

Investigating the effect of heat transfer from the mold on the mechanical properties of self-compacting concrete

Mahbobeh Mirzaei Aliabadi*¹, Amir hossein Derakhshan nezhad², Seyed Ali Mousavi Abdullah nezhad³, Ali Hitavi³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2- Master's student in Civil-Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

3- Bachelor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

ABSTRACT

Self-compacting concrete is widely used in buildings, bridges, industrial pavements and other structures. Due to the wide use of this material, many researchers have investigated its mechanical properties. Several factors influence the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete, and heat transfer is one of these factors. Heat transfer is a vector quantity that occurs through conduction, convection and radiation. Heat transfer to solids is a mixture of molecular vibrations and energy transfer by free electrons. Heat transfer is from the molds to the concrete and the temperature increase of the molds affects the surrounding concrete. Therefore, the heat transferred to the molds from the air and its transfer to the concrete can cause crushing, flaking, cracking and reducing the final strength of the concrete. In this research, the numerical model of heat transfer with different types of molds to self-compacting concrete was investigated with ABAQUS software and the experimental results of the compressive strength of self-compacting concrete in polypropylene and ST37 steel molds. The numerical results showed that the transfer The heat from the polypropylene mold to the general environment of the self-compacting concrete and to its central core was reduced by about 61.50 and 62.66 percent compared to the St37 steel mold, and the average laboratory results of the final compressive strength of the concrete showed that the failure results from the uniaxial compression machine, Concrete in polypropylene mold increased by 8.49% and 7.28% compared to concrete in St37 steel mold during 7-day and 28-day curing. With the results shown from polypropylene mold, the effect of heat transfer, temperature and environmental factors can be seen and It reduces the self-compaction of concrete and its use in concrete structures leads to more durability and increased compressive strength compared to other form.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 June 2023

Revise Date: 30 September 2023

Accept Date: 27 November 2023

Keywords:

Heat transfer;
self-compacting concrete,
Abaqus software;
concrete mold (steel, copper,
aluminum, polypropylene,)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.403066.3155>

*Corresponding author: Mahbobeh Mirzaei Aliabadi.
Email address: mirzaie@bkatu.ac.ir

بررسی تأثیر انتقال حرارت از قالب بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم

محبوبه میرزایی علی آبادی^{۱*}، امیرحسین درخشان نژاد^۲، سید علی موسوی عبدالله نژاد^۳، علی هیتاوی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

چکیده

بتن خودتراکم به طور گسترده در ساختمان‌ها، پل‌ها، روسازی‌های صنعتی و سایر سازه‌ها استفاده می‌شود. به دلیل استفاده گسترده از این ماده، پژوهشگران زیادی به بررسی خواص مکانیکی آن پرداخته‌اند. عوامل متعددی بر خواص تازه و مکانیکی بتن خودتراکم تأثیرگذار است که انتقال حرارت یکی از این عوامل می‌باشد. انتقال حرارت یک کمیت برداری است که از طریق رسانش، همرفت و تابش رخ می‌دهد. انتقال حرارت به جامدات، مخلوطی از ارتعاشات مولکولی و انتقال انرژی توسط الکترون‌های آزاد است. انتقال حرارت از قالب‌ها به بتن صورت گرفته و افزایش دمای قالب‌ها بر اطراف بتن متأثر است. بنابراین حرارت منتقل شده به قالب‌ها از هوا و انتقال آن به بتن می‌تواند باعث خرد شدن، پوسته پوسته شدن، ترک خوردن و کاهش مقاومت نهایی بتن شود. در این تحقیق به بررسی مدل عددی انتقال حرارت با انواع قالب‌های مختلف به بتن خودتراکم با نرم افزار آباکوس (ABAQUS) و نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن خودتراکم در دو قالب پلی‌پروپیلن و فولادی ST37 پرداخته شد. نتایج عددی نشان داد که انتقال حرارت از قالب پلی‌پروپیلن به محیط کلی بتن خودتراکم و به هسته مرکزی آن نسبت به قالب فولادی St37 حدود ۶۱/۵۰ و ۶۲/۶۶ درصد کاهش داشت و میانگین نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری نهایی بتن نشان داد نتایج شکست از دستگاه فشاری تک محوره، بتن در قالب پلی‌پروپیلن نسبت به بتن در قالب فولادی St37 طی عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه ۸/۴۹٪ و ۷/۲۸٪ افزایش یافت. با نتایج نشان داده شده از قالب پلی‌پروپیلن می‌توان اثر انتقال حرارت، دما و عوامل محیطی به بتن خودتراکم را کاهش داد و استفاده از آن در سازه‌های بتنی منجر به دوام بیشتر و افزایش مقاومت فشاری بالاتر نسبت به سایر قالب‌ها شود.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت، بتن خودتراکم، نرم افزار آباکوس، قالب‌های بتن (فولادی، مسی، آلومینیومی، پلی-پروپیلن)

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.403066.3155	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۲/۰۹/۰۶	۱۴۰۲/۰۹/۰۶	۱۴۰۲/۰۷/۰۸	۱۴۰۲/۰۴/۰۵
محبوبه میرزایی علی آبادی mirzaie@bkatu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

¹ k-value

۱- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در بتن خودتراکم^۲ افزایش دما و اثرات مخرب آن بر خواص تازه بتن است. افزایش حرارت در بتن تازه باعث بالا رفتن هیدراتاسیون می‌شود. هیدراتاسیون یک واکنش گرمازا است، به این معنی که گرما تولید می‌کند و زمانی که بتن داغ است این واکنش سریع‌تر انجام می‌گردد و باعث افزایش تخلخل، افزایش منافذ بزرگ و افزایش خلل و فرج در بتن خودتراکم می‌شود. خشک شدن سطح یکی دیگر از مشکلات احتمالی ناشی از انتقال حرارت گرم به بتن است که منجر به جمع شدگی و ترک خوردن می‌شود. بنابراین نگرانی اصلی در مورد بتن خودتراکم، مقاومت و زمان گیرش آن است. همچنین افزایش دما منجر به جمع شدگی حرارتی بتن می‌شود که در بتن معمولی مشکلی نیست و می‌توان اثر آن را نادیده گرفت و منجر به ترک خوردگی نمی‌شود اما در بتن خودتراکم اگر انتقال حرارت بیشتر و رهایی تنش وارده بیشتر شود، بتن منجر به ترک خوردگی می‌شود. یکی از عوامل مختلف بر افزایش حرارت در بتن‌ها، قالب‌ها می‌باشند. با افزایش دما، حرارت قالب‌ها افزایش می‌یابد و تاثیر مستقیم بر مقاومت فشاری بتن‌ها می‌گذارند [۱]. همچنین دمای پایین بتن، روند هیدراتاسیون را به میزان قابل توجهی کاهش و از آسیب ساختاری جدی ساختمان و مصالح می‌تواند جلوگیری کند. بیشتر سازه‌های بتنی با عوامل محیطی در تماس هستند و شرایطی جوی مانند آفتاب، باد، تغییر دما و غیره بر روی آن‌ها تاثیر می‌گذارند. دمای سطح ساختمان‌های بتنی با تابش آفتاب، همرفت و دمای محیط تغییر می‌کنند. به دلیل اینکه سطح بتن مستقیماً در معرض عوامل جوی قرار می‌گیرد، در نتیجه درون هسته بتن توزیع دمای ناهمگن و میدان دمایی ایجاد می‌شود. از یک سو، توزیع دما مستقیماً به تغییر شکل بتن، بار حرارتی، انبساط، انقباض، جمع شدگی و خمش منجر می‌شود که احتمالاً بر یکپارچگی سازه‌های بتنی تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، توزیع دما به طور غیرمستقیم تأثیراتی بر محیط میکرو درونی بتن ایجاد می‌کند و منجر به مسائل دوام مانند کربناته شدن، نفوذ کلریدها، خوردگی میلگردها و خزش می‌شود در نتیجه باعث تخریب دوام بتن می‌شود. افزایش دما سطحی بتن ممکن است منجر به ترک در سازه شود [۲]. تغییرات دما در سازه‌های بتنی به دلیل گرمای هیدراتاسیون با توجه به تغییرات خواص حرارتی بتن، مانند انتقال حرارت، گرمای ویژه، چگالی و غیره به طور قابل توجهی بر پایداری و دوام بتن اثرگذار هستند. برای درک عمیق از شرایط انتقال حرارت و تأثیرگذاری آن بر توزیع دمای داخلی بتن، تئوری‌هایی از جنبه‌های مختلف برای پیش بینی تغییرات انتقال حرارت دما در سازه‌های بتنی تحت محیط طبیعی ارائه شده است. پژوهشگران نتایج انتقال حرارت، تابش، گرما و تأثیرگذاری آن‌ها بر بتن و سایر عوامل مختلف را مورد بررسی قرار دادند.

هائویو زنگ و همکاران [۱] برای پیش بینی پاسخ ترک خوردگی و مقابله با آن، یک روش سیستماتیک برای انجام تجزیه و تحلیل برای انتقال حرارت بدست آوردند. ساتا و همکاران [۲] برای همرفت، رابطه‌ای بین ضریب همرفتی و سرعت باد از طریق روش عددی به دست آوردند. ژانگ و همکاران [۳] آزمایش تونل باد بتن را انجام دادند و رابطه‌ای بین انتقال حرارت، جابجایی و سرعت باد ترسیم کردند. شیائو و همکاران [۴] به چگونگی تأثیر پارامترهای هواشناسی بر میدان دمایی سازه‌های بتنی در زیر نور خورشید را تجزیه و تحلیل کردند. دافی و همکاران [۵] یک قانون متغیر زمان - تابش و یک رابطه با انتقال حرارت روی سطح بتن را مورد مطالعه قرار دادند. شیندلر و همکاران [۶] یک مدل روسازی بتنی با کارایی بالا (HIPERPAV) و مدل تفاضل محدود یک بعدی گذرا را برای بررسی پاسخ دمایی روسازی سیمان پرتلند تحت تأثیر عوامل محیط خارجی و گرمای داخلی تولید شده توسط هیدراتاسیون سیمان اتخاذ کردند. چو و همکاران [۷] یک مدل در خصوص پیش‌بینی دمای داخلی و رطوبت نسبی (RH) برای توصیف تکامل در بتن، با اعمال تشعشع، انتقال حرارت و دمای محیط، بر طبق اصل اساسی ناپایدار یک بعدی ایجاد کردند. بن خالد و همکاران [۸] مدلی از اجزاء محدود یک بعدی برای پیش بینی انتقال گرما و رطوبت از طریق دیواره بتنی کنفی پیشنهاد کردند. کیان و همکاران [۹] یک مدل المان محدود سه بعدی برای پیش بینی انتقال حرارت بر یک مخلوط آسفالتی و بتنی در طول تراکم بر اساس قانون فوریه و اصل ترمودینامیکی توسعه دادند. یانجون و همکاران [۱۰] بر اساس کنترل دما، آزمایش‌های مقاومت مکانیکی و آزمایش‌های ریزساختار، تأثیر محتویات مختلف یخ (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪) را بر انتقال حرارت و خواص مکانیکی بررسی کردند. یانلی و همکاران [۱۱] مکانیسم انتقال رطوبت و گرمای در بتن به طور سیستماتیک توسط نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار دادند. یائودونگ و همکاران [۱۲] یک روش آزمایش انتقال حرارت جدید

² Self-consolidating concrete

را برای بررسی اثراتی که کسر حجمی سنگدانه‌های درشت بازیافتی و دانه‌های توخالی لعاب‌دار بر عملکرد انتقال حرارت بتن دارند، پیشنهاد کردند. جین و همکاران [۱۳] تأثیر شکل، کسر حجمی و درجه بندی سنگدانه‌های درشت و همچنین کسر حجمی و دانه بندی دانه‌های توخالی لعاب‌دار بر هدایت حرارتی مؤثر در بتن مورد بررسی قرار گرفت. منیر المرزک و همکاران [۱۴] به بررسی تأثیر رطوبت و نقش سنگدانه‌های لاستیکی بر رفتار حرارتی بتن، به ویژه زمان انتقال حرارت در داخل ماده در دماهای بسیار بالا مانند دمای آتش سوزی مورد بررسی قرار دادند. حامد و همکاران [۱۵] به بررسی خواص حرارتی بتن معمولی با مقاومت مختلف و عملکرد آن با مطالعه خواص مکانیکی، فیزیکی و حرارتی اندازه گیری کردند و ارتباط بین خواص حرارتی با خواص مکانیکی و فیزیکی را مورد بررسی قرار دادند.

انتقال حرارت بتن تا حد زیادی تحت تأثیر تناسب مخلوط‌ها مانند، سنگدانه‌ها، نوع قالب‌ها و همچنین وضعیت رطوبت می‌باشد. با این حال، مضرات و خطرات پنهانی گرما بر مصالح ساختمانی، در سلامت و عملکرد ایمنی ساختار درونی سازه بتنی تأثیر گذار است. همچنین انتقال و حرارت گرما بر چهار خواص اصلی سیمان که عبارتند از: تری کلسیم سیلیکات (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) و آلومینوفریت کلسیم (C_4AF) متأثر است و باعث کاهش اثرات موارد ذکر شده و گیرش آن‌ها می‌گردد. انتقال حرارت، یکی از ویژگی حرارتی- فیزیکی بتن تلقی می‌شود که قالب‌ها بر انتقال حرارت از طریق رسانش بر بتن تأثیر می‌گذارند. هدف از این پژوهش، ایجاد همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن خودتراکم با نتایج عددی دمای داخلی کل بتن خودتراکم در دو قالب پلی پروپیلن و فولادی ST37، همچنین مقایسه تاثیر انتقال حرارت در یک بازه زمانی مشخص از انواع قالب‌ها به بتن خودتراکم و مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم در دو قالب پلی پروپیلن و فولادی ST37 است.

۲- انتقال حرارت در بتن

آب موجود در بتن خودتراکم با دمای زیاد، باعث تبخیر شدن سریع‌تر آن می‌گردد و سرعت واکنش هیدراتاسیون، هیدراته شدن سیلیکات کلسیم، سولفات کلسیم، آلومینات و سولفو آلومینات کلسیم (اترینگایت) در سیمان افزایش یافته و این واکنش‌ها منجر به گیرش سریع در خمیر سیمان شده و کارایی خواص مکانیکی بتن تازه، با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. در نهایت بتن فرصت لازم برای روانی، قابلیت پر شدن، تراکم و چسبندگی بین ذرات، جداشدگی دانه‌ها، ضعیف شدن ناحیه انتقال و عدم کسب مقاومت کافی را نمی‌یابد. تحقیقات زیادی در زمینه اثرات نامطلوب هوای گرم بر خواص تازه بتن صورت گرفته است که این تأثیرات نامطلوب، بر خواص مکانیکی تازه بتن در مواردی از جمله افزایش زمان گیرش، افزایش افت اسلامپ، افزایش آب مورد نیاز، افزایش احتمال ایجاد ترک‌های پلاستیک و افزایش احتمال ایجاد ترک‌های حرارتی اشاره شده است. همچنین از اثرات هوای گرم بر خواص سخت شده بتن مواردی از جمله کاهش مقاومت، کاهش دوام، عدم یکنواختی سطح ظاهری بتن، افزایش نفوذپذیری، کاهش مقاومت سایشی و افزایش احتمال ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی مورد مطالعه قرار گرفته است. مشکل دیگر هوای گرم، اثر نامطلوب آن در بتن حجیم است اگر گرمای آزاد شده در بتن بیش از اندازه باشد این گرما و حرارت ناشی از واکنش هیدراتاسیون، منجر به ترک‌های حرارتی، عدم انتقال حرارت به خارج، افزایش دمای داخلی، کاهش دوام و مقاومت نهایی را در پی خواهد داشت [۱۶]. رسانایی حرارتی خاصیتی از مواد است که بیانگر توانایی آن‌ها در انتقال گرما می‌باشد که دو حالت پایدار و گذرا را شامل می‌شود. حالت پایدار انتقال حرارت ثابت است که در آن دما یا جریان گرما وابسته به زمان نیست. روش گذرا وابسته به زمان و تغییرات دما می‌باشد [۱۷]. بتن یک ماده جامد همسان‌گرد، همگن است. انتقال حرارت در بتن با دماهای معمولی عمدتاً از طریق رسانایی حرارتی انجام می‌گیرد. خواص بتن تحت تأثیر پخش فضایی و نسبت حجمی عناصری مانند سنگدانه‌ها، سیمان، آب و حفره‌ها قرار می‌گیرد. حفره‌های داخل بتن تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی و حرارتی بتن می‌گذارند. تغییر در خصوصیات بتن باعث ایجاد مقادیر مختلف هدایت حرارتی می‌شود که محیط سطحی بتن و موارد ذکر شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پوششی که به عنوان قالب در اطراف بتن می‌باشد اگر گرمای محیطی را جذب و افزایش دما داشته باشد در همان سن و ساعات اولیه که هیدراتاسیون بتن شکل می‌گیرد، مدول ارتجاعی کاهش، وادادگی تنش زیاد و باعث کاهش عمل آوری و مقاومت حداکثری بتن می‌شود [۱۸]. اثر انتقال حرارت از قالب به بتن، باعث افزایش جمع شدگی، انبساط حجمی و سطحی بتن می‌شود. انبساط حاصل از واکنش هیدراتاسیون مقید تنش فشاری خواهد بود که خود این عامل سبب ترک خوردگی می‌شود. استفاده از قالب‌های پلی پروپیلن موجب افزایش

مقاومت حداکثری، حفظ خواص مکانیکی، کاهش جمع شدگی و پارامترهایی همچون مدول الاستیسیته، ضریب انبساط حرارتی و مدول ارتجاعی بتن شده و انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن کرنش کمتری را نسبت به سایر قالب‌ها به بتن اعمال می‌کند [۱۹].

۳- قالب‌های بتن

بتن خودتراکم یکی از مصالح ساختمانی اصلی در صنعت ساختمان است. به دلیل ویژگی‌های بتن در ساختمان‌ها، مانند عملکرد سازه‌ای، پایداری، دسترسی، فراوانی مصالح، هزینه‌ی کم و همچنین به دلیل شکل پذیری، بدون در نظر گرفتن پیچیدگی هندسی، به طور گسترده در ساخت و ساز استفاده می‌شود. بتن خودتراکم به دلیل کارایی خواص، کیفیت، سهولت اندازه‌گیری، نفوذناپذیری و فلسفه طراحی بسیار مفید بوده و به علت ایمنی، پایداری بالا و اقتصادی بودن، یکی از محبوب‌ترین مصالح ساختمانی است [۲۰]. قالب‌ها یکی از ضروری‌ترین عوامل برای ساخت سازه‌های بتنی هستند که می‌توانند بتن را به شکل هندسه مورد نظر درآورند و به تدریج با گذشت زمان، بتن تازه در آن به روند توسعه مقاومت لازم و سخت شدن صورت گیرد. قالب‌ها دارای دو نوع دائمی یا موقتی می‌باشند. [۲۱ و ۲۰]. انواع قالب بندی بتن به جنس و نوع سازه بستگی دارد، مانند: قالب سقف‌ها، قالب تیرها و ستون‌ها. بین ۲۵ تا ۳۲ درصد از هزینه سازه صرف قالب بندی می‌شود، بنابراین طراحی قالب‌های موقت، صرفه اقتصادی دارند زیرا مجدداً قابل استفاده هستند. نوعی دیگر از آن‌ها جدا ناپذیرند و به قالب‌های ثابت معروف می‌باشند [۲۱].

۳-۱- انواع قالب‌های بتن از نظر جنس

- ۱) پلی پروپیلن
- ۲) مسی
- ۳) آلومینیوم ۲۰۲۴ (AL2024)
- ۴) فولادی st37
- ۵) فولادی st52

۳-۲- قالب‌های پلی پروپیلن

قالب‌های پلی پروپیلن از پلاستیک سبک وزن و با استحکام ساخته می‌شوند. این نوع قالب‌ها برای پروژه‌های ساختمانی استفاده می‌گردند. قالب‌های پلی پروپیلن دارای سطحی غیر قابل نفوذ هستند که معمولاً به بتن یک سطح صاف می‌بخشند [۲۱]. از مزایای قالب‌های پلی پروپیلن می‌توان به این موارد اشاره نمود: از نظر وزن سبک‌تر از دیگر قالب‌هاست، می‌توان آن را به سهولت برش و سوراخ کرد، آسیب دیدگی آن‌ها به سادگی ترمیم می‌شوند، برای شکل‌های پیچیده و خاص بسیار مفید هستند، به راحتی با آب شسته و تمیز می‌شوند، قیمت آن‌ها کمتر از سایر قالب‌هاست، جابجایی آن‌ها آسان‌تر از سایر قالب‌هاست، در اندازه و شکل تنوع بیشتری نسبت به سایر قالب‌ها دارند و انتقال حرارت کمتری به بتن می‌رساند [۲۲] (مطابق شکل ۱).



شکل ۱: قالب پلی پروپیلن [۲۱]

۳-۳- قالب‌های فولادی

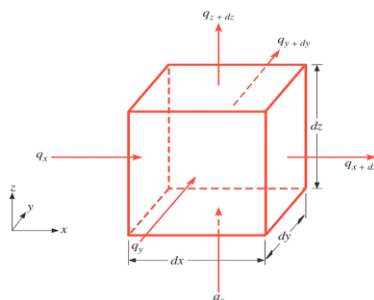
این نوع قالب‌ها از صفحات فولادی ساخته می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با استفاده از پیچ و مهره یا سیم‌های مفتولی مناسب، در کنار هم متصل کرد [۲۱] و می‌توان در تعداد زیاد با هر شکل و اندازه مناسب ساخت. قالب‌های فولادی عمدتاً در پروژه‌های ساختمانی عظیم، گزینه‌ی مناسبی هستند. بهترین قالب برای سازه‌های دایره‌ای یا به شکل منحنی، قالب‌های فلزی می‌باشند. از مزیت قالب‌های فولادی و خواص آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره نمود: به راحتی نصب و برچیده می‌شوند، این قالب‌ها بسیار با دوام بوده و ظرفیت تحمل بار بیشتری را دارند، دوام و طول عمر بیشتری نسبت به سایر قالب‌ها را دارا می‌باشند (مطابق شکل ۲). قالب‌های آلومینیومی شباهت زیادی به قالب‌های فولادی دارند. تفاوت اصلی آن‌ها این است که چگالی آلومینیوم نسبت به فولاد کمتر است و همین علت باعث سبک‌تر شدن قالب می‌گردد. آلومینیوم نسبت به فولاد نیز از دوام کمتری برخوردار است [۲۲].



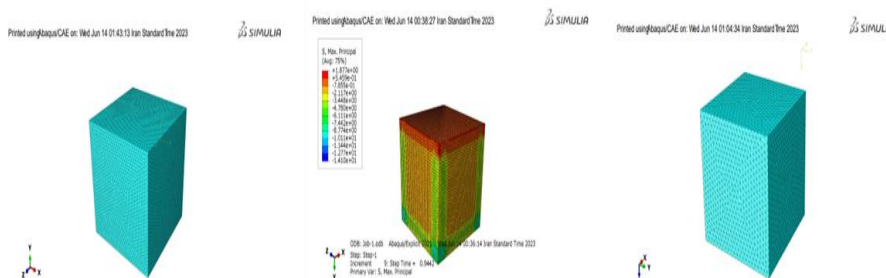
شکل ۲: قالب فولادی [۲۱]

۴- صحت سنجی

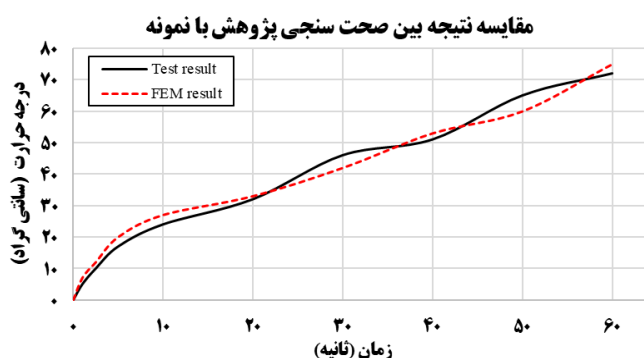
قبل از شروع مدلسازی در نرم افزار آباکوس لازم است برای تایید و دقت مدل تحلیل عددی، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه سازی شده و نتایج تجربی اثر حرارت در بتن معمولی پرتلند، از مقاله‌ای که دارای اعتبار بین المللی بوده و تا حدودی به پژوهش حاضر نزدیک می‌باشد، انتخاب شده و در نرم افزار آباکوس مدل سازی شود [۱]. با نرم افزار اجزاء محدود یک مدل بتنی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی متر مکعب ساخته شد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، انتقال دما در فاصله ۵۰۰ میلی متر از سمت بالا، ۶۰۰ میلی متر از طرفین و ۱۹۰ میلی متر از طرف مقابل نمونه بتن تعبیه شد. برای یکنواخت شدن دمای اولیه نمونه بتن، تحت شرایط استاندارد با بالاترین دما $37/1$ سانتی‌گراد و ظرفیت گرمایی ویژه ۹۵۰ ژول بر کیلوگرم سانتی‌گراد در مدت زمان ۶۰ ثانیه دمای بتن حدود 72 درجه سانتی‌گراد با شبیه سازی عددی برای بهبود دقت مدل ایجاد گردید. کل سطوح را در 4692 المان مرزی مثلثی شکل و 100553 المان چهار وجهی مشبک، برای این نمونه بتنی به صورت سه بعدی مدل سازی گردید، شرایط محیطی و دمای سطح مدل بر اساس میانگین دمای روزانه سطح زمین در 20 درجه سانتی‌گراد تعیین شد. این مدل به طور دقیق می‌تواند توزیع دمای داخلی بتن را با انتقال حرارت و دماهای مختلف در یک محیط طبیعی با همرفت، تابش حرارت پیش بینی کند. نتایج آنالیز اخذ شده در نرم افزار با نتایج واقعی مقاله مقایسه گردید (مطابق شکل‌های ۴ و ۵).



شکل ۳: هدایت حرارتی در حجم کنترل شده



شکل ۴: مکعب و هدایت حرارتی شبیه سازی شده در آباکوس



شکل ۵: زمان - درجه حرارت، برای نمایش تطابق عملکرد، جهت صحت سنجی در نرم افزار آباکوس

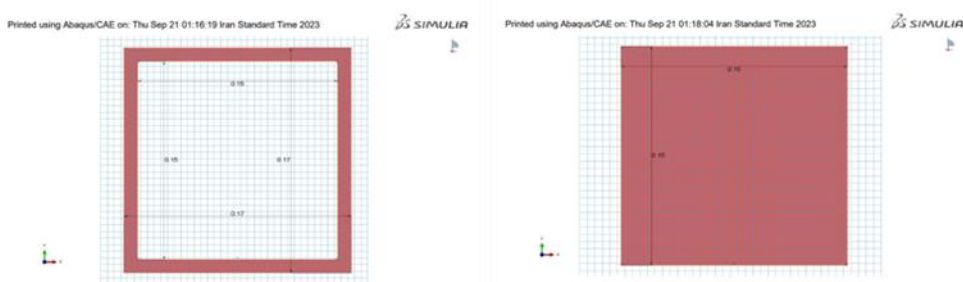
۵- روش کار با نرم افزار آباکوس

۵-۱- ساخت هندسه مدل (پودمان Part)

پودمان Part، وظیفه مدلسازی هندسی اجسام را دارد که می توان برای ساخت هندسی یک مدل از بخش تعریف شده سطح، حجم و خط جسم مورد نظر را ترسیم نمود. در این تحقیق از بخش shell 2D (پوسته دو بعدی) جهت تعریف بتن خودتراکم و قالب استفاده گردید. دو مستطیل به ابعاد مشخص ترسیم، که یکی از مستطیل ها بتن خودتراکم و دیگری به عنوان قالب در نظر می گردد (مطابق جدول ۱ و شکل ۶).

جدول ۱: ابعاد دو مستطیل ایجاد شده در قسمت part

ابعاد مستطیل اول (بتن خودتراکم) (m)	ابعاد داخلی مستطیل دوم (m)	ابعاد بیرونی مستطیل دوم (m)
۰/۱۵×۰/۱۵	۰/۱۵×۰/۱۵	۰/۰۲×۰/۱۷×۰/۱۷



شکل ۶: دو مستطیل ایجاد شده در قسمت part

۲-۵- تعریف خصوصیات سطح مقطع و اختصاص آن (پودمان Property)

در پودمان property خواص مواد دو مدل و نوع آن‌ها از جمله؛ Density (چگالی)، Specific Heat (گرمای ویژه) و heat transfer (انتقال حرارت) مورد نیاز متناسب با هر ماده لحاظ و بتن مورد نظر نیز از نوع همگن تعیین می‌گردد (مطابق جدول ۲ و ۳).

جدول ۲: چگالی و خواص مواد

خواص ماده	پلی پروپیلن	St37	St52	مس	آلومینیوم ۲۰۲۴	بتن خودتراکم
چگالی (kg/m^3)	۹۴۶	۷۸۵۰	۷۸۵۰	۸۹۶۰	۱۲۷۸۰	۲۴۰۰

جدول ۳: گرمای ویژه و انتقال حرارت مواد

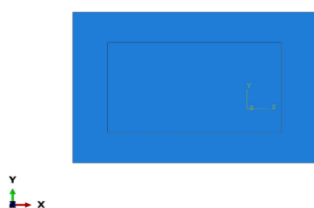
خواص ماده	پلی پروپیلن	St37	St52	مس	آلومینیوم ۲۰۲۴
انتقال حرارت (W/K.m)	۱۱	۵۳	۴۸۸	۴۰۱	۱۲۱
گرمای ویژه (J/kg.c)	۲۳۰	۴۹۰	۴۶۰	۳۸۵	۷۹۱

۳-۵- متصل کردن اجزاء ساخته شده (پودمان Assembly)

جهت تعیین موقعیت و مکان هندسی بتن و قالب، از پودمان Assembly جهت سر هم بندی انجام می‌گردد (مطابق شکل ۷).

Printed using Abaqus/CAE on: Wed Jun 14 20:44:56 Iran Standard Time 2023

SIMULIA



شکل ۷: شکل نهایی در قسمت assembly

۴-۵- روش حل مساله (پودمان Step)

انتخاب تعیین مراحل مساله و نوع حلگر در پودمان استپ صورت می‌گیرد.

۴-۵-۱- تعریف حلگر شار گرمایی (Heat Transfer)

با توجه به فیزیک مسئله و وجود انتقال حرارت و حالت گذرا، می‌توان به تعریف Step از نوع شار گرمایی Heat Transfer و پاسخ

گذرا transient پرداخت. نوع تحلیل این پژوهش یک مسئله ترمودینامیکی و شبه استاتیکی می باشد. تحلیل به صورت غیر خطی، چون با زمان مرتبط بوده و زمان حل برابر با ۶۰ ثانیه است. اعمال بارگذاری در فرآیند شبه استاتیک در حد ممکن بصورت ملایم اعمال گردید. زمانی که تأثیرات اینرسی بسیار کم است در یک لحظه خاص از زمان، می توان مسئله را استاتیک فرض کرد. شبه استاتیک معمولاً برای مسائل غیرخطی بکار برده می شود.

۵-۵- بخش اتصال دهنده به مدل (پودمان Interaction)

برای اتصال بتن به قالب از نوع Tie استفاده گردید. با این روش سطوح متصل به یکدیگر مقید خواهند بود.

۵-۶- تعریف بارهای وارده (پودمان Load)

با توجه به صورت مسئله، شرایط مرزی را از پودمان load انتخاب و به سطح خارجی بتن ۱۱۰ درجه سانتی گراد دما و یک میدان دمایی با دمای اولیه ۵۵ درجه سانتی گراد در بتن اعمال می گردد تا در نتایج نرم افزار انتقال گرما در بتن بهتر بررسی شود. این عدهای وارد شده فقط برای مقایسه انتقال گرما از قالب به بتن می باشند.

۵-۷- المان بندی مدل (پودمان Mesh)

در روش شبه استاتیکی، همگرایی به طول بازه‌ی زمانی و المان‌ها وابسته بوده به صورتی که از یک گام زمانی تبعیت می کند. برای تعریف مش بندی بتن و قالب، از Hex, Structure که گزینه‌ی مناسبی برای مش بندی اعضای shell2D هستند، انتخاب می گردد. در کل شکل ترسیم شده ۸۸۳۶ المان و ۲۲۳۸۱ گره و نوع المان‌های قالب DC2D4, DC2D6, DC2D8 می باشند. المان بتن از نوع DC2D4 می باشد.

۵-۸- بررسی آنالیز

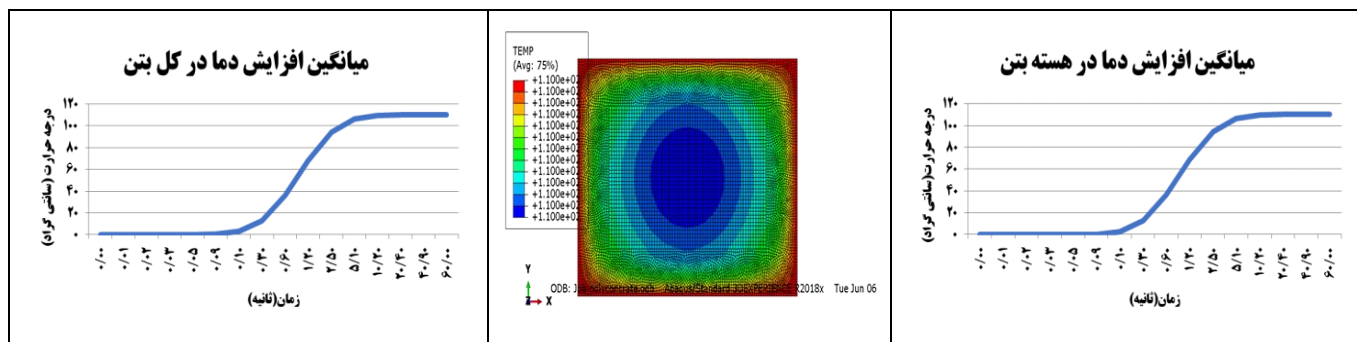
انجام و شروع حل مسئله به پردازش گر در پودمان Job انجام می گیرد. پس از پیغام Complete با استفاده از دکمه Result می توان به محیط Visualization رفته و نتایج حل مسئله را به بررسی نمود.

۵-۹- خروجی های نرم افزار آباکوس

براساس خروجی نرم افزار آباکوس دو نمودار میانگین افزایش دما از قالب به بتن براساس زمان - درجه حرارت بدست می آید که با دمای وارد شده ۱۱۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان ۶۰ ثانیه ترسیم شده است.

۱-۵-۹- قالب پلی پروپیلن (پلیمری)

مطابق نتایج دو شکل ۸ (الف) و ۸ (پ) به ترتیب افزایش دما در هسته و در کل بتن اعمال گردیده شد که با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می گردند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان گردی مواد بتن است. در قالب پلی پروپیلن افزایش دما از قالب به هسته بتن و کل بتن با تاخیر زمانی رخ می دهد و این تاخیر زمانی به هسته بتن فرصت می دهد، تا در همان سنین اولیه با حرارت و دما هیدراتاسیون کمتر به مقاومت اولیه و نهایی بیشتری برسد. در یک بازه زمانی مشخص اختلاف میانگین افزایش دما در کل بتن و هسته بتن حدود ۰/۶ درجه سانتی گراد متغیر است.



(پ)

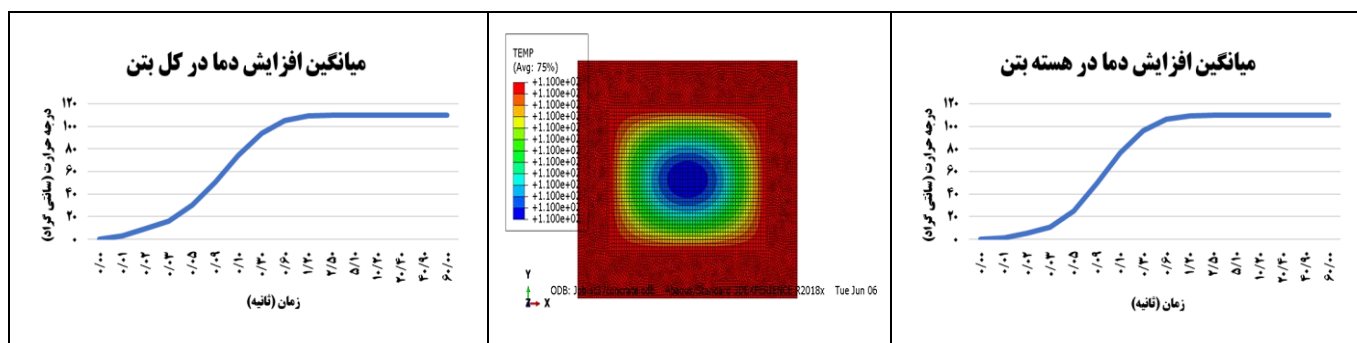
(ب)

(الف)

شکل ۸: الف) میانگین افزایش دما در هسته بتن ب) انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به بتن پ) میانگین افزایش دما در کل بتن

۹-۵-۲- قالب فولادی st37

مطابق نتایج دو شکل ۹ (ت) و ۹ (ج) به ترتیب افزایش دما در هسته و در کل بتن اعمال گردیده شد که با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می گردند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان گردی مواد بتن است. در قالب st37 افزایش دما از قالب به هسته و کل بتن با افزایش زمان رخ می دهد. این افزایش زمان به هسته و کل بتن باعث افت بتن در همان سنین اولیه، با حرارت و دما هیدراتاسیون بیشتر، کاهش و آسیب به مقاومت اولیه و نهایی بتن می شود. در یک بازه زمانی مشخص اختلاف میانگین افزایش دما در کل بتن و هسته بتن حدود ۰/۷ درجه سانتی گراد متغیر است.



(ج)

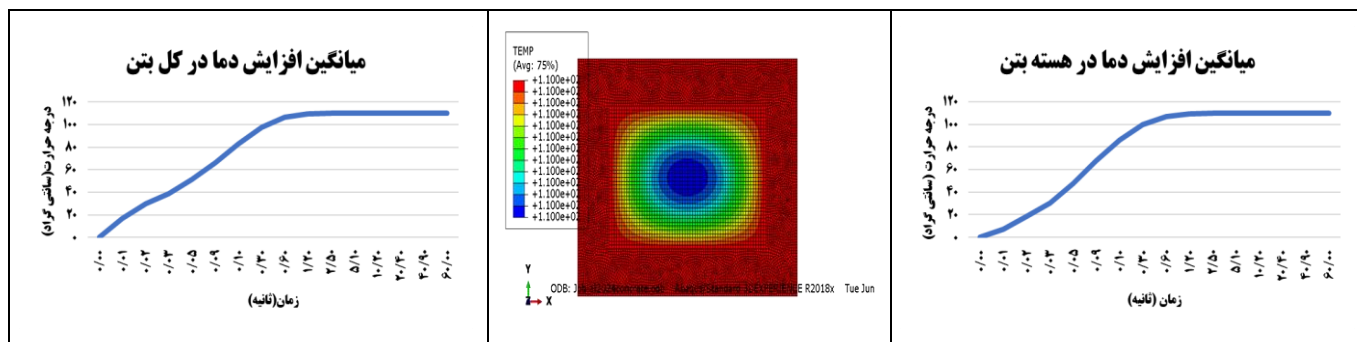
(ث)

(ت)

شکل ۹: ت) میانگین افزایش دما در هسته بتن ث) انتقال حرارت از قالب st37 به بتن ج) میانگین افزایش دما در کل بتن

۹-۵-۳- قالب مسی

مطابق نتایج دو شکل ۱۰ (چ) و ۱۰ (خ) به ترتیب افزایش دما در هسته و در کل بتن اعمال گردیده شد که با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می گردند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان گردی مواد بتن است. در قالب مسی افزایش دما از قالب به هسته و کل بتن با افزایش زمان رخ می دهد. این افزایش زمان به هسته و کل بتن باعث افت بتن در همان سنین اولیه، با حرارت و دما هیدراتاسیون بیشتر، کاهش و آسیب به مقاومت اولیه و نهایی بتن می شود. در یک بازه زمانی مشخص اختلاف میانگین افزایش دما در کل بتن با میانگین افزایش دما در هسته بتن حدود ۰/۵ درجه سانتی گراد متغیر است.



(خ)

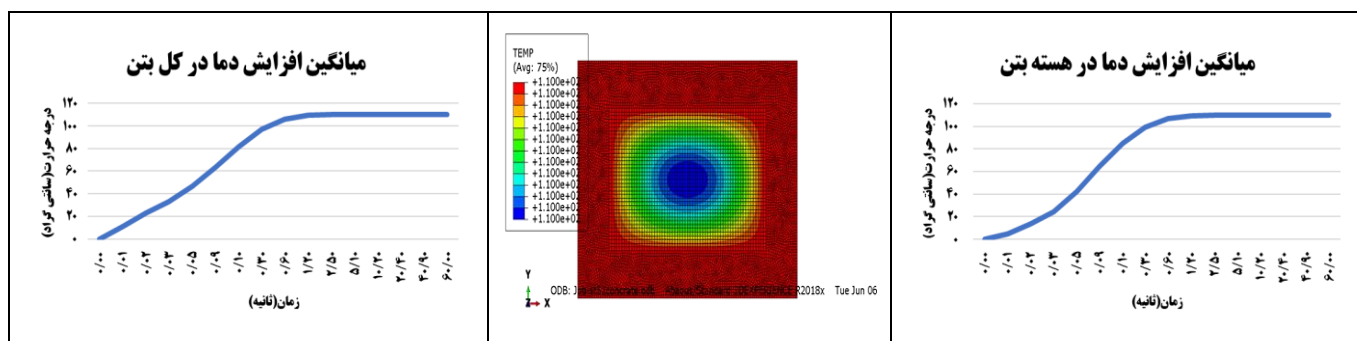
(ح)

(چ)

شکل ۹: میانگین افزایش دما در هسته بتن (چ) میانگین افزایش دما در کل بتن (خ) انتقال حرارت از قالب مس به بتن (ح)

۹-۵-۴- قالب آلومینیوم ۲۰۲۴ (AL2024)

مطابق نتایج دو شکل ۱۱ (د) و ۱۱ (ر) به ترتیب افزایش دما در هسته و در کل بتن اعمال گردیده شد که با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می گردند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان گردی مواد بتن است. در قالب آلومینیوم ۲۰۲۴ افزایش دما از قالب به هسته و کل بتن با افزایش زمان رخ می دهد. این افزایش زمان به هسته و کل بتن باعث افت بتن در همان سنین اولیه، با حرارت و دما هیدراتاسیون بیشتر، کاهش و آسیب به مقاومت اولیه و نهایی بتن می شود. در یک بازه زمانی مشخص اختلاف میانگین افزایش دما در کل بتن با میانگین افزایش دما در هسته بتن حدود $0/3$ درجه سانتی گراد متغیر است.



(ر)

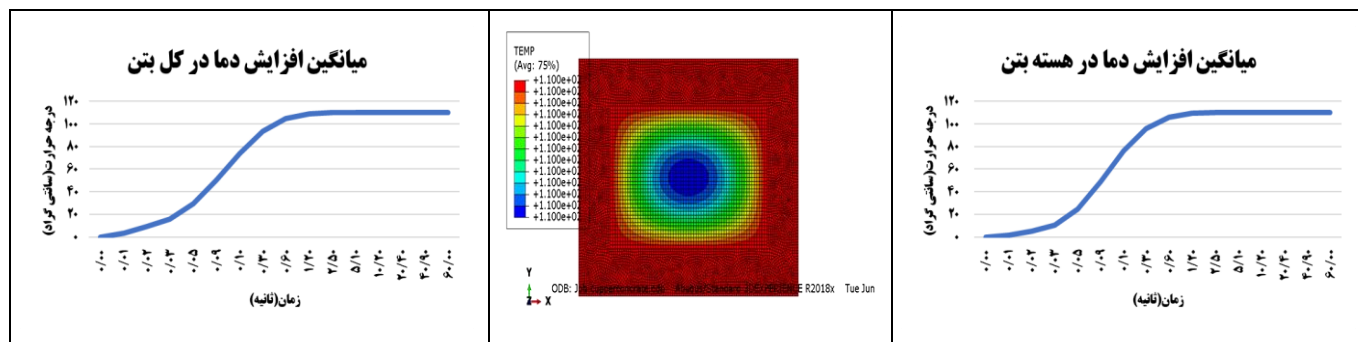
(ذ)

(د)

شکل ۱۱: میانگین افزایش دما در هسته بتن (ذ) انتقال حرارت از قالب AL2024 به بتن (ر) میانگین افزایش دما در کل بتن

۹-۵-۵- قالب فولادی st52

مطابق نتایج دو شکل ۱۲ (ز) و ۱۲ (س) به ترتیب افزایش دما در هسته و در کل بتن اعمال گردیده شد که با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می گردند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان گردی مواد بتن است. در قالب st52 افزایش دما از قالب به هسته و کل بتن با افزایش زمان رخ می دهد. این افزایش زمان به هسته و کل بتن باعث افت بتن در همان سنین اولیه، با حرارت و دما هیدراتاسیون بیشتر، کاهش و آسیب به مقاومت اولیه و نهایی بتن می شود. در یک بازه زمانی مشخص اختلاف میانگین افزایش دما در کل بتن با میانگین افزایش دما در هسته بتن حدود $0/8$ درجه سانتی گراد متغیر است.



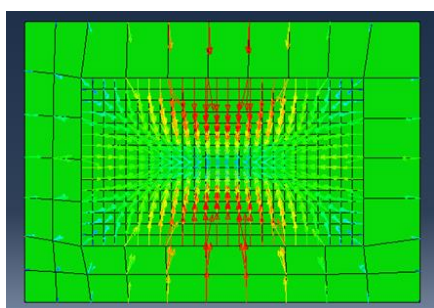
(س)

(ز)

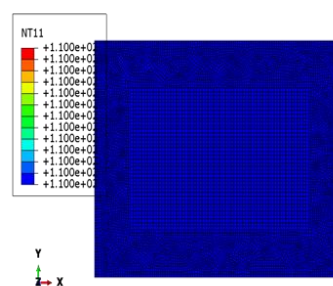
(ش)

شکل ۱۲: (ز) میانگین افزایش دما در هسته بتن (ژ) انتقال حرارت از قالب AL2024 به بتن (س) میانگین افزایش دما در کل بتن

مطابق شکل ۱۳ (ش) با افزایش دما با گذشت زمان دمای قالب و بتن هم دما می‌شوند. علت این موضوع همگن بودن یا همسان‌گردی مواد بتن است.



(ص)



(ش)

شکل ۱۳: (ش) هم دما شدن بتن با قالب با دمای وارد شده ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان ۶۰ ثانیه (ص) حرکت شار گرمایی (انتقال گرمایی) از قالب به بتن

۱۰-۵- جمع بندی نتایج عددی

نمودارهای افزایش دما، نشان دادند که انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به کل و هسته بتن نسبت به قالب‌های St52، آلومینیوم ۲۰۲۴، مس و St37 کاهش می‌یابد و تاثیر استفاده از این قالب بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم عواملی را همچون افزایش مقاومت فشاری بتن، افزایش دوام و طول عمر، افزایش مقاومت کششی، کاهش خزش، کاهش جمع شدگی، اثرگذاری بر نسبت مدولار و مدول الاستیسیته و مدول ارتجاعی، ضریب انبساط حرارتی، نسبت پواسون و تخلخل را متأثر می‌کند. رفتار کششی بتن وابسته به دما می‌باشد، به این ترتیب که مقاومت کششی حداکثر و سختی الاستیک بتن با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین در اعضای خمشی، در ناحیه‌ی انتقال کششی در بتن بر اثر دما، انتقال گرما و انتقال حرارت بالا باعث ترک خوردگی ایجاد می‌گردد [۲۳].

۶- روش کار به صورت آزمایشگاهی

۶-۱- طرح اختلاط

در مرحله‌ی اول می‌بایست برای رسیدن به یک طرح اختلاط بهینه و مناسب بتن خودتراکم، با مصالح مختلف سیمان، شن نخودی، شن بادامی، ماسه، آب، روان کننده، ژل میکروسیلیس، پودر سنگ به دفعات مکرر با سعی و خطا در شرایط محیطی مناسب و دمای نسبتاً گرم (حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد) انجام گردد (مطابق شکل ۱۴).



ماسه

سیمان پرتلند تیپ ۲

پودر سنگ



آب

ژل سیلیس

شن بادامی



شن نخودی

ابر روان کننده

شکل ۱۴: مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن خودتراکم

شن و ماسه مورد استفاده در این طرح اختلاط از عبدالخان خوزستان تهیه گردید. درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک این ماسه، به ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۲/۶۰ می‌باشد. همچنین از شن نخودی و بادامی عبدالخان خوزستان با درصد جذب آب و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک به ترتیب ۰/۶۵، ۲/۵۹ و ۰/۷۸، ۲/۷۰ استفاده گردید. تهیه مصالح مصرفی در این طرح مخلوط از

قبیل؛ آب شرب، ابر روان کننده POWER PLAST-ES و ژل میکروسیلیس MICRO GEL محصول آبادگران، پودر سنگ قم و سیمان پرتلند تیپ ۲ با مشخصات مندرج در جداول ۴ و ۵ که مورد استفاده قرار گرفته است (مطابق جدول ۶).

جدول ۴: مشخصات سیمان پرتلند تیپ ۲

تحلیل شیمیایی درصد	IR	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	O+Na	K ₂ O	LOI	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Cao
۰/۲۴	۲۱/۶۸	۴/۸۲	۳/۸۸	۶۵/۴۰	۲/۰۸	۰/۶۸	۰/۲۵	۰/۱۸۸	۰/۲۰	۶۰/۶۳	۱۶/۴۶	۶/۲۱	۱۱/۸۰	۰/۷۰	

جدول ۵: مشخصات مکانیکی سیمان پرتلند تیپ ۲

مشخصات میزان	ظرافت بلین (cm ² /g)(BF)	زمان تنظیم اولیه (دقیقه)(IST)	زمان تنظیم نهایی (دقیقه)(FST)	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)
۳۲۲۰	۱۵۵	۲۷۰	۲۴۰	۳۰۰	۴۴۶	

جدول ۶: طرح اختلاط بهینه بتن خودتراکم [۲۴].

سیمان (Kg)	شن نخودی (Kg)	شن بادامی (Kg)	ماسه (Kg)	آب (Kg)	ابر روان کننده (g)	ژل سیلیس (g)	پودر سنگ (Kg)
۱۲۴۵۰	۸۵۰۰	۳۶۰۰	۳۳۹۰۰	۵۱۲۰	۱۵۵	۳۰۵	۷۸۵۰

۲-۶- ساخت و عمل آوری بتن خودتراکم

در مدت زمان ۱۵ دقیقه ترکیبات ذکر شده را در پن میکسر مخلوط می‌گردند (مطابق شکل ۱۵). سپس بتن تازه را در دو نوع قالب مکعبی (پلی پروپیلن و فولادی) با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری قالب‌گیری می‌شوند (مطابق شکل ۱۶). مجموعاً ۵۰ نمونه بتن در قالب مکعبی پلی پروپیلن و ۵۰ نمونه بتن در قالب مکعبی فولادی پر می‌کنیم. جهت عمل آوری نمونه‌ها در مدت زمان ۷ روزه و ۲۸ روزه در حوضچه‌ی آب نگهداری می‌شوند (نسبت آب به سیمان $\frac{W}{C}$: ۰.۴۱). (قالب مسی و قالب آلومینیومی به دلیل گرانی در بازار، عدم دسترسی و اقتصادی نبودن آن‌ها در کار و پروژه‌های عمرانی و عظیم مورد پذیرش و استفاده نمی‌باشد).



شکل ۱۵: ساخت بتن خودتراکم با اضافه نمودن مصالح در پن میکسر



(ض)

(ط)

شکل ۱۶: (ض) قالب فولادی (st37) و قالب پلی پروپیلن (ط) قالب گیری بتن خودتراکم در قالب فولادی (st37) و قالب پلی پروپیلن

۳-۶- اندازه گیری دمای بتن خودتراکم

با استفاده از دماسنج دیجیتال دمای اولیه بتن های تازه را از لحظه ریختن در قالبها اندازه گیری و ثبت نموده (مطابق شکل ۱۷) و هر ۳ ساعت دمای محیط داخلی قالب را تا مدت ۲۴ ساعت ثبت گردید^۳ (ساعت قالب گیری بتن ۱۲/۳۰ ظهر) (مطابق جداول ۷ و ۸).



(ع)



(ظ)

شکل ۱۷: (ظ) اندازه گیری دمای اولیه بتن تازه توسط دماسنج دیجیتال (ع) دماسنج تابشی حرارتی

جدول ۷: میانگین دماهای داخلی قالب پلی پروپیلن بر حسب سانتی گراد

دمای لحظه اولیه قالب	۳ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۶ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۹ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۲ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۵ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۸ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۲۱ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۲۴ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه
۳۰/۸	۳۳/۶	۳۰/۵	۲۶/۳	۲۲/۴	۱۸/۶	۱۹/۲	۲۵/۹	۳۳/۱

جدول ۸: میانگین دماهای داخلی قالب فولادی بر حسب سانتی گراد

دمای لحظه اولیه قالب	۳ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۶ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۹ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۲ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۵ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۱۸ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۲۱ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه	۲۴ ساعت بعد از دمای لحظه اولیه
۴۰/۲	۵۶/۳	۴۵/۶	۳۷/۲	۲۹/۸	۲۳/۳	۲۴/۱	۳۰/۸	۴۲/۸

۴-۶- شکست بتن خودتراکم با دستگاه مقاومت فشاری تک محوره

بعد از ۲۴ ساعت بتن ها از قالب خارج شده و در حوضچه ای آب جهت عمل آوری به مدت زمان ۷ روزه و ۲۸ روزه قرار می گیرند. نتایج حاصل شده از شکل ۱۸ نشان داد باتوجه به نمونه های بتن خودتراکم خارج شده از قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی مطابق گویای این است که انتقال حرارت کمتر از قالب پلی پروپیلن به بتن باعث سطحی صاف، بدون خلل و فرج شد و نسبت به قالب فولادی که انتقال حرارت بیشتری به بتن منتقل کرده باعث سطحی ناصاف و با خلل و فرج شده است. مطابق شکست های ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن با دستگاه جک بتن شکن بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن نسبت به بتن خودتراکم در قالب فولادی مقاومت فشاری بیشتری را کسب گردید (مطابق شکل ۱۹ و جداول ۹ و ۱۰).

^۳ فرضیات: تغییرات باد و رطوبت نسبی خنثی فرض شده است.



شکل ۱۸: نمونه بتن خودتراکم خارج شده از قالب پلی پروپیلین و قالب فولادی



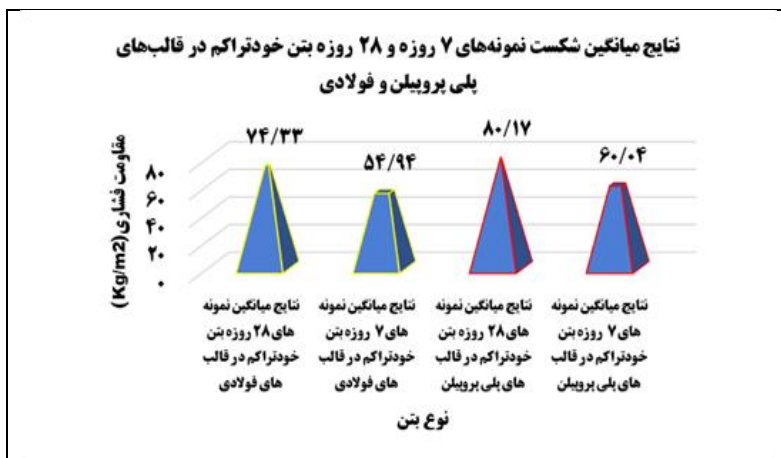
شکل ۱۹: نمونه‌های بتن خودتراکم ساخته شده و شکست نمونه بتن مکعبی با دستگاه مقاومت فشاری تک محوره

جدول ۹: نتایج شکست نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن خودتراکم در قالب‌های پلی پروپیلین بر حسب (Kg/m^2)

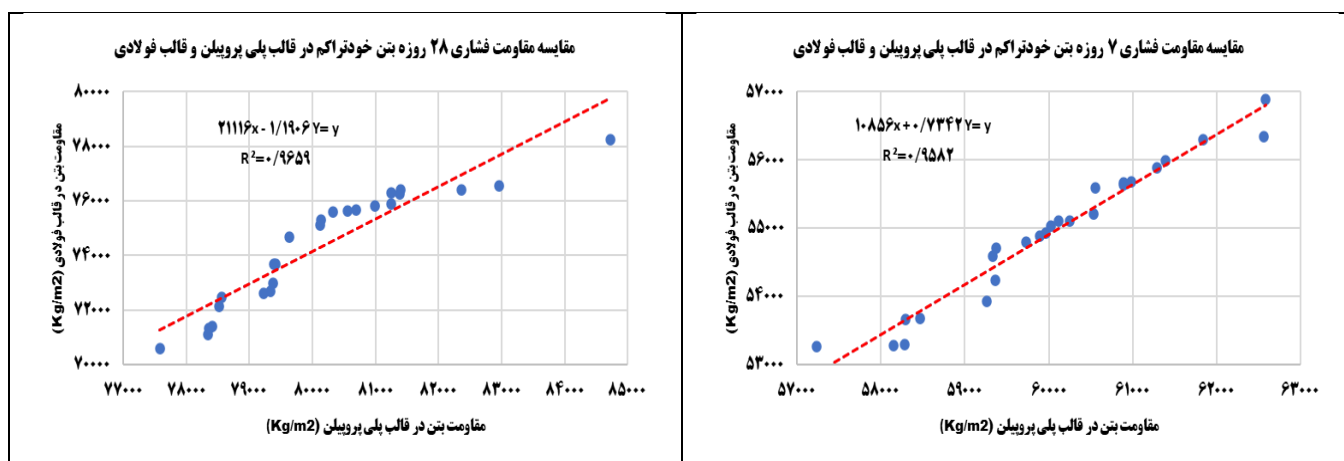
شماره	شکست ۷ روزه					شکست ۲۸ روزه				
۱	۶۰۸۹۲	۶۱۳۹۲	۵۹۲۶۱	۶۰۰۲۱	۵۹۸۸۷	۸۱۳۹۰	۸۲۹۵۶	۸۰۱۱۹	۸۰۹۸۶	۸۱۲۵۳
۲	۵۸۲۹۶	۶۰۵۲۸	۵۹۳۳۶	۵۷۲۳۱	۶۱۲۸۶	۷۹۶۳۲	۷۹۳۹۲	۷۸۳۳۹	۷۹۳۳۶	۷۹۲۲۶
۳	۵۸۱۵۲	۶۰۵۵۲	۶۰۱۱۰	۶۰۹۸۲	۵۹۳۶۹	۷۸۴۱۳	۷۸۵۶۲	۷۹۴۱۳	۷۸۵۲۳	۸۰۶۹۲
۴	۵۹۹۶۳	۵۹۳۶۰	۵۹۷۲۹	۵۸۲۸۰	۶۲۵۸۲	۷۸۳۶۲	۸۱۲۵۰	۸۱۳۹۵	۸۰۱۴۲	۸۴۷۲۹
۵	۶۲۵۵۶	۶۰۲۵۰	۶۱۸۳۱	۵۸۴۶۳	۶۰۸۹۳	۷۷۵۸۰	۷۹۳۶۹	۸۰۳۲۸	۸۲۳۶۰	۸۰۵۵۳
	میانگین کل ۲۵ نمونه ۷ روزه: ۶۰/۰۴					میانگین کل ۲۵ نمونه ۲۸ روزه: ۸۰/۱۷				

جدول ۱۰: نتایج شکست نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن خودتراکم در قالب‌های فولادی بر حسب (Kg/m^2)

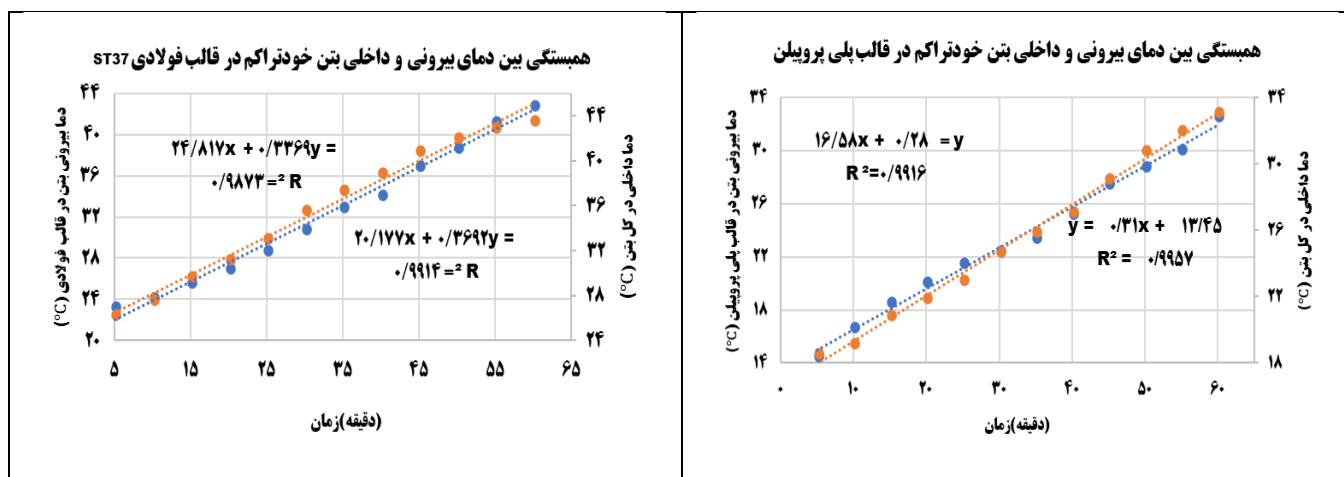
شماره	شکست ۷ روزه					شکست ۲۸ روزه				
۱	۵۵۸۹۰	۵۴۲۳۶	۵۵۶۶۰	۵۳۲۵۸	۵۳۲۸۵	۷۵۶۲۰	۷۳۶۶۹	۷۴۶۶۳	۷۱۳۰۹	۷۱۴۰۹
۲	۵۴۹۲۰	۵۵۱۰۸	۵۵۰۲۲	۵۵۲۱۰	۵۶۸۹۲	۷۶۳۹۵	۷۶۵۵۲	۷۶۲۸۲	۷۳۶۶۷	۷۸۲۵۸
۳	۵۵۵۹۶	۵۴۸۸۹	۵۵۹۹۳	۵۵۶۸۰	۵۴۷۹۲	۷۵۸۲۵	۷۵۶۰۰	۷۵۸۸۳	۷۶۲۵۸	۷۲۵۹۳
۴	۵۶۲۹۰	۵۵۱۱۰	۵۴۵۸۱	۵۳۶۶۹	۵۳۹۲۵	۷۵۶۶۲	۷۵۳۰۸	۷۲۹۹۲	۷۱۰۸۵	۷۰۵۹۳
۵	۵۳۲۸۰	۵۶۳۳۷	۵۳۶۶۰	۵۵۶۴۰	۵۴۷۰۳	۷۶۳۹۹	۷۵۱۱۳	۷۲۱۱۶	۷۲۴۶۵	۷۲۶۹۰
	میانگین کل ۲۵ نمونه ۷ روزه: ۵۴/۹۴					میانگین کل ۲۵ نمونه ۲۸ روزه: ۷۴/۳۳				



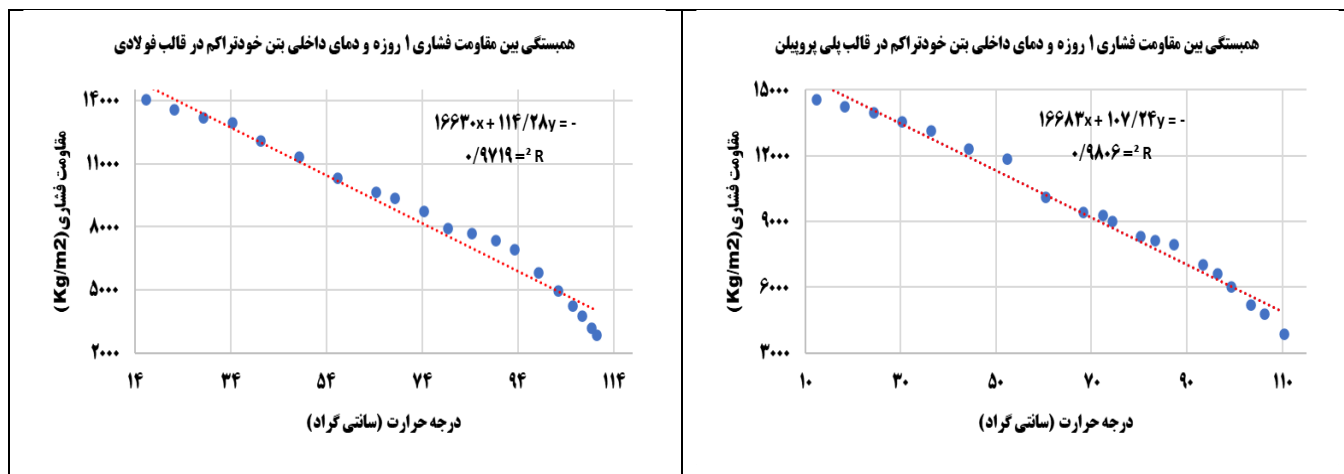
شکل ۲۰: نتایج میانگین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن خودتراکم با دو قالب فولادی و پلی پروپیلن



شکل ۲۱: مقایسه نتایج کل مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن خودتراکم با دو قالب فولادی و پلی پروپیلن



شکل ۲۲: رابطه همبستگی نتایج آزمایشگاه با نرم افزار آباکوس



شکل ۲۳: رابطه همبستگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۱ روزه بتن خودتراکم با نرم افزار آباکوس

۵-۶- جمع بندی نتایج آزمایشگاهی

۱- مطابق شکل ۲۰ و ۲۱ میانگین نتایج و نتایج کل مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن نسبت به بتن در قالب فولادی St37 طی عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه مقایسه شد که ضریب همبستگی مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن خودتراکم در شکل ۲۱ با دو قالب فولادی و پلی پروپیلن به ترتیب 0.9582 و 0.9659 شد و مطابق شکل ۲۰ میانگین نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن نسبت به بتن در قالب فولادی St37 طی عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه $8/49$ درصد و $7/28$ درصد افزایش یافت. به دلیل اینکه بتن خودتراکم نسبت به حرارت حساس است، مقاومت بتن در قالب پلی پروپیلن نسبت به قالب فولادی مطابق درصدها افزایش یافت و همچنین سیمان مورد نظر به دلیل هیدراتاسیون در دمای هوای نسبتاً گرم، دمای بتن را بالا می‌برد این مورد باعث ضعف در اترینگایت سیمان شده و بتن در قالب فولادی به مقاومت نهایی نخواهد رسید.

۲- مطابق شکل ۲۲ رابطه همبستگی نتایج دمای اندازه‌گیری شده بیرونی بتن خودتراکم در آزمایشگاه مطابق جدول ۷ و ۸ با نتایج زمان - حرارت (دمای داخلی کل بتن) در نرم افزار آباکوس برای دو قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی ایجاد گردید که نشان داد با افزایش دما بر قالبها در یک بازه زمانی مشخص دمای بیرونی و داخلی بتن خودتراکم هم دما شده و دمای بیرونی و داخلی بتن در قالب پلی پروپیلن از ابتدا تا انتها به ترتیب 25% و 9% و میزان اختلاف دمای بیرونی و داخلی بتن در قالب فولادی از ابتدا تا انتها به ترتیب 12% و 7% اختلاف دارند و این نزدیک شدن دمای بیرونی و داخلی بتن با افزایش دما نشان دهنده ایجاد همبستگی بین نتایج مذکور است و ضریب همبستگی نتایج آزمایشگاه با نرم افزار آباکوس بین دمای داخلی و بیرونی بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی 0.9916 و 0.9873 شد.

۳- برای ایجاد رابطه همبستگی بین نتایج آباکوس و مقاومت فشاری بتن خودتراکم لازم به ذکر است بتن خودتراکم تازه را در دو قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی قالب گیری نموده و نمونه‌های بتن را در آن مطابق با نتایج آباکوس که دمای داخلی کل بتن را برای هر دو قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی نیز آنالیز گردید، تنظیم نموده و پس از ۲۴ ساعت قالبها را از آن خارج گردید و آزمایش مقاومت فشاری ۱ روزه را با دستگاه مقاومت فشاری تک محوره انجام و نتایج ثبت گردید. به دلیل اینکه بتن در قالب به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و عملیاتی از قبیل تغییرات دما، گرمای هیدراتاسیون، خواص حرارتی بتن، انتقال حرارت از قالب به بتن، و غیره که به طور قابل توجهی بر پایداری و دوام بتن اثرگذار هستند. مقاومت فشاری ۱ روزه بتن خودتراکم انجام گردید و نتایج مطابق شکل ۲۳ نشان داد که باتوجه به افزایش حرارت در دو قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی میزان مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. رابطه ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری ۱ روزه و دمای داخلی بتن خودتراکم با نرم افزار آباکوس در قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی به ترتیب 0.9806 و 0.9719 شد.

جدول ۱۱: دمای تنظیم شده دستگاه آون مطابق نتایج آباکوس و مقاومت فشاری آروزه بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی

مقاومت فشاری آروزه بتن خودتراکم در قالب پلی پروپیلن (Kg/m^2)																				
۱۱۰	۱۰۶	۱۰۳	۹۹	۹۶	۹۳	۸۷	۸۳	۸۰	۷۴	۷۲	۶۸	۶۰	۵۲	۴۴	۳۶	۳۰	۲۴	۱۸	۱۲	دمای دستگاه آون ($^{\circ}\text{C}$)
۳۸۵۰	۴۷۶۰	۵۲۰۰	۶۰۰۰	۶۶۰۰	۷۰۲۰	۷۹۶۰	۸۱۳۰	۸۳۰۰	۹۰۰۰	۹۲۶۰	۹۴۰۰	۱۰۱۰۰	۱۱۸۵۰	۱۳۳۱۰	۱۳۱۵۰	۱۳۵۵۰	۱۳۹۸۰	۱۴۲۳۰	۱۴۵۵۰	مقاومت فشاری آروزه

مقاومت فشاری آروزه بتن خودتراکم در قالب فولادی (Kg/m^2)																				
۱۱۰	۱۰۹	۱۰۵	۱۰۲	۹۹	۹۵	۹۰	۸۶	۸۴	۷۹	۷۴	۶۸	۶۴	۵۶	۴۸	۴۰	۳۴	۲۸	۲۲	۱۶	دمای دستگاه آون ($^{\circ}\text{C}$)
۳۸۹۰	۳۴۱۰	۳۸۴۰	۴۶۵۰	۵۲۸۰	۵۸۲۰	۶۹۲۰	۷۳۲۰	۷۶۷۰	۷۹۰۰	۸۷۱۰	۹۳۶۰	۹۶۳۰	۱۰۳۰۰	۱۱۳۰۰	۱۲۰۸۰	۱۲۹۵۰	۱۳۱۶۰	۱۳۵۶۰	۱۴۰۲۰	مقاومت فشاری آروزه

۷- نتیجه گیری

بر اساس تحلیل آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با نرم افزار آباکوس، با توجه به بررسی انتقال حرارت از قالبها به بتن خودتراکم و تاثیر آن بر نتیجه مقاومت و خواص تازه بتن مقایسه آزمایشگاهی و تحلیل عددی انتقال حرارت از قالبها به بتن خودتراکم با توجه به دادههای اندازه گیری شده می توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- طبق نتایج عددی انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به محیط کلی بتن خودتراکم نسبت به قالب فولادی St37 حدود ۶۱/۵۰ درصد کاهش یافت.

۲- طبق نتایج عددی انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به هسته مرکزی بتن خودتراکم نسبت به قالب فولادی St37 حدود ۶۲/۶۶ درصد کاهش یافت.

۳- در دمای ۱۱۰ سانتی گراد هم دما شدن قالب پلی پروپیلن با بتن در بازه زمانی ۵/۴۰ ثانیه ایجاد گردید و نسبت به قالب فولادی که در بازه زمانی ۱/۲۹ ثانیه به ۱۱۰ سانتی گراد صورت گرفت. این انتقال با تاخیر زمانی در قالب پلی پروپیلن می تواند به بتن فرصت دهد که باعث افزایش مقاومت اولیه و نهایی شود.

۴- میانگین مقاومت فشاری نهایی طبق نتایج شکست از دستگاه فشاری تک محوره، بتن در قالب پلی پروپیلن نسبت به بتن در قالب فولادی St37 طی عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه ۸/۴۹ درصد و ۷/۲۸ درصد افزایش یافت.

۵- شیب انتقال حرارت در نمودار زمان - درجه حرارت در قالب پلی پروپیلن نسبت به قالب فولادی St37 حدود ۴۱/۹۸ درصد کاهش یافت.

۶- نتایج حرارت دو قالب از نرم افزار آباکوس و نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری آروزه بتن خودتراکم با افزایش حرارت در دو قالب پلی پروپیلن و قالب فولادی میزان مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد اما مقاومت فشاری در دمای ۲۰ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد بتن در قالب پلی پروپیلن نسبت به قالب فولادی St37 به ترتیب ۱/۰۳ و ۱/۵ افزایش داشت.

انتقال حرارت برحسب شار گرمایی از قالب به بتن ارائه شد، با استفاده از مدل های عددی نشان داده شده از نمودار زمان - درجه حرارت ضریب همبستگی (R) بتن در قالب های پلی پروپیلن، مس، آلومینیوم ۲۰۲۴، St37، St52، برابر ۰/۸۵۰۰، ۰/۸۳۳۲۷، ۰/۸۳۶۳، ۰/۸۴۶۶ و ۰/۸۴۶۱ می باشند همچنین ضریب تعیین (R^2) بتن در قالب های پلی پروپیلن، مس، آلومینیوم ۲۰۲۴، St37، St52، برابر ۰/۸۶۰۴، ۰/۸۳۸۲، ۰/۸۴۱۴، ۰/۸۳۸۵ و ۰/۸۳۷۹ هستند. نتایج خروجی نشان داده شده از ضریب همبستگی نمونه ها، به خوبی با نتایج آزمون اتحاد دارد و کاملاً معقول است. انتقال حرارت از قالب های فولادی و پلی پروپیلن به بتن با مدلی عددی حاصل شده از نرم افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد و حداکثر خطا بیش از ۵٪ نیست که نشان داد پیش بینی مدل امکان پذیر بوده و انتقال حرارت در بتن دقیق است. افزایش دما و تاثیر آن به هنگام قرارگیری بتن خودتراکم تازه در قالبها، این مطالعه را برای مقایسه قالب پلی پروپیلن نسبت به سایر

قالبها و تاثیر مستقیم آن بر مقاومت فشاری بتن برای ساخت و ساز با کیفیت بالا پیشنهاد کردیم. تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بر روی انتقال حرارت، انجام شد. حرارت و تغییرات دمایی با انواع قالبها بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم و نتیجه‌ی مطلوب انتقال حرارت از قالب پلی پروپیلن به بتن نسبت به سایر قالبها را مورد بررسی قرار گرفت.

مراجع

- [1] Zeng .H, Lu .C, Zhang. L, Yang. T, Jin. M , Ma. Y, Liu. J,(2022), Prediction of Temperature Distribution in Concrete under Variable Environmental Factors through a Three-Dimensional Heat Transfer Model, *Materials (Basel)* , 15(4), 1510.
- [2] Saetta, A., Scotta, R. Vitaliani, R.(1995), Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads. *Journal of Structural Engineering*, Volume 121 Issue 3, 446–457.
- [3] Liu, Z. Zhang, J.(2006) study on the convective heat transfer coefficient of concrete in wind tunnel experiment. *Journal China Civ. Eng ResearchGate. J. Issue 9*, 39–42,- 61.
- [4] Xiao, J. Song, Z. (2010) Analysis of solar temperature action for concrete structure based on meteorological parameters. *China Civ. Eng. J*, 43, 30–36.
- [5] John A. Duffie, William A. Beckman, Blair. N,(2020) *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, USA, John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, 928 Pages.
- [6] Schindler, A. Ruiz, J. Rasmussen, R. Chang, G. Wathne, L.(2004) Concrete pavement temperature prediction and case studies with the FHWA HIPERPAV models. *journal ISSN 0958-9465. Concr. Compos*, 26, 463–471.
- [7] Cho, B. Park, D. Kim, J. Hamasaki, H.(2017) Study on the heat-moisture transfer in concrete under real environment. *Constr. Build. Mater*, 132, 124–129.
- [8] Benkhaled, M. Ouldboukhite, S.-E. Bakkour, A. Amziane, S.(2021)A 1D Model for Predicting Heat and Moisture Transfer through a Hemp-Concrete Wall Using the Finite-Element Method. *Materials*, 14, 6903.
- [9] Qian, G. He, Z. Yu, H. Gong, X. Sun, J.(2020) Research on the affecting factors and characteristic of asphalt mixture temperature field during compaction. *Constr. Build. Mater*, 257, 119509.
- [10] Shen, Y. Lv, Y. Yang, H. Ma, W. Zhang, L. Pan, J. (2022). Effect of different ice contents on heat transfer and mechanical properties of concrete. *Cold Regions Science and Technology*. Volume 199, 103-570.
- [11] Wang, Y. Zhu, J. Sun, Y. (2023). Multi-scale modeling and simulation of bidirectional coupled moisture and heat transfer in concrete. *Journal of Building Engineering*. Volume 74.106-856.
- [12] Guo, Y. Liu, Y. Wang, W. Zhang, Y. Wang, Z. Jiang, L. (2020). A study on heat transfer performance of recycled aggregate thermal insulation concrete. *Journal of Building Engineering*. Volume 32.101-797.
- [13] Tu, J. Wang, Y. Zhou, M. Zhang, Y. (2021). Heat transfer mechanism of glazed hollow bead insulation concrete. *Journal of Building Engineering*. Volume 40. 102-629.
- [14] Marzak, M, E. Ben Aicha, M. Lamrani, B. Alaoui, A, H. (2022). Analysis of the heat transfer time in rubber aggregate concrete as a function of humidity percentage at very high temperature. *Materials Today, Proceedings*. Volume 57. Pages 786-792.
- [15] Rezaei Talebi, H. Anak Kayan, B. Asadi, I. Fitri Bin Abu Hassan, Z.(2020). Investigation of Thermal Properties of Normal Weight Concrete for Different Strength Classes. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. Volume 8, Issue 3, Pages: 908-914
- [16] Qolipourazim, A, Afshin, H, Charhtab Basim, M.(2021) Investigating the effects of using liquid nitrogen on the properties of concrete in hot air concreting. *Scientific-Research Journal of Structural and Construction Engineering*, Volume, 8, No, 278-291.
- [17] Dicleli M, Bruneau M.(1995) Seismic performance of single-span simply supported and continuous slab-on-girder steel highway bridges. *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 121(10): 1497-1506.
- [18] AASHTO. (2007) *LRFD bridge design specifications (4th ed.)*. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.

- [19] Chopra AK. (2001) Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (2nd ed.), Prentice Hall, Englewood Cliffs, .
- [20] Li, W. Lin, X. Wen Bao, D. Min Xie, Y.(2022) A review of formwork systems for modern concrete construction, Journals Structures Volume 38, April, Pages 52-63.
- [21] Encyclopaedia of Ahanalat, Ahan Mills, published on November 27, (2021), and concrete molding; Its types and characteristics, Farnaz Bayria.
- [22]ny-engineers, March 8, (2019),Types of Formwork for Concrete Structures, Nick Natsoulis.
- [23]Rezaie.f , Sayad Sedgh Herfeh. n, (2023), scientific-research journal of structural and construction engineering, volume 10, number 2, pages 232 to 253.
- [24]Dadpur. A. (2016) Laboratory investigation of the effect of granulation and volume ratio of coarse grains on fresh properties of self-compacting concrete. the coach. Master's Degree in Engineering and Construction Management of Khatam Al Anbia University of Technology.