری بر معادلات پایه کوپل انتقال رطوبت و حرارت

معادلات حاکم بر کوپل جریان رطوبت و حرارت به شرح زیر می باشند [1]:

$$j = -\frac{a}{g} \text{grad}(p) + a1 * \text{grad}(T) \quad (1)$$

$$q = -b * \text{grad}(T) \quad (2)$$

که در آن j شار رطوبتی، q شار حرارتی، a ضریب نفوذپذیری، g شتاب گرانش، p فشار، b ضریب هدایت

حرارتی، $a1=0$ (بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی) و T دما می باشد.

با توجه به شرایط نگهداری توده آب در حفره های اشباع و نیمه اشباع بتن بطور طبیعی می توان نوشت [1]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -div(j) + \frac{\partial w_d}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن w آب های قابل تبخیر موجود در روزنه های اشباع و نیمه اشباع بتن، t زمان، j شار رطوبتی و w_d شامل تمام جرم آزاد آب قابل تبخیر که می تواند در حفره ها توسط هیدراتاسیون مصرف شده و یا در دمای بالاتر از 120 درجه بعلت هیدراتاسیون مجدد آزاد شود می باشد.

برای دمای کمتر از 100 درجه می توان نوشت:

$$\frac{\partial w_d}{\partial t} = -\frac{\partial(\Delta w_h)}{\partial t} \quad (4)$$

که در آن Δw_h آب مصرف شده به وسیله هیدراتاسیون است. دی هیدراتاسیون جای خودش را به هیدراتاسیون داده است که فرایندی آنگیر است. بنابراین منفی می باشد.

با توجه به شرایط تعادل گرمایی در بتن می توان نوشت [1]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - C_a \frac{\partial w}{\partial t} - C_w grad(T) = -div(q) \quad (5)$$

که در آن C ظرفیت حرارتی بتن، ρ چگالی جرمی آب که شامل آب شیمیایی به استثنای آب آزاد می شود، C_a گرمای جذب شده از آب آزاد و C_w ظرفیت گرمایی از حجم مایع آب می باشد.

تغییرات رطوبت داخل بتن نسبت به زمان را بر اساس تابعی از فشار و دما می توان نوشت:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

با توجه به انتقال رطوبت و حرارت در سطوح می توان نوشت:

$$n \cdot j = B_w (P_b - P_{en}) \quad (7)$$

$$n \cdot q = B_T (T_b - T_{en}) + C_w \cdot n \cdot j \quad (8)$$

که در آن n بردار یکه، B_w ترک سطحی آب، B_T ترک سطحی دما، P_b فشار بدنه، P_{en} فشار محیط، T_b دمای بدنه و T_{en} دمای محیط می باشد.

با توجه به معادلات (1)، (3) و (6) از معادلات اصلی می توان نوشت:

$$\frac{a}{g} \times \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial r} + r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right) + a_1 \times \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + A_1 \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) + A_2 \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - A_3 = 0 \quad (9)$$

$$A_1 = -\frac{\partial w}{\partial P}, A_2 = -\frac{\partial w}{\partial T}, A_3 = -\frac{\partial w_d}{\partial t}$$

با توجه به معادلات (2)، (5) و (6) از معادلات اصلی می توان نوشت:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{b}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_4 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_5 \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + A_6 \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) = 0 \quad (10)$$

$$A_4 = C_w \left[-\frac{a}{g} * \frac{\partial p}{\partial r} - a_1 * \frac{\partial T}{\partial r} \right], A_5 = Ca \frac{\partial w}{\partial T} - \rho c, A_6 = Ca \frac{\partial w}{\partial P}$$

با توجه به معادلات (1)، (2) و (8) از معادلات اصلی می توان نوشت:

$$b \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + a * C_w \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) + a_1 * C_w \frac{\partial T}{\partial r} + B_T (T_b - T_{en}) = 0 \quad (11)$$

با توجه به معادلات (1) و (7) از معادلات اصلی می توان نوشت:

$$a \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) + a_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + B_w (p_b - p_{en}) = 0 \quad (12)$$

3. حل معادلات کوپل انتقال رطوبت و حرارت به روش اجزای محدود

روش آنالیز اجزاء محدود با استفاده از روش باقی مانده وزنی گالرکین برای حل معادلات استفاده شده است که در این روش مقدار $R(x)$ معادله مورد نظر در تابع وزن $w(x)$ ضرب شده و انتگرال این تابع برابر صفر قرار داده می شود [2]:

$$\int w_i(x) R(x) dx = 0$$

$$\int w_i(r) \left(\begin{array}{l} \frac{a}{g} * \frac{1}{r} (\frac{\partial p}{\partial r} + r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2}) + a_1 * \frac{1}{r} (\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}) - A_1 (\frac{\partial p}{\partial t}) - A_2 (\frac{\partial T}{\partial t}) - A_3 - a (\frac{\partial p}{\partial r}) + \\ a_1 (\frac{\partial T}{\partial r}) + B_w (p_b - p_{en}) \end{array} \right) dr = 0 \quad (14)$$

$$\int w_i(r) \left(\begin{array}{l} (\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}) + \frac{b}{r} (\frac{\partial T}{\partial r}) + C_w A_4 (\frac{\partial T}{\partial r}) + A_5 (\frac{\partial T}{\partial t}) + A_6 (\frac{\partial p}{\partial t}) - b (\frac{\partial T}{\partial r}) - a \times c_w (\frac{\partial p}{\partial r}) - \\ a_1 \times c_w (\frac{\partial T}{\partial r}) - B_T (T_b - T_{en}) \end{array} \right) dr = 0 \quad (15)$$

که در آن $W_i(x)$ تابع وزنی گالرکین و $R(x)$ معادلات 9، 10، 11 و 12 می باشد. با جایگزینی توابع وزنی با توابع شکل المان (w با N) و اختصاص دما و فشار به گره ها ($T=Ti Ni$ ، $p=pi Ni$) در معادلات 14 و 15 و همچنین گرفتن با در نظر گرفتن المان دو گرهی و در نتیجه با حل انتگرال های بالا به دو معادله بشرح زیر می توان رسید که باید توامان صدق کنند.

$$k_1 \dot{P} + k_2 \dot{T} + k_3 P + k_4 T + F_2 = 0; k_5 \dot{T} + k_6 \dot{P} + k_7 T + F_2 = 0 \quad (16)$$

که در آن که k_1 ، k_2 ، k_4 ، k_5 ، k_6 ، k_7 و F_1 و F_2 ماتریس های جزء سختی برای هر المان می باشند. ماتریس معادلات دیفرانسیل در معادلات 16 می تواند در یک پروسه گام به گام کامل شود که ما از روش کرنک- نیکلسون استفاده کردیم. برای این منظور گام های زمانی مجزا $dt=tn+1-tn$ استفاده شده و همچنین مشتقات زمانی موجود در معادله 15 با تقریب اختلاف میانی جایگزین می شود که در نتیجه می توان نوشت:

$$\begin{aligned} (k_1 + k_3 \frac{\Delta t}{2}) P_{n+1} + (k_2 + k_4 \frac{\Delta t}{2}) T_{n+1} &= (k_1 - k_3 \frac{\Delta t}{2}) P_n + (k_2 - k_4 \frac{\Delta t}{2}) T_n - F_1 \Delta t; \\ (k_5 + k_7 \frac{\Delta t}{2}) T_{n+1} + k_6 P_{n+1} &= (k_5 - k_7 \frac{\Delta t}{2}) T_n + k_6 P_n - F_2 \Delta t \end{aligned} \quad (17)$$

که ماتریس های جزء المان در آن عبارتند از :

$$k_1 = A_1 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, k_2 = A_2 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, k_5 = A_5 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, k_3 = \begin{bmatrix} \frac{a(n)}{dr} - \frac{a(n)}{2 \times r_c} & \frac{a(n)}{dr} - \frac{a(n)}{2} \\ \frac{a(n)}{dr} + \frac{a(n)}{2} & -\frac{a(n)}{dr} + \frac{a(n)}{2} \end{bmatrix}$$

$$k_4 = \begin{bmatrix} -\frac{a1(n)}{dr} - \frac{a1(n)}{2 \times r_c} & \frac{a1(n)}{dr} - \frac{a1(n)}{2 \times r_c} \\ \frac{a1(n)}{dr} + \frac{a1(n)}{2 \times r_c} & -\frac{a1(n)}{dr} + \frac{a1(n)}{2 \times r_c} \end{bmatrix}, k_7 = \begin{bmatrix} -\frac{b(n)}{dr} - \frac{b(n)}{2 \times r_c} - \frac{A_4}{2} & +\frac{b(n)}{dr} - \frac{b(n)}{2 \times r_c} - \frac{A_4}{2} \\ +\frac{b(n)}{dr} + \frac{b(n)}{2 \times r_c} + \frac{A_4}{2} & -\frac{b(n)}{dr} + \frac{b(n)}{2 \times r_c} + \frac{A_4}{2} \end{bmatrix}$$

$$F_1 = A_3 \begin{bmatrix} \frac{dr}{2} \\ \frac{2}{dr} \\ \frac{2}{2} \end{bmatrix}, F_2 = A_7 \begin{bmatrix} \frac{dr}{2} \\ \frac{2}{dr} \\ \frac{2}{2} \end{bmatrix}$$

می باشد. $dr = r(n+1) - r(n)$ و ام i گره n مختصات اولیه، r_0 و $rc = r_0 + (r(n+1) + r(n))/2$ که در آن با جایگذاری ماتریس های بالا در معادلات همزمان 18 می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} AA & AE & AB & AF & 0 & 0 & \dots & \dots \\ AN & AJ & AO & AK & 0 & 0 & \dots & \dots \\ AC & AH & MD & MJ & BB & BF & \dots & \dots \\ AP & AL & MQ & MM & BO & BK & \dots & \dots \\ 0 & 0 & BC & BH & BD & BJ & \dots & \dots \\ 0 & 0 & BP & BL & BQ & BM & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{matrix} \kappa \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} = \begin{matrix} \times \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} P_{n+1} \\ T_{n+1} \\ P_{n+1} \\ T_{n+1} \\ P_{n+1} \\ T_{n+1} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{matrix} F \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \\ D_n \\ E_n \\ F_n \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

که ضرایب ماتریس k عبارتند از:

$$AA = BA = K_1(1,1) + K_3(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AE = BE = K_2(1,1) + K_4(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AH = BH = K_2(2,2) + K_4(2,2) \frac{\Delta t}{2},$$

$$AC = BC = K_1(2,1) + K_3(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AG = BG = K_2(2,1) + K_4(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AK = BK = K_5(1,2) + K_7(1,2) \frac{\Delta t}{2},$$

$$AM = BM = K_5(2,2) + K_7(2,2) \frac{\Delta t}{2}, AL = BL = K_5(2,1) + K_7(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AF = BF = K_2(1,2) + K_4(1,2) \frac{\Delta t}{2},$$

$$AD = BD = K_1(1,1) + K_3(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AB = BB = K_1(1,2) + K_3(1,2) \frac{\Delta t}{2}, AQ = BQ = K_6(2,2),$$

$$AO = BO = K_6(1,2), AN = BN = K_6(1,1), MJ = AJ + BJ, MQ = AQ + BQ, MM = AM + BM$$

$$AJ = BJ = (K_5(1,1) + K_7(1,1)) \frac{\Delta t}{2}, AP = BP = K_6(2,1), MD = AD + BD$$

(19)

ضرایب $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, F_1$ و F_2 در ضرایبی که با A شروع می شوند مربوط به المان 1 و در ضرایبی که با B شروع می شوند مربوط به المان 2 می باشد.

ماتریس \bar{f} از روابط زیر بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} AA_i & AE_i & AB_i & AF_i & 0 & 0 & \dots & \dots \\ AN_i & AJ_i & AO_i & AK_i & 0 & 0 & \dots & \dots \\ AC_i & AH_i & MD_i & MJ_i & BB_i & BF_i & \dots & \dots \\ AP_i & AL_i & MQ_i & MM_i & BO_i & BK_i & \dots & \dots \\ 0 & 0 & BC_i & BH_i & BD_i & BJ_i & \dots & \dots \\ 0 & 0 & BP_i & BL_i & BQ_i & BM_i & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \\ D_n \\ E_n \\ F_n \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ v_n \\ w_n \\ o_n \\ p_n \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (20)$$

ضرایب موجود در ماتریس ck از روابط زیر بدست می آید

$$\begin{aligned} AA_i &= BA_i = K_3(1,1) - K_1(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AE_i = BE_i = K_2(1,1) - K_4(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AH_i = BH_i = K_2(2,2) - K_4(2,2) \frac{\Delta t}{2}, \\ AC_i &= BC_i = K_3(2,1) - K_1(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AG_i = BG_i = K_2(2,1) - K_4(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AK_i = BK_i = K_7(1,2) - K_5(1,2) \frac{\Delta t}{2}, \\ AM_i &= BM_i = K_7(2,2) - K_5(2,2) \frac{\Delta t}{2}, AL_i = BL_i = K_7(2,1) - K_5(2,1) \frac{\Delta t}{2}, AF_i = BF_i = K_2(1,2) - K_4(1,2) \frac{\Delta t}{2}, \\ AD_i &= BD_i = K_3(1,1) + K_1(1,1) \frac{\Delta t}{2}, AB_i = BB_i = K_3(1,2) + K_1(1,2) \frac{\Delta t}{2}, AQ_i = BQ_i = K_6(2,2), \\ AO_i &= BO_i = K_6(1,2), AN_i = BN_i = K_6(1,1), MJ_i = AJ_i + BJ_i, MQ_i = AQ_i + BQ_i, MM_i = AM_i + BM_i, \\ AJ_i &= BJ_i = K_7(1,1) - K_5(1,1) \frac{\Delta t}{2}, MD_i = AD_i + BD_i, AP_i = BP_i = K_6(2,1) \end{aligned}$$

ضرایب $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, F_1$ و F_2 در ضرایبی که با A شروع می شوند مربوط به المان 1 و در ضرایبی که با B شروع می شوند مربوط به المان 2 می باشد. ضرایب موجود در ماتریس Z از روابط زیر بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \\ D_n \\ E_n \\ H_n \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_n \\ T_n \\ P_n \\ T_n \\ P_n \\ T_n \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} AF1(1,1) \\ AF2(2,1) \\ AF1(2,1) + BF1(1,1) \\ AF2(2,1) + BF2(1,1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (21)$$

ضرایب AF_1 و AF_2 مربوط به درایه های ماتریس F_1 و F_2 المان 1 و ضرایب BF_1 و BF_2 مربوط به درایه های ماتریس F_1 و F_2 المان 2 می باشند. و ضرایب موجود در ماتریس XX جزء معلومات مسأله می باشد.

4. مراحل حل معادله کوپل جریان رطوبت و حرارت در بتن

1- پس از حل معادلات، با استفاده از نرم افزار MATLAB برنامه ای برای پیش بینی همزمان رطوبت و حرارت نوشته شده است که الگوریتم حل معادلات حاکم بر جریان رطوبت و حرارت بر مبنای تحلیل اجزای محدود و استفاده از روش های حل تکرار عددی می باشد که بطور خلاصه و در گامهای زیر ارائه شده است:

2- تعیین اطلاعات مربوط به هندسه، ویژگیهای مواد، شرایط مرزی و اطلاعات مورد نیاز برای فرآیند حل تکراری نظیر گامهای زمانی، معیارهای همگرایی و.....

3- حدس اولیه مقادیر فشار و دما اگر در گام اول باشد، بر اساس دمای اولیه و رطوبت اولیه داخل بتن و اگر در گام های بعدی باشد بر اساس مقادیر بدست آمده از گام های قبلی.

4- بدست آوردن ضرایب $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ و A_7 قبل از شروع تکرار بر اساس مقادیر فشار و دمای زده شده و بعد از شروع تکرار بر اساس مقادیر بدست آمده از مرحله 7.

5- محاسبه ماتریس های سختی جزء المان $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ و F_1 و F_2 بر اساس ضرایب بدست آمده در مرحله قبل.

6- محاسبه ماتریس k و f برای هر المان و ترکیب ماتریس های تشکیل شده در مختصات طبیعی و شکل دادن ماتریس کلی.

7- اعمال شرایط مرزی به ماتریس های k و f بدست آمده از مرحله قبل.

8- حل معادله $f=kx$ که در آن مقادیر فشار و دما در گره می باشد.

9- شروع چرخه تکرار بین مقادیر بدست آمده از مرحله قبل که در صورت مطابقت بودن آن با معیارهای همگرایی مقادیر بعنوان فشار و دما در آن بازه زمانی در گره ها می باشند در غیر اینصورت رفتن به مرحله 3.

10- شروع محاسبات برای بازه زمانی بعدی در صورتی که زمان مورد نظر به پایان نرسیده باشد و گرفتن

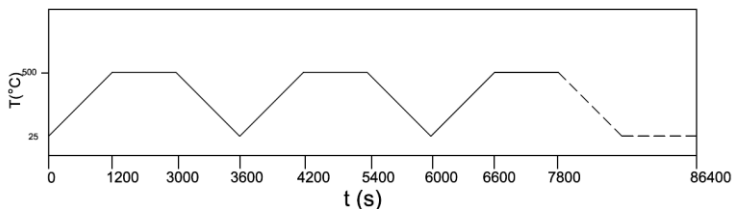
مقادیر بدست آمده از مرحله قبل بعنوان فشار و دمای اولیه و رفتن به مرحله 3 در غیر اینصورت رفتن به مرحله

11- اتمام زمان مورد نظر و در نتیجه پایان آنالیز.

5. تاثیر رطوبت نمونه در مقادیر فشار منفذی و دما در نمونه های استوانه ای تحت حرارت

سه نمونه بتنی به شعاع داخلی 9 متر و خارجی 10 متر مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. رطوبت نسبی نمونه های بتنی 50%، 70% و 80% در نظر گرفته شده است، بقیه ویژگیهای موثر در جریان رطوبت و حرارت در بین

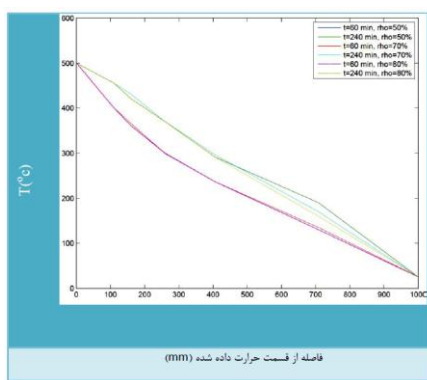
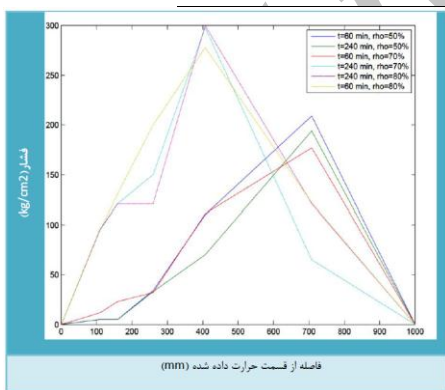
نمونه ها مشترک است که مطابق جدول پایین است. روند اعمال حرارت به نمونه ها مطابق شکل (1) می باشد.



شکل (1): نمودار حرارت اعمالی به جدار داخلی استوانه در حالت سریع

جدول (1): ویژگیها و شرایط مورد نیاز مشترک حرارتی و رطوبتی مورد نیاز نمونه

شرایط	ویژگیهای بتن
$0.1 \cdot 10^{-11}$ (m/s)	نفوذپذیری
50 روز	سن بتن
25°C	دمای اولیه
100 (kg/m ³)	رطوبت اشباع
300 (kg/m ³)	درصد وزنی سیمان در هر متر مکعب بتن
2400(kg/m ³)	وزن مخصوص بتن در دمای اتاق
1.974 (j/m.s.°C)	ضریب هدایت حرارتی بتن



شکل (2): مقایسه مقادیر عددی دما برای طرح های مختلف شکل (3): مقایسه مقادیر عددی فشار برای طرح های مختلف

همانطوری که از اشکال بالا مشخص است، تاثیر رطوبت نسبی در توزیع فشار و دما در نمونه های بتنی در نظر گرفته زیاد است. محل بیشترین مقدار فشار منفذی برای نمونه های مختلف یکسان شده است ولی مقدار آن برای

نمونه های بتنی مختلف با رطوبت نسبی مختلف یکسان نشد. افزایش زمان حرارت دهی موجب کاهش تاثیر ضریب هدایت حرارتی در توزیع فشار در نمونه بتنی نشده است. تاثیر رطوبت نسبی در توزیع دما خیلی زیاد نبوده ولی با توجه به این که این پارامتر بیشتر در مورد فشار منفذی مورد توجه قرار می گیرد، این اثر نیز قابل توجه می باشد. البته در دماهای بالاتر این اثر قابل توجه تر می شود.

7. خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله پس از حل کوپل معادلات انتقال حرارت و رطوبت به روش اجزای محدود، اقدام به نوشتن برنامه تحلیل جریان در محیط MATLAB شده است سپس تاثیر پارامترهای تاثیر گذار در برنامه تحلیل جریان مورد بررسی قرار گرفت. که مشاهده شده است، که پارامترهای رطوبتی مثل رطوبت نسبی بر توزیع دما در نمونه اثر بسیار زیادی دارد، که این اثر در زمان های زیاد پس از حرارت دهی بیشتر می شود. لذا جهت طراحی و بهسازی سازهایی که در برابر گرادیان های حرارتی و رطوبتی شدید قرار دارند باید اثار پارامترهای حرارتی و رطوبتی بر روی هم مورد توجه قرار گرفته شود.

8. تقدیر و تشکر

در اینجا جا دارد از دکتر جمال احمدی تشکر ویژه جهت کمک های فراوان ایشان بعمل آید.

9. مراجع

- [1] Bazant, Z.P. Pore pressure and drying of concrete at high temperature. journal of the engineering mechanics division, EM5,14077.
- [2] Bathe. K.J. and Khoshgoftaar. M.R. Finite element formulation and solution of nonlinear heat transfer. Nuclear Engineering and Design, 51:389-401. 1979.
- [3] Jensen, B.M. The effect of temperature on the thermal dilatation of concrete conditioned to a given humidity, Graduate Student Research No.
- [4] Iglesias H. A. and Chirife J. Handbook of food isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components. Academic Press, New York, 1982.
- [5] Hedenblad G. Drying of construction water in concrete Drying times and moisture measurement. Technical report, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1997.

پیوست 1

فلوچارت برنامه تحلیل کوپل جریان رطوبت و حرارت

