

خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی پومیس در برابر دمای زیاد

علی اکبر رمضانپور^{i*}؛ رضا اسماعیلیⁱⁱ

چکیده

تاکنون عمده توجهات در تحقیقات بتن خود تراکم روی طرح اختلاط و خواص مکانیکی آن بوده است و می توان گفت کارهای محدودی به منظور ارزیابی عملکرد این بتن از نظر دوام و پایداری صورت گرفته است. یکی از عوامل فیزیکی زیان آور بر روی دوام بتن، دمای زیاد است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر دمای زیاد بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی پومیس، می باشد. پوزولان پومیس هم به صورت ۱۵٪ وزنی جایگزین سیمان و هم ۱۵٪ وزنی جایگزین فیلر استفاده شده و نسبت آب به سیمان در تمامی طرح اختلاطها ثابت می باشد. نمونه ها پس از ۲۸ روز عمل آوری، تحت شرایط یکسان و بدون اعمال هیچ گونه باری در کوره تا رسیدن به دماهای ۲۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ثابت (۲.۵ °C /min) حرارت دیدند و ۲ ساعت در این دماها نگه داشته شدند. سپس با رسیدن دمای نمونه های داخل کوره به دمای محیط، آزمایش مقاومت فشاری و آزمایشهای غیر مخرب نظیر چکش اشمیت و التراسونیک و همچنین توزین نمونه ها انجام گردید. با توجه به نتایج حاصل از آزمایشهای فوق می توان گفت تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، تقریباً بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس جایگزین فیلر، دارای مقاومت پسماندی بیش از سایر نمونه ها می باشد.

کلمات کلیدی

بتن خودتراکم، خواص مکانیکی، پومیس، دمای زیاد

Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Containing Pumice at Elevated Temperatures

A.A. Ramezaniapour; R. Esmaili

ABSTRACT

As the use of Self Compacting Concrete becomes common, the risk of exposing it to elevated temperatures increases. However, few investigations have been reported on the mechanical properties of SCC when it is exposed to elevated temperatures. Mechanical properties of SCC containing Pumice (P) at elevated temperatures up to 800°C were experimentally investigated in this paper. Four different mix designs, Traditional Concrete (TC), SCC and two other SCC mixtures containing pumice as a replacement for both cement and filler were produced. At the age of 28 days, the specimens were placed in an electrical furnace and heating was applied at the rate of 2.5 (°C/min) up to the desired temperature. Maximum temperatures of 200, 450, 600 and 800°C were maintained for 2 hr. Then, the specimens were allowed to be cooled in the furnace and subsequently tested for compressive strength, rebound hammer, ultrasonic pulse velocity and weight loss. The residual compressive strength of SCC mixture containing pumice as a filler replacement almost was higher than the other mixtures up to 800°C.

KEYWORDS

Self-Compacting Concrete, Mechanical Properties, Pumice, Elevated Temperatures

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۸/۱۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۱۰/۱۲

^{i*} نویسنده مسئول و استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ aaramce@aut.ac.ir

ⁱⁱ دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ reza.esmaili@gmail.com

۱- مقدمه

از سال ۱۹۸۳ مسئله دوام سازه‌های بتن آرمه توجه محققین ژاپنی را به خود جلب کرد. برای ایجاد سازه‌های بتن آرمه بادوام، نیاز به ایجاد تراکم کافی بوسیله کارگران مجرب است. با کمبود کارگران مجرب در این زمینه، یک راه حل در سال ۱۹۸۶ توسط اوکامورا (Okamura) در ژاپن ارائه گردید، و آن بکارگیری بتن خود تراکم بود [۱]. بتن خود تراکم بتنی است که تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به بکارگیری هر نوع لرزاننده بطور کامل قالب‌ها را (حتی با وجود انبوه میلگردها) پر کرده و همگنی خود را حفظ نماید [۲].

تا کنون تحقیقات زیادی در رابطه با خصوصیات بتن تازه، طرح اختلاط و مقاومت انواع مختلف مخلوطهای بتن خودتراکم صورت گرفته و کارهای محدودی در زمینه عملکرد این نوع بتن از منظر دوام و پایایی خصوصاً در مقایسه با بتن معمولی، انجام شده است. با توجه به تفاوت‌های موجود در طرح اختلاط و نحوه تراکم بین بتن خودتراکم و بتن معمولی، شناخت عملکرد این نوع بتن از نقطه نظر دوام ضروری است.

مزایای چشمگیر بتن خود تراکم موجب گسترش سریع آن در دنیا شده که در نتیجه آن، خطر قرارگیری سازه‌های ساخته شده با این بتن نوین در معرض محیط‌های مختلف و نیز دمای زیاد، روز به روز در حال افزایش است. علیرغم تصور عموم، بتن در برابر دمای زیاد همواره مقاومت قابل توجهی ندارد، حتی اگر چنین باشد، ارزیابی دوام سازه‌ها بعد از قرارگیری در معرض دمای زیاد امری ضروری خواهد بود.

از عوامل مؤثر در کاهش مقاومت بتن در برابر دمای زیاد، وقوع پدیده‌ای تحت عنوان پکیدن است. دلیل اصلی پکیدن بتن در برابر دمای زیاد، افزایش فشار منفذی داخلی در نتیجه تخریب آب موجود در ترکیب می‌باشد [۲]. در بتن‌هایی که دارای منافذ ریزی در ساختار خود باشند، مانند بتن‌های توانمند (HPC)، این فشار داخلی امکان خروج نداشته و در نتیجه بتن می‌پکد.

تحقیقاتی نیز توسط نوموو (Noumowe) بر روی مقاومت بتن خودتراکم مقاومت بالا در برابر دمای زیاد صورت گرفته است. وی آزمایش‌ها را تا دو دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد انجام داد و طبق گزارش‌های ارائه شده توسط این محقق مقاومت پسماند نمونه‌های بتن معمولی و نمونه‌های بتن خودتراکم مقاومت بالا، مشابه بوده ولی خطر پکیدن بتن خودتراکم به مراتب بیشتر می‌باشد [۴].

لارش بوستروم (Lars Boström) پکیدن بتن خودتراکم در برابر آتش را بررسی کرد و نشان داد که این موضوع برای

SCCها جدی‌تر از بتن‌های معمولی است [۵].

درکل می‌توان گفت حجم کارهای تحقیقاتی صورت گرفته بر روی خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم در برابر دمای زیاد در مقایسه با بتن‌های معمولی و مقاومت بالا بسیار اندک است. رفتار واقعی بتن در معرض دمای زیاد، نتیجه چندین عامل همزمان وابسته بهم است که تحلیل دقیق آنها نسبتاً پیچیده می‌باشد. با این وجود سعی شده، تا با انجام این پژوهش، خواص مکانیکی ۴ نوع بتن (بتن معمولی، بتن خودتراکم معمولی، بتن خودتراکم حاوی پومیس بصورت جایگزین سیمان و جایگزین فیلر) در برابر دمای زیاد، تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی و نسبت‌های اختلاط

سیمان پرتلند مصرفی از نوع ۱ محصول کارخانه سیمان تهران می‌باشد. مشخصات شیمیایی پومیس و سیمان مصرفی در جدول شماره (۱) درج شده است. سنگدانه با حداکثر قطر اسمی ۲/۸ اینچ (۱۵ میلیمتر) انتخاب گردید. ریزدانه و درشت دانه از نوع شکسته، تولیدی شرکت متوساک بوده و فیلر مصرفی از دو محصول شرکت دگوسا (با عنوان تجاری فیلر هواکش و ماسه سیلیسی M90) می‌باشد. ماده افزودنی مورد استفاده، فوق‌روان‌کننده‌ای بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های بهینه شده و با نام تجاری Glenium 51 است.

به منظور بررسی خواص مکانیکی بتن خود تراکم حاوی پومیس در برابر دمای زیاد در مقایسه با دیگر بتن‌ها، ۴ طرح ساخته شد که عبارتند از : بتن معمولی (بتن شاهد) (TC)، بتن خودتراکم معمولی (بتن شاهد) (SCC)، بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین سیمان (P1) و بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین فیلر (P2). خلاصه‌ای از طرح‌های اختلاط و نتایج آزمایش‌های بتن تازه طبق استاندارد افنارک (EFNARC)، در جدول شماره (۲) ارائه شده است [۶].

۲-۲- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش

نمونه‌ها به صورت مکعبی و به اضلاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شد. کلیه نمونه‌ها پس از یک روز از قالب خارج و سپس به اتاق عمل‌آوری منتقل شده و در شرایط استاندارد (دمای ۲۳±۲ درجه سانتیگراد و رطوبت اشباع) به مدت ۲۸ روز تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند.

در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها تا رسیدن به وزنی ثابت خشک



۳-۲- چکش اشमित

نتایج چکش اشमित نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۳) مشاهده می‌شود. این آزمایش با وجود اینکه از دقت بالایی برخوردار نیست، اما بدلیل غیرمخرب بودن می‌تواند در تعیین سختی سطح بتن کمک کند. همانطور که در شکل مشهود است، نتایج چکش اشमित نمونه‌های طرح P1 تا دمای ۴۵۰°C افزایش یافته‌اند، اما بعد از این دما نتایج چکش اشमित در تمامی نمونه‌ها دچار کاهش شده‌اند.

افزایش دما تا ۲۰۰°C باعث خشک و سخت شدن لایه سطحی نمونه‌ها شده که در نتیجه آن نتایج چکش اشमित افزایش کمی می‌یابند. در دماهای زیادتر، ترکهای داخلی و تجزیه شیمیایی لایه سطحی نمونه‌ها شدت گرفته و باعث کاهش نتایج چکش اشमित می‌گردند.

۳-۳- سرعت عبور موج التراسونیک

نتایج سرعت عبور موج التراسونیک نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۴) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، سرعت عبور موج با افزایش دما، کاهش پیدا کرده است.

پرواضح است که سرعت عبور موج از داخل نمونه‌های بتنی از ریزترکهای بوجود آمده در درون آنها متأثر خواهد بود و می‌توان کاهش سرعت عبور موج را با افزایش دما بواسطه گسترش ریزترکها در بتن دانست.

گسترش ریزترکها بخصوص تا دمای ۳۰۰°C افزایش می‌یابد، که باعث کاهش دوام بتن‌ها در دماهای زیادتر نظیر ۴۵۰°C، ۶۰۰°C و ۸۰۰°C می‌گردد [۹]، [۱۰].

۳-۴- میزان کاهش وزن

میزان کاهش وزن نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۵) مشاهده می‌شود. همانطور که مشهود است میزان کاهش وزن نمونه‌های بتن معمولی (بتن شاهد) (TC) در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشتر است. بین دمای ۲۳±۲°C و ۲۰۰°C، در همه نمونه‌ها کاهش وزن سریعی رخ داده است، بویژه در طرحهای TC و SCC. علت این کاهش وزن را می‌توان تبخیر آب آزاد و قسمتی از آب مقید فیزیکی ذکر کرد [۱۱].

از دمای ۲۰۰°C تا ۶۰۰°C، کاهش وزن شامل تبخیر آب مقید شیمیایی حاصل از تجزیه CSH و دهیدراته شدن CH می‌باشد [۱۱]. از دمای ۶۰۰°C به بالا کاهش وزن زیادی در نمونه‌ها رخ می‌دهد، که در نتیجه تجزیه فیلر سنگ آهکی و آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن است [۱۲]:

شده و پس از توزین در داخل کوره برقی‌ای که دمای آن با سرعت ثابت (۲.۵ °C/min) تا رسیدن به دمای مورد نظر افزایش می‌یافت، قرار داده شدند. آزمایش‌ها در دمای محیط (۲۳±۲ درجه سانتیگراد) و دماهای ۲۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. پس از رسیدن دمای کوره به دمای موردنظر، نمونه‌ها را به مدت ۲ ساعت در آن دما در کوره نگه داشته شدند و پس از آن از داخل کوره بیرون آورده شدند و به آنها اجازه داده شد تا به دمای محیط برسند. سپس توزین نمونه‌ها به منظور تعیین میزان کاهش وزن و نیز آزمایش‌های مقاومت فشاری و غیر مخرب نظیر چکش اشमित و امواج التراسونیک انجام شدند.

۳- نتایج آزمون‌ها

۳-۱- مقاومت فشاری پسماند

مقدار مقاومت فشاری پسماند نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۲) ارائه شده است. هنگامیکه بتن در معرض دمای زیاد قرار می‌گیرد، تغییراتی در خواص مکانیکی و دوام آن در نتیجه تغییرات همزمان شیمیایی و فیزیکی در خمیر سیمان سخت شده (HCP)، سنگدانه‌ها و مرز مشترک این دو ماده رخ می‌دهد که پی بردن به دلایل وقوع این تغییرات مشکل به نظر می‌رسد.

همانطور که در شکل شماره (۲) دیده می‌شود، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های طرح P2 تا دمای ۴۵۰°C افزایش یافته و این افزایش در نمونه‌های طرح P1 در مقایسه با بتن معمولی (بتن شاهد) (TC) و بتن خودتراکم معمولی (بتن شاهد) (SCC) میزان بیشتری دارد. با توجه به شکل می‌توان گفت مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از دمای ۴۵۰°C به بعد کاهش یافته‌اند و در دمای ۸۰۰°C تقریباً ۳۰ درصد مقاومت اولیه خود را حفظ کرده‌اند.

دلایل افزایش مقاومت فشاری را می‌توان سخت شدن خمیر سیمان در اثر تبخیر آب آزاد، که باعث افزایش نیروهای وان‌دروالس که در نتیجه نزدیکی لایه‌های ژل سیمان به یکدیگر پدید می‌آید و نیز دهیدراته شدن مواد سیمانی موجود در بتن در اثر افزایش دما که باعث ازدیاد سختی خمیر سیمان می‌شوند، ذکر کرد [۷]، [۸].

با مقایسه نتایج مقاومت فشاری می‌توان گفت نمونه‌های طرح P1 دارای رفتار بهتری از نقطه نظر میزان مقاومت پسماند نسبت به سایر طرحها دارا هستند.

لازم به ذکر است که در هیچکدام از نمونه‌ها پدیده پکیدن رخ نداده است.

۴- بررسی ارتباط نتایج با یکدیگر**۴-۱- مقاومت فشاری پسماند با سرعت عبور موج****التراسونیک**

مقدار مقاومت فشاری پسماند نمونه‌ها نسبت به نتایج سرعت عبور موج التراسونیک در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۶) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشهود است از دمای 45.0°C به بالا، هم مقاومت فشاری و هم سرعت عبور موج التراسونیک به علت گسترش ترکهای درونی نمونه، کاهش می‌یابند. اگرچه هیچ رابطه خطی بین این نتایج دیده نمی‌شود.

۴-۲- مقاومت فشاری پسماند با میزان کاهش وزن

مقدار مقاومت فشاری پسماند نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۷) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان دریافت، نمونه‌های بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین فیلر (P2) در عین اینکه نسبت به نمونه‌های بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین سیمان (P1) تقریباً دارای کاهش وزن یکسانی در دماهای مورد آزمایش هستند، لکن نمونه‌های طرح P1 دارای کاهش مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های طرح P2 هستند.

بین دماهای 45.0°C و 80.0°C نیز تقریباً رابطه‌ای خطی بین مقدار مقاومت فشاری پسماند نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها قابل مشاهده است.

۴-۳- سرعت عبور موج التراسونیک با میزان کاهش**وزن**

نتایج التراسونیک نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها در هر دما در سن ۲۸ روزه در شکل شماره (۸) ارائه شده است.

با توجه به شکل با افزایش دما هم سرعت عبور موج التراسونیک و هم وزن نمونه‌ها کاهش می‌یابند. با ازدیاد دما در نتیجه تجزیه شیمیایی مواد وزن کاهش یافته و در عین حال این افزایش دما باعث بوجود آمدن ریزترکها در ساختار خمیر سیمان و نیز تغییر ریزساختار بتن می‌شود، که در نتیجه سرعت عبور موج التراسونیک هم کاهش می‌یابد. و نیز هیچ رابطه خطی بین تغییرات این نتایج دیده نمی‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیقات و آزمایش‌ها نشان می‌دهد:

۱- تفاوت نتایج حاصل از آزمایش‌های غیرمخرب چکش اشमित و التراسونیک برای بتن‌های معمولی و خودتراکم با یکدیگر مشهود می‌باشد. این تفاوتها به دلیل تأثیر سختی لایه سطحی نمونه‌ها در نتایج چکش اشमित و نیز وقوع ریزترکها در نتایج التراسونیک می‌باشند. به نظر می‌رسد برای تخمین نسبتاً درستی از مقاومت نمونه‌ها، استفاده از آزمایش غیرمخرب التراسونیک روش مناسبتری است.

۲- در محدوده دمایی $20 \pm 2^\circ\text{C}$ و 45.0°C ، در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین فیلر افزایش مقاومت مشاهده می‌گردد. همچنین افت مقاومتی بین ۷۰٪ تا ۷۵٪ در تمامی نمونه‌ها در محدوده دمایی 45.0°C و 60.0°C مشاهده می‌شود. در دمای 80.0°C نیز مقاومت پسماند نمونه‌ها بین ۳۰-۲۵ درصد مقاومت اولیه می‌باشد.

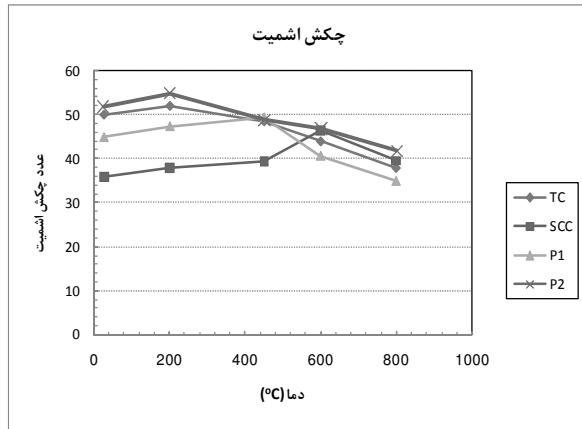
۳- در نهایت با توجه به نتایج تحقیقات و آزمایش‌های محدود انجام شده می‌توان نتیجه گرفت بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین سیمان از نظر مقاومت و دوام در برابر دماهای زیاد، دارای وضعیت بهتری نسبت به سایر طرحها می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات شیمیایی پومیس و سیمان مصرفی

K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	(%) آنالیز شیمیایی
۱.۱۵	۴.۸	۱.۳۴	۴.۶	۳.۸۶	۱۷.۳	۶۴.۶	پومیس
۰.۹۵	۰.۱۲	۴.۸۰	۶۱.۵	۲.۷۶	۳.۶۸	۲۱.۵	سیمان
			C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	(%) ترکیب شیمیایی
			۸.۴	۵.۱	۲۳.۱	۵۱.۱	سیمان

جدول (۲): طرحهای اختلاط و نتایج آزمایش‌های بتن تازه

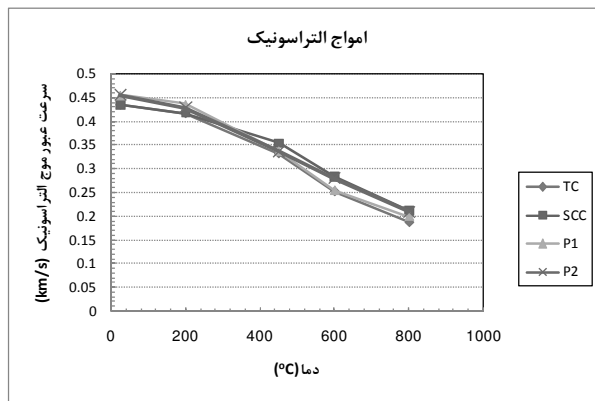
مصالح	نام طرح	TC	SCC	P1	P2
سیمان (kg/m^3)		۴۵۰	۴۵۰	۲۸۲.۵	۴۵۰
پومیس (kg/m^3)		—	—	۶۷.۵	۶۷.۵
فیلر (kg/m^3)		—	—	۱۵۰	۸۲.۵
درشت دانه (kg/m^3)		۹۰۰	۹۰۰	۸۸۰	۸۹۰
ریز دانه (kg/m^3)		۶۰۰	۶۰۰	۵۹۴	۵۹۴
آب (kg/m^3)		۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰
w/c		۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴
اسلامپ (mm)		۱۵۰	۷۱۵	۷۶۰	۷۱۰
جریان اسلامپ (mm)		—	۷۲۰	۷۳۰	۷۰۰
جعبه L (H_2/H_1)		—	۰.۹۵	۱	۱.۰۵
قیف V (s)		—	۹	۵.۵	۵.۷
مقاومت ۲۸ روزه (MPa)		۶۰	۵۵	۴۵	۶۹



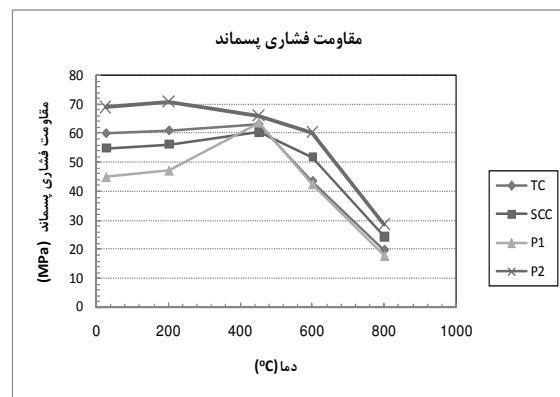
شکل (۳): نتایج چکش اشmitt نمونه‌ها



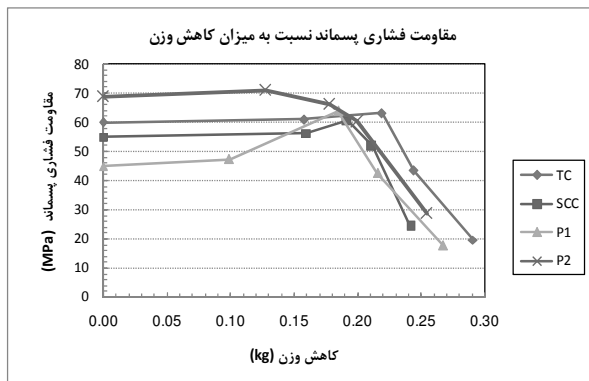
شکل (۱): نمونه‌ها در داخل کوره برقی



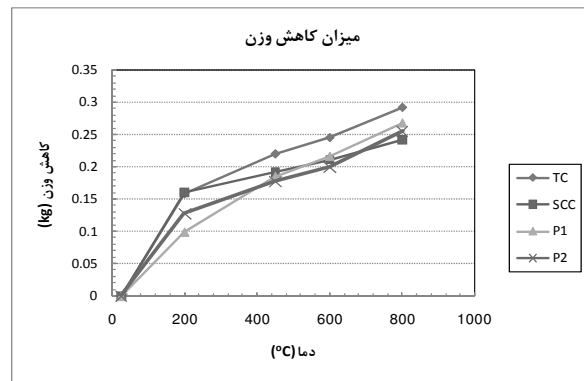
شکل (۴): نتایج سرعت عبور امواج التراسونیک نمونه‌ها



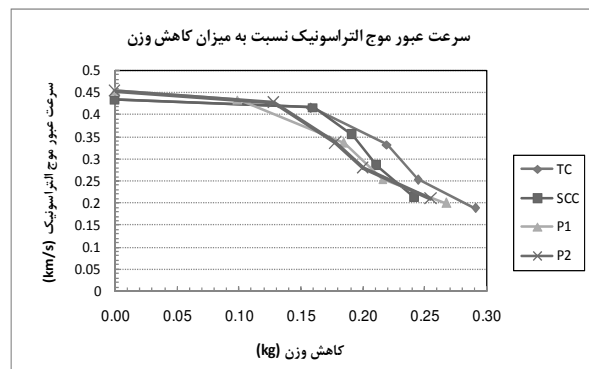
شکل (۲): مقاومت فشاری پسماند نمونه‌ها



شکل (۷): مقاومت فشاری پسماند نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها



شکل (۵): میزان کاهش وزن نمونه‌ها



شکل (۸): نتایج التراسونیک نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها



شکل (۶): مقاومت فشاری پسماند نسبت به نتایج التراسونیک نمونه‌ها

۶- مراجع

- Khoury, G. A., "Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment", Mag. Concrete Res., 44(161), pp.291-309, 1999. [۷]
- Dias, D. P. S., Khoury, G. A., Sullivan, P. J. E., "Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1,292°F)", ACI Mater. J., 87(2), pp.160-165, 1990. [۸]
- Lin, W. M., Lin, T. D., Powers-Couche, L. J., "Microstructures of fire-damaged concrete", ACI Mater. J., 93(3), pp.199-205, 1996. [۹]
- Riley, M. A., "Possible new method for assessment of fire damaged concrete", Mag. Concrete Res., 43(155), pp.87-92, 1991. [۱۰]
- Bazant, Z. P., Kaplan, M. F., "Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models", Longman, London, 1996. [۱۱]
- G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, L. Taerwe, P. Vandeveldel., "Phase distribution and microstructural changes of self-consolidating cement paste at elevated temperature", Cement & Concrete Research, 2007. [۱۲]
- Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete, Development, Applications and Investigations", Proceeding of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, Reykiavik, pp.29-34, 1999. [۱]
- Bartos, P.J.M., Gibbs, J.C. Zhu, W., "Uniformity of in situ properties of Self- Compacting Concrete in full scale structural elements", Cement and Concrete Composites, 2001. [۲]
- Kalifa, P., Menneteau, F.D, Quenard, D. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures." Cement & Concrete Research, 30(12), pp.1915-1927, 2000. [۳]
- Noumowe, A., Carre, H., Daoud, A., Toutanji H., "High-Strength Self-Compacting Concrete Exposed to Fire Test ", ASCE Materials Journal, 2006, Vol. 18, pp. 754-758. [۴]
- Boström, L., "Self-Compacting Concrete Exposed to Fire." Third International Symposium on Self-compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp. 17-20, August, 2003. [۵]
- EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", Feb. 2002. [۶]