

Investigation and extraction of compressive strengths of concrete containing zeolite and bentonite, according to the dimensions and type of samples (cubic and cylindrical) at different temperatures

Ahlam Aljenabi¹, Majid Gholhaki^{1,2}, Omid Rezaifar³

1- M.Sc. graduate, Faculty of civil engineering, Semnan University, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran

3-Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Iran

ABSTRACT

Cement production is one of the major pollution contributors owing to its large rates of energy consumption and gas emission. Moreover, high temperatures could detrimentally impact the concrete infrastructure and thus, it would be essential to study performance of such structures under exposure to the elevated temperatures. In this paper, post-heat performance of the concrete whose cement has been replaced by zeolite and bentonite at ratios of 6 and 10% (by cement weight) under exposure to temperatures of 28, 150, 300 and 700°C, was studied. For this purpose, cubic specimens with sizes of 100×100×100, 150×150×150 and 200×200×200mm and cylindrical specimens with sizes of 200×100 and 300×150mm, were produced. Based on the results, replacing cement by zeolite and bentonite at the age of 90 days under ambient temperature, increases the compressive strength compared to the control specimen. Moreover, it was observed that heating the cubic and cylindrical specimens containing 10% bentonite at 150°C, increase the compressive strength by 40%. Conversely, the results indicate that when exposed to temperatures of 300 and 700°C, a decreasing trend is seen in the tensile strength of both cubic and cylindrical specimens containing the pozzolans. Besides, to study micro-structure of the specimens, the X-ray diffraction tests were carried out on the specimens at the age of 28 days. The difference between conversion ratio of the cubic and cylindrical specimens in this study, to the values provided by the codes, is less than 10%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 September 2021

Revise Date: 30 November 2021

Accept Date: 03 February 2022

Keywords:

Bentonite

Zeolite

Supplementary Cementing Materials

Temperature

Compressive Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.303890.2566>

*Corresponding author: Majid Gholhaki.

Email address: mgholhaki@semnan.ac.ir

بررسی و استخراج نسبت مقاومت‌های فشاری بتن‌های حاوی زئولیت و بنتونیت، بر حسب ابعاد و نوع نمونه‌ها (مکعبی و استوانه‌ای) در دماهای مختلف

احلام الجنابی^۱، مجید قلهکی^{۲*}، امید رضایی فر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

تولید سیمان یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی محیط زیست و دماهای بالا یکی از عوامل آسیب به سازه‌های بتنی می‌باشد. در این مقاله تاثیر جایگزینی زئولیت (۶ و ۱۰ درصد وزنی سیمان) و بنتونیت (۶ و ۱۰ درصد وزنی سیمان) در ابعاد و اشکال مختلف (استوانه‌ای و مکعبی) و در دماهای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بر مشخصات مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد مورد بررسی برای نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰، ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ و ۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و برای نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ و ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با زئولیت و بنتونیت در سن ۹۰ روز و در دمای محیط سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بتن معمولی می‌شود. این بررسی در دماهای مختلف نشان می‌دهد که با حرارت دادن به نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای حاوی ۱۰ درصد بنتونیت در دمای ۱۵۰ درجه سبب افزایش ۴۰ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه حرارت‌ندیده نظیر خود شده است. دمای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب حدوداً ۱۰ و ۷۸ درصد سبب کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های استوانه‌ای حاوی مواد پوزولانی شده است. تحلیل *xrd* بر روی نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روز انجام شده است. اختلاف ضریب تبدیل نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در این پژوهش نسبت به ضرایب آیین‌نامه کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: بنتونیت، زئولیت، مواد مکمل سیمانی، دما، مقاومت فشاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.303890.2566	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.303890.2566	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۱۴	۱۴۰۰/۱۱/۱۴	۱۴۰۰/۰۹/۰۹	۱۴۰۰/۰۶/۱۷
				*نویسنده مسئول:		
				مجدید قلهکی		
				mgholhaki@semnan.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین مواد در جهان می‌باشد که از ترکیب سیمان، آب و سنگدانه‌ها تولید می‌شود. از نظر هزینه و هم از نظر تأثیرات زیست محیطی، سیمان عنصری مهم بوده که این ماده در یک فرآیند پیچیده از جمله عملیات حرارتی تا دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و انتشار تقریباً ۷۱۰ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای CO₂ در هر تن سیمان پرتلند تولید می‌شود [۱]. به منظور کاهش انتشار گاز CO₂ در طول تولید بتن یافتن جایگزین مناسب برای سیمان امری ضروری است. یکی از روش‌های مناسب جهت کاهش اثرات منفی مربوط به این ساخت و ساز، جایگزینی نسبی سیمان پرتلند توسط مواد شبه سیمانی مناسب می‌باشد. این مواد در هیدراتاسیون سیمان شرکت کرده و از این طریق، از سختی بتن پشتیبانی می‌کنند. به مخلوط‌هایی که این خصوصیات را نشان می‌دهند مواد سیمانی تکمیلی (SCM) گفته می‌شود. متداول‌ترین SCMها، محصولات جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی و بخار سیلیس می‌باشد که این مواد دسترسی محدودی دارند که تقاضای مواد جایگزین را افزایش می‌دهند [۲]. استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن به عنوان یک راه حل بهینه برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش منابع انرژی و مصرف سیمان بوده که یکی از مرسوم‌ترین روش‌های جایگزینی سیمان، استفاده از پوزولان‌های طبیعی می‌باشند. مصرف پوزولان‌ها در صنعت ساخت و ساز به حدی افزایش یافته است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی این مواد در آیین‌نامه‌های روز دنیا نیز ارائه شده است [۳]. زئولیت و بنتونیت جز مواد پوزولانی طبیعی می‌باشند که منابع عمده آن در استان سمنان می‌باشد. زئولیت و بنتونیت سرشار از Al₂O₃ و SiO₂ می‌باشند که با Ca(OH)₂ وارد واکنش شده و زل C-S-H و آلومینات‌ها را تشکیل می‌دهند. این مواد سازگار با محیط زیست بوده و با گذشت زمان عملکرد و دوام بالایی از خود نشان می‌دهند [۴]. سازه‌ها علاوه بر آن که باید در برابر زلزله و باد مقاوم باشند، به مقاومت در برابر آتش‌سوزی نیز باید توجه شود. آتش‌سوزی در صورت وقوع ممکن است خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری را در سازه ایجاد کند بنابراین درک درست از رفتار بتن در دماهای بالا بسیار با اهمیت می‌باشد.

در سال‌های اخیر محققان زیادی به بررسی تاثیر مواد پوزولانی بر خصوصیات مکانیکی بتن پرداختند. در سال ۲۰۱۹ رحمان و همکاران به بررسی تاثیر بنتونیت حرارت‌دیده بر خواص مکانیکی بتن پرداختند. در این مطالعه از بنتونیت صفر، ده، پانزده، بیست، بیست و پنج، سی و سی و پنج درصد برای جایگزینی وزنی سیمان پرتلند استفاده شد. تست‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی با دو سری بنتونیت خام و حرارت‌دیده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی نشان داد که بتن حاوی بنتونیت عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. استفاده از فعال‌سازی حرارتی می‌تواند باعث افزایش سطح اختلاط بنتونیت در بتن شود. در نمونه‌های خام درصد بهینه بنتونیت ۱۰-۱۵٪ بوده ولی در بنتونیت حرارت‌دیده این درصد جایگزینی به ۱۵-۲۰٪ افزایش یافته است [۵]. در سال ۲۰۲۰ رضایی‌فر و همکاران اثر استفاده از بنتونیت سمنان و کائولن را به عنوان جایگزینی جزئی سیمان در بتن‌های کم مقاومت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اگر مقدار بنتونیت و کائولن بیش از ۲/۷٪ وزن سیمان باشد، مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۷۵٪ کاهش می‌یابد. براساس نتایج حاصله نمی‌توان از مواد پوزولانی به تنهایی استفاده کرد [۶]. در سال ۲۰۱۶ شبا و همکاران به بررسی تاثیر خاکستر بادی و بنتونیت به عنوان جایگزینی جزئی سیمان در بتن انبوه پرداختند که براساس نتایج حاصله نمونه حاوی ۱۲/۵٪ خاکستر بادی و ۱۲/۵٪ بنتونیت در تولید افزایش دما در بتن‌های انبوه نقش چشمگیری داشته به این صورت که در اثر این ترکیب حدوداً ۱۰٪ افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع در سن ۹۰ روز حاصل شده است [۷]. در سال ۲۰۱۹ ترومر و همکاران تاثیر نوعی بنتونیت بر بتن که تحت دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته بود را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج مقاومت فشاری بتن سخت شده با خاک رس کلسینه شده در سنین اولیه نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته بود اما در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری بتن حاوی بنتونیت به نمونه مرجع رسید [۸]. در تحقیقات دیگر نیز نشان داده می‌شود که بنتونیت در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) واکنش دارای مقاومت فشاری حدوداً ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال بوده ولی در سنین بالاتر (۹۰ روز) دارای مقاومت فشاری خوب و متعارفی حدوداً ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد براساس نتایج با افزایش جایگزینی بنتونیت به جای سیمان پرتلند، کارایی، تراکم بتن تازه و جذب آب نسبت به نمونه مرجع کاهش خواهد یافت [۹-۱۱]. در سال ۲۰۲۱ محققان با هدف ارزیابی عملکرد خاک رس کلسینه شده (بنتونیت کلسینه شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد) که به عنوان جایگزین جزئی سیمان در ملات پایه سیمانی استفاده شد، تحقیقاتی انجام دادند که از بنتونیت با درصدهای مختلف ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ استفاده شد. نتایج مقاومت فشاری در این پژوهش نشان داد که درصد بهینه بنتونیت حرارت‌دیده در سن ۲۸ روز

۱۲ تا ۱۴ درصد می‌باشد. همچنین براساس نتایج فعال سازی حرارتی رس های بنتونیتی منجر به دست آوردن مواد پوزولانی می شود اما به دلیل تفاوت در انواع بنتونیت برنامه فعال سازی خاصی وجود ندارد [۱۳ و ۱۲]. در سال ۲۰۲۱ محمود و همکاران از بنتونیت پرکلسیم عراقی که تحت دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه حرارت دیده بود جهت جایگزینی بخشی از سیمان استفاده کردند طبق نتایج بتن تهیه شده از این بنتونیت با واکنش کند همراه بود یعنی در زمان گیرش اولیه و نهایی اثر کندکننده داشته و سرعت افزایش مقاومت را کاهش می‌دهد و جایگزینی سیمان با ۲۵ تا ۳۰ درصد بنتونیت سبب کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی در مقاومت فشاری ۲۸ روزه شد [۱۴].

بررسی مشخصات مکانیکی نمونه بتنی حاوی زئولیت در دمای معمولی نشان می‌دهد که در برخی از مطالعات افزایش [۱۵] و در برخی دیگر کاهش یافته است [۱۶-۱۷]. علت اصلی تفاوت در نتایج در ترکیبات شیمیایی زئولیت مصرفی در پژوهش می‌باشد که این تفاوت در ترکیبات شیمیایی به محل استخراج وابسته است. در سال ۲۰۱۸ باربارا و همکاران طبق نتایج خود اعلام کردند که بتن‌های حاوی زئولیت نسبت به نمونه مرجع که فاقد زئولیت است در سنین ۷ و ۲۸ روز، دارای مقاومت فشاری کمتری می‌باشند [۱۸]. با این حال، درصد کاهش در سنین بالاتر بتن ۹۰ و ۱۸۰ روز کمتر یا حتی تا صفر می‌باشد. در سال ۲۰۱۹ شهاب و همکاران با انجام مطالعات بر روی مقاومت فشاری بتن حاوی زئولیت و کائولن به این نتیجه دست پیدا کردند که استفاده از زئولیت با درصدهای ۵-۱۲ در تمام سنین سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود که با افزودن کائولن تا ۱۵٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته و به طور کلی نتایج نشان داد که بهترین مقادیر مقاومت فشاری بدون استفاده از کائولن، ۷٪ زئولیت برای سیمان حاوی زئولیت است [۱۹]. در سال ۲۰۲۰ مقدم و همکاران به بررسی مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی زئولیت و میکروسیلیس در محدوده دمایی ۲۸-۸۰۰ درجه سانتیگراد پرداختند. درصدهای مصرفی زئولیت و میکروسیلیس به ترتیب (۰، ۱۰ و ۲۰) و ۱۰٪ می‌باشد. طبق نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت تا ۸۰۰ درجه از میزان مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه کاسته شده است که نتیجه تبخیر آب آزاد در نمونه‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی جزئی سیمان با زئولیت و سیلیس در طرح اختلاط سازه بتنی که در معرض دمای بالا قرار دارد هم از نظر مهندسی و هم از نظر زیست محیطی مطابقت دارد [۲۰]. در سال ۲۰۲۰ کانگ و همکاران زئولیت با درصدهای مختلف و اندازه‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. براساس نتایج حاصله افزودن ۱۰٪ زئولیت با ابعاد ۵/۶ میکرومتر در سن ۹۰ روز دارای بهترین نتیجه در آزمایش مقاومت فشاری بوده است. همچنین نمونه‌های حاوی زئولیت با ابعاد ۵/۶ میکرومتر نسبت به سایر اندازه‌ها حاوی نتایج مقاومت فشاری بهتری در تمام سنین می‌باشد. افزودن زئولیت سبب کاهش ترک‌های انقباضی می‌گردد [۲۱].

براساس تحقیقاتی که در گذشته صورت گرفته است مشخصات مکانیکی بتن‌های ساخته شده از زئولیت و بنتونیت در دماهای بالا بررسی نشده است. از طرف دیگر ضرایب تبدیل مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای اگرچه برای بتن‌های معمولی وجود دارد، لکن برای بتن‌های حاوی مواد پوزولانی زئولیت و بنتونیت و یا در دماهای مختلف رابطه‌ای ارائه نشده است. بر این اساس به بررسی اثرات افزودن زئولیت و بنتونیت بر رفتار نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با ابعاد مختلف و در دماهای گوناگون پرداخته شده است. در ادامه نیز ضریب تبدیل مقاومت فشاری نمونه‌های پوزولانی مکعبی به نمونه‌های پوزولانی استوانه‌ای پیشنهاد شده است.

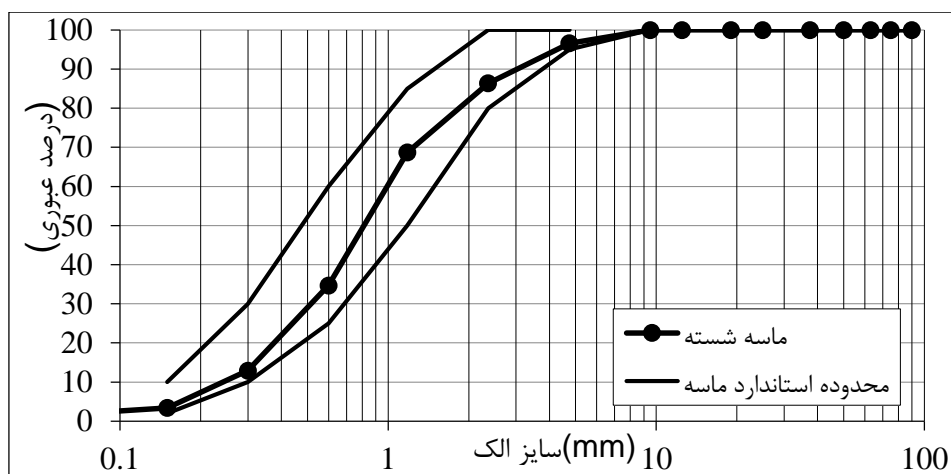
۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله چهار طرح اختلاط با مقدار سیمان ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی با ابعاد متفاوت مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. یکی از طرح‌های اختلاط بعنوان بتن معمولی و سه طرح اختلاط دیگر حاوی مواد پوزولانی زئولیت و بنتونیت می‌باشد. جهت تهیه بتن پوزولانی از نسبت آب به مصالح سیمانی (مجموع مقدار سیمان، زئولیت و بنتونیت) ۰/۶۵ و دو درصد جایگزینی ۶ و ۱۰ برای بنتونیت و ۶ و ۱۰٪ جایگزینی برای زئولیت استفاده شد. درصدهای منتخب برای زئولیت و بنتونیت براساس مطالعات گذشته در نظر گرفته شده است [۲۲-۲۳]. نسبت ریزدانه و درشت دانه در مخلوط بتن ۰/۳۳ به ۰/۶۷ است. آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی در سن ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای انجام شد. ابعاد نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰،

۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ و ۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین ابعاد نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ و ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها در دماهای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

۲-۱- مشخصات مصالح

شن و ماسه مصرفی در این پژوهش، از نوع شن و ماسه کوهی موجود در شهر سمنان می‌باشد. جهت مشخص نمودن توزیع دانه‌بندی مصالح سنگی، آزمایش دانه‌بندی انجام شد که دانه بندی مصالح سنگی به همراه حدود مجاز استاندارد ASTM-C33 [۲۴] در شکل ۱ ارائه شده است. مقدار حداکثر اندازه اسمی شن مورد استفاده بین ۸ الی ۹ میلی‌متر می‌باشد که از الک ۳/۸ اینچ عبور کرده و بر روی الک شماره ۴ باقی می‌ماند.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی

سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع سیمان پرتلند تیپ II شاهرود است. زئولیت مصرفی به رنگ کرم بوده و به صورت پودری از شرکت نگین پودر سمنان تهیه شد که چگالی آن ۲/۳ گرم بر سانتی‌متر می‌باشد. رنگ بنتونیت سدیم دار استفاده شده کرم رنگ بوده و از معادن سمنان تهیه شد. زئولیت و بنتونیت مصرفی در شکل ۲ آورده شده است. آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهر سمنان می‌باشد. آنالیز شیمیایی زئولیت، بنتونیت و سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲: مصالح مصرفی جایگزین بخشی از سیمان (الف) بنتونیت مصرفی (ب) زئولیت مصرفی

جدول ۱: مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان، زئولیت و بنتونیت

ترکیبات	بنتونیت (%)	زئولیت (%)	سیمان (%)
SiO ₂	۶۹/۸	۶۹/۲۸	۲۱/۱۱
Al ₂ O ₃	۱۱/۸۸	۱۰/۴۳	۴/۴۲
Fe ₂ O ₃	۱/۷۳	۰/۴۹	۳/۹۶
CaO	۰/۹۶	۳/۵۶	۶۳/۲۳
MgO	۱/۴۲	۰/۵	۱/۵۱
Na ₂ O	۰/۵	۰/۷۳	۰/۳۲
K ₂ O	۰/۴۷	۱/۲۷	۰/۵۱
TiO ₂	۰/۱	۰/۱۶۶	-

۳- نسبت‌های اختلاط بتن و روند ساخت

جهت دستیابی به اثر تغییرات حرارت بر مشخصات بتن، نمونه‌های مورد نظر با یک طرح اختلاط و با شرایط یکسان آماده و عمل‌آوری شدند. طرح اختلاط‌های مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. نسبت اختلاط نمونه‌ها به روش وزنی و ACI211 می‌باشد. نسبت آب به مصالح سیمانی با توجه به انجام آزمایشات متعدد و خصوصیات مصالح مصرفی از جمله زئولیت و بنتونیت ۰٫۶۵ حاصل شد.

جدول ۲: طرح‌های اختلاط

نمونه	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	بنتونیت (kg/m ³)	درصد بنتونیت	زئولیت (kg/m ³)	درصد زئولیت	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)
0.65-C250	۲۵۰	۱۶۲/۵	۰	۰	۰	۰	۱۲۴۰	۶۲۰
0.65-6b6z	۲۲۰	۱۶۲/۵	۱۵	۶	۱۵	۶	۱۲۴۰	۶۲۰
0.65-10b6z	۲۱۰	۱۶۲/۵	۲۵	۱۰	۱۵	۶	۱۲۴۰	۶۲۰
0.65-6b10z	۲۱۰	۱۶۲/۵	۱۵	۶	۲۵	۱۰	۱۲۴۰	۶۲۰

جهت اختلاط مواد با یکدیگر ابتدا شن و ماسه مورد نظر در داخل مخلوط‌کن ریخته شده و طی زمان یک دقیقه بصورت خشک با یکدیگر ترکیب شدند سپس یک سوم از آب طرح اختلاط، داخل مخلوط‌کن ریخته شده تا شن و ماسه ترکیبی یکنواخت ایجاد کنند سپس سیمان و مواد پوزولانی که از قبل با یکدیگر مخلوط شده‌اند، بصورت خشک به مخلوط‌کن اضافه گردید. پس از آن دو سوم آب باقی‌مانده به آهستگی به طرح اختلاط افزوده شد و مخلوط‌کن به مدت دو دقیقه دیگر مصالح را با یکدیگر مخلوط کرده تا بتنی یکدست حاصل شود. برای کلیه طرح‌ها پس از ساخت مخلوط بتن، آزمایش روانی اسلامپ بر روی بتن تازه طبق استاندارد ASTM C143 [۲۵] انجام شده که میزان پایین‌آمدگی متوسط سطح نمونه‌ها بین ۶ تا ۸ سانتی‌متر بود. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا قالب‌ها به خوبی با روغن مخصوص قالب چرب شده تا نمونه‌ها به راحتی از قالب خارج شوند. جهت تراکم بتن در قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی با روش میل‌زنی طبق استاندارد در سه لایه ریخته شده و در هر لایه ۲۵ ضربه توسط میله مخصوص کوبیده شد. در تمامی نمونه‌ها جهت اطمینان با پتک مخصوص چند ضربه به بدنه قالب زده شده تا فضاهای خالی احتمالی با مواد بتنی پر شود. پس از متراکم نمودن بتن، سطح بتن با مال‌ه پرداخت شد. نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و پس از خارج کردن نمونه‌های بتنی از قالب‌ها، در حوضچه‌ای با دمای محیط غرقاب شده تا برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه عمل‌آوری شوند.

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر در سن ۲۸ و ۹۰ روزه در دماهای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. شکل ۳ قرارگیری نمونه‌ها را در کوره نشان می‌دهد.

تامین دمای هدف توسط کوره با ظرفیت گرمایی ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. جهت جلوگیری از اسپالینگ، نرخ افزایش دما مابین ۱،۶۶ تا ۳،۶۱ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انتخاب شدند. حد فاصل زمانی بین رسیدن دمای داخل کوره و مرکز بتن به دمای مورد نظر، حدوداً یک ساعت زمان نیاز است. به همین علت نمونه‌ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای مورد نظر در همان دما باقی ماندند تا قسمت درونی بتن و تمام قسمت‌های نمونه هم‌دما شوند [۲۶]. این کار به این علت انجام می‌شود تا کاهش دمای نمونه‌ها به آرامی انجام شود. در نتیجه کوره به مدت یک ساعت خاموش شده و سپس درب کوره به آرامی و به تدریج باز شد و سپس نمونه‌ها از کوره خارج گردیدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه‌ها هنگام سرد شدن خواهد شد. نمونه‌ها پس از خارج شدن از کوره به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط باقی ماندند و سپس تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند.



شکل ۳: قرارگیری نمونه‌ها در کوره

۴- مشخصات آزمایش‌ها

در این پژوهش جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ ، $150 \times 150 \times 150$ و $200 \times 200 \times 200$ میلی‌متر براساس استاندارد BS12390-3 انجام شده است [۲۷]. همچنین از استاندارد ASTM C39 برای دستیابی به مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای 200×100 و 300×150 میلی‌متر استفاده شده است [۲۸]. جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر از آزمایش برزلی طبق استاندارد ASTM C496 استفاده شده است [۲۹]. شکل ۴ نحوه قرارگیری نمونه‌ها حین انجام آزمایش را نشان می‌دهد.



(ج)



(ب)



(الف)

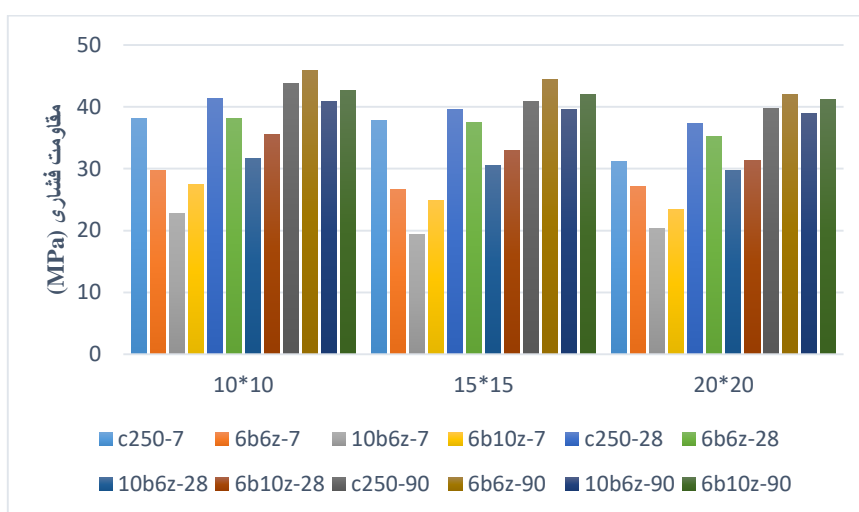
شکل ۴: نحوه قرارگیری نمونه‌ها حین انجام آزمایش (الف) آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی (ب) آزمایش مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (ج) آزمایش برزلی نمونه استوانه‌ای

۵- نتایج آزمایش

۵-۱- مقاومت فشاری

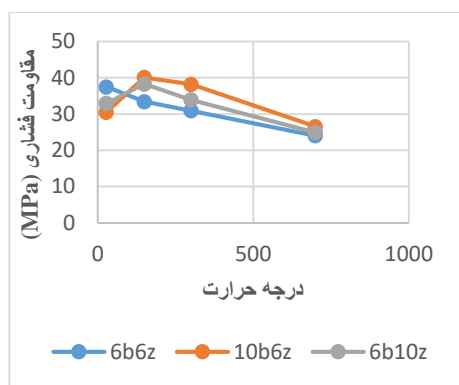
۵-۱-۱- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای محیط و برای چهار طرح اختلاط c250، 6b6z، 10b6z و 6b10z در شکل ۵ گزارش شده است.

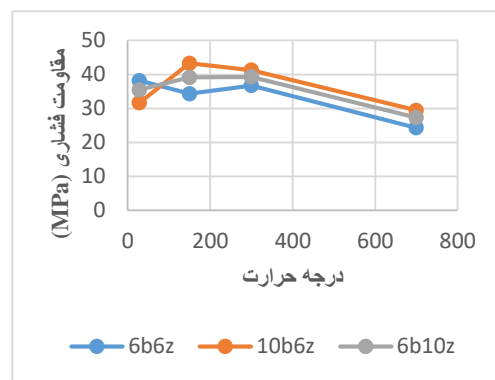


شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای محیط

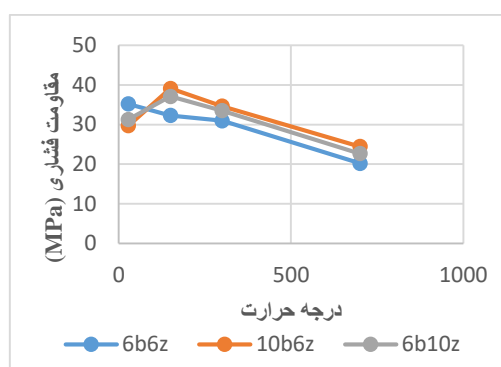
بر اساس نتایج در نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ ، $150 \times 150 \times 150$ و $200 \times 200 \times 200$ میلی‌متر قابل ملاحظه بود که در سن ۷ روز نمونه‌های 6b6z، 6b10z و 10b6z نسبت به نمونه مرجع کاهش مقاومت داشتند این پدیده کاملاً طبیعی می‌باشد به این علت که واکنش شیمیایی مواد پوزولانی نسبت به نمونه مرجع طولانی بوده و در سن ۷ روز نمی‌توان انتظار داشت که نمونه‌های پوزولانی به مقاومت خوبی دست یافته باشند. در سن ۲۸ روز نمونه‌های 6b6z و 6b10z در نمونه‌های مکعبی حدوداً به طور میانگین ۹۰ و ۸۰٪ مقاومت فشاری نمونه شاهد را کسب کردند و همچنان کمترین میزان مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز برای نمونه 10b6z است. در سن ۹۰ روز مشاهده شد که نمونه‌های 6b6z و 6b10z در نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه مرجع به طور میانگین ۵٪ افزایش مقاومت داشتند و نمونه 10b6z حدوداً ۹۰٪ مقاومت فشاری نمونه شاهد را کسب کرد. با بررسی نتایج قابل ملاحظه است که افزودن مواد پوزولانی سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه می‌گردد که با افزایش سن نمونه‌ها این اختلاف مقاومت فشاری کاهش یافته و یا گاهی سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع می‌گردد. با مقایسه میان مقادیر مقاومت فشاری در نمونه‌های مکعبی مشاهده می‌شود که نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر دارای بیشترین مقادیر فشاری و نمونه مکعبی $200 \times 200 \times 200$ میلی‌متر دارای کمترین مقاومت فشاری می‌باشند. با توجه به رابطه تنش که از تقسیم نیرو بر سطح مقطع نمونه‌ها حاصل می‌شود، می‌توان گفت هرچه سطح مقطع نمونه کمتر باشد میزان تنش افزایش خواهد یافت در اینجا نیز به این علت که شرایط برای تمام نمونه‌های مکعبی یکسان بوده است درستی این مسئله را تایید می‌کند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در دمای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز در شکل ۶ قابل مشاهده است.



ب- نتایج مقاومت فشاری نمونه مکعبی (mm) ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰



الف- نتایج مقاومت فشاری نمونه مکعبی (mm) ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰



ج- نتایج مقاومت فشاری نمونه مکعبی (mm) ۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰

شکل ۶: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در دمای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز

براساس نتایج نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی دماهای مختلف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین مقاومت فشاری بود. میزان افزایش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های مکعبی به ترتیب در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده در سن ۲۸ روز به طور میانگین ۳۳ و ۲۴٪ است ولی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده در سن ۲۸ روز به طور میانگین ۱۳٪ کاهش مقاومت داشته است. در نمونه‌های مکعبی 6b10z نیز مشاهده شد که نسبت به نمونه 6b10z حرارت‌ندیده در سن ۲۸ روز در دمای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد حدوداً به طور میانگین ۱۶٪ افزایش مقاومت داشته ولی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به طور میانگین ۳۰٪ کاهش مقاومت دارد. کاهش مقاومت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تبخیر آب موجود در نمونه‌ها می‌باشد. در نمونه 6b6z حرارت دیده نسبت به نمونه 6b6z حرارت‌ندیده در سن ۲۸ روز سبب کاهش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های مکعبی در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد شد. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در دمای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۹۰ روز در جدول ۳ مشاهده است.

جدول ۳: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در دماهای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۹۰ روز

Cu 150x150x150 (mm)		Cu ^۲ 100x100x100 (mm)		Name
fc(MPa)-700	fc(MPa)-300	fc(MPa)-700	fc(MPa)-300	
۳۲/۵۶	۴۱/۷۱	۳۵/۷۶	۴۲/۸۰	C250
۲۷/۳۷	۳۷/۸۲	۳۰/۵۲	۳۹/۳۲	6b6z
۲۳/۸	۳۵/۴۱	۲۸/۵۱	۳۷/۵۲	6b10z
۲۰/۲۶	۳۳/۴۴	۲۵/۱۹	۳۴/۶۴	10b6z

در سن ۹۰ روز تمامی نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ و $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر حرارت دیده نسبت به نمونه‌های حرارت‌ندیده خود کاهش مقاومت داشتند. براساس نتایج حاصله در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نمونه شاهد دارای بیشترین مقاومت فشاری و نمونه 10b6z دارای کم‌ترین مقاومت فشاری بود. نمونه‌های مکعبی حاوی طرح اختلاط c250 در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه شاهد حرارت‌ندیده حدوداً ۳٪ کاهش مقاومت داشتند. نمونه‌های مکعبی 6b6z، 6b10z و 10b6z در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های حرارت‌ندیده خود در سن ۹۰ روز به طور میانگین ۱۵٪ کاهش مقاومت داشت. در دمای ۷۰۰ درجه نیز روند کاهش مقاومت مانند دمای ۳۰۰ درجه بوده ولی میزان افت مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه نسبت به دمای ۳۰۰ درجه بیشتر است. میزان افت مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های حرارت‌ندیده خود در سن ۹۰ روز در نمونه‌های شاهد، 6b6z، 10b6z و 6b10z به ترتیب به طور میانگین ۱۹، ۳۶، ۴۴ و ۳۸٪ بود. به طور کلی براساس نتایج دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۹۰ روز باعث افت شدید در نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی شده ولی در نمونه شاهد میزان افت مقاومت فشاری چندان چشمگیر نمی‌باشد. در خصوص درصد رشد نمونه‌های حرارت‌دیده از ۲۸ روزه به ۹۰ روزه مشاهده شد که در نمونه‌های حاوی 6b6z میزان مقاومت فشاری از ۲۸ روزه به ۹۰ روزه افزایش یافته ولی در مابقی نمونه‌ها میزان مقاومت فشاری از ۲۸ به ۹۰ روزه کاهش یافته بود. به طور کلی قابل ملاحظه است که در تمامی نمونه‌ها در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نتایج بهتری حاصل شده است و نتایج مقاومت فشاری در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز برای نمونه‌های 10b6z و 6b10z افزایش داشته است و تقریباً نتایج یکسانی با نمونه‌های تست شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. ولی در تمامی نتایج ارائه شده نمونه‌های تست شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش مقاومت نسبت به نمونه حرارت‌ندیده شده است. با بررسی نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با حرارت‌دادن به نمونه‌های حاوی بنتونیت و زئولیت می‌توان درصد استفاده از بنتونیت و زئولیت را افزایش داد و بدنبال آن سبب افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز شد. بررسی مقاومت فشاری بتن معمولی در آیین‌نامه‌هایی که اثر حرارت را بر مشخصات مکانیکی بتن در نظر گرفته‌اند به صورت مقاومت نرمال شده مطرح شده است. مقاومت نرمال شده از تقسیم مقاومت فشاری در هر دما به مقاومت فشاری در دمای محیط محاسبه می‌گردد. در این آیین‌نامه‌ها مقادیر رایج شده بر اساس آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های سرد شده می‌باشد. در جدول ۴ مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های بررسی شده و مقدار رایج شده در آیین‌نامه‌های En1992 و 360-10AISC ارائه شده است [۳۰-۳۱]. در جدول نماد H نشان دهنده نمونه‌های حرارت دیده و نماد R نشان‌دهنده نمونه‌های حرارت‌ندیده متناظر می‌باشد.

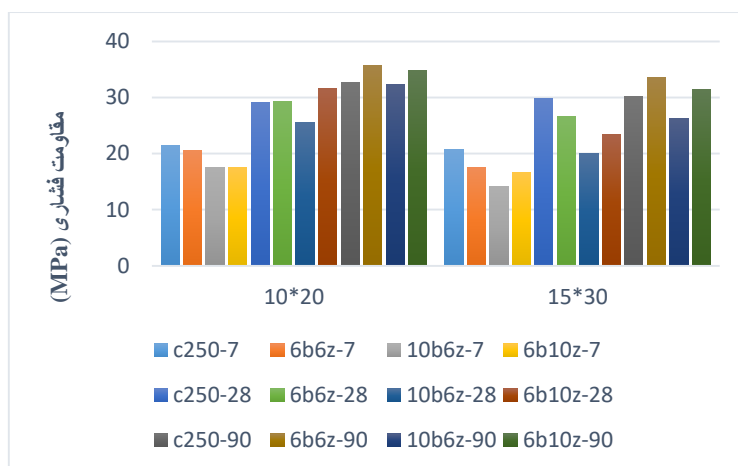
جدول ۴: مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های مکعبی و مقادیر ارایه شده در آیین‌نامه‌ها

Cu 200x200x200 (mm)	Cu 150x150x150 (mm)	Cu 100x100x100 (mm)	AISC 360-10	En1992-1- 2	درجه حرارت	نام نمونه	ردیف
$\frac{f_c, 28(H)}{f_c, 28(R)}$	$\frac{f_c, 28(H)}{f_c, 28(R)}$	$\frac{f_c, 28(H)}{f_c, 28(R)}$					
۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	6b6z	۱
۱/۲۲	۱/۱۶	۱/۱	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	6b10z	۲
۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۷	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	10b6z	۳
۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	6b6z	۴
۱/۰۷	۱/۰۳	۱/۱	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	6b10z	۵
۱/۱۶	۱/۲۵	۱/۳	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	10b6z	۶
۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	6b6z	۷
۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	6b10z	۸
۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	10b6z	۹

در نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر، به جز نمونه 6b6z در دمای 150°C درجه سانتی‌گراد که از مقاومت فشاری نرمال‌شده در هر دو آیین‌نامه کمتر است در تمامی نمونه‌ها و تمامی درجه حرارت‌ها در سن ۲۸ روز میزان مقاومت فشاری نرمال‌شده افزایش یافت. همچنین در نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر، مقاومت فشاری نرمال‌شده نمونه 6b6z در دماهای 150°C و 300°C درجه سانتی‌گراد از مقاومت فشاری نرمال‌شده در هر دو آیین‌نامه کمتر شده ولی در مابقی نمونه‌ها و تمامی درجه حرارت‌ها در سن ۲۸ روز میزان مقاومت فشاری نرمال‌شده افزایش یافت. در نمونه‌های مکعبی $200 \times 200 \times 200$ میلی‌متر نیز مشاهده شد که نمونه 6b6z در دماهای 150°C و 300°C درجه سانتی‌گراد از مقاومت فشاری نرمال‌شده در آیین‌نامه En1992-1-2 کمتر بوده ولی نسبت به آیین‌نامه AISC 360-10 نتایج تقریباً یکسانی حاصل شد و در دمای 700°C درجه سانتی‌گراد میزان مقاومت فشاری نرمال‌شده نسبت به هر دو آیین‌نامه افزایش یافت. در نمونه‌های 6b10z و 10b6z در تمامی حرارت‌ها میزان مقاومت فشاری نرمال‌شده نسبت به هر دو آیین‌نامه ارائه شده افزایش یافت. در این نمونه‌ها نیز همانند نمونه‌های مکعبی با ابعاد 100 و 150 میلی‌متر نمونه‌های حاوی 10% بنتونیت تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت‌دیده دارد و سبب رشد مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز شده است. این موضوع تاثیر مثبت کاربرد ژئولیت و بنتونیت را بر بهبود مشخصات مقاومت فشاری نرمال‌شده تایید می‌کند.

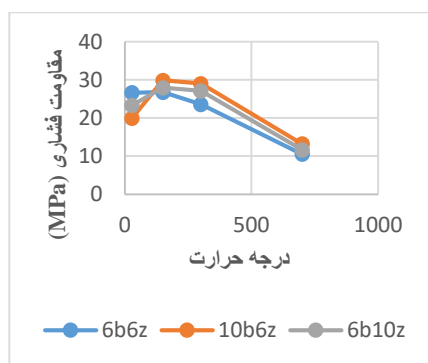
۵-۱-۲- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای

نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های استوانه‌ای در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در دمای محیط و برای چهار طرح اختلاط 250c، 6b6z، 10b6z و 6b10z در شکل ۷ قابل مشاهده است.

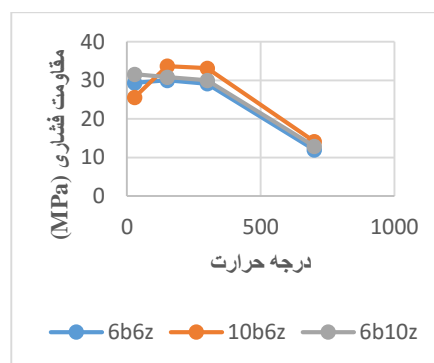


شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۷، ۲۸، ۹۰ روزه در دمای محیط

در نمونه‌های استوانه‌ای 200×100 و 300×150 میلی‌متر همانند نمونه‌های مکعبی قابل مشاهده است که در سن ۷ روز نمونه‌های 6b6z، 6b10z و 10b6z نسبت به نمونه مرجع کاهش مقاومت داشته و نمونه 6b6z در سن ۷ روز نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بیشتری کسب کرد و حدوداً به ۹۰٪ مقاومت نمونه مرجع دست یافت. نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت نسبت به دو طرح اختلاط دیگر مقاومت فشاری کمتری در سن ۷ روز کسب کرد. در سن ۲۸ روز نمونه‌های استوانه‌ای 200×100 میلی‌متر حاوی 6b6z و 6b10z تقریباً یکسانی نسبت به نمونه شاهد به دست آورد و همچنان کمترین میزان مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز برای نمونه 10b6z بود. در سن ۲۸ روز در نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر حاوی 6b6z و 6b10z حدوداً به ترتیب ۸۹ و ۷۵٪ مقاومت فشاری نمونه شاهد را کسب کرده و کمترین میزان مقاومت فشاری برای نمونه 10b6z بود. در سن ۹۰ روز مشاهده شد که نمونه‌های 6b6z و 6b10z نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۹٪ افزایش مقاومت داشتند و نمونه 10b6z حدوداً ۹۰٪ مقاومت فشاری نمونه شاهد را کسب کرد که این نتیجه گویای آن است که فعالیت پوزولانی بنتونیت نسبت به ژئولیت طولانی‌تر می‌باشد و با افزایش سن نمونه‌ها اختلاف مقاومت فشاری کاهش یافته و یا گاهی سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع می‌گردد. همان‌گونه که ذکر شد طبق رابطه تنش هرچه سطح مقطع کوچکتر باشد، میزان تنش نیز افزایش می‌یابد که در این نمونه‌های استوانه‌ای قابل مشاهده است که نمونه‌های 300×150 میلی‌متر نتایج کمتری نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر دارند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در دمای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز در شکل ۸ قابل مشاهده است.



ب- نتایج مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای 300×150 (mm)



الف- نتایج مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای 200×100 (mm)

شکل ۸: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در دمای ۲۸، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز

در نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی دماهای مختلف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین مقاومت فشاری بوده و به ترتیب در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده در سن ۲۸ روز حدوداً ۳۱ و ۲۹٪ افزایش مقاومت داشت و این افزایش مقاومت در نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳۰ میلی‌متر حدوداً ۴۶٪ بود. در هر دو نوع استوانه میزان مقاومت فشاری نمونه حلی ۱۰٪ بنتونیت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده حدوداً ۴۵٪ کاهش مقاومت داشته است. در نمونه‌های استوانه‌ای حاوی 6b10z نیز مقاومت فشاری در دماهای ۳۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه حرارت‌ندیده خود حدوداً بین ۵ تا ۱۰٪ افزایش مقاومت داشته است. در نمونه‌های استوانه‌ای حاوی 6b6z در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های مکعبی نتایج بهتری حاصل شده است که براساس نتایج میزان مقاومت فشاری در این دماها با نمونه مرجع تقریباً یکسان حاصل شده است ولی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۵۸٪ کاهش مقاومت داشته است. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در دمای ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۹۰ روز جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در دماهای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

Cylinder 100x200 (mm)		
fc(MPa)-700	fc(MPa)-300	Name
۲۵/۱۸	۳۱/۵	C250
۲۱/۷۴	۳۲/۱	6b6z
۱۸/۳۲	۲۷/۹۳	6b10z
۱۴/۷۹	۲۵/۹	10b6z

در نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی دماهای مختلف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین مقاومت فشاری بوده و به ترتیب در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده در سن ۲۸ روز حدوداً ۳۱ و ۲۹٪ افزایش مقاومت داشته است و این افزایش مقاومت در نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳۰ میلی‌متر حدوداً ۴۶٪ می‌باشد. در هر دو نوع استوانه میزان مقاومت فشاری نمونه حلی ۱۰ درصد بنتونیت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه 10b6z حرارت ندیده حدوداً ۴۵٪ کاهش مقاومت داشته است. در نمونه‌های استوانه‌ای حاوی 6b10z نیز مقاومت فشاری در دماهای ۳۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه حرارت‌ندیده خود حدوداً بین ۵ تا ۱۰٪ افزایش مقاومت داشته است. در نمونه‌های استوانه‌ای حاوی 6b6z در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های مکعبی نتایج بهتری حاصل شده است که براساس نتایج میزان مقاومت فشاری در این دماها با نمونه مرجع تقریباً یکسان حاصل شده است ولی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۵۸٪ کاهش مقاومت داشته است. در این بخش نیز قابل ملاحظه است که تمامی نمونه‌های حرارت دیده در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه‌های حرارت‌ندیده خود کاهش مقاومت دارند. در جدول ۶ مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های استوانه‌ای و مقدار آرایه شده در آیین نامه های En1992 و 360-10AISC ارائه شده است.

³ Cylinder

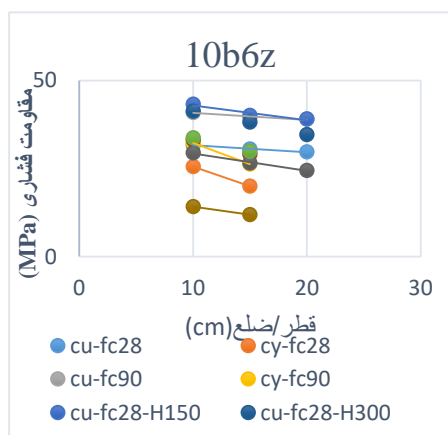
جدول ۶: مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های استوانه‌ای و مقادیر ارایه شده در آیین‌نامه‌ها

Cy 150x300 (mm)	Cy 100x200 (mm)	AISC 360-10	En1992-1- 2	درجه حرارت	نام نمونه	ردیف
$\frac{f_c, 28(H)}{f_c, 28(R)}$	$\frac{f_c, 28(H)}{f_c, 28(R)}$					
۱	۱/۰۲	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	6b6z	۱
۱/۲۰	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	6b10z	۲
۱/۴۹	۱/۳۲	۰/۹۳	۰/۹۸	۱۵۰	10b6z	۳
۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	6b6z	۴
۱/۱۶	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	6b10z	۵
۱/۴۵	۱/۲۹	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰	10b6z	۶
۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	6b6z	۷
۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	6b10z	۸
۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۳	۰/۴۳	۷۰۰	10b6z	۹

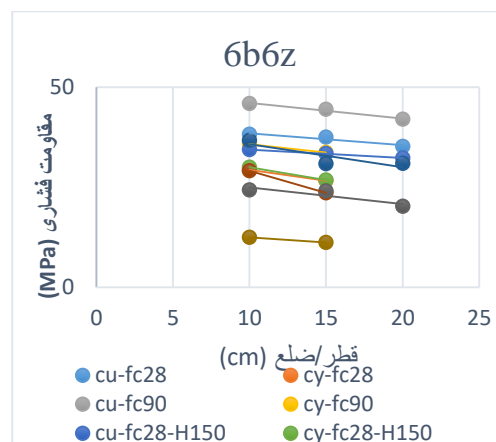
طبق نتایج ارائه شده در تمامی نمونه‌ها و تمامی درجه حرارت‌ها در سن ۲۸ روز میزان مقاومت فشاری نرمال شده در هر دو آیین‌نامه یا افزایش یافته یا نتیجه تقریباً یکسانی حاصل شده است. در این بخش نیز مشاهده می‌شود که صحت استفاده از مواد پوزولانی قابل تایید است.

۵-۱-۳- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای از نظر ابعاد

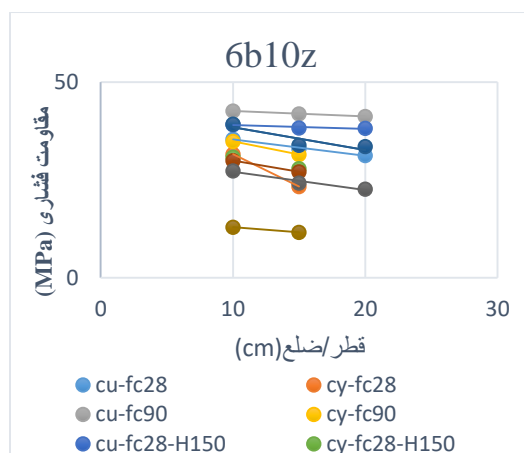
در شکل ۹ برای سه طرح اختلاط 6b6z، 10b6z و 10b6z برآزش داده‌ها به صورت خطی رسم شده است.



ب) طرح اختلاط 10b6z



الف) طرح اختلاط 6b6z



شکل ۹: تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای براساس تغییر ابعاد 6b10z

مشاهده می‌گردد که با افزایش مقاومت از شیب این خط کاسته شده است. یعنی نرخ کاهش مقاومت با افزایش ابعاد نمونه با افزایش مقاومت مخلوط، کاهش یافته است و خط برازش کننده داده‌ها به سمت خط مستقیم میل می‌کند.

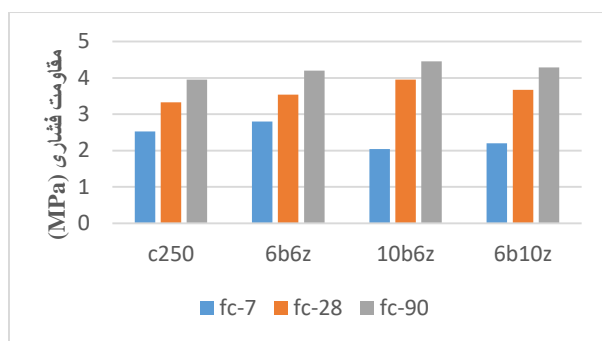
در توجیه مقاومت بیشتر نمونه‌های مکعبی می‌توان گفت که به علت وجود اصطکاک میان صفحه فولادی بارگذاری و سطح بارگذاری شده بتن و همچنین متفاوت بودن مشخصات این دو ماده نظیر ضریب پواسون آن‌ها، تنش برشی در سطح تماس نمونه با صفحات بارگذاری ایجاد می‌گردد که ثابت شده این تنش برشی با بیشینه زاویه ۶۰ درجه در نمونه گسترش پیدا می‌کند. در نمونه‌های مکعبی گسترش تنش برشی در بتن، از بالا و پایین نمونه، در وسط نمونه با یکدیگر تلاقی می‌نمایند اما در نمونه‌های استوانه‌ای مشاهده می‌گردد که ناحیه‌ای در مرکز بتن وجود دارد که عاری از تنش‌های برشی می‌باشد. این عامل سبب آن می‌گردد که نمونه‌های استوانه‌ای مقاومت کمتری نشان دهند هم‌چنین بر اساس تئوری احتمال با افزایش ابعاد نمونه احتمال وجود ترک در بتن بالا می‌رود؛ با وجودی که بتن تحت فشار قرار دارد ولی گسیختگی آن در اثر کشش ایجاد شده و گسترش ترک‌ها در بتن می‌باشد، به همین علت با افزایش احتمال وجود ترک‌ها با افزایش ابعاد نمونه احتمال شکست بتن در مقاومت‌های پایین‌تر بالا می‌رود.

۵-۲- مقاومت کششی (برزیلی)

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی براساس رابطه پیشنهادی ASTM C496 بر حسب مگاپاسکال برای نمونه‌های ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر در دمای محیط و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز محاسبه شده و در شکل ۱۰ ارائه شده است.

$$f_t = \frac{2p}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (1)$$

در رابطه ۱، f_t بر حسب مگاپاسکال و P حداکثر بار اعمال شده بر حسب نیوتن و L و D به ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای بر حسب میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۱۰: نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای محیط در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

براساس نتایج در سن ۷ روز مقاومت کششی نمونه 6b6z نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است و دارای بیشترین مقاومت کششی نسبت به سایر نمونه‌ها است. نمونه‌های 10b6z و 6b10z نسبت به نمونه مرجع مقاومت کششی کم‌تری داشتند. با مقایسه نتایج در سن ۲۸ روز نشان داده شد که مواد پوزولانی زئولیت و بنتونیت در چسبندگی مواد تاثیر بسزایی دارند. در سن ۲۸ روز نیز نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت نسبت به سایر نمونه‌ها حاوی مقاومت کششی بیشتری بود که در این سن نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۲۰٪ افزایش مقاومت داشته است. در سن ۲۸ روز مشاهده شد که نمونه مرجع c250 حاوی کمترین مقاومت کششی نسبت به سایر نمونه‌ها است. نمونه‌های 6b6z و 6b10z نسبت به نمونه مرجع حدوداً به ترتیب ۶ و ۱۰٪ افزایش مقاومت داشتند. افزودن بنتونیت سبب افزایش انعطاف‌پذیری در نمونه‌ها شد همچنین قابل ذکر است که میزان خاصیت خمیری ذرات بنتونیت بیشتر از زئولیت می‌باشد به همین واسطه باعث به وجود آمدن لایه‌ای انعطاف‌پذیر در اطراف سنگدانه‌ها شده و سبب افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌ها می‌گردد. روند افزایش مقاومت در نمونه‌ها در سن ۹۰ روز نیز همانند روند نمونه‌ها در سن ۲۸ روز می‌باشد به طوری‌که نمونه‌های 10b6z، 6b10z و 6b6z نسبت به نمونه مرجع ۱۱، ۶ و ۴٪ می‌باشد. در ادامه نتایج مقاومت کششی حرارت‌دیده نمونه‌های 6b6z، 6b10z و 10b6z در دماهای ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷: نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها در دماهای مختلف در سنین ۲۸

نام نمونه	fct(MPa)-150	fct(MPa)-300	fct(MPa)-700
6b6z	۲/۹۴	۲/۶	۰/۷۲
6b10z	۳/۷	۳/۲۵	۰/۸۳
10b6z	۴/۰	۳/۶۴	۰/۸۳

نتایج مقاومت کششی همانند نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی دماهای مختلف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین مقاومت کششی می‌باشد. نمونه 10b6z در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه حرارت‌ندیده، حدوداً ۲٪ افزایش مقاومت داشته ولی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه تست شده در دمای محیط حدوداً ۸٪ کاهش مقاومت مشاهده شد. میزان کاهش مقاومت در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای این نمونه بسیار زیاد بوده و به مقدار ۰٫۸۷ رسیده است. در نمونه 6b10z همانند نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت، میزان مقاومت کششی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حدوداً با مقاومت کششی نمونه متناظر حرارت‌ندیده خود یکسان بوده و تقریباً ۲٪ افزایش مقاومت داشته است ولی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۱۳٪ کاهش مقاومت مشاهده شد. در این ترکیب نیز دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بشدت سبب کاهش مقاومت کششی نمونه 6b10z شده است. نمونه 6b6z در دمای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه حرارت‌ندیده خود حدوداً به ترتیب ۲۰ و ۳۶٪ کاهش مقاومت مشاهده شد. به طور کلی نمونه‌های حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ زئولیت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نتایج تقریباً یکسانی با نمونه‌های حرارت‌ندیده متناظر خود دارند و در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش مقاومت کششی چندان چشمگیر نمی‌باشد ولی در دمای

۷۰۰ درجه سانتی گراد میزان کاهش مقاومت بشدت زیاد بوده و سبب افت شدید کاهش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌ها می‌باشد. در جدول ۸ نتایج مقاومت کششی نرمال شده نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و مقادیر ارایه شده در آیین نامه En1992 گزارش شده است.

جدول ۸: مقاومت کششی نرمال شده نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و مقادیر ارایه شده در آیین نامه

ردیف	نام نمونه	درجه حرارت	En1992-1-2	$\frac{f_{ct, 28(H)}}{f_{ct, 28(R)}}$
۱	6b6z	۱۵۰	۰/۹۹	۰/۸۳
۲	6b10z	۱۵۰	۰/۹۹	۱/۰۱
۳	10b6z	۱۵۰	۰/۹۹	۱/۰۱
۴	6b6z	۳۰۰	۰/۶	۰/۸۳
۵	6b10z	۳۰۰	۰/۶	۱/۰۱
۶	10b6z	۳۰۰	۰/۶	۱/۰۱
۷	6b6z	۷۰۰	۰	۰/۲
۸	6b10z	۷۰۰	۰	۰/۲۲
۹	10b6z	۷۰۰	۰	۰/۲۳

۵-۳- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بر حسب دما

با توجه به اینکه مقادیر حاصله از مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها از پیوستگی خوب و مناسبی برخوردار است، با برآزش منحنی‌های ترسیم شده برای نمونه‌ها در هر دما در نرم‌افزار اکسل، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن‌های پوزولانی در جدول ۹ پیشنهاد شده است.

جدول ۹: روابط پیشنهادی مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر حسب دما

نام نمونه	تابع رگرسیون	ضریب رگرسیون (R^2)
6b6z	$y = -0.0289x + 31.591$	۰/۹۹
6b10z	$y = -0.0315x + 34.276$	۰/۹۵
10b6z	$y = -0.0347x + 36.911$	۰/۹۵
6b6z	$y = -0.0042x + 3.6864$	۰/۹۸
6b10z	$y = -0.0054x + 4.6594$	۰/۹۸
10b6z	$y = -0.0059x + 5.1157$	۰/۹۷

با توجه به تشابه معادلات در سه طرح اختلاط مذکور و از طریق میانگین گیری بین روابط حاصله، تابع رگرسیون جهت تعیین مقاومت فشاری بر حسب دما به صورت زیر قابل پیش بینی می باشد:

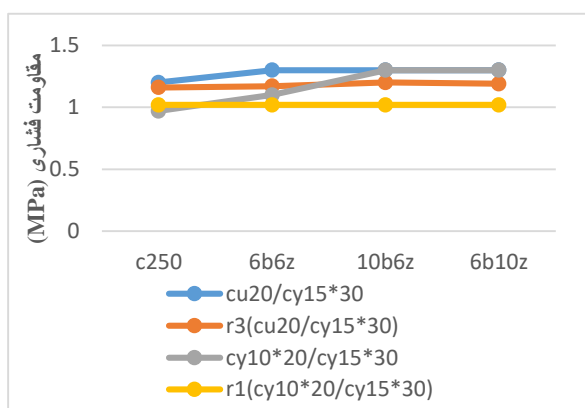
$$F_C = -0.0317T + 34.25 \quad R^2=0.93 \quad (2)$$

همچنین تابع رگرسیون قابل پیش بینی جهت تعیین مقاومت کششی بر حسب دما به صورت زیر خواهد بود:

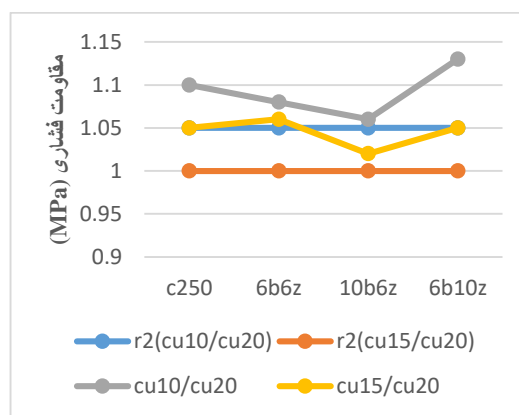
$$F_T = -0.0052T + 4.4872 \quad R^2=0.9 \quad (3)$$

۴-۵- ضریب تبدیل نمونه های مکعبی به استوانه ای

در شکل های ۱۱ و ۱۲ به مقایسه ضرایب r_1 ، r_2 و r_3 حاصل از انجام آزمایش و آیین نامه مبحث نهم پرداخته شده است. براساس نتایج قابل ملاحظه است که میزان اختلاف ضرایب r_2 در نمونه ها کمتر از ۱۰٪ بوده و میزان اختلاف r_3 در نمونه ها کمتر از ۸٪ می باشد. مشاهده می شود که میزان اختلاف ضریب r_1 در نمونه های 6b6z و c250 کمتر از درصد بوده ولی میزان اختلاف این ضریب در نمونه های 6b10z و 10b6z حدوداً ۲۰٪ می باشد.



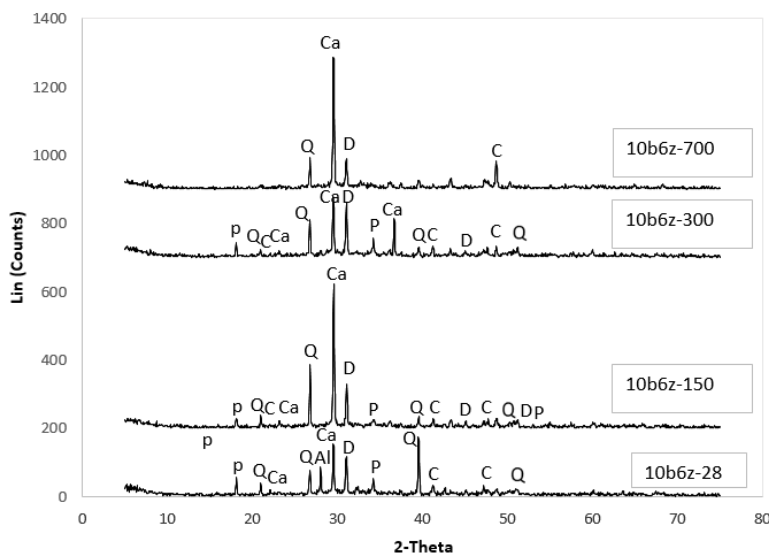
شکل ۱۲: مقایسه ضرایب r_1 و r_3 آزمایشگاهی و آیین نامه ای



شکل ۱۱: مقایسه ضریب r_2 آزمایشگاهی و آیین نامه ای

۵-۵- تحلیل XRD

نتایج حاصل از آزمایش xrd برای نمونه های 10b6z در دماهای ۲۸ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳: آنالیز کیفی XRD نمونه 10b6z در دماهای مختلف

(P:portlandite, Q:Qobalt, C: C-S-H gel, Ca: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, D: Dolomite)

با مقایسه نتایج پراش پرتو ایکس در نمونه مرجع و نمونه‌های حاوی ژئولیت و بنتونیت مشاهده شد که وجود ژئولیت و بنتونیت سبب ایجاد واکنش پوزولانی این مواد با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن شده است. واکنش Al_2O_3 و SiO_2 با $\text{Ca}(\text{OH})_2$ واکنش پوزولانی می‌باشد. با مصرف هیدروکسید کلسیم مقدار این ماده را در بتن کاهش می‌دهند و در عوض مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته (ژل C-S-H) را افزایش می‌دهند. قرار گرفتن ملات در معرض دمای بالا با تغییرات شیمیایی، تخریب ریزساختار و در نهایت از بین رفتن سازه همراه است. خواص مکانیکی الگوهای XRD فازهایی مانند پرتلندیت، ژل C-S-H، کربنات کلسیم، کوارتز، دولومیت و پلاژیوکلاز را شناسایی می‌کنند. خواص مکانیکی خمیر سیمان به شدت تحت تأثیر پیوند شیمیایی هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) است. ارزیابی قله های CSH می‌تواند به تفسیر یافته‌ها کمک کند. در نمونه 10b6z که در دمای محیط قرار دارد، پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود ولی با افزایش دما این ماده وجود نداشته و به میزان کربنات کلسیم افزوده شده است حضور این ماده در نمونه‌ها سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. قله کوارتز در الگوی XRD در اثر شکستگی اجزای کل تشکیل می‌شود. شدت اوج CSH با افزایش دما از ۲۸ به ۷۰۰ کاهش یافته است. این مقادیر نشان می‌دهد که شدت اوج CSH تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد تقریباً ثابت است و در ۷۰۰ درجه سانتیگراد به طور قابل توجهی کاهش یافته است. تغییرات شیمیایی ریزساختار در دمای زیر ۳۰۰ درجه سانتیگراد ناچیز است. بنابراین از دست دادن مقاومت فشاری و کششی ملات‌ها در این دما می‌تواند ناشی از تبخیر آب آزاد باشد. تبخیر آب آزاد درون بتن سبب پوکی و به اصطلاح کریستالی شدن آن می‌شود. به دلیل شرایط پخت داخلی، دلیل افزایش قدرت در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد، پرتلندیت برای تولید محتوای بالاتر ژل های CSH مصرف می‌شود. الگوهای XRD به ترتیب در ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد، کاهش و افزایش محتوای پرتلندیت را نشان می‌دهد. افزایش شدت پورتلندیت در ۳۰۰ درجه سانتیگراد، نشان می‌دهد که واکنش کم آبی پرتلندیت برگشت پذیر است. اصلاح این مرحله می‌تواند در طول مدت خنک شدن نمونه‌ها از زمان آزمایش خواص مکانیکی تا زمان آزمایش XRD رخ دهد. برگشت پذیری این واکنش نیز در مرجع ذکر شده است [۳۲].

۶- نتیجه گیری

پس از حرارت دادن به نمونه‌ها، نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در تمامی درجه حرارت‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه دارای بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز می‌باشد به نحوی که نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت نسبت به نمونه‌های حرارت‌نندیده نظیر خود در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد سبب افزایش مقاومت

چشمگیری شده است. با حرارت دادن به نمونه‌های حاوی بنتونیت و ژئولیت می‌توان درصد استفاده از بنتونیت و ژئولیت را افزایش داد و بدنبال آن سبب افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز شد.

در سن ۹۰ روز در دماهای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در تمامی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای نسبت به نمونه‌های حرارت‌ندیده نظیر خود کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در دمای ۳۰۰ درجه نمونه شاهد دارای بیشترین مقاومت فشاری و نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت دارای کمترین مقاومت فشاری می‌باشد. ولی میزان افت مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه نسبت به دمای ۳۰۰ درجه خیلی بیشتر است دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۹۰ روز باعث افت شدید در نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی می‌شود ولی در نمونه شاهد میزان افت مقاومت فشاری چندان چشمگیر نمی‌باشد.

در مقایسه مقاومت فشاری و مقاومت کششی نرمال شده تجربی در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای و مقاومت فشاری ارائه شده توسط دو آیین‌نامه مشاهده می‌شود که در دماهای ۱۵۰ و ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد اغلب نتایج تجربی از مقادیر ارائه شده توسط آیین‌نامه بیشتر می‌باشد که این موضوع تاثیر مثبت کاربرد ژئولیت و بنتونیت را بر بهبود مشخصات مقاومت فشاری نرمال شده تایید می‌کند.

نمونه حاوی ۱۰٪ بنتونیت در تمامی دماهای مختلف ۱۵۰، ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین مقاومت کششی می‌باشد. نمونه 10b6z در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه حرارت‌ندیده، حدوداً ۲٪ افزایش مقاومت داشته ولی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه تست شده در دمای محیط حدوداً ۸٪ کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۱۰٪ ژئولیت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نتایج تقریباً یکسانی با نمونه‌های حرارت‌ندیده متناظر خود دارند و در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش مقاومت کششی چندان چشمگیر نمی‌باشد ولی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان کاهش مقاومت بشدت زیاد بوده و سبب افت شدید کاهش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌ها می‌باشد.

در اغلب نمونه‌ها اختلاف ضریب تبدیل نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در این پژوهش نسبت به ضرایب آیین‌نامه کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.

سپاسگزاری

باتشکر از مجموعه آزمایشگاهی حوزه عمران دانشگاه سمنان که با کمک‌های وافر و بی‌دریغ خود مرا در پیش برد این پژوهش علمی یاری نمودند.

مراجع

- [1] Jiang, J., Lu, Z., Li, J., Xie, Y., Luo, K., & Niu, Y. (2019). Preparation and properties of nanopore-rich lightweight cement paste based on swelled bentonite. *Construction and Building Materials*, 199, 72–81.
- [2] Environment, U. N., Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete research*, 114, 2–26.
- [3] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag. *Journal of Building Engineering*, 24, 100757.
- [4] Pachideh, G., Gholhaki M. (2019) an experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures, *Journal of Testing and Evaluation*, 47(2), 1606-1620.
- [5] Rehman, S. U., Yaqub, M., Noman, M., Ali, B., Ayaz Khan, M. N., Fahad, M., ... Gul, A. (2019). The Influence of Thermo-Mechanical Activation of Bentonite on the Mechanical and Durability Performance of Concrete. *Applied Sciences*, 9(24), 5549.
- [6] Taklymi, S. M. Q., Rezaifar, O., & Gholhaki, M. (2020). Investigating the properties of bentonite and kaolin modified concrete as a partial substitute to cement. *SN Applied Sciences*, 2(12), 1–14.
- [7] Shabab, M. E., Shahzada, K., Gencturk, B., Ashraf, M., & Fahad, M. (2016). Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(5), 1987–1995.

- [8] Trümer, A., Ludwig, H.-M., Schellhorn, M., & Diedel, R. (2019). Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete. *Applied Clay Science*, 168, 36–42.
- [9] Karthikeyan, M., Ramachandran, P. R., Nandhini, A., & Vinodha, R. (2015). Application on partial substitute of cement by bentonite in concrete. *International Journal of ChemTech Research*, 8(11), 384–388.
- [10] Reddy, G. V. K., Rao, V. R., & Reddy, M. A. K. (2017). Experimental investigation of strength parameters of cement and concrete by partial replacement of cement with Indian calcium bentonite. *Int J Civ Eng Technol*, 8(1), 512–518.
- [11] Memon, S. A., Arsalan, R., Khan, S., & Lo, T. Y. (2012). Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 237–242.
- [12] Mesboua, N., Benyounes, K., Kennouche, S., Ammar, Y., Benmounah, A., & Kemer, H. (2021). Calcinated Bentonite as Supplementary Cementitious Materials in Cement-Based Mortar. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 11(1), 23–32. <https://doi.org/10.2478/jaes-2021-0004>
- [13] A. Al-Hammood, A., J. Frayyeh, Q., & A. Abbas, W. (2021). Thermally Activated Bentonite As a Supplementary Cementitious Material – A Review. *Engineering and Technology Journal*, 39(2A), 206–213. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i2a.1733>
- [14] Al-hammood, A. A. (2021). Iraqi bentonite as a natural pozzolan for sustainable concrete, 1–23.
- [15] Ahmadi, B., & Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134–141.
- [16] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A. A., Maghsoudi, M., & Siad, H. (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 151, 292–311.
- [17] Ramezaniapour, A. A., Mousavi, R., Kalhori, M., Sobhani, J., & Najimi, M. (2015). Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes. *Construction and Building Materials*, 101, 347–358.
- [18] Raggiotti, B. B., Positieri, M. J., & Oshiro, Á. (2018). Natural zeolite, a pozzolan for structural concrete. *Procedia Structural Integrity*, 11, 36–43.
- [19] Abdul-Wahab, S. A., Hassan, E. M., Al-Jabri, K. S., & Yetilmezsoy, K. (2019). Utilizing zeolite/kaolin combination for partial cement clinker replacement to manufacture environmentally sustainable cement in Oman.
- [20] Moghadam, M. A., & Izadifard, R. A. (2020). Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 253, 119206.
- [21] Thang, N. C., Tuan, N. Van, Yang, K.-H., & Phung, Q. T. (2020). Effect of Zeolite on Shrinkage and Crack Resistance of High-Performance Cement-Based Concrete. *Materials*, 13(17), 3773.
- [22] Abdolsha, F., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. (2021). Study of changes in mechanical properties of concrete containing bentonite and zeolite in cement replacement. *Amirkabir Civil Engineering*. (in persian)
- [23] Zargar, Z., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. (2021). Evaluation of the effectiveness of straw fibers on the mechanical properties of concrete containing zeolite and bentonite. *Amirkabir Civil Engineering*. (in persian)
- [24] Standard, A. (2003). C33, “Standard Specification for Concrete Aggregates,” ASTM International, vol. i, no. C.
- [25] ASTM, C. (2014). Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete.
- [26] Behnood, A., & Ziari, H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 106–112.
- [27] Standard, B. (2009). Testing hardened concrete. *Compressive Strength of Test Specimens, BS EN*, 12390–12393.
- [28] Standard, A. (2010). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *ASTM C39*.
- [29] Norma, A. (2004). C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 469–490.
- [30] ANSI, A. (2010). AISC 360-10. *Chicago, IL*.
- [31] Eurocode, E. (2004). 2: design of concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design. *Brussels: European Concrete Platform*.
- [32] Morsy, M. S., Galal, A. F., & Abo-El-Enein, S. A. (1998). Effect of temperature on phase composition and microstructure of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay. *Cement and concrete research*, 28(8), 1157–1163.