

# خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی پومیس در برابر دمای زیاد

علی اکبر رمضانپور<sup>i\*</sup>؛ رضا اسماعیلی<sup>ii</sup>

## 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

<sup>i\*</sup> نویسنده مسئول و استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ aaramce@aut.ac.ir

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

SCC ها جدی تر از بتن های معمولی است [۵]. در کل می توان گفت حجم کارهای تحقیقاتی صورت گرفته بر روی خواص مکانیکی بتن های خودتراکم در برابر دمای زیاد در مقایسه با بتن های 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 می باشد. 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 نسبت های اختلاط

سیمان پرتلند مصرفی از نوع ۱ محصول کارخانه سیمان تهران می باشد. 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 ) می باشد. ماده افزودنی مورد استفاده، فوق روان کننده ای بر پایه پلی کروکسیلات های 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 بتن ها، 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). خلاصه ای از طرح های اختلاط و نتایج آزمایش های بتن تازه طبق استاندارد افنارک ( EFNARC )، در جدول شماره (۲) ارائه شده است [۶].

### ۲-۲- نحوه آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش

نمونه ها به صورت مکعبی و به اضلاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شد. کلیه نمونه ها پس از یک روز از قالب خارج و سپس به اتاق عمل آوری 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 نمونه ها تا رسیدن به وزنی ثابت خشک

از سال ۱۹۸۳ مسئله دوام سازه های بتن آرمه توجه محققین ژاپنی را به خود جلب کرد. برای ایجاد سازه های 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 قالب ها 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 مخلوط های 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 تفاوت های 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 سازه های ساخته شده با این بتن نوین در معرض محیط های 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 سازه ها بعد از قرارگیری در معرض دمای زیاد امری ضروری خواهد بود.

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

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

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

شده و پس از توزین در داخل کوره برقی‌ای که دمای آن با سرعت ثابت  $2.5$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) تا رسیدن به دمای مورد نظر افزایش می‌یافت، قرار داده شدند. آزمایش‌ها در دمای محیط ( $23 \pm 2$ ) درجه سانتیگراد ( و دماهای  $200$ ،  $450$ ،  $600$  و  $800$ ) درجه سانتیگراد انجام گرفت. پس از رسیدن دمای کوره به دمای موردنظر، نمونه‌ها را به مدت  $2$  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  $28$  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  $450^{\circ}\text{C}$  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  $450^{\circ}\text{C}$  به بعد کاهش یافته‌اند و در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  تقریباً  $30$  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 هیدراته شدن مواد سیمانی موجود در بتن در اثر افزایش دما که باعث ازدیاد سختی خمیر سیمان می‌شوند، ذکر کرد [7]، [8].

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 پکیندن رخ نداده است.

#### ۳-۲- چکش اشमित

نتایج چکش اشमित نمونه‌ها در هر دما در سن  $28$  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  $450^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته‌اند، اما بعد از این دما نتایج چکش اشमित در تمامی نمونه‌ها دچار کاهش شده‌اند.

افزایش دما تا  $200^{\circ}\text{C}$  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  $28$  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  $300^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد، که باعث کاهش دوام بتن‌ها در دماهای زیادتر نظیر  $450^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  می‌گردد [9]، [10].

#### ۳-۴- میزان کاهش وزن

میزان کاهش وزن نمونه‌ها در هر دما در سن  $28$  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  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  و  $200^{\circ}\text{C}$ ، 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 [11].

از دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$ ، کاهش وزن شامل تبخیر آب مقید شیمیایی حاصل از تجزیه CSH و هیدراته شدن CH، می‌باشد [11]. از دمای  $600^{\circ}\text{C}$  به بالا کاهش وزن زیادی در نمونه‌ها رخ می‌دهد، که در نتیجه تجزیه فیلر سنگ آهکی و آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن است [12]:

**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  $45.0^\circ\text{C}$  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  $45.0^\circ\text{C}$  و  $80.0^\circ\text{C}$  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  $45.0^\circ\text{C}$ ، 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  $45.0^\circ\text{C}$  و  $60.0^\circ\text{C}$  مشاهده می‌شود. در دمای  $80.0^\circ\text{C}$  نیز مقاومت پسماند نمونه‌ها بین ۳۰-۲۵ درصد مقاومت اولیه می‌باشد.

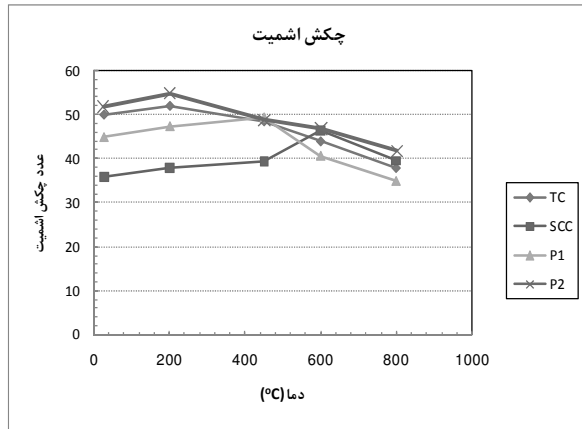
۳- در نهایت با توجه به نتایج تحقیقات و آزمایش‌های محدود انجام شده می‌توان نتیجه گرفت بتن خودتراکم با ۱۵٪ وزنی پومیس بصورت جایگزین سیمان از نظر مقاومت و دوام در برابر دماهای زیاد، دارای وضعیت بهتری نسبت به سایر طرحها می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات شیمیایی پومیس و سیمان مصرفی

K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	(%) 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 <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	(%) ترکیب شیمیایی
			۸.۴	۵.۱	۲۳.۱	۵۱.۱	سیمان

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

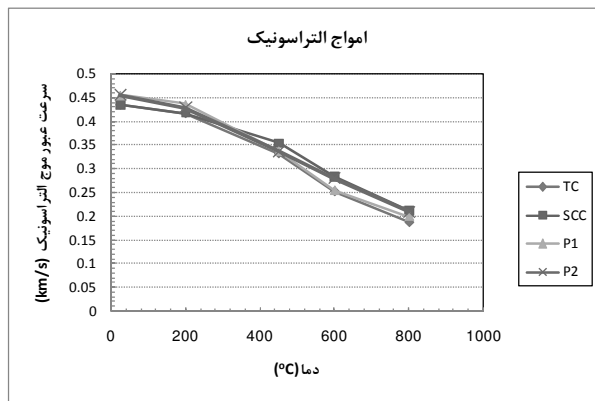
نام طرح	TC	SCC	P1	P2
سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	۴۵۰	۴۵۰	۲۸۲.۵	۴۵۰
پومیس ( $\text{kg/m}^3$ )	—	—	۶۷.۵	۶۷.۵
فیلر ( $\text{kg/m}^3$ )	—	—	۱۵۰	۸۲.۵
درشت دانه ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۰۰	۹۰۰	۸۸۰	۸۹۰
ریز دانه ( $\text{kg/m}^3$ )	۶۰۰	۶۰۰	۵۹۴	۵۹۴
آب ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰
w/c	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴
اسلامپ (mm)	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



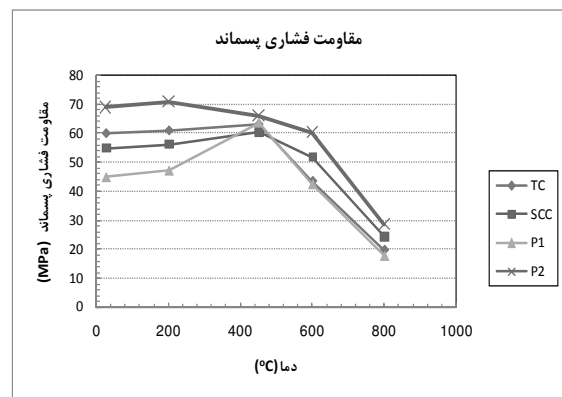
شکل (۳): نتایج چکش اشمیت نمونه‌ها



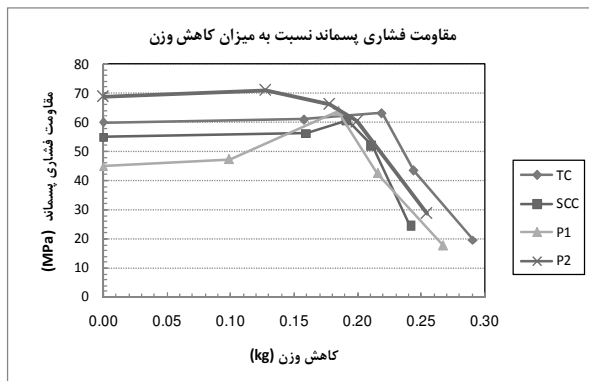
شکل (۱): نمونه‌ها در داخل کوره برقی



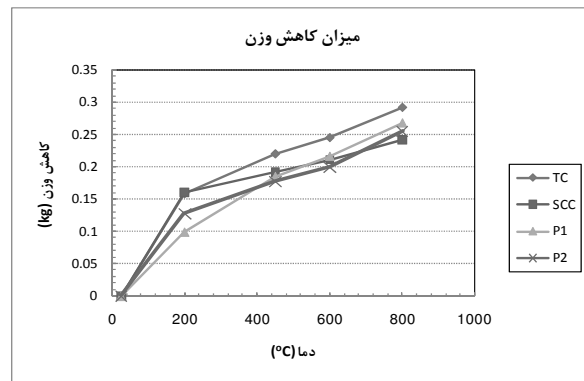
شکل (۴): نتایج سرعت عبور امواج التراسونیک نمونه‌ها



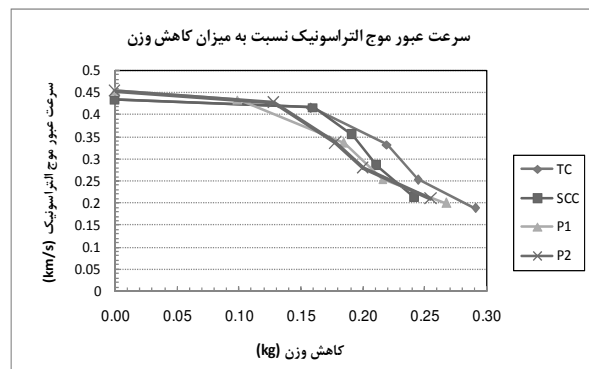
شکل (۲): مقاومت فشاری پسماند نمونه‌ها



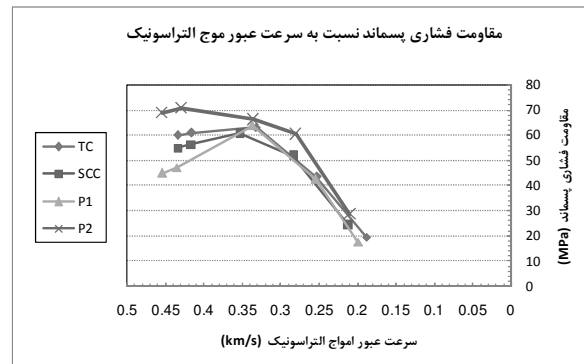
شکل (۷): مقاومت فشاری پسماند نسبت به میزان کاهش وزن نمونه‌ها



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 17<sup>th</sup> 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]