

ارزیابی انتقال حرارت و روند کسب مقاومت در بتن

محمدعلی داستان دینزاب* (استادیار)

سید مهدی موسوی (دانشیار)

محمد کریمی مهرآبادی (کارشناس ارشد)

محسن آخانی (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوره ۲ - ۳۶، شماره ۱/۴، ص. ۱۳۱-۱۳۹

فرایند گیرش بتن، یک فرایند گرماده است. در صورتی که تنش‌های حرارتی در بتن تازه از مقاومت اکتسابی بتن در طول دوره کسب مقاومت بیشتر باشند، آنگاه ترک‌های زود هنگام در توده بتن به وجود خواهند آمد. در نتیجه، تحلیل حرارتی و بررسی روند کسب مقاومت به خصوص در سازه‌هایی با بتن ریزی حجیم (مانند: سدها، فونداسیون‌ها و عرشه‌ی پل‌ها)، اهمیت ویژه‌ی دارد. مقوله‌ی انتقال حرارت و تحلیل دمایی بتن تازه، متشکل از چند مکانیزم است. در نوشتار حاضر، به مدل‌سازی مکانیزم‌های اشاره شده و شبیه‌سازی روند کسب مقاومت بتن با استفاده از روش اجزاء محدود و انجام آزمایش‌های مرتبط پرداخته شده است. پس از صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، روند کسب مقاومت یک سیستم دال و تیر بتن‌آرمه بررسی شده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که روش اشاره شده، مقاومت بتن را به صورت مطلوبی ارزیابی می‌کند، ولی زمان‌های پیشنهاد شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان باید با آزمایش‌های بیشتری ارزیابی شود.

واژگان کلیدی: حرارت‌زایی سیمان، روند کسب مقاومت، روش اجزاء محدود، تحلیل حرارتی بتن.

m-dastan@araku.ac.ir
m-mousavi@araku.ac.ir
mehrabadi@gmail.com
mst.akhani@gmail.com

۱. مقدمه

۱.۱. پیشینه‌ی پژوهش

مقوله‌ی انتقال حرارت و تحلیل دمایی بتن تازه، متشکل از چند مکانیزم است، که هر یک از آن‌ها باید در تحلیل لحاظ شود. فرایند اخیر می‌تواند شامل ۳ بخش باشد: ۱. گرمای تولید شده ناشی از هیدراتاسیون، ۲. انتقال حرارت در بتن و ۳. انتقال حرارت در مرز المان بتنی با محیط اطراف.^[۱] بر همین مبنا در ادبیات فنی، مراجع متعددی به بررسی میدان حرارتی ناشی از هیدراتاسیون^۱ و آنالیز ریسک ترک پرداخته‌اند.

کارینو و لو^۲ (۲۰۰۱) در بیان اهمیت موضوع بلوغ بتن، الگوی کاربردی و روشنی برای تعیین مفهوم بلوغ بتن با استفاده از روش‌های مختلف ارائه داده‌اند.^[۲] آن‌ها و فاریا^۳ (۲۰۰۸) نیز در بررسی دما و تنش‌های ناشی از هیدراتاسیون سیمان، پی یک توربین بادی را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه و پیشنهادهایی برای تعیین نواحی ایجاد ترک حرارتی ارائه کرده‌اند.^[۲] همچنین سوتسوس^۴ و همکاران (۲۰۱۳) برای بررسی کاربرد روش بلوغ بتن برای تخمین مقاومت بتن سبک خودمترکم، نمونه‌های آزمایشگاهی زیادی را مطالعه کرده‌اند.^[۲] در سال ۲۰۱۶، رانز^۵ و همکاران نیز در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۰/۲۳، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

DOI:10.24200/J30.2020.54432.2639

مطالعه‌ی ارزیابی بلوغ بتن در سقف‌های بتنی پیش‌ساخته از حسگرهایی با اتصال بدون سیم استفاده کرده‌اند.^[۵] همچنین کامکار و ایرن (۲۰۱۸)، در بررسی عملکرد روش بلوغ بتن برای تخمین مقاومت بتن مسلح شده با الیاف فولادی، روش‌های مختلف تخمین مقاومت بتن را ارزیابی کردند.^[۶] می^۶ و همکاران (۲۰۱۹)، نیز یک مدل جدید برای بلوغ بتن معرفی کردند، که در آن تأثیر هم‌زمان دما و رطوبت در نظر گرفته شده است.^[۷]

۲.۱. اهمیت پژوهش

بتن ماده‌ی مرکب، متشکل از: آب، سیمان، سنگ‌دانه و افزودنی‌هاست. واکنش آب و سیمان (هیدراتاسیون)، که به واسطه‌ی آن ماتریس سخت بتن حاصل می‌شود، گرماده است و در نتیجه، در طول دوره‌ی گیرش بتن، درون آن ایجاد گرما می‌شود، که اگر کنترل نشود، می‌تواند سبب ایجاد ترک‌های گسترده در بتن شود و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین با اندازه‌گیری تاریخچه‌ی تغییرات دمایی بتن در زمان، می‌توان بلوغ بتن را تعیین و بر این اساس تخمین مناسبی از مقاومت بتن در زمان‌های مختلف به خصوص سنین اولیه ارائه کرد. تخمین مقاومت بتن در سنین اولیه، اهمیت زیادی دارد و می‌تواند در تعیین زمان مناسب برای قالب‌برداری اجزاء

ترکیب‌های اخیر، سریع‌ترین ترکیب، C_2S سپس C_3S و بعد از آن دو ترکیب دیگر هستند. به دلیل نرخ واکنش متفاوت اجزاء کلینکر و اندرکنش آن‌ها، شاخص درجه‌ی هیدراتاسیون به‌عنوان یگانه شاخصی تقریبی و کلی پذیرفته شده است.

۲. نسبت آب به سیمان: نیز در هیدراتاسیون مؤثر است و همچنین میزان درجه‌ی هیدراتاسیون نهایی را کنترل می‌کند. در نوشتار میلر^[۹]، (۱۹۶۶)، رابطه‌ی ۱ برای تأثیر نسبت وزنی آب به سیمان ($\frac{w}{cm}$) در درجه‌ی هیدراتاسیون نهایی (ξ_∞) ارائه شده است، که البته در آن، تأثیر سایر پارامترها لحاظ نشده است.

$$\xi_\infty = \frac{17031 \frac{w}{cm}}{0.194 + \frac{w}{cm}} \quad (1)$$

۳. اندازه‌ی ذرات سیمان: در بررسی‌های آزمایشگاهی، افزایش نرخ حرارت‌زایی و افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون نهایی با ریزتر شدن ذرات سیمان تأیید شده است. ذرات ریزتر، سطح ویژه‌ی بیشتری دارند و در نتیجه، سطح تماس بیشتری برای واکنش با آب دارند.

۴. دمای مراقبت: دمای مراقبت تأثیری دوگانه دارد؛ یعنی از سویی باعث افزایش نرخ واکنش و در نتیجه نرخ حرارت‌زایی می‌شود؛ و از سویی، تراکم محصولات هیدراتاسیون در دمای بالاتر بیشتر است و در نتیجه در مراحل پایانی، فرایند کندتر خواهد بود. علاوه بر این، درجه‌ی نهایی هیدراتاسیون نیز ممکن است در دمای بالاتر، کمتر باشد.

۲.۲. مدل‌سازی حرارت‌زایی سیمان

متابقی مدل مورد استفاده در نوشتار سرورا^[۱۰]، (۲۰۰۲)، در نوشتار حاضر نیز متغیر حالت برای سنجش هیدراتاسیون به‌صورت رابطه‌ی ۲ در نظر گرفته شده است:

$$\xi = \frac{\chi}{\chi_\infty} \quad (2)$$

که در آن، χ تعداد مول‌های آب، که در واحد حجم ترکیب می‌شوند؛ χ_∞ تعداد مول‌های نهایی و ξ درجه‌ی هیدراتاسیون هستند. در عمل هیچ‌گاه هیدراتاسیون به‌صورت کامل انجام نمی‌شود و می‌توان نوشت: ($\xi < 1 \rightarrow \chi \leq \chi_\infty$) نرخ تغییر درجه‌ی هیدراتاسیون نیز هم تابعی از مقدار درجه‌ی هیدراتاسیون است و هم تابعی از دماست. این وابستگی به‌صورت رابطه‌ی ۳ تعریف شده است:

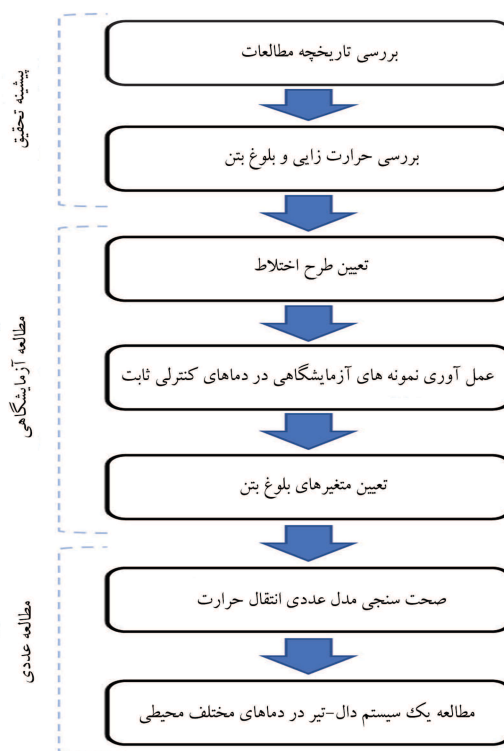
$$\dot{\xi} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

که در آن، $\tilde{A}(\xi)$ وابستگی نرخ به درجه‌ی هیدراتاسیون را تعیین می‌کند و پارامترهای R ، E_a و T به ترتیب انرژی فعال‌سازی، ثابت عمومی گازها و دما بر حسب کلوین هستند. تابع $\tilde{A}(\xi)$ به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$\tilde{A}(\xi) = \frac{k}{n_s} \exp\left(-\frac{\bar{n}\xi}{\xi_\infty}\right) \left(\frac{A_0}{k\xi_\infty} + \xi\right) (\xi_\infty - \xi) \quad (4)$$

در ادامه، با یک فرض منطقی، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نرخ گرمایابی متناسب با نرخ درجه‌ی هیدراتاسیون در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۵):

$$\dot{Q} = Q_\xi \dot{\xi} \quad (5)$$



شکل ۱. فلوچارت روند مطالعه‌ی انجام شده.

بتنی به‌کار رود. همچنین می‌تواند مانع از ایجاد ترک‌های ناشی از بارگذاری زودهنگام سازه شود و زمان انجام پروژه‌های بتنی را کمینه سازد.

۳.۱. مراحل پژوهش

مراحل پژوهش حاضر به اختصار در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در ابتدا روابط استفاده شده در بررسی حرارت‌زایی سیمان ارائه و سپس به ارتباط بلوغ بتن با دمای ناشی از هیدراتاسیون پرداخته شده است. در ادامه، برای یک طرح اختلاط متداول در ایران، مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین متغیرهای مربوط به بلوغ بتن با ثبت پیوسته‌ی داده‌های دمایی بتن انجام شده است. در گام بعدی، مطالعات عددی مربوط به حرارت‌زایی و بلوغ بتن توجه شده است. در این مرحله، بعد از انجام صحت‌سنجی مدل عددی با توجه به داده‌های دمایی ثبت شده برای پی یک توربین بادی^[۱۲]، نحوه‌ی کسب مقاومت بتن در یک سیستم تیر و دال بررسی شده است. در انتها، بر اساس نتایج پژوهش حاضر، میزان کسب مقاومت بتن در دماهای مختلف محیط با اعداد پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های ایران و آمریکا مقایسه شده است.

۲. حرارت‌زایی و بلوغ بتن

۱.۲. عوامل تأثیرگذار در حرارت‌زایی سیمان

عوامل تأثیرگذار در حرارت‌زایی سیمان، عبارت‌اند از:^[۸]

۱. ترکیب شیمیایی سیمان: ترکیب شیمیایی سیمان، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در هیدراتاسیون است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که ۴ ترکیب اصلی سیمان (C_2S ، C_3S ، C_3A ، C_4AF) هر یک نرخ حرارت‌زایی متفاوتی دارند. از میان

رشد مقاومت را نشان می‌دهند، در آیین‌نامه‌ی ۱۷ - ASTM C ۱۰۷۴^[۱۸] دو تابع برای سنجش بلوغ ارائه شده است:

۱. تابع Nurse - Saul، که در آن از تابع بلوغ برای محاسبه‌ی عامل زمان - دما^{۱۱} $M(t)$ به صورت رابطه‌ی ۹ استفاده می‌شود:

$$M(t) = \sum_0^t (T_c - T_0) \Delta t \quad (9)$$

که در آن، T_c و T_0 به ترتیب دمای میانگین بتن در بازه‌ی Δt و دمای پایه (کمینه‌ی دمایی که در آن فرایند هیدراتاسیون انجام می‌شود)، بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد هستند.

۲. تابع Arrhenius، که در آن تابع بلوغ برای محاسبه‌ی سن معادل^{۱۲} (t_e) به صورت رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود:

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r + T_c} - \frac{1}{T_r + T_0} \right)} \quad (10)$$

که در آن، T_r دمای مشخصه بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد است و سایر متغیرها در قسمت‌های قبل تعریف شده‌اند.

۳. مطالعه‌ی آزمایشگاهی متغیرهای بلوغ بتن

۳.۱. شرایط آزمایش

برای مدل‌سازی حرارت‌زایی و روند کسب مقاومت بتن به پارامترهایی نیاز است که به وسیله‌ی آزمایش‌های استاندارد قابل اندازه‌گیری و تعیین هستند. آزمایش‌های استاندارد ذکر شده در آیین‌نامه‌ی ASTM تشریح شده‌اند و در بخش حاضر، نحوه‌ی انجام آن‌ها ارائه شده است.

دسته‌ی اول از آزمایش‌ها، آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر است، که انجام آن به منظور به دست آوردن نمودار مقاومت بر حسب شاخص بلوغ است (مستقل از مسیر دمایی). بدین منظور تعداد ۱۵ نمونه‌ی استوانه‌یی برای ۵ سن مختلف (۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) تهیه و در هر سن، ۲ نمونه آزمایش شدند و در صورتی که مقدار میانگین با هر یک از نمونه‌ها اختلافی بیش از ۱۰٪ داشت، نمونه‌ی سوم نیز آزمون می‌شد. با ثبت مقاومت‌های حاصل از آزمایش، اطلاعات مقاومتی کامل شدند و لذا برای محاسبه‌ی شاخص بلوغ، تاریخچه‌ی دمایی نمونه‌ها نیز در دسترس بودند. در مجموعه‌ی نمونه‌های مذکور، تاریخچه‌ی دمایی دست‌کم دو نمونه باید ثبت شود. گام‌های ثبت دمایی، در ۴۸ ساعت ابتدایی هر نیم ساعت و بعد از آن هر ساعت، یک بار است. دقت حسگرهای دمایی موردنظر نیز دست‌کم ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد ذکر شده است. در پژوهش حاضر، از حسگرهایی با دقت ۰٫۱ درجه استفاده شده است (شکل ۲). حسگرهای دمایی مذکور ضد آب بودند و همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، درون نمونه‌ی استوانه‌یی و دقیقاً در مرکز نمونه، بلافاصله بعد از بتن‌ریزی قرار می‌گرفتند. حسگرها در دو نمونه جا دهی شدند و از مقدار میانگین آن‌ها برای محاسبات استفاده شده است.

آزمون بر روی نمونه‌های استوانه‌یی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه اراک صورت گرفته است. تجهیزات و مصالح استفاده شده به شرح: ۱۵ قالب استوانه‌یی، بُرد الکترونیکی، حسگرهای ثبت دما، مخلوطکن بتن، لرزاننده و جک

که در آن، Q_c کل گرمای ایجاد شده در واحد حجم به ازاء درجه‌ی هیدراتاسیون برابر با ۱ است. برای به دست آوردن پارامترهای موجود در مدل می‌توان از آزمون کالریتری استفاده کرد. آیین‌نامه‌ی ژاپن^[۱۹] برای محاسبه‌ی نمودار دما - زمان در حالت آدیاباتیکی استفاده شده است. در مرجع اخیر، تاریخچه‌ی دمایی به صورت رابطه‌ی ۶ ارائه شده است:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (6)$$

که در آن، مقادیر ΔT_{∞} و r با توجه به عیار سیمان و نوع سیمان قابل محاسبه هستند.

۳.۲. انتقال حرارت

انتقال حرارت می‌تواند از طریق مکانیزم‌های مختلفی رخ دهد. این ساز و کارها عبارت‌اند از:

-- انتقال حرارت رسانشی؛^۹

-- انتقال حرارت همرفتی؛^{۱۰}

-- انتقال حرارت از طریق تابش؛

-- انتقال حرارت از طریق انتقال جرم.

معادله‌ی حاکم بر انتقال حرارت رسانشی به صورت رابطه‌ی ۷ است:^[۱۲]

$$k \nabla^2 T + \dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (7)$$

که در آن، T ، \dot{Q} ، k و ρc به ترتیب: دما، نرخ گرمایی، ضریب انتقال حرارتی و ضریب گرمای ویژه‌ی حجمی هستند. انتقال حرارت از طریق همرفتی را می‌توان با استفاده از مدل سرمایش نیوتن به صورت رابطه‌ی ۸ توصیف کرد:

$$q = h(T_a - T_b) \quad (8)$$

که در آن، q شار حرارتی، T_a دمای سطح ناحیه، T_b دمای سیال در تماس با سطح ناحیه و h ضریب انتقال حرارتی همرفتی هستند. از آن‌جا که اختلاف دمای سطح بتن و هوای اطراف آن کم است، استفاده از رابطه‌ی خطی‌سازی شده برای انتقال حرارت تابشی منطقی است. در نتیجه می‌توان ساز و کار ترکیبی همرفتی - تابشی را با یک ضریب، که حاصل مجموع دو ضریب همرفتی بر حسب سرعت باد و ضریب انتقال حرارت تابشی است، به صورت تابعی خطی از دما در نظر گرفت.^[۱۳]

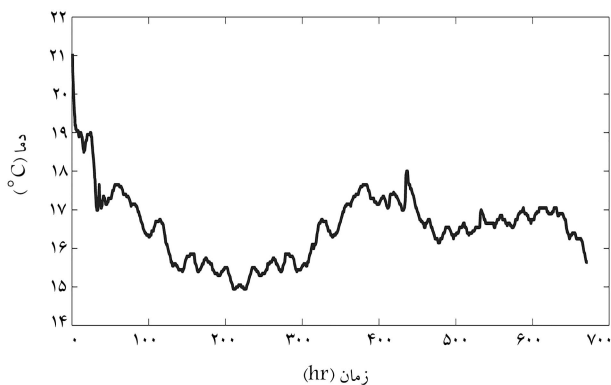
۴.۲. روش بلوغ بتن

روش بلوغ بتن، روشی است که امکان در نظر گرفتن ترکیبی آثار زمان و دما در رشد مقاومت بتن را فراهم می‌کند. مفهوم بلوغ در بتن به مفهوم کسب مقاومت بتن و سایر خواص آن است، که مستقیماً به سن نمونه و تاریخچه‌ی دمایی آن مربوط می‌شود. روش بلوغ بتن، راهکار نسبتاً ساده‌یی را برای تخمینی قابل اعتماد از مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه (۱۴ روز یا کمتر) ارائه می‌کند.

کسب مقاومت یک مخلوط بتن، در صورتی که به خوبی ریخته و عمل‌آوری شود، تابعی از سن و تاریخچه‌ی دمایی آن است.^[۱۴] مفهوم بلوغ بتن برای اولین بار در اواخر دهه‌ی ۴۰ و اوایل دهه‌ی ۵۰ در انگلستان، زمانی که پژوهش‌گران آثار ترکیبی دما و زمان را در رشد مقاومت بتن بررسی می‌کردند، مطرح شد.^[۱۵-۱۸] توابع بلوغ، عبارت‌های ریاضی هستند که به منظور تبدیل تاریخچه‌ی دمایی واقعی بتن به عواملی که میزان

جدول ۲. مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی.

سن (روز)	مقاومت (مگاپاسکال)
۱	۲٫۷
۳	۵٫۹۵
۷	۱۱٫۶
۱۴	۱۵٫۱۵
۲۸	۱۹٫۸



شکل ۴. تاریخچه‌ی میانگین دمای سنسوره.

جدول ۳. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی.

سن (روز)	مقاومت (MPa)		
	(۱۵ درجه)	(۲۵ درجه)	(۳۵ درجه)
۰٫۵	-*	-*	۳٫۲۱
۱	۵٫۳۴	۶٫۰۰	۶٫۶۰
۲	۶٫۰۰	۸٫۵۰	۱۱٫۹
۴	۸٫۳۶	۱۵٫۰۰	۱۷٫۳۴
۸	۱۵٫۰۰	۲۰٫۲۷	۲۱٫۷۰
۱۶	۲۰٫۱۰	۲۲٫۷۰	۲۳٫۷۶
۳۲	۲۵٫۰۰	۳۲٫۷۰	-

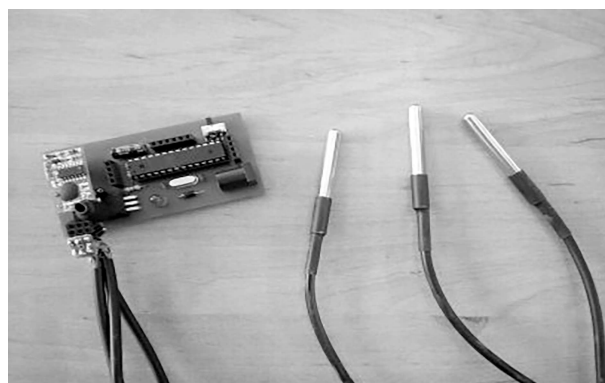
* عدم دستیابی نمونه به مقاومت کمینه جهت انجام آزمایش.

اخیراً آزمایش شدند. در مجموع ۵۴ نمونه آزمون شدند. دماهای: بیشینه، متوسط و کمینه در پژوهش حاضر به ترتیب برابر ۳۵، ۲۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده‌اند.

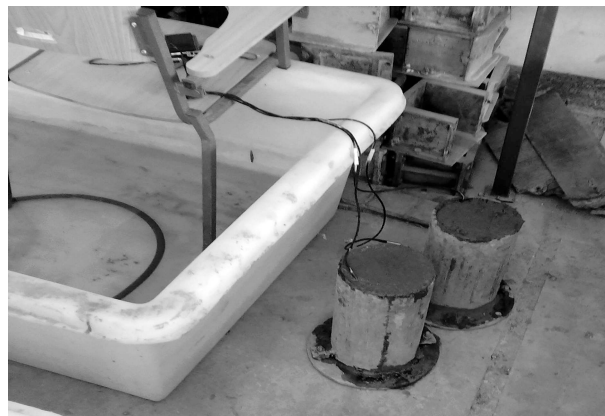
۲.۳. نتایج آزمایش

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌یی و تاریخچه‌ی دمایی ثبت شده در آن‌ها در جدول ۲ و شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین مقاومت نمونه‌های مکعبی در هر سه دما و در سنین مختلف نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

از نتایج به دست آمده برای محاسبه‌ی انرژی فعال‌سازی، که نرخ حرارت‌زایی سیمان را کنترل می‌کند، استفاده شده است. مطابق روش ذکر شده در آیین‌نامه‌ی ASTM C ۱۰۷۴ - ۱۷ برای محاسبه‌ی انرژی فعال‌سازی، از روش تشریح شده در بخش حاضر استفاده شده است. ابتدا پارامترهای t_0 ، s_u و k در رابطه‌ی ۱۱ به



شکل ۲. حسگرهای دمایی استفاده شده در نمونه‌های استوانه‌یی.



شکل ۳. جا دهی حسگرها در نمونه.

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط بتن.

مواد	مقدار (kg/m^3)
شن	۷۰۰
ماسه	۱۱۵۰
آب	۱۹۸
سیمان	۳۶۰

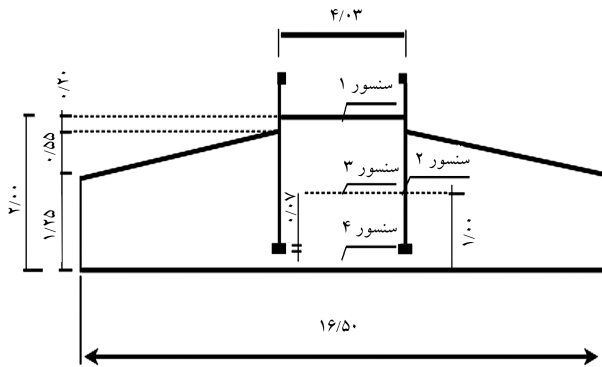
بتن شکن هستند. طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌های استوانه‌یی مطابق جدول ۱ است.

دسته‌ی دوم آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ملات و برای تعیین خواص حرارت‌زایی سیمان، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه اراک و آزمایشگاه مرکز رشد پارک علم و فناوری استان مرکزی انجام شده است. تجهیزات استفاده شده عبارت‌اند از: دستگاه بنماری، انکوباتور یخچال‌دار، جک ملات‌شکن، میکسر ملات و قالب‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری. نمونه‌ها به شکل مکعب با ابعاد ۵ سانتی‌متر بودند. طرح اختلاط ملات استفاده شده با توجه به طرح اختلاط بتن، به این صورت تعیین شده است:

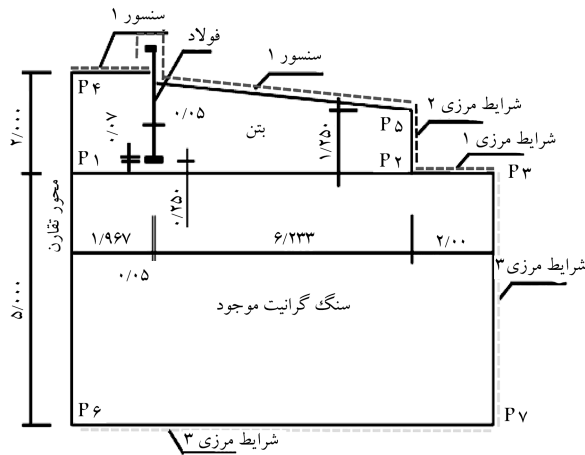
-- نسبت ماسه به سیمان برابر با نسبت شن به سیمان در طرح اصلی؛

-- خمیر سیمان دارای نسبت آب به سیمان برابر با طرح اصلی.

نمونه‌ها در ۶ سن مختلف (اولین سن به ازاء مقاومت فشاری تقریباً ۴ مگاپاسکال و سنین بعدی، هر سن دو برابر سن ماقبل) و در هر سن، ۳ نمونه و در سه دمای مختلف (کمترین دمای مورد انتظار، بیشترین دمای مورد انتظار و میانگین دو دمای



شکل ۶. هندسه‌ی فونداسیون و محل قرارگیری حسگرهای دمایی.



شکل ۷. شرایط مرزی.

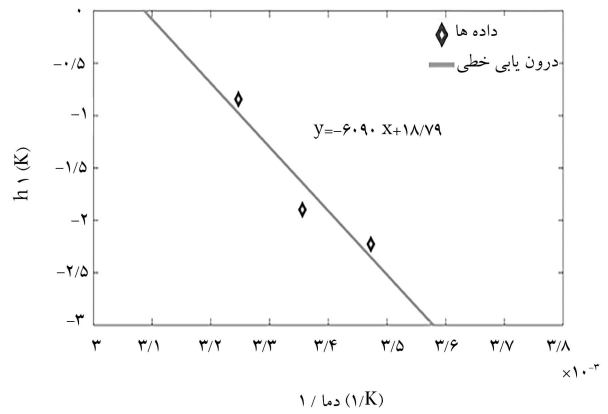
جدول ۴. مشخصات حرارتی بتن در شبیه‌سازی مدل صحت‌سنجی.

E_a	ρC	k	ξ_∞
$50 \left(\frac{KJ}{mol} \right)$	$2400 \left(\frac{KJ}{m^3 K} \right)$	$2/6 \left(\frac{W}{mK} \right)$	$0/9$

که در آن، مقدار $\frac{w}{cm}$ برابر نسبت آب به مواد سیمانی در ترکیب بتن و PFA برابر نسبت وزنی خاکستر بادی به کل مواد سیمانی است. به منظور انجام تحلیل اجزاء محدود، از نرم‌افزار آباکوس^[۲۱] استفاده شده است. چنانچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، به دلیل تقارن مسئله، مدل سازه به صورت دو بُعدی با تقارن محوری لحاظ شده است. مدت زمان مورد بررسی نیز ۳۰ روز و دمای اولیه‌ی بتن، رینگ فولادی و گرانیت زیرین فونداسیون نیز به ترتیب برابر ۱۵، ۱۰ و ۵/۶ درجه بوده است.

۳.۱.۴. نتایج صحت‌سنجی

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به منظور کنترل نحوه‌ی توزیع حرارت، ۴ عدد حسگر دمایی در سازه قرار داده شده است. در بخش کنونی، تاریخچه‌ی دمایی ثبت شده توسط حسگرها و مقادیر محاسباتی خروجی نظیر آن‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، تطابق مطلوبی بین نتایج مدل‌سازی و مقادیر ثبت شده‌ی میدانی مشاهده می‌شود. نکته‌ی که در این‌جا می‌توان به آن اشاره کرد، این است که دما در نقاط سطحی تحت تأثیر تغییرات دمایی محیط نوسان داشته است، ولی با افزایش عمق، وابستگی ذکر شده از بین رفته است. لازم به ذکر است که اختلاف بیشتر بین نتایج آنالیز و مقادیر ثبت شده در حسگر ۱، که به سطح نزدیک‌تر است، به دلیل تقریب در شرایط مرزی است.



شکل ۵. محاسبه‌ی انرژی فعال‌سازی.

گونه‌ی تعیین می‌شوند که در هر دما، رابطه‌ی اخیر با کمترین خطا، مقاومت نمونه‌ها در سنین مختلف را تعیین کند.

$$s = s_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (11)$$

که در آن، s مقاومت نمونه و t سن آن است. سپس نمودار لگاریتم مقدار k بر حسب معکوس دما بر حسب کلونین ترسیم شده است، که شیب آن برابر انرژی فعال‌سازی تقسیم بر ثابت عمومی گازهاست. در شکل ۵، محاسبات مرتبط انجام و نمودار نهایی ترسیم شده است، که مطابق آن، حاصل تقسیم انرژی فعال‌سازی بر ثابت گازها برابر ۶۰۹۰ کلونین محاسبه شده است.

۴. مطالعه‌ی عددی انتقال حرارت و بلوغ بتن

۱.۴. صحت‌سنجی مدل عددی

۱.۱.۴. هندسه‌ی مدل

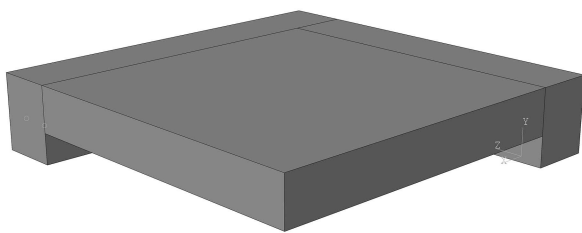
به منظور صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود و ارزیابی توانایی آن در مدل‌سازی مسئله‌ی انتقال حرارت در بتن تازه، سیستم فونداسیون یک برج باد، که توسط آزنها فاریا (۲۰۰۸)^[۲۱] آزمایش و کنترل دمایی شده است، در بخش حاضر به روش اجزاء محدود مدل‌سازی شده است. هندسه‌ی فونداسیون و محل قرارگیری حسگرهای دمایی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۲.۱.۴. شرایط مرزی

در مدل‌سازی صورت گرفته، سه نوع شرایط مرزی به صورت نشان داده شده در شکل ۷ در نظر گرفته شده‌اند. در قسمت شرایط مرزی نوع یک، کلیه‌ی سطوح در تماس مستقیم با هوا قرار دارند و مقدار ضریب همرفت - تابشی برابر با $10 \left(\frac{w}{m^2 K} \right)$ برای آن فرض شده است. در محل شرایط مرزی نوع دو، با در نظر گرفتن قالب‌های فلزی در سطح عمودی بتن مقدار $h = 7/5 \left(\frac{w}{m^2 K} \right)$ برای آن در نظر گرفته شده و شرایط مرزی نوع سه، که در آن تغییر دما به دلیل حرارت‌زایی بتن، ناچیز فرض شده و در نتیجه شار حرارتی در آن برابر صفر فرض شده است. سایر مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی، در جدول ۴ ارائه شده است.

برای محاسبه‌ی مقدار درجه‌ی هیدراتاسیون نهایی از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شده است:^[۲۱]

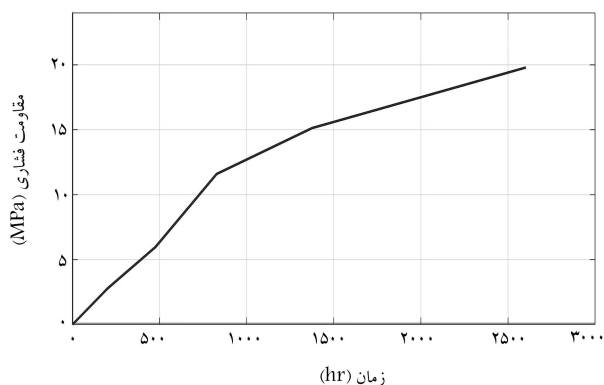
$$\xi_\infty = \frac{17031 \frac{w}{cm}}{0.194 + \frac{w}{cm}} + 0.05 p_{FA} \leq 1 \quad (12)$$



شکل ۱۱. سیستم دال - تیر.

جدول ۵. مشخصات حرارتی بتن در مدل‌سازی سیستم دال - تیر.

E_a	ρC	k	ξ_∞
$50/63 \left(\frac{KJ}{mol} \right)$	$2400 \left(\frac{KJ}{m^3K} \right)$	$2/6 \left(\frac{W}{mK} \right)$	$0/75$

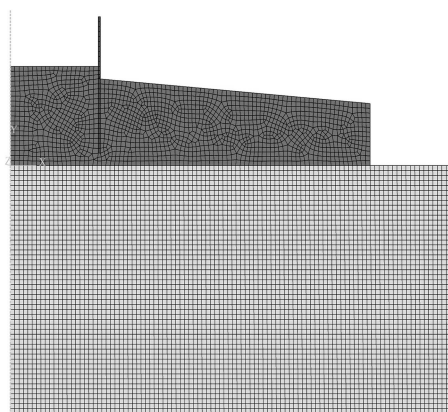


شکل ۱۲. نمودار سن معادل - مقاومت.

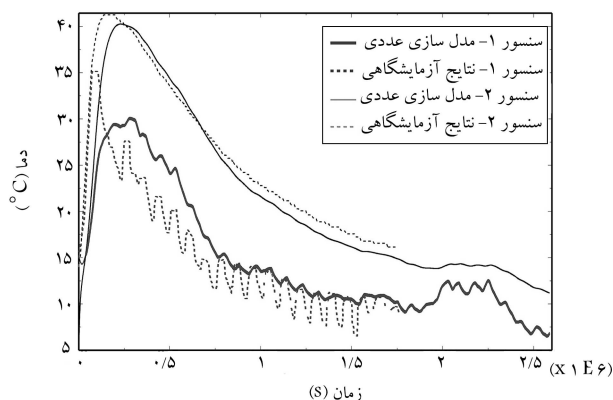
مطالعه‌های عددی مختلفی نشان داده‌اند که ساده‌سازی انجام شده، خطای چندانی در شبیه‌سازی‌های عددی ایجاد نمی‌کند و هم‌خوانی مناسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی گزارش شده است. [۲۳-۲۴] به دلیل تقارن، فقط ¼ سازه مدل‌سازی شده است. المان‌های استفاده شده از نوع DC3D8 (المان ۸ گره‌بی خطی انتقال حرارت) و با این شرایط مرزی بوده‌اند:

- دمای محیط در مدل‌ها به ترتیب برابر ۰، ۸، ۱۶، ۲۴ درجه فرض شده است؛
- سطح بالایی دال، که در تماس با هواست، شرایط مرزی از نوع تابشی - همرفتی با ضریب انتقال همرفتی $h = 10 \left(\frac{W}{m^2K} \right)$ بوده است؛
- شرایط مرزی در سطوح تقارن بدون انتقال حرارت فرض شده است ($h = 0$)؛
- شرایط مرزی سطح زیرین و جانبی در تماس با قالب فازی با ضریب انتقال همرفتی $h = 7/5 \left(\frac{W}{m^2K} \right)$ بوده است.

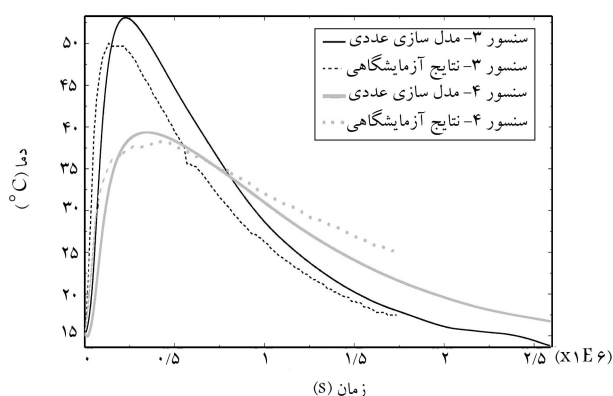
همچنین با استفاده از نتایج آزمون نمونه‌های استوانه‌ای، نمودار مقاومت فشاری بر حسب سن معادل (نسبت به دمای صفر درجه) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برای تعیین روابط حرارت‌زایی خمیر سیمان، همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، نیاز به آزمون کالریتری است. در پژوهش حاضر، از روابط آیین‌نامه‌ی ژاپن به جای آزمون کالریتری استفاده شده است، تا ضرایب مدل حرارت‌زایی به دست آیند. در مدل‌سازی صورت گرفته، ۳ پارامتر درونی تعریف شده‌اند، که به ترتیب: درجه‌ی هیدراتاسیون، سن معادل و مقاومت فشاری هستند. از آن‌جا که تاریخچه‌ی دمایی و در نتیجه میزان مقاومت فشاری در نقاط مختلف ممکن است مقداری متفاوت باشند، مقطع وسط تیر و وسط دال برای سنجش روند کسب مقاومت در نظر



شکل ۸. مدل اجزاء محدود فونداسیون برج باد.



شکل ۹. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی دمایی حسگرهای ۱ و ۲ با نتایج اجزاء محدود.

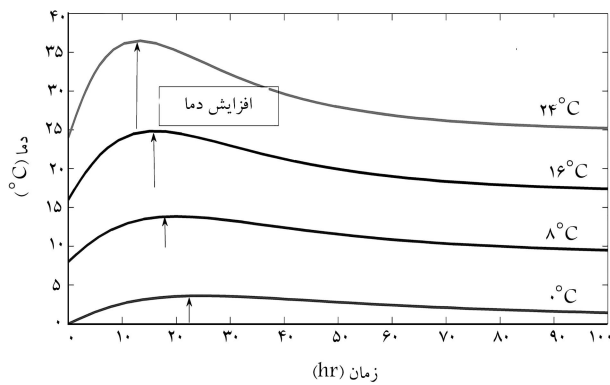


شکل ۱۰. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی دمایی حسگرهای ۳ و ۴ با نتایج اجزاء محدود.

۲.۴. مطالعه‌ی یک سیستم دال - تیر

۱.۲.۴. مدل‌سازی

در ادامه، یک سیستم دال - تیر (شکل ۱۱) ساخته شده با بتنی با چگالی (2400 kg/m^3) و مشخصات حرارتی ذکر شده در جدول ۵، با شبیه‌سازی نرم‌افزاری بررسی شده است. تا روند کسب مقاومت آن در ۴ دمای مختلف (۰، ۸، ۱۶، ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) مقایسه شود. پانل مورد بررسی، یک دهانه‌ی کلی ۵ متری و تیرهایی با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر داشت. تحلیل انجام شده برای مدل‌سازی گرمای ناشی از هیدراتاسیون سیمان از نوع تحلیل حرارتی بوده و از تأثیر میله‌گردهای فولادی در انتقال حرارت صرف‌نظر شده است.



شکل ۱۶. نمودار دما بر حسب زمان.

جدول ۶. زمان‌های قالب‌برداری برای دال.

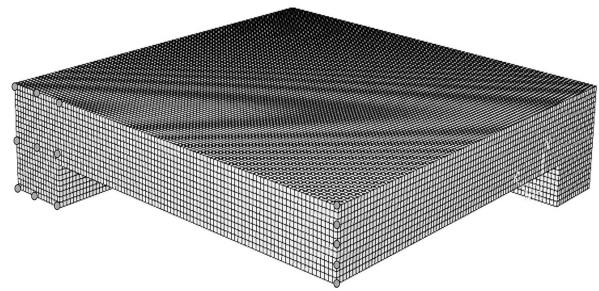
نوع محاسبه	دمای محیطی بتن		
	درجه ۰	درجه ۸	درجه ۱۶
آیین‌نامه‌ی مبحث نهم (روز)	۱۰	۶	۴
آیین‌نامه‌ی ACI ۳۴۷ (روز)	-	-	۷
آنالیز (روز)	۲۷	۱۳	۷
			۳/۱

مقاومت فشاری مشخصه به صورت رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

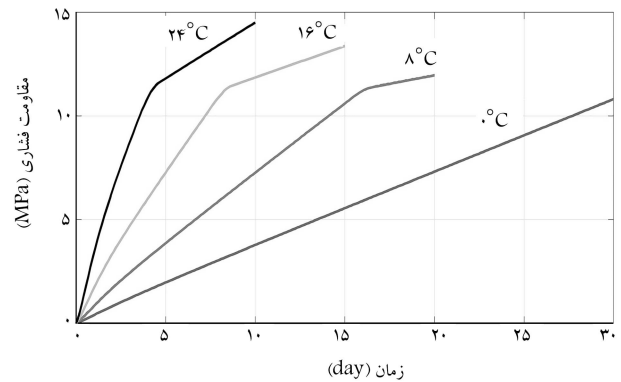
$$f_m = f_c + 6 \rightarrow f_c = 14 \text{ (MPa)} \quad (13)$$

با لحاظ این‌که مراقبت از بتن باید تا کسب مقاومتی برابر با ۰/۷۰ مقاومت مشخصه ادامه یابد، در نتیجه زمان قالب‌برداری سطوح زیرین قالب باید تا زمانی که مقاومت فشاری کسب شده برابر با ۹/۸ مگاپاسکال باشد، انجام شود. با توجه به شکل‌های نشان داده شده در قسمت قبل، مدت زمان قالب‌برداری با توجه به نتایج آنالیز و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر آیین‌نامه در جدول ۶ ارائه شده است. در آیین‌نامه‌ی ACI ۳۴۷ ویرایش ۲۰۰۴، فقط زمان قالب‌برداری برای دمای بالای ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پیشنهاد شده و برای دمای کمتر از ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اشاره شده است که زمان قالب‌برداری باید افزایش یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این تحلیل در دمای ۲۴ درجه، هم‌خوانی مناسبی با آیین‌نامه‌ی ایران و در دمای ۱۶ درجه، نتایج هم‌خوانی مناسبی با آیین‌نامه‌ی ACI دارند. ولی اختلاف بین نتایج معنادار است و نیاز به مطالعه‌ی بیشتر است.

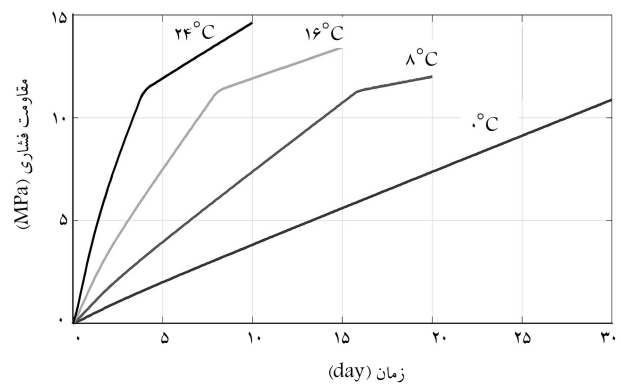
مسئله‌ی دیگری که البته در بتن‌ریزی‌های حجیم ویژه‌ی پیدا می‌کند و با مدل ارائه شده در نوشتار حاضر قابل پیش‌بینی است، مسئله‌ی گرادیان حرارتی و در نتیجه، ایجاد تنش‌های حرارتی و ترک‌خوردگی زودرس در سازه است. مسئله‌ی مذکور با محدود کردن گرادیان حرارتی درون سازه کنترل می‌شود. اختلاف دمای موجود بین قسمت‌های مختلف سازه تا حد زیادی بستگی به سرعت هیدراتاسیون و در نتیجه به دمای محیط دارد. در شکل ۱۶، اختلاف دمای بیشینه‌ی درون دال مورد بررسی و دمای محیط برای ۴ دمای بررسی شده‌ی محیط مشاهده می‌شود، که مطابق آن، بیشینه‌ی اختلاف دمای بین درون دال و محیط با افزایش دمای محیط افزایش یافته و در زمان کمتری از زمان شروع گیرش رخ داده است. در شکل ۱۷، اختلاف دمای بیشینه‌ی درون دال و محیط مشاهده می‌شود، که مطابق آن، رابطه‌ی بین دمای محیط و اختلاف دمای بیشینه، تقریباً خطی است.



شکل ۱۳. مش‌بندی و تعریف نقاط میانگین‌گیری.



شکل ۱۴. نمودار کسب مقاومت مقطع وسط دهانه‌ی تیر بر حسب زمان.



شکل ۱۵. نمودار کسب مقاومت در مرکز دال.

گرفته شده است. در مقطع تیر، ۹ نقطه و در مقطع دال، ۵ نقطه میانگین‌گیری شده‌اند. در شکل ۱۳، مش‌بندی و نقاط میانگین‌گیری مقاطع مذکور مشاهده می‌شوند.

۲.۲.۴. نتایج

در شکل ۱۴، روند کسب مقاومت مقطع تیر در وسط دهانه بر حسب زمان و در شکل ۱۵، روند کسب مقاومت وسط دهانه‌ی دال مشاهده می‌شوند. آنچه از نمودارهای مذکور می‌توان استنباط کرد، مقایسه‌ی روند کسب مقاومت در شرایط دمایی مختلف است. مقایسه‌ی صورت گرفته در انجام برخی از فعالیت‌های ساختمانی، مانند مراقبت و قالب‌برداری، که باید زمانی صورت پذیرند که مقاومت خاصی مهیا شده باشد، مفید خواهد بود.

در ادامه، کمیته‌ی زمان قالب‌برداری سطوح زیرین در دال با توجه به نتایج تحلیل بررسی شده است. با توجه به این‌که مقاومت فشاری ۲۸ روزه میانگین برابر با ۲۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است، مطابق مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان،

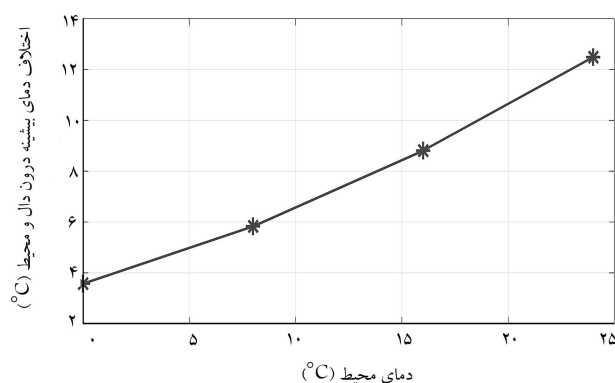
را ارزیابی کرد. مدل سازی عددی توسط یک مطالعه آزمایشگاهی، صحت سنجی شد. مطالعه عددی مشخص ساخت که نرم افزار آباکوس توانسته است روند توزیع حرارت با گذشت زمان را به درستی شبیه سازی کند و با اختلاف کمتر از ۱۴٪، بیشینه دمای ثبت شده در مدل آزمایشگاهی را تخمین بزند.

در ادامه، بر اساس صحت سنجی انجام گرفته، یک سیستم دال - تیر جهت مطالعه پارامتریک مدل سازی شد. توزیع حرارت بر اساس هیدراتاسیون سیمان برای دماهای محیطی ۰، ۸، ۱۶ و ۲۴ درجه سانتی گراد شبیه سازی و مقاومت بتن بر اساس متغیر بلوغ بتن محاسبه شد. نتایج نشان داد که در دال و تیر، شیب میزان افزایش مقاومت بتن با زمان، از نقطه زمانی مشخصی کاهش می یابد. همچنین مقدار این نقطه زمانی با کاهش دمای محیطی افزایش می یابد. رسم نمودار تغییرات دما در طول زمان برای دماهای محیطی مختلف نشان داد که با افزایش دمای محیطی، تغییرات دمای ناشی از هیدراتاسیون سیمان نیز به صورت خطی نسبت به دمای محیطی افزایش می یابد.

مقایسه نتایج تحلیل پارامتریک برای سیستم دال - تیر با زمان های پیشنهادی آیین نامه های ایران و ACI نشان داد که در برخی دماها، هم خوانی بین نتایج تحلیل و آیین نامه وجود دارد؛ ولی به طور کلی نتایج بیانگر نیاز به مطالعه بیشتر در حوزه ذکر شده هستند.

تقدیر و تشکر

نوشتار حاضر، با حمایت دانشگاه اراک در قالب طرح پژوهشی به شماره ۹۶/۵۸۵۳ انجام شده است.



شکل ۱۷. نمودار اختلاف دما بر حسب دمای محیط.

۵. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به ارزیابی روند انتقال حرارت و کسب مقاومت در بتن با توجه به بلوغ بتن پرداخته شده است. بر این اساس، در ابتدا به بررسی نحوه انتقال حرارت در بتن و بیان روابط حاکم بر آن پرداخته شده است. روابط مربوط به بلوغ بتن ارائه شده و آزمایش هایی بر مبنای استاندارد ASTM C ۱۰۷۴ در دمای کنترلی ثابت ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد جهت تعیین ضرایب استفاده شده در روش بلوغ بتن انجام شده است. بر این اساس، مسیری مشخص جهت تعیین بلوغ بتن و تخمین مقاومت فشاری بر اساس آن معرفی شده است.

در گام بعدی، نحوه انتقال حرارت هیدراتاسیون سیمان به صورت شبیه سازی عددی مطالعه شد تا بتوان بلوغ بتن و مقاومت فشاری محاسبه شده بر مبنای بلوغ

پانویس ها

1. hydration
2. Carino and Lew
3. Azenha & Faria
4. Soutsos
5. Ranz
6. Mi
7. Mills
8. Cervera
9. conduction heat transfer
10. convection heat transfer
11. temperature-time factor
12. equivalent age

منابع (References)

1. Riding, K.A. "Early age concrete thermal stress measurement and modeling", The University of Texas at Austin (2007).
2. Carino, N. and Lew, H.S. "The maturity method: theory and application", *Cement, Concrete Aggregates*, **6**(2), pp. 61-73 (2001).
3. Azenha, M. and Faria, R. "Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower-A case study", *Engineering Structures*, **30**(9), pp. 2392-2400 (2008).
4. Soutsos, M., Turu'allo, G., Owens, K. and et al. "Matu-

- rity testing of lightweight self-compacting and vibrated concretes”, *Construction Building Materials*, **47**, pp. 118-125 (2013).
5. Ranz, J., Aparicio, S., Fuente, J. and et al. “Monitoring of the curing process in precast concrete slabs: an experimental study”, *Construction Building Materials*, **122**, pp. 406-416 (2016).
 6. Kamkar, S. and Eren, Ö. “Evaluation of maturity method for steel fiber reinforced concrete”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**(1), pp. 213-221 (2018).
 7. Mi, Z., Hu, Y., Li, Q. and et al. “Maturity model for fracture properties of concrete considering coupling effect of curing temperature and humidity”, *Construction and Building Materials*, **196**, pp. 1-13 (2019).
 8. Lin, F. and Meyer, C. “Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure”, *Cement and Concrete Research*, **39**(4), pp. 255-265 (2009).
 9. Mills, R. “Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes”, *Highway Research Board Special Report*, **90**, pp. 406-424 (1966).
 10. Cervera, M., Faria, R., Oliver, J. and et al. “Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena”, *Computers & Structures*, **80**(18-19), pp. 1511-1521 (2002).
 11. Japan Society of Civil Engineers Concrete Committee (JSCE), “Standard specifications for concrete structures design, (2007).
 12. Holman, J.P. “Heat transfer”, McGraw-Hill, 10th edition(2009).
 13. Teixeira de Freitas, J.A., Cuong, P.T., Faria, R. and et al. “Modelling of cement hydration in concrete structures with hybrid finite elements”, *Finite Elements in Analysis and Design*, **77**, pp. 16-30 (2013).
 14. Malhotra, V.M. and Carino, N.J., *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press (2004).
 15. McIntosh, J.D. “Electrical curing of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, **1**(1), pp. 21-28 (1949).
 16. Nurse, R.W. “Steam curing of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, **1**(2), pp. 79-88 (1949).
 17. Saul, A.G.A. “Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, *Magazine of Concrete Research*, **2**(6), pp. 127-140 (1951).
 18. Bergström, S.G. “Curing temperature, age and strength of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, **5**(14), pp. 61-66 (1953).
 19. ASTM C1074-17. “Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method”, ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
 20. Schindler, A.K. and Folliard, K.J. “Heat of hydration models for cementitious materials”, *ACI Materials Journal*, **102**(1), pp. 24-33 (2005).
 21. Inc. Hibbett, Karlsson, and Sorensen, “ABAQUS/standard: user’s manual”, Hibbitt, Karlsson & Sorensen (2001).
 22. Zhou, Y., Meng, D. and Wang, Y. “Finite-element simulation of hydration and creep of early-age concrete materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(11), p. 05014006 (2014).
 23. Kim, J.K., Kim, K.H. and Yang, J.K. “Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system”, *Computers & Structures*, **79**(2), pp. 163-171 (2001).
 24. Burkan Isgor, O. and Razaqpur, A.G. “Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures”, *Cement and Concrete Composites*, **26**(1), pp. 57-73 (2004).