

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات حرارتی بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی

محمد حسین جبارخانی^۱، قاسم دهقانی اشکزری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۲/۰۷/۱۷، پذیرش: ۹۴/۰۱/۳۰)

چکیده

در سال‌های اخیر، پیشرفت در زمینه تکنولوژی بتن به تولید بتن فوق توانمند الیافی و توانمند منتج شده است. دو خصوصیت اصلی بدنه سیمانی با مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال و دارا بودن رفتار شکل‌پذیر به دلیل وجود الیاف، بتن فوق توانمند را از انواع دیگر بارز می‌کند. سازه‌های بتنی در طول عمر خود شرایط دمایی مختلف را تجربه می‌کنند و این موارد بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن اثر مستقیم دارد. این اثرات می‌تواند شامل تغییرات دمایی جوی طبیعی یا شرایط غیر طبیعی مانند آتش‌سوزی باشد. از این رو بررسی اثرات دما بر روی بتن به ویژه بتن فوق توانمند که انتظار مقاومت بالایی از آن می‌رود، بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق ویژگی‌های حرارتی یک نوع بتن فوق توانمند مسلح با الیاف فولادی با محاسبه ضریب انبساط حرارتی و مقاومت در برابر حرارت بالا بررسی شده است. ضریب انبساط حرارتی بتن فوق توانمند بیش از بتن توانمند و مقادیر گزارش شده برای بتن معمولی می‌باشد. در آزمایش حرارتی در نمونه‌های خشک نشده با افزایش دما به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقاومت نمونه‌ها کاسته شده است. در نمونه‌های خشک شده حساسیت بتن فوق توانمند نسبت به حرارت بیش از بتن توانمند می‌باشد.

کلید واژه‌ها: بتن فوق توانمند الیافی، ضریب انبساط حرارتی، مقاومت در برابر حرارت بالا.

Experimental Investigation of Thermal Characteristics of Ultra High Performance Concrete reinforced with steel fibres

M. Hossein Jabbarkhani, G. Dehghani Ashkezari*

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 08/10/2013; Accepted: 21/04/2015)

Abstract

In the recent years, development in concrete technology results in production of ultrahigh performance fiber concrete. Having more than 150 MPa compressive strength and ductile behavior are two main characteristics of this concrete. Concrete structures experience different thermal conditions during their age and these conditions have direct influences on mechanical properties and durability of concrete. These effects can be natural atmospheric temperature difference or manmade conditions like fire. So investigation of temperature effects on concrete specially ultrahigh performance concrete which is expected to have high strength, is very important. In this research thermal characteristics of an ultrahigh performance concrete reinforced with steel fibers is investigated through calculating thermal expansion coefficient and resistance against high temperature. Thermal expansion coefficient of ultrahigh performance fiber concrete is higher than high performance concrete and normal concrete. In high temperature experiment, in wet specimens, by increasing the temperature to 400 °C the strength of specimens decreased. In dry specimens, ultrahigh performance concrete is more sensitive to temperature increase than high performance concrete.

Keywords: Ultrahigh Performance Fiber Concrete, Thermal Expansion Coefficient, Resistance against High Temperature EMP.

*Corresponding Author E-mail: ghdeas@yahoo.com

۱. مقدمه

استفاده از سنسور اپتیک رشته‌ای آزمایش کرده‌اند. کادا [۷] ضریب انبساط حرارتی بتن توانمند را در سنین اولیه تعیین کرده و ویت من [۸] این ضریب را در خمیر سیمان سخت شده بررسی کرده است. داوونی [۹] اثر حرارت و رطوبت بر خصوصیات مکانیکی بتن را تحلیل کرده است. گرایبل [۱۰] نیز در مطالعات وسیع خود در مورد بتن فوق توانمند ضریب انبساط حرارتی را مورد آزمایش قرار داده است.

قرارگیری بتن در حرارت زیاد یکی از شدیدترین شرایطی است که ممکن است بتن در معرض آن قرار گیرد. بتن دارای دوام خوبی در حرارت بالا و آتش‌سوزی می‌باشد و می‌تواند محافظ مناسبی برای میلگردهای تسلیح کننده بتن باشد. زمانی که بتن در معرض دمای زیاد قرار می‌گیرد، خصوصیات نظیر قابلیت باربری و دوام آن به علت فرآیندهای ترمومکانیک و ترموهیدرولیک دچار افت می‌شوند و منجر به ترک خوردگی، افت مقاومت فشاری و قله‌کن شدن می‌گردد. وقتی که درجه حرارت بتن زیاد می‌شود، این ماده دچار تغییراتی در ترکیبات شیمیایی و ساختار فیزیکی می‌شود. این تغییرات در وهله اول در خمیر سیمان به وقوع می‌پیوندد و از تجزیه هیدروکسید کلسیم (CH) در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع و تا نابودی کامل C-S-H در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه پیدا می‌کند. سنگدانه‌ها نیز بر حسب نوع آن‌ها (کوارتز و یا کربناتی) رفتار متفاوت دارند.

دو علت عمده برای ایجاد ضعف‌های ذکر شده به ویژه قله‌کن شدن بتن در مراجع بیان شده است. یک احتمال آن است که قله‌کن شدن به علت انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه به علت عدم سازگاری بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد. زمانی که نمونه تحت حرارت قرار می‌گیرد، در مراحل اولیه سنگدانه‌ها منبسط می‌شوند، در حالی که خمیر سیمان به علت از دست دادن آب منقبض می‌شود و باعث به وجود آمدن تنش حاصل از جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود. در بتن‌های توانمند ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه متراکم‌تر بوده و باعث به وجود آمدن تنش بیشتری می‌شود [۱۱]. همچنین تنش داخلی در بتن از تغییرات ریزساختاری در بتن به علت فشار ایجاد شده ناشی از بخار آب در خلل و فرج بتن نیز به وجود می‌آید [۱۲ و ۱۳]. در واقع فشار زیاد بخار آب که نمی‌تواند از بتن خارج شود (به علت حفرات ریز) باعث قله‌کن شدن بتن می‌شود. بنابراین هر اندازه بتن متراکم‌تر باشد، خطر قله‌کن شدن افزایش می‌یابد [۱۴]. مقاومت در برابر حرارت بالا به پارامترهایی نظیر هندسه المان، مواد استفاده شده در ساخت بتن، شدت بار، سرعت گرم کردن و خصوصیات حرارت بستگی دارد.

تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن خطر قله‌کن شدن بتن تحت حرارت بالا را تا حدی زیادی کاهش می‌دهد [۱۵]. بر اساس گزارش این پژوهشگران، بهترین عملکرد مربوط به ترکیب الیاف فلزی و پلی‌پروپیلن بوده است. مقبول‌ترین تئوری در زمینه توجیه این پدیده، ذوب شدن الیاف در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و در نتیجه ایجاد فضا (کانال) برای فشار ایجاد شده از بخار است.

از پیشرفت‌های اخیر در زمینه تکنولوژی بتن، بتن فوق توانمند الیافی می‌باشد که به دلیل داشتن مقاومت‌های کششی و فشاری بالا و رفتار شکل‌پذیر در سازه‌های دفاعی و به منظور افزایش مقاومت در برابر انفجار و ضربه و نفوذ پرتابه استفاده می‌شود.

بتن فوق توانمند دارای خصوصیات عمده مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵۰ مگاپاسکال، دارا بودن الیاف پرمقاومت برای دستیابی به رفتار شکل‌پذیر، مقدار بیشتر سیمان و نوع خاص سنگدانه نظیر کوارتز و بازالت بسیار سخت می‌باشد. در بتن فوق توانمند یکنواختی و چگالی با حذف درشت دانه و بهینه‌سازی رفتار دانه‌ای افزایش می‌یابد. بهبود خواص ماتریس با استفاده از افزودنی‌های پوزولانی حاصل شده و نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۲۵ است. همچنین با به کار بردن الیاف ریز فلزی ظرفیت کششی و شکل‌پذیری بسیار افزایش می‌یابد. الیاف مورد استفاده در بتن فوق توانمند معمولاً کوتاه، نرم و مستقیم می‌باشند در حالی که الیاف فلاپ‌دار معمولاً در بتن توانمند و یا معمولی استفاده می‌شوند. برای ساخت بتن فوق توانمند الیاف با قطر ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر و طول ۳ تا ۲۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدول الاستیسیته الیاف فولادی در حدود ۲۰۰ GPa، مقاومت کششی آن‌ها بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاپاسکال و تغییر شکل آن‌ها در هنگام گسیختگی ۳ تا ۴ درصد است. استفاده از ۲ درصد حجمی الیاف، معمول‌ترین میزان استفاده از الیاف در بتن فوق توانمند می‌باشد. رفتار خمشی بتن فوق توانمند با بهبود تراکم دانه‌ای و افزودن الیاف به آن که منجر به نگاه داشتن خمیر سیمان دو طرف ترک‌ها در کنار هم می‌شوند، افزایش می‌یابد، این پدیده را اثر پل زدن می‌نامند. بتن توانمند فاقد الیاف بوده و شامل دانه‌بندی درشت‌تر نسبت به بتن فوق توانمند است.

بررسی اثرات دمایی بر روی بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این تغییرات دما می‌تواند منشأ طبیعی یا غیر طبیعی داشته باشد. تأثیرات تغییر دما را می‌توان با به وسیله تحلیل ضریب انبساط حرارتی بتن و قرارگیری در برابر حرارت بالا بررسی کرد.

آگاهی نسبت به میزان ضریب انبساط حرارتی در مدل‌سازی رفتار مواد در حرارت اهمیت فراوانی دارد. تنش‌های حرارتی اضافه در مواد سیمانی می‌توانند منجر به ترک خوردگی و قله‌کن شدن بتن شوند. بنابراین در صورت توانایی در مدل کردن کرنش‌های ناشی از حرارت در مواد، می‌توان انتظار داشت که در مرحله طراحی این مورد به درستی در نظر گرفته شده و تدابیر لازم برای کنترل آن اتخاذ گردد. کیم و همکاران [۱] و دو [۲] ضریب انبساط حرارتی بتن با سنگدانه‌های مختلف را بررسی کرده‌اند. تومن [۳] به بررسی ضریب انبساط حرارتی بتن توانمند در دمای بین ۲۰ تا ۱۰۰۰ و در شرایط رطوبتی متفاوت پرداخته است. در [۴] شین ضریب انبساط حرارتی در بتن را به منظور استفاده در روسازی‌های بتنی مورد آزمایش قرار داده است. لی و چایلدا [۵ و ۶] ضریب انبساط حرارتی بتن را با

جدول ۱. طرح اختلاط بتن فوق توانمند و خصوصیات بتن تازه

کد نمونه	سیمان (kg/m ^۳)	دوده سیلیس (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	فوق روان ساز (kg/m ^۳)	الیاف (kg/m ^۳)	سنگدانه (kg/m ^۳)	نسبت آب به سیمان	چگالی (kg/m ^۳)	قطر بازشدگی (mm)	مقاومت فشاری (MPa)
U1	۱۰۵۰	۳۵۰	۲۲۴	۴۲	۷۸	۶۷۸	۰/۱۶	۲۴۲۴	۱۹۴/۳	۱۴۹/۷
U2	۱۰۵۰	۳۵۰	۲۲۴	۴۲	۱۵۶	۶۷۸	۰/۱۶	۲۴۱۵	۱۸۹/۴	۱۶۱/۳

جدول ۲. طرح اختلاط بتن توانمند و خصوصیات بتن تازه

کد نمونه	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m ^۳)	دوده سیلیس (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	ماسه (kg/m ^۳)	شن نخودی (kg/m ^۳)	شن بادامی (kg/m ^۳)	روان کننده	چگالی (kg/m ^۳)	اسلامپ (cm)	درصد هوا	مقاومت فشاری (MPa)
H	۰/۳۶	۳۷۰	۳۰	۱۴۴	۱۱۵۳	۸۹	۵۶۰	۲	۲۳۴۹	۱۵	۰/۸	۴۹/۲

جدول ۳. مقایسه طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن‌های فوق توانمند الیافی

مرجع	سیمان (kg/m ^۳)	دوده سیلیس (kg/m ^۳)	نسبت آب به سیمان	درصد الیاف	مقاومت فشاری (MPa)
یانگ [۱۹]	۹۵۰	۲۳۸	۰/۲	۲	۱۹۰
حسن [۲۰]	۶۵۷	۱۱۹	۰/۱۷	۲	۱۵۰
یانگ [۲۱]	۶۵۷	۱۱۹	۰/۱۵	۲	۱۲۰
تولدو فیلو [۲۲]	۱۰۱۱	۵۸	۰/۱۵	۲	۱۶۰
کورینالدسی [۲۳]	۹۶۰	۲۴۰	۰/۱۶	۲/۵	۱۵۵
هابل [۲۴]	۱۰۵۰	۲۷۵	۰/۱۴	۶	۱۶۰
آقای یو ۱ [۲۵]	۸۷۵	۴۴	۰/۱۹	۲/۵	۱۵۶
آقای یو ۲ [۲۵]	۶۱۲	۴۴	۰/۱۹	۲/۵	۱۴۲
آقای یو ۳ [۲۵]	۷۰۰	۴۴	۰/۱۹	۲/۵	۱۴۹
نمونه U1	۱۰۵۰	۳۵۰	۰/۱۶	۱	۱۴۹/۷
نمونه U2	۱۰۵۰	۳۵۰	۰/۱۶	۲	۱۶۱/۳

و نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها از این طرح‌ها تهیه شده است. خصوصیات بتن‌ها و مقاومت فشاری آن‌ها در جدول‌های (۱ و ۲) به نمایش درآمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تفاوت U1 و U2 در میزان الیاف است و سایر خواص به منظور مقایسه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. روش اختلاط شامل مراحل زیر می‌باشد:

الف- هم‌زدن اجزا خشک شامل سنگدانه، سیمان و دوده سیلیس به مدت ۵ دقیقه؛

ب- هم‌زدن مخلوط، اضافه کردن تدریجی آب و روان‌ساز به مدت ۴ دقیقه؛

ج- استراحت ۱ دقیقه؛

د- هم‌زدن مخلوط به مدت ۳ دقیقه؛

ه- اضافه کردن الیاف به تدریج و هم‌زدن تا ۴ دقیقه.

به منظور مقایسه بتن‌های مورد استفاده در این تحقیق با موارد مشابه، طرح اختلاط و مقاومت فشاری تعدادی از نمونه‌های بتن فوق توانمند الیافی ارائه شده توسط سایر محققین در جدول (۳) به نمایش درآمده است.

همچنین افزایش الیاف فولادی باعث کاهش خطر قلوه‌کن شدن بتن می‌شود. علت افزایش مقاومت کششی بتن و ظرفیت تغییر شکل نمونه می‌باشد.

در این تحقیق یک نوع بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف ساخته شده، ضریب انبساط حرارتی و سپس قرارگیری بتن در حرارت بالا به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته شده است. جهت بررسی اثر مقدار الیاف فولادی، بتن فوق توانمند با دو مقدار مختلف درصد حجمی الیاف (یک و دو درصد) ساخته شده است. به منظور مقایسه، یک نوع بتن توانمند نیز ساخته و آزمایش‌های مشابه بر روی این نوع بتن نیز انجام شده است.

۲. روش تحقیق

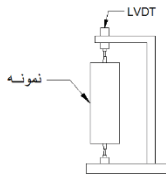
بتن‌های ساخته شده تحقیق، شامل بتن فوق توانمند با یک درصد الیاف (U1)، بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف (U2) و بتن توانمند (H) بوده

گرفته تا خطاهای احتمالی در ثبت دما به حداقل برسد. در این هنگام نمونه‌ها از آب بیرون آورده شده و توسط جابه‌جایی سنج دیجیتال با دقت 0.001 میلی‌متر، اندازه نمونه قرائت و ثبت می‌شود و دمای حوضچه به عدد بعدی تغییر یافته و این فرآیند برای چند نقطه تکرار می‌شود. با توجه به رابطه (۲) داریم:

$$\frac{dL}{L} = \alpha \cdot dT \quad (2)$$

با رسم منحنی dL/L نسبت به dT می‌توان با برازش دادن داده‌ها و به‌دست آوردن شیب خط، ضریب انبساط حرارتی ماده را محاسبه نمود. یک نمونه از دستگاه جابه‌جایی سنج دیجیتال در شکل (۱) به نمایش در آمده است.

بر اساس برخی تحقیقات انتظار می‌رود زمانی که دمای آب به درجه جوشیدن نزدیک می‌شود، رفتار بتن از حالت خطی بودن خارج می‌شود [۶]. علت این امر می‌تواند رخ دادن فعل و انفعالات شیمیایی در بتن و تغییرات ناشی از آن باشد. معمولاً این ضریب در دمای ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌شود [۱۶].



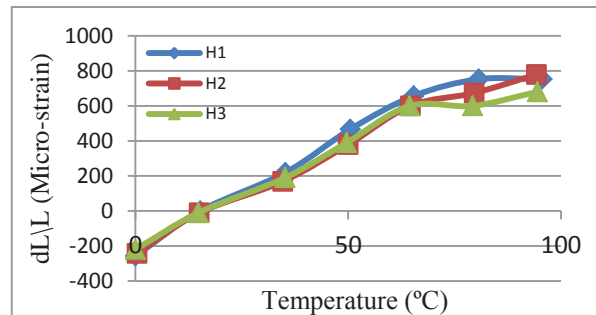
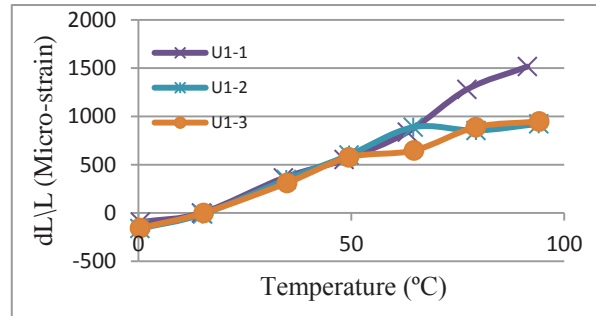
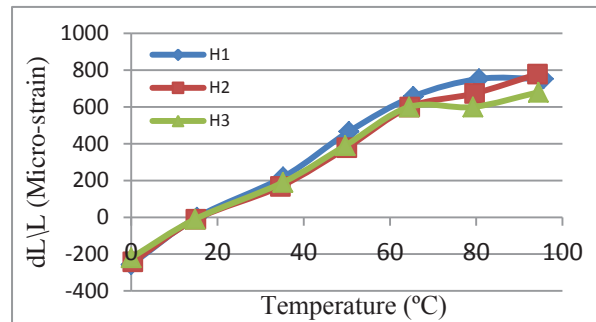
شکل ۲. دستگاه جابه‌جایی سنج دیجیتال

در این پروژه اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه‌ها از دمای صفر تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. همان‌طور که انتظار می‌رفت رفتار بتن در دمای بالاتر از ۸۰ درجه به صورت غیر خطی می‌باشد. در شکل (۱) منحنی تغییر کرنش نمونه‌های بتنی در دماهای مختلف ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار بتن در دمای کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد خطی و پس از آن غیر خطی می‌باشد. لازم به ذکر است از هر نوع از بتن‌های مورد آزمایش (U1، U2، U3) سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، برای به‌دست آوردن ضریب انبساط حرارتی باید قسمت غیر خطی منحنی در نظر گرفته نشود. در واقع ضریب انبساط خطی به‌دست آمده مربوط به بازه دمای بین ۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در دمای بیش از آن، رفتار بتن به دلایلی که قبلاً بیان شد غیر خطی می‌باشد.

در شکل (۳) نمودار تغییرات کرنش نمونه‌ها نسبت به درجه حرارت پس از حذف دو نقطه بیش از ۸۰ درجه نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کلیه نمونه‌ها در این بازه دارای رفتار خطی با ضریب رگرسیون نزدیک به ۱ می‌باشند. شیب منحنی نشان دهنده ضریب انبساط حرارتی نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج آزمایش تعیین ضریب انبساط حرارتی نمونه‌ها در جدول (۴) به صورت خلاصه ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی تغییر کرنش نمونه‌های بتنی در دماهای مختلف

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش ضریب انبساط حرارتی

تغییر شکل ماده بر اثر حرارت بر اساس معادلات فیزیک با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$dL = L_0 \cdot \alpha \cdot dT \quad (1)$$

که در آن، L_0 طول اولیه ماده در دمای مرجع α ضریب انبساط حرارتی بر حسب $10^{-6} / ^\circ C$ (کرنش بر درجه سانتی‌گراد) و dT تغییر دما می‌باشد. روش مورد استفاده در اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی قراردادی نمونه‌های ساخته شده در آب با دماهای مختلف بوده است. در ابتدا نمونه‌های بتنی با ابعاد تقریبی $7/5 \times 7/5 \times 25$ سانتی‌متر که در دو سر آن‌ها پین‌های از جنس فولاد ضدزنگ تعبیه شده بود، تهیه شدند. پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها آماده انجام آزمایش شدند. برای انجام آزمایش نمونه‌ها در حوضچه آب که دمای آن با سنسورهای حرارتی قابل تنظیم است، قرارداده شده و دمای آب بر روی دمای مورد نظر تنظیم گردید. پس از رسیدن دمای آب به مقدار مورد نظر، نمونه‌ها به مدت حداقل دو ساعت در آن دما نگهداری شده تا دمای کلیه قسمت‌های نمونه تا حد مطلوبی یکنواخت و به اندازه مورد نظر باشد. اندازه‌گیری دمای حوضچه توسط دو دماسنج دقیق صورت

۳-۲. آزمایش مقاومت در برابر حرارت بالا

در این تحقیق برای آزمایش نمونه‌های بتنی در حرارت بالا از دو راهکار بهره برده شده است. راهکار اول آزمایش بر روی نمونه‌های مرطوب و راهکار دوم خشک نمودن نمونه‌ها در اون یا گرم‌کن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۵ روز می‌باشد. در حالت دوم به علت از بین رفتن آب آزاد در بتن احتمال قلوه‌کن شدن تا حد زیادی کاهش یافته و امکان ثبت افت مقاومت نیز فراهم می‌گردد. نمونه‌های ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش ساخته شدند.

مرسوم‌ترین پارامترهای مورد اندازه‌گیری در تحقیقات محققین، اندازه‌گیری میزان افت مقاومت فشاری (به بیان دقیق‌تر اندازه‌گیری نسبت مقاومت فشاری نمونه تحت حرارت و نمونه شاهد) و افت وزن نمونه‌ها می‌باشد [۱۷].

علل اصلی افت وزن، آزاد شدن آب آزاد و آبی که به صورت فیزیکی مقید شده است، کربناته شدن سنگدانه‌های کربناتی و نیز قلوه‌کن شدن بتن می‌باشد. آب نه تنها بخشی از بتن است، بلکه نقش مهمی در تعیین طبیعت ماده، رفتار آن و عملکرد بتن دارد. آب تأثیر مهمی در مقاومت، سختی و شکل‌پذیری بتن دارد [۱۸]. سه نوع مختلف آب در بتن وجود دارد: آب موجود در منافذ موئینه، آب ژلی و آبی که به صورت شیمیایی ترکیب شده است.

آب موجود در منافذ موئینه قابلیت تبخیر شدن دارد و نه تنها در منافذ موئینه خمیر سیمان وجود دارد (۱۰۰ تا ۲۰۰۰ آنگستروم)، بلکه در سنگدانه و ناحیه انتقالی نیز وجود دارد. زمانی که رطوبت محیط پایین و درجه حرارت زیاد است این آب به راحتی تبخیر می‌شود. آب ژلی در حفره‌های ژل سیمان وجود دارد (۱۵ تا ۲۰ آنگستروم) و تقریباً ۲۸ درصد حجم سیمان هیدراته شده را اشغال می‌کند. این آب معمولاً به عنوان آب جذب شده یا آب مقید شده به صورت فیزیکی شناخته شده و به علت وجود نیروی وان در والسی با ذرات سیمان به راحتی تبخیر نمی‌شود. هرچند زمانی که دمای محیط بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد، این نوع آب می‌تواند تبخیر شود.

آب ترکیب شده شیمیایی جزئی از اجزای سیمان هیدراته شده است و تقریباً ۲۳ درصد وزن سیمان را اشغال می‌کند و معمولاً به عنوان آب غیرقابل تبخیر برای دمای کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد شناخته می‌شود. اما زمانی که خمیر سیمان به صورت شیمیایی تجزیه می‌شود (دمای بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) این آب نیز می‌تواند تبخیر شود. آب موجود در منافذ موئینه به طور مداوم کم می‌شود، ولی آب موجود در ژل و ترکیب شده شیمیایی با گذشت زمان و ادامه فرایند هیدراتاسیون سیمان افزایش می‌یابد.

همان‌طور که بیان شد، راه ساده اندازه‌گیری رطوبت در بتن اندازه‌گیری افت وزن بتن است. افت وزن بتن در دمای زیاد به عوامل ذیل بستگی دارد:

- ترکیب بتن (نوع سیمان و مقدار آن، مقدار آب، نسبت آب به سیمان، نوع سنگدانه و مقدار آن)؛

- درجه هیدراتاسیون (دمای عمل‌آوری، رطوبت و سن)؛

- رطوبت اولیه (اشباع، خشک شده در هوا، خشک شده در اون)؛

- روش گرمادهی (درجه حرارت، نرخ حرارت دهی و مدت زمان حرارت دهی).

جدول ۴. نتایج آزمایش تعیین ضریب انبساط حرارتی (میکروکنش بر درجه سانتی‌گراد)

کد نمونه	ضریب انبساط	میانگین	انحراف از معیار
H	۱۳/۵۱	۱۲/۸۹	۰/۵۳
	۱۲/۶۲		
	۱۲/۵۴		
U1	۱۴/۹۲	۱۴/۸۲	۱/۵۷
	۱۶/۳۵		
	۱۳/۲۰		
U2	۱۶/۲۶	۱۵/۵۲	۰/۶۶
	۱۴/۹۷		
	۱۵/۳۵		

نمونه‌های بتنی پس از توزین به مدت ۲ ساعت در دمای مورد نظر قرار گرفته و سپس به آرامی در داخل کوره سرد می‌شوند. علت این کار جلوگیری از به وجود آمدن شوک حرارتی در بتن پس از حرارت دیدن است. پس از سرد شدن، نمونه‌ها توزین و در صورت امکان مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است برای انجام هر آزمایش حداقل ۲ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۲-۱. نتایج آزمایش نمونه‌های خشک نشده

در شکل (۴) تصویر ظاهری نمونه‌های خشک نشده پس از حرارت دیدن نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این مرحله آزمایش تنها بر روی بتن فوق توانمند صورت پذیرفت، زیرا پیش‌بینی می‌شد بتن توانمند به علت نداشتن الیاف، دچار خرابی همراه با ترکیدگی شده و به تجهیزات آزمایشگاهی آسیب وارد آورد. همچنین با قطعه قطعه شدن نمونه امکان ثبت داده فراهم نمی‌شد.

همانگونه که ملاحظه می‌شود در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل ظاهری نمونه‌ها معمولی به نظر می‌رسد. اما در نمونه‌های بتن در شکل (۵) نمودار افت وزن نمونه‌های U1 و U2 ارائه شده است.



۲۰۰ درجه سانتی‌گراد



۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

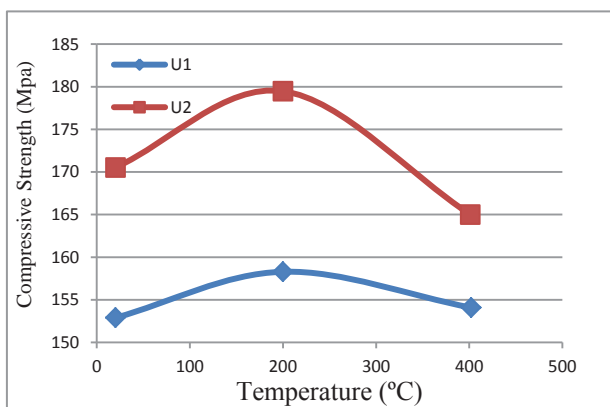


۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۴. مشاهدات ظاهری آزمایش حرارت نمونه‌های خشک نشده

نوع ریزترک در نمونه‌های U1 نیز قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد علت اصلی سالم بودن نمونه‌های U2 مربوط به الیاف بیشتر آن بوده که مانع قلوه‌کن شدن بتن شده است. با افزایش دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، هر دو نوع نمونه قلوه‌کن شده‌اند.

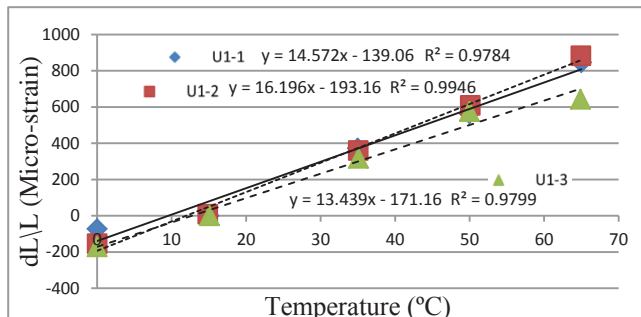
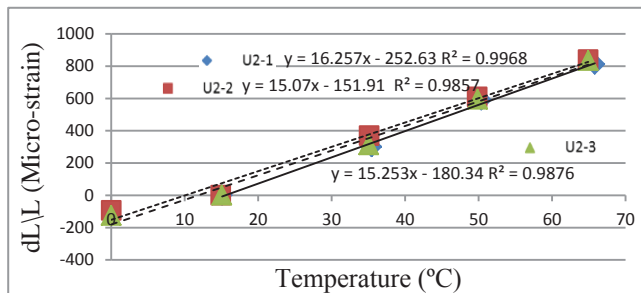
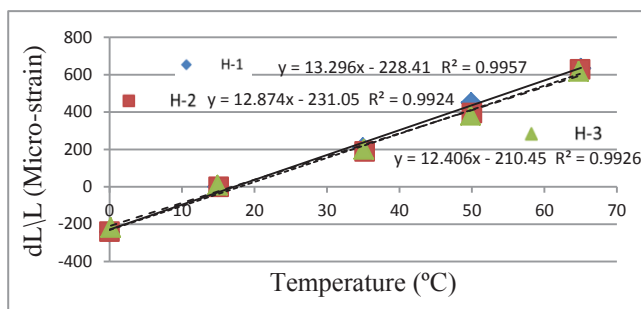
در شکل (۶) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خشک نشده ارائه شده است. البته با توجه به وقوع قلوه‌کن شدن در برخی نمونه‌ها، امکان اندازه‌گیری مقاومت فشاری باقیمانده کلیه نمونه‌ها فراهم نگردید.



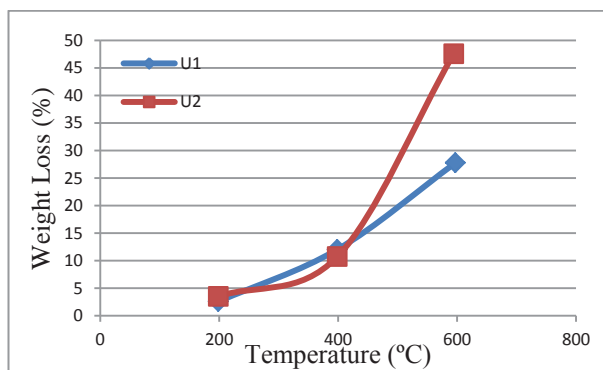
شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خشک نشده

۳-۲-۲. نتایج آزمایش نمونه‌های خشک شده

در شکل‌های (۷-۹) مشاهدات ظاهری نمونه‌های بتن توانمند، فوق توانمند با یک درصد الیاف (U1) و بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف (U2) خشک شده در اون پس از قرارگیری در درجه



شکل ۳. نمودار تغییرات کرنش نمونه‌ها نسبت به درجه حرارت پس از حذف دو نقطه بیش از ۸۰ درجه (معادله خطوط به ترتیب از بالا به پایین مربوط به نمونه اول، دوم و سوم می باشد)



شکل ۵. افت وزن نمونه‌های خشک نشده در دماهای مختلف

فوق توانمند حاوی یک درصد الیاف فولادی (U1) که در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده‌اند، قلوه‌کن شدن رخ داده است. با این افزایش دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، هر دو نوع نمونه قلوه‌کن شده‌اند. با افزایش دما انرژی کرنشی ذخیره شده و فشار بخار آب داخل منافذ بتن افزایش یافته و بتن با وجود داشتن الیاف فولادی پرمقاومت قلوه‌کن می‌شود.

این حال نمونه‌های U2 (بتن فوق توانمند حاوی دو درصد الیاف) سالم بوده و تنها ریزترک‌هایی در سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. این



۴۰۰ درجه سانتی گراد



۲۰۰ درجه سانتی گراد



۷۰۰ درجه سانتی گراد



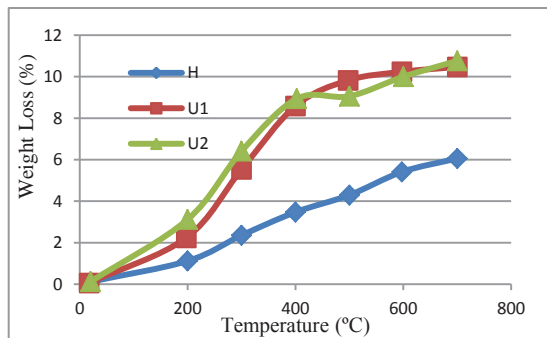
۶۰۰ درجه سانتی گراد

شکل ۹. مشاهدات ظاهری بتن فوق توانمند (U2) پس از قرار گرفتن به مدت دو ساعت در دماهای مختلف

در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد نمونه بتن های فوق توانمند دچار ترک خوردگی نقشه ای شکل، قلوه کن شدن و پوسته پوسته شدن شده اند، ولی بتن توانمند تنها دچار ترک خوردگی شده است. در شکل (۱۰) افت وزن نمونه های خشک شده در اون نشان داده شده است. میزان افت وزن نمونه های بتن فوق توانمند تقریباً دو برابر نمونه بتن توانمند می باشد.

در شکل (۱۱) تغییرات مقاومت فشاری نمونه های خشک شده ارائه شده است. کلیه نمونه ها تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد دچار افزایش مقاومت و پس از آن کاهش مقاومت شدند. علت افزایش مقاومت تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد احتمالاً تشکیل ترکیبات چسبنده قوی مانند زنولیت و افزایش نیروی واندروالسی می باشد. با افزایش درجه حرارت، محصولات اصلی هیدراتاسیون سیمان (CH و C-S-H) به تدریج تجزیه شده و مقاومت فشاری بتن با کاهش روبرو می شود.

به منظور درک صحیح تر از تغییرات مقاومت فشاری، نسبت مقاومت فشاری ثانویه به اولیه در شکل (۱۲) رسم گردیده است.



شکل ۱۰. افت وزن نمونه های خشک شده در اون

حرارت های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد شکل ظاهری نمونه تنها دچار تغییر رنگ جزئی شده است. اما در دمای بالاتر ترک خوردگی مشاهده می شود. در دمای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی گراد ریزترک هایی مشاهده می شود، به نظر می رسد میزان این ریزترک ها در بتن های توانمند کمتر از بتن فوق توانمند می باشد. در دمای ۶۰۰ درجه بتن فوق توانمند حاوی یک درصد لیاف قلوه کن شده است. اما دو نمونه دیگر تنها دچار ترک خوردگی شده و یکپارچگی خود را حفظ کرده اند.



۴۰۰ درجه سانتی گراد



۲۰۰ درجه سانتی گراد



۷۰۰ درجه سانتی گراد



۶۰۰ درجه سانتی گراد

شکل ۷. مشاهدات ظاهری بتن توانمند پس از قرار گرفتن به مدت دو ساعت در دماهای مختلف



۴۰۰ درجه سانتی گراد



۲۰۰ درجه سانتی گراد



۷۰۰ درجه سانتی گراد



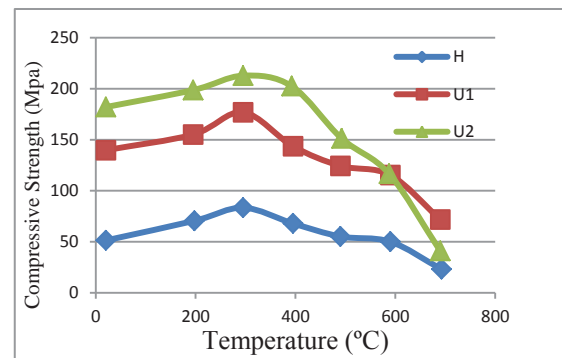
۶۰۰ درجه سانتی گراد

شکل ۸. مشاهدات ظاهری بتن فوق توانمند (U1) پس از قرار گرفتن به مدت دو ساعت در دماهای مختلف

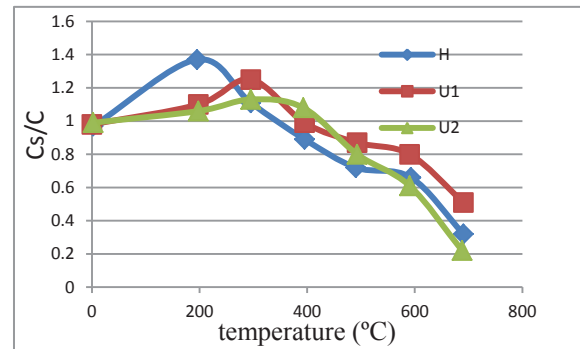
مشاهدات ظاهری به نظر می‌رسد که حساسیت بتن فوق توانمند نسبت به حرارت بیش از بتن توانمند می‌باشد. احتمالاً علت این پدیده ساختار متراکم بتن فوق توانمند می‌باشد. همچنین بتن فوق توانمند حاوی دو درصد الیاف عملکرد بهتری نسبت به بتن با یک درصد الیاف نشان داد. همان‌طور که اشاره شد در نمونه‌های خشک شده افت وزن نمونه‌های بتن فوق توانمند تقریباً دو برابر نمونه بتن توانمند می‌باشد. در صورتی که وزن مخصوص بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شود، با توجه به نسبت آب به سیمان در بتن توانمند و فوق توانمند (۰/۳۶ و ۰/۱۶) و مقدار سیمان مصرفی در هر یک (۴۰۰ و ۱۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب)، درصد آب اختلاط در بتن توانمند و فوق توانمند به ترتیب برابر با ۶ و ۹/۳ درصد وزنی بتن می‌باشد. بنابراین یکی از علل بیشتر بودن افت وزن بتن فوق توانمند به بتن توانمند در حرارت مربوط به بیشتر بودن آب اختلاط می‌باشد. البته با مقایسه نسبت افت وزنی دو نوع بتن توانمند و فوق توانمند، به نظر می‌رسد روند افت وزنی به درصد آب اختلاط در بتن فوق توانمند بیش از بتن توانمند است. این بدان معناست که احتمالاً با افزایش دما، در بتن فوق توانمند آب موجود در لایه‌های ژلی و ترکیب شده شیمیایی راحت‌تر آزاد می‌شوند. در این زمینه بررسی نتایج مکانیکی (مقاومت فشاری) و مطالعات ریزساختاری روشن‌تر می‌باشد. کلیه نمونه‌ها تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دچار افزایش مقاومت و پس از آن کاهش مقاومت شدند. روند کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ها تقریباً مشابه می‌باشد. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها به کمتر از ۵۰ درصد مقاومت اولیه کاهش می‌یابد. روند کاهش مقاومت در بتن توانمند در دمای بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد اندکی بیش از نمونه‌های با دو درصد الیاف (U2) در دمای بیش از ۵۰۰ درجه بسیار سریع بوده و حتی بیشتر از نمونه‌های U1 می‌باشد. این روند در مشاهدات ظاهری نمونه‌های خشک نشده نیز ملاحظه شد.

۵. مراجع

- [1] KIM, J. "Experimental Measurement of Concrete Thermal Expansion"; Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 2003, 5, 1036-1048.
- [2] Du, L. "Coefficient of Thermal Expansion of Concrete with Different Coarse Aggregates"; J. Testing Evaluation 2010, 38, 683-690.
- [3] Toman, J.; Černý, R. "Thermal and Hydric Expansion of High Performance Concrete"; Acta Polytechnica 2001, 41, 2-4.
- [4] Shin, H.; Chung, Y. "Determination of Coefficient of Thermal Expansion Effects on Louisiana's PCC Pavement Design"; Technical Report, Dep't of Civil and Environmental Eng. Louisiana State Univ. 12/2011.
- [5] Qingbin Li, a.; Yuan, L. "Model for Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Concrete by Fiber Optic Sensor"; Int. J. Solids Struct. 2002, 39, 2927-2937.
- [6] Paul, C.; Allan C. L.; Wonga, N.; Gowripalanb, G. D. "Measurement of the Coefficient of Thermal Expansion of Ultra-High Strength Cementitious Composites using Fiber Optic



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خشک شده



شکل ۱۲. نسبت مقاومت فشاری ثانویه به اولیه نمونه‌های خشک شده

۴. نتیجه‌گیری

آزمایش‌های انجام شده نشان داد که ضریب انبساط حرارتی بتن توانمند اندکی بیش از مقادیر گزارش شده برای بتن معمولی ($12 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$) می‌باشد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد ضریب انبساط حرارتی بتن فوق توانمند با توجه به ساختار بسیار متراکم آن بیش از بتن توانمند می‌باشد. مقدار به‌دست آمده تقریباً منطبق با نتایج آزمایش‌های گریپیل برای بتن فوق توانمند که در حدود ۱۵ میکرو کرنش بر درجه سانتی‌گراد گزارش شده [۱۰]، می‌باشد. بزرگ‌تر بودن ضریب انبساط حرارتی در بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف نسبت به بتن با یک درصد الیاف نکته جالبی می‌باشد و به نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از تأثیر میزان فولاد مصرفی (الیاف) در بتن می‌باشد. به عبارت دیگر بیشتر بودن میزان الیاف در بتن باعث افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن شده است. آزمایش مقاومت در حرارت بالا در نمونه‌های خشک نشده نیز نشان داد که میزان افت وزن نمونه U2 با توجه به قلوه‌کن شدن آن بیشتر از U1 می‌باشد. با توجه به شکل ظاهری نمونه‌ها افت وزن بیشتر ناشی از قلوه‌کن شدن بتن بوده و به نظر می‌رسد نمونه‌های U2 حاوی مقدار بیشتری آب بوده و در نتیجه مقدار خرابی در آن بیشتر بوده است. احتمال دیگر متراکم‌تر بودن ساختار U2 نسبت به U1 می‌باشد. این نتیجه در آزمایش تعیین درصد تخریل به‌دست آمد. بر اساس آزمایش تعیین درصد تخریل، میزان تراکم نمونه U2 بیش از U1 می‌باشد. در نمونه‌های خشک نشده با افزایش دما به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقاومت نمونه‌ها کاسته شده است. در نمونه‌های خشک شده بر اساس

- [18] Zhang, B. "Effects of Moisture Evaporation (Weight Loss) on Fracture Properties of High Performance Concrete Subjected to High Temperatures"; *Fire Safety J.* 2011, 46, 543-549.
- [19] Yang, S. L.; Millard, S. G.; Soutsos, M. N.; Barnett, S. J.; Le, T. T. "Influence of Aggregate and Curing Regime on the Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)"; *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 2291-2298.
- [20] Hassan, A. M. T.; Jones, S. W.; Mahmud, G. H. "Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)"; *Constr. Build. Mater.* 2012, 37, 874-882.
- [21] Yang, I. H.; Joh, C.; Kim, B. S. "Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Beams Subjected to Bending"; *Eng. Struct.* 2010, 32, 3478-3487.
- [22] Toledo Filho, R. D.; Koenders, E. A. B.; Formagini, S.; Fairbairn, E. M. R. "Performance Assessment of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in View of Sustainability"; *Mater. Des.* 2012, 36, 880-888.
- [23] Corinaldesi, V.; Moriconi, G. "Mechanical and Thermal Evaluation of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes for Engineering Applications"; *Constr. Build. Mater.* 2012, 26, 289-294.
- [24] Habel, K.; Viviani, M.; Denarié, E.; Brühwiler, E. "Development of the Mechanical Properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)"; *Cem. Concr. Res.* 2006, 36, 1362-1370.
- [25] Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H. J. H. "Mix Design and Properties Assessment of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC)"; *Cem. Concr. Res.* 2014, 56, 29-39.
- Sensors"; *Penga Cement and Concrete Research* 2007, 37, 789-795.
- [7] Kada, H. "Determination of the Coefficient of Thermal Expansion of High Performance Concrete from Initial Setting"; *Materiaux et Constructions* 2002, 35, 35-41.
- [8] Wittmann, F.; Lukas, J. "Experimental Study of Thermal Expansion of Hardened Cement Paste"; *Materiaux et Construction* 1974, 7, 247-252.
- [9] Downie, B. "Effect of Moisture and Temperature on the Mechanical Properties of Concrete"; *Master of Science Thesis, West Virginia Univ.* 2005.
- [10] Graybeal, B. A. "Characterization of the Behavior of Ultra-High Performance Concrete"; *PhD Dissertation, Univ. of Maryland, College Park, Maryland* 2005.
- [11] Bentz, D. P. "Fibers, Percolation, and Spalling of High Performance Concrete"; *ACI Materials J.* 2000, 97, 351-359.
- [12] Chiang, C. H.; Yang, C. C. "Artificial Neural Networks in Prediction of Concrete Strength Reduction Due to High Temperature"; *ACI Materials J.* 2005, 102, 93-102.
- [13] Nassif, A. Y.; Burley, E.; Rigden, S. "A New Quantitative Method of Assessing Fire Damage to Concrete Structures"; *Magazine of Concrete Research* 1995, 47, 271-278.
- [14] Kodur, V. K. R.; Phan, L. "Critical Factors Governing the Fire Performance of High Strength Concrete Systems"; *Fire Safety J.* 2007, 42, 482-488.
- [15] Pliya, P.; Beaucour, A. L.; Noumowé, A. "Contribution of Cocktail of Polypropylene and Steel Fibers in Improving the Behavior of High Strength Concrete Subjected to High Temperature"; *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 1926-1934.
- [16] Shui, ZH.; Zhang, R.; Chen, W.; Xuan, D. "Effects of Mineral Admixtures on the Thermal Expansion Properties of Hardened Cement Paste"; *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 1761-7.
- [17] Sahmaran, M.; Lachemi, M.; Li, V. C. "Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites"; *ACI Materials J.* 2010, 107, 297-304.