

## تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر عملکرد بتن با نگرش به تغییرات نانوساختار C-S-H

محمد امیری \*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

مرضیه آریانپور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس.

### چکیده

رفتار بتن در درجه حرارت‌های زیاد، از نظر تامین ایمنی سازه تحت بارهای مشخص و اندازه‌گیری ظرفیت باربری برای ادامه بهره‌برداری سازه اهمیت دارد. نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم از محصولات فرایند هیدراتاسیون خمیر سیمان است که نقش مهمی در افزایش مقاومت بتن دارد، که تحت تأثیر حرارت دچار تغییرات رفتاری می‌شود. از این‌رو هدف این مقاله بررسی تأثیر حرارت‌های مختلف بر پارامترهای مقاومتی بتن با سیمان پرتلند از منظر ریزساختاری با نگرش به تغییرات نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) است. در این راستا حدود ۳۰۰ نمونه به مدت ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در حوضچه آب عمل‌آوری شده‌است. سپس به مدت ۲ ساعت همه آزمون‌ها تحت دماهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. درصد تغییرات طولی و وزنی، مقاومت فشاری و رفتار ترک‌خوردگی در نمونه‌های بتن مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین برای ارزیابی رفتار ریزساختاری آزمون‌ها در دمای متفاوت از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) استفاده شد. براساس نتایج پژوهش حاضر به دلیل ماهیت رفتاری نانوساختار C-S-H، تغییرات وزن، طول و مقاومت فشاری نمونه‌ها وابسته به رفتار نانوساختار C-S-H است. با شروع تجزیه نانوساختار C-S-H بر اثر حرارت، افت مقاومت فشاری و افت وزنی مشاهده شده و ترک‌ها نیز گسترده‌تر می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده مقاومت فشاری نمونه ۱۴ و ۲۸ روزه تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب از  $262 \text{ kg/cm}^2$  و  $270 \text{ kg/cm}^2$  به مقدار  $36 \text{ kg/cm}^2$  و  $44 \text{ kg/cm}^2$  کاهش یافته‌است. دلیل این کاهش براساس نتایج SEM، تجزیه کامل نانوساختار C-S-H و پرتلندیت در ساختار سیمان است.

واژه‌های کلیدی: حرارت زیاد، بتن با سیمان پرتلند، مقاومت فشاری، نانوساختار C-S-H، SEM.

\* نویسنده مسئول: amirri@chmail.ir

## ۱- مقدمه

صورت کریستال‌های ضعیف الیافی بوده‌است و با تکمیل شدن فرایند هیدراتاسیون به شکل توده منسجم در آمده‌است [۵]. مدل‌های زیادی برای توصیف ساختمان دقیق C-S-H بیان شده‌است. بر اساس مدل پاورز-بروناور این ساختار به صورت لایه‌ای با سطح زیاد است. مساحت سطح ویژه C-S-H حدود ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر مربع بر گرم پیشنهاد شده است [۵]. مقاومت این ساختار به نیروهای واندروالس نسبت داده می‌شود. در مدل فلدمن-سردا ساختار C-S-H به صورت یکسری لایه‌های غیر منظم، که تصادفی برای ایجاد فضاهای بین لایه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های گوناگون به ابعاد ۵ تا ۲۵ آنگستروم در کنار هم قرار گرفتند، نمایش داده می‌شود [۵]. در تحقیقات انجام شده در ساختار سیمان پرتلند، نشان می‌دهد که نانوساختار C-S-H (هیدرات سیلیکات کلسیم) باعث مقاومت ملات سیمانی است که این ساختار در دمای زیاد دچار تغییرات می‌شود. هرتر [۲] گزارش داد که ساختار C-S-H در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تجزیه و در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس تخریب شده است. همچنین در دمای زیادتر ۱۱۵۰ درجه سلسیوس این ساختار ذوب می‌شود. همچنین سایر مواد معدنی در سیمان به کریستال تبدیل شده‌است، در نتیجه تغییرات شدید ریز ساختاری به وجود می‌آید که مقاومت و دوام بتن را کم می‌کند. تاپکو<sup>۴</sup> و همکاران [۶] دریافتند که ملات سیمان، خواص اتصال خود را به دلیل تبخیر آب از نانوساختار CSH از دست می‌دهد. آریوز<sup>۵</sup> [۷] مشاهده کرد نمونه‌هایی که در معرض دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس قرار دارند، تغییر سطحی قابل توجهی ندارند. با افزایش دما به ۶۰۰ درجه سلسیوس، بتن شروع به شکستن می‌کند اما اثر آن در سطح بتن قابل توجه نیست. بتن تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس ترک می‌خورد و تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس این ترک‌ها افزایش می‌یابد. پس از قرار گرفتن در دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، نمونه‌ها به طور کامل تجزیه شد و خواص اتصال خود را به علت ترک خوردگی بیش از حد، از دست می‌دهد. براساس پژوهش‌های محققین [۸، ۹]، نوع و خواص سنگ‌دانه‌ها نقش مهمی در بتن تحت تاثیر دما دارد. افت مقاومت فشاری بتن با سنگ‌دانه‌های مختلف در دماهای زیادیکسان نیست. البته این به ساختار مواد

دوام سازه در برابر حرارت زیاد یکی از فاکتورهای اصلی ساختمان، برای تحمل آتش و حفاظت از آن تعریف می‌شود [۱]. شدت تخریب در آتش، ناشی از میزان حرارت آزاد شده هنگام آتش‌سوزی است. بخشی از این حرارت در فضای آتش پخش می‌شود و مابقی جذب مواد ساختمانی و اعضاء شده‌است. بنابراین اعضاء سازه‌ای مقاومت مکانیکی خود را از دست می‌دهد و در یک دمای بحرانی تخریب یا آسیب جدی می‌بیند. استفاده از بتن به علت توانایی بالقوه در تحمل درجه حرارت‌های زیاد آتش، کم بودن هدایت الکتریکی و گرمای ویژه در سازه‌ها متداول‌تر است. این بدان معنی نیست که درجه حرارت زیاد هیچ اثری بر روی بتن ندارد. زمانی که بتن در معرض درجه حرارت زیاد قرار می‌گیرد، خواص مکانیکی آن مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و پایداری بتن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین خصوصیات بتنی که پس از آتش‌سوزی نگهداری می‌شود از نظر اندازه‌گیری ظرفیت باربری و بازسازی سازه اهمیت دارد [۲]. میزان خسارت ناشی از آتش ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده دارد [۳]. با این حال که بتن‌های سیمانی برای کاربردهای معمولی، مقاومت مناسبی در برابر آتش دارند اما مقاومت فشاری این بتن‌ها در دماهای زیاد به علت تغییرات گسترده فیزیکی و شیمیایی متغیر است [۴]. ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی بتن در معرض دمای زیاد، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. هنگامی که آتش به وسیله آب خاموش می‌شود، هیدروکسید کلسیم<sup>۱</sup> (یکی از ترکیبات مهم در ملات سیمان است) به اکسید کلسیم<sup>۲</sup> تبدیل شده‌است. که این تبدیل باعث ایجاد ترک خوردگی و تخریب بتن می‌شود. بنابراین دمای زیاد در شکل ترک خوردگی سطحی و پوسته انداختن بتن تاثیر گذار است [۵]. نتایج مطالعه بر روی ماتریس سیمان نشان می‌دهد هنگامی که فازهای سیمانی با آب واکنش دادند نانوساختار C-S-H<sup>۳</sup> به وجود می‌آید. این ساختار حدود ۷۰٪ از حجم مواد جامد خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده را تشکیل داده است و مهمترین بخش هیدراتاسیون در تعیین خواص مکانیکی و مقاومتی بتن است. در مرحله تشکیل نانوساختار C-S-H ابتدا به

<sup>4</sup> Topcu<sup>5</sup> Arioz<sup>1</sup> Ca(OH)<sub>2</sub><sup>2</sup> CaO<sup>3</sup> calcium silicate hydrate

شده‌اند. همچنین افزایش دما از ۲۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. با افزایش دما مقاومت فشاری نمونه شاهد ۱۱٪ و نمونه‌های حاوی پوزولان ۸٪ افت دارد.

با توجه به مطالعات گسترده‌ای که بر روی تاثیر دما بر مقاومت بتن انجام شده‌است، اما مطالعه‌ای جامع‌ای از منظر ریزساختاری با نگرش به تغییرات نانو ساختار C-S-H و تاثیر آن بر روی تغییرات مقاومت فشاری بتن انجام نشده‌است. برای اساس هدف این مطالعه بررسی تغییرات رفتاری نانو ساختار C-S-H تحت تاثیر دما و نقش آن بر پارامترهای مکانیکی و مقاومتی بتن است.

## ۲- مواد و روش‌ها

جهت ساخت تمامی نمونه‌ها از سیمان پرتلند نوع ۲ هرمزگان استفاده شد. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته‌است [۱۴]. تست مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط جک مکانیکی شرکت آزمون با سرعت ۷۵ kg/sec انجام شده‌است. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند با آزمایش XRF تعیین شد و در جدول (۱) ارائه شده‌است. به طور کلی سنگدانه‌هایی که دارای منحنی دانه‌بندی پیوسته‌ای باشند، به گونه‌ای که برخی از اندازه دانه‌ها در آنها بسیار کم و یا بسیار زیاد نباشد، رضایت بخش‌ترین نتایج را به همراه دارد. بدین منظور دانه‌بندی بتن سیمانی برای ماسه و شن به ترتیب از استاندارد ASTM C136-96 و ASTM C136 استفاده شده‌است [۱۴]. منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه در شکل (۱) ارائه شده‌است. جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۰/۱۶ و ۱/۰۳ درصد است. در این تحقیق حداکثر قطر سنگ‌دانه‌های استفاده شده ۹/۵ میلی‌متر و همچنین آب مصرفی در ساخت بتن، آب شرب هرمزگان با  $pH=7/8$  است.

در طراحی بتن با سیمان پرتلند، اسلامپ بتن در محدوده ۸ تا ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شده‌است. همچنین وزن مخصوص بتن سیمانی  $2345 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شد. طرح اختلاط نمونه‌های تهیه شده در جدول (۲) ارائه شده‌است.

برای تولید بتن طبق استاندارد ASTM C192/192M-2 عمل شد [۱۴]. ابتدا سیمان به همراه مصالح درشت‌دانه و ریزدانه درون

معدنی بتن مربوط می‌شود. کوارتز دردمای ۵۷۰ درجه سلسیوس با افزایش حجم و آسیب ناشی از آن تغییر می‌کند. بتن‌های متشکل از سنگ آهک<sup>۱</sup> ( $\text{CaCO}_3$ ) در دمای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به اکسید کلسیم<sup>۲</sup> ( $\text{CaO}$ ) یا آهک شکفته تبدیل می‌شود.

مانصر<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر حرارت زیاد بر مقاومت فشاری و کاهش وزن بتن با درصدهای مختلف افزودنی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در دمای ۲۰°C برای بتن با ۲٪ فوق روان کننده مقاومت فشاری حدود ۳۴٪ بیشتر از بتن شاهد است. همچنین بیشترین افت مقاومت فشاری، حدود ۴۲٪، برای بتن با ۲٪ افزودنی هوازا است. همچنین در ادامه به این نتیجه رسیدند که از دمای محیط تا دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به دلیل خروج آب موجود از بتن کاهش وزن اندکی وجود دارد اما بین دمای ۱۰۵ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس کاهش وزن به سرعت افزایش می‌یابد. دلیل این امر استفاده از افزودنی‌های فوق روان کننده و هوازا منجر به کاهش افت وزن بتن شده‌است. بر اساس مطالعه کایتون<sup>۴</sup> و همکاران بر روی ساختار و مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف سبک تحت دمای زیاد، مقاومت فشاری بتن در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس حدود ۴۴ و ۱۹ مگاپاسکال است [۱۱]. اما نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در همین دماها دارای مقاومت فشاری ۵۵ و ۳۰ مگاپاسکال است. کیخا [۱۲] به بررسی تاثیر حرارت زیاد بر مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی الیاف شیشه پرداخت و به این نتیجه رسید خنک شدن آهسته نمونه‌های حرارت دیده در مقایسه با خنک شدن سریع افت کمتری در مقاومت فشاری دیده می‌شود. همچنین مقاومت فشاری و کششی با افزایش مدت زمان حرارت کاهش می‌یابد. در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس الیاف شیشه ذوب نشده‌است و با وجود کاهش خصوصیات الیاف در هنگام مواجهه با این حرارت، باز هم الیاف شیشه در بهبود مقاومت کششی موثر است. به طور کلی نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف شیشه تحت تاثیر دما عملکرد بهتری در مقاومت کششی و فشاری از خودشان نشان دادند.

برنجیان و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر درجه حرارت زیاد بر خواص بتن خودمتراکم حاوی افزودنی‌های پودری پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن ۲۰٪ متاکائولین و خاکستر بادی به جای پوزولان، سبب افزایش مقاومت فشاری در دمای محیط

<sup>3</sup> Maanser

<sup>4</sup> caetano

<sup>1</sup> calcium carbonate

<sup>2</sup> Calcium Oxide

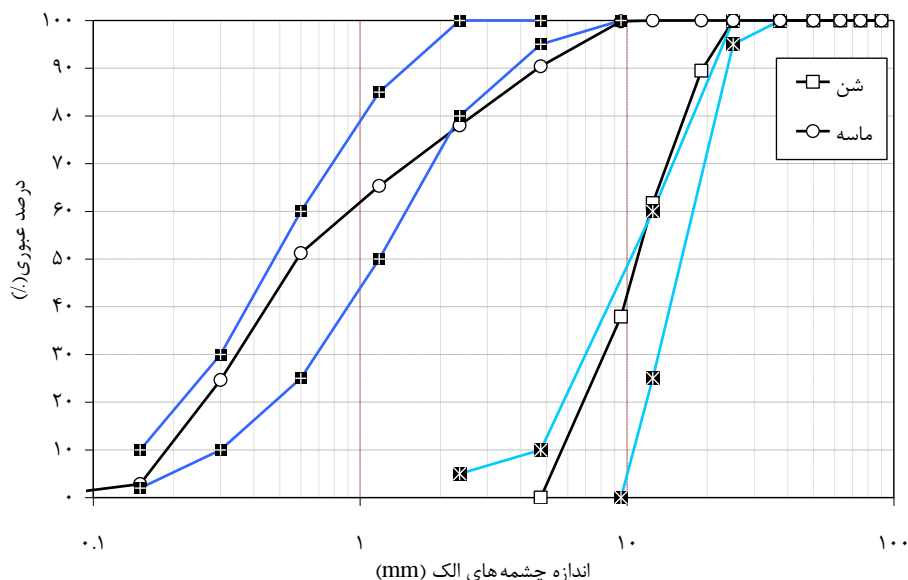
میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شود. سپس آب به ترکیبات خشک اضافه شده‌است و عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. مخلوط تازه درون قالب‌های از پیش آماده شده ریخته شد. استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲

نوع	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I
سیمان پرتلند نوع ۲	۲۲/۰۰	۵/۳۰	۴/۰۰	۶۵/۰۰	۲/۵۰	۰/۷۰	۰/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰

جدول ۲- طرح اختلاط بتن با سیمان پرتلند نوع ۲

طرح مخلوط	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	آب/سیمان	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )
مخلوط	۴۵۰	۲۰۵	۰/۴۵	۹۶۰	۸۰۰



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی (شن و ماسه)

سپس آزمایش‌های افت وزنی (ASTM C1792-14)، تغییرات طولی (ASTM C157/C157M-17) و مقاومت فشاری (ASTM C39) بر روی نمونه‌ها انجام شده‌است [۱۴]. وزن و تغییرات طول نمونه‌ها به ترتیب توسط ترازو و کولیس دیجیتال در دو مرحله (قبل از قرارگیری در حرارت و بعد از قرار گرفتن در حرارت) اندازه‌گیری شده‌است. سپس برای تست مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها زیر جک بتن شکن گذاشته شدند. در نهایت پودر حاصل از نمونه‌ها برای آزمایش ریزساختاری SEM جمع‌آوری شدند. برای بررسی ریزساختاری، آزمایش‌های میزان ترک خوردگی و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) توسط دستگاه Tescan-Vega3 در دانشگاه شیراز انجام شد.

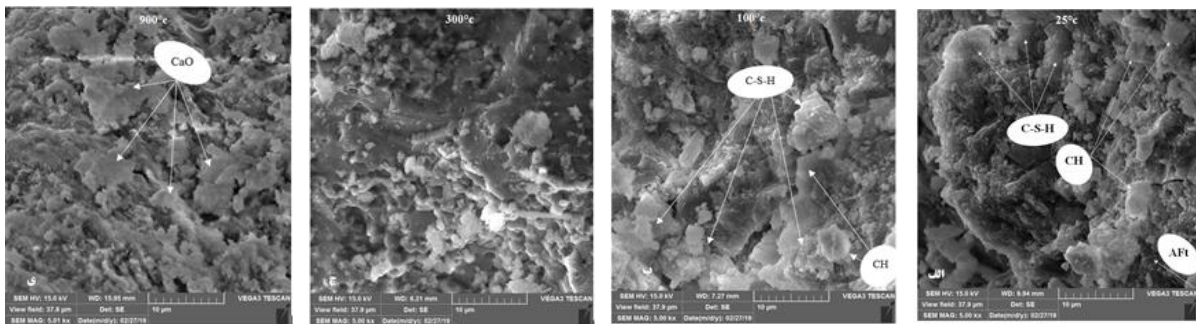
براساس استاندارد ASTM C31 بتن ساخته شده در ۳ لایه با ۲۵ ضربه (جهت تراکم) درون قالب ریخته می‌شود [۱۴]. پس از قالب‌گیری، عمل آوری به مدت زمان ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در حمام رطوبت انجام شده‌است. پس از گذشت زمان عمل آوری، نمونه‌ها در سنین مختلف برای انجام آزمایش از درون حوضچه آب خارج می‌شود. قبل از حرارت دیدن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون تحت دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، خشک می‌شود پس از خشک شدن، هر نمونه در یک دمای مشخص به صورت جداگانه درون کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت گذاشته می‌شود. نمونه‌ها تحت دمای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس آزمایش شده‌اند. شایان به ذکر است که نمونه‌های دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس در آون قرار نمی‌گیرد.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- ریخت شناسی آزمون‌ها در معرض حرارت

در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی آزمون‌های ۲۸ روزه را در معرض حرارت‌های متفاوت نشان می‌دهد. بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل (۲) گروهی از ترکیبات شیمیایی مختلف قابل مشاهده است. همچنین میکروترک‌ها، حفره‌ها و ساختارهای پرتلندیت (CH)، نانو ساختار C-S-H و Aft<sup>۱</sup> قابل تشخیص است. نانو ساختار C-S-H محصول اصلی هیدراتاسیون سیمان و عامل اصلی مقاومت فشاری و کاهش میزان نفوذپذیری است. در شکل (۲-الف) آزمون تحت دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است، در این تصویر بلورهای هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)<sub>2</sub>) به صورت ساختار شش ضلعی، نانو ساختار اسفنجی هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و ساختار سوزنی شکل اترینگایت [۱۵] قابل تشخیص است. با توجه اینکه آزمون مورد مطالعه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس ترک خوردگی مشهودی در سطح نمونه مشاهده نمی‌شود و سطح بتن دارای ضعف نیست. همچنین نانو ساختار C-S-H در شکل به وفور یافت می‌شود. رشد این نانو ساختار با گذشت زمان و تکامل فرایند هیدراتاسیون به گونه‌ای است که حفره‌های کوچک و ترک‌ها را پوشش داده است. در شکل (۲-ب) تصویر نمونه تحت دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس ارائه شده است، حذف آب سطحی نمونه‌ها موجب شده است که نانو ساختار C-S-H همچنین بلورهای پرتلندیت با وضوح بیشتری قابل مشاهده باشد. پس از حذف آب سطحی نمونه‌ها نانو ساختار C-S-H بیشتر و اندازه این ساختار اسفنجی بزرگ‌تر شده است. همچنین در این دما ساختار AFm<sup>۲</sup> و Aft<sup>۱</sup> نیز از بین رفته است. قابل توجه است که سطح این نمونه‌ها بدون ترک خوردگی مشاهده شده است. بر اساس تصاویر موجود و همچنین پژوهش‌های صورت گرفته تا دمای ۲۰۰ درجه

سلسیوس هیچ تغییری در فازهای سیمانی و نانو ساختار C-S-H مشاهده نشد [۱۱]. مطابق شکل (۲-ج و ۲-د) بین دمای ۳۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس تغییرات شیمیایی و فیزیکی زیادی در خمیر سیمان رخ داده است. شکل (۲-ج) تصویر نمونه در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس است. ساختار پرتلندیت و نانو ساختار C-S-H همچنان قابل مشاهده است. اما نسبت به نمونه شاهد این ساختار رو به زوال است. تغییر در ساختار این فازها از دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نیز آغاز می‌شود. علاوه بر این به علت تجزیه کامل آب آزاد و آب جذب شده توسط بتن در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس میکروترک‌ها شروع به گسترش می‌کند. طبق پژوهش‌های انجام شده بین دمای ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس ساختار پرتلندیت شروع به تجزیه می‌کند و به سنگ آهک (هیدروکسیلاسیون، فرایند هیدروکسیل شدن گفته می‌شود) تبدیل می‌شود [۱۶، ۱۷]. همچنین کرنات کلسیم در دمای ۷۳۰ تا ۷۸۰ درجه سلسیوس تجزیه شده است و به آهک تبدیل می‌شود. در نهایت شکل (۲-د) ساختار پرتلندیت و C-S-H به طور کامل در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تجزیه و ذوب شده است. مشاهده می‌شود بلورهای اکسید کلسیم (CaO) وجود دارد که نتیجه مستقیم حذف کربن (کربن زدایی) از کرنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) است. نابودی این ساختار باعث ایجاد ترک و حفره در ساختار می‌شود. همچنین تخلخل نیز افزایش پیدا کرده و سایر مواد معدنی در سیمان به کریستال تبدیل شده است که احتمالاً موجب کاهش مقاومت بتن می‌شود. در نتیجه تغییرات شدید ریزساختاری به وجود می‌آید که مقاومت و دوام بتن را کم می‌کند. به صورت کلی در محدوده دمای ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به علت تبدیل کرنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) به اکسید کلسیم (آهک، CaO) و دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>)، نانو ساختار C-S-H تجزیه می‌شود و همچنین ترک‌ها نیز گسترش یافته است. در نتیجه ساختار سیمان شدیداً آسیب می‌بیند.



شکل ۲- تصاویر SEM از نمونه‌های بتنی، (الف) بتن در دمای محیط، (ب) بتن تحت دمای ۱۰۰°C، (ج) بتن تحت دمای ۳۰۰°C، (د) بتن تحت دمای ۹۰۰°C

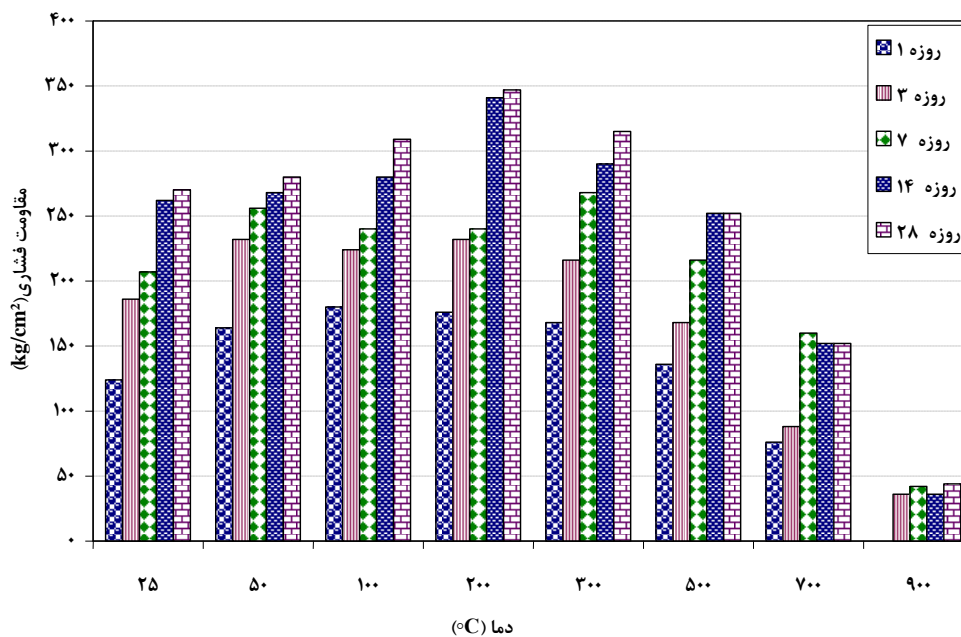
<sup>۲</sup> Alumina Ferrice Oxide Mono-Sulfate

<sup>۱</sup> Alumina Ferrice Oxide Tri-Sulfate

## ۲-۳- بررسی تغییرات مقاومت فشاری

هنگامی که خمیر سیمان در معرض حرارت قرار می‌گیرد، محصولات هیدراته (هیدرات سیلیکات کلسیم، هیدروکسید کلسیم و هیدرات سولفوآلومینات کلسیم) به تدریج آب خود را از دست می‌دهند و بخار آب تولید می‌شود. همچنین فشار منافذ در بتن افزایش می‌یابد [۱۸]. این پدیده در حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس شروع می‌شود و تا ۵۰۰ درجه سلسیوس ادامه دارد، که به دمای تبخیر آب از منافذ مویرگی مربوط می‌شود [۱۹] و این فرایند بر مقاومت بتن نیز تاثیر مستقیم دارد. مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به  $252 \text{ kg/cm}^2$  کاهش یافته‌است. این کاهش مقاومت فشاری با توجه به تصاویر SEM (شکل ۲) مربوط تجزیه نانو ساختار C-S-H است. کم آب شدن بیشتر خمیر سیمان، به علت تجزیه کم هیدروکسید کلسیم، از دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس آغاز شده‌است [۲۰، ۲۱]. آب موجود در هیدروکسید کلسیم بین دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس از بین می‌رود. اما اگر دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) موجود باشد، در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) تشکیل می‌شود. همچنین تجزیه پرتلندیت در هنگام سرد شدن (رسیدن به دمای محیط) به سرعت انجام می‌شود [۲۲]. در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری نمونه ۳ و ۲۸ روزه به ترتیب  $8 \text{ kg/cm}^2$  و  $152 \text{ kg/cm}^2$  است که نسبت به نمونه شاهد به ترتیب  $52/6$  و  $43/7$  درصد افت مقاومت مشاهده شده‌است. علت افت مقاومت فشاری در این دما تجزیه کربنات کلسیم به اکسید کلسیم است. همچنین با توجه به شکل (۲-ی) نانو ساختار C-S-H تجزیه شده‌است و مقاومت فشاری با توجه به تغییرات شدید ریزساختاری افت پیدا می‌کند. این کاهش مقاومت فشاری در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس بسیار مشهودتر است. نمونه ۱ روزه به علت داشتن ساختار ضعیف و تشکیل نشدن کامل محصولات هیدراتاسیون از جمله نانو ساختار C-S-H تحت زیادترین دما ( $900^\circ\text{C}$ ) مقاومت فشاری خود را کامل از دست داده‌است. واضح است که با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت آنها تحت دما، دوام زیادتری پیدا می‌کنند. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب  $36 \text{ kg/cm}^2$ ،  $42 \text{ kg/cm}^2$ ،  $36 \text{ kg/cm}^2$  و  $44 \text{ kg/cm}^2$  است. در حقیقت حذف نانو ساختار C-S-H در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس دلیل اصلی افت شدید مقاومت است که این موضوع در شکل (۲-ی) نیز قابل مشاهده است. به طور کلی تجزیه ریز ساختار بتن تحت دمای زیاد منجر به کاهش مقاومت بتن می‌شود.

شکل ۳ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن تحت دمای ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس طی دوره عمل‌آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان داده شده‌است. مقاومت فشاری نمونه‌های که در دمای محیط نگهداری شد به ترتیب  $124 \text{ kg/cm}^2$ ،  $186 \text{ kg/cm}^2$ ،  $207 \text{ kg/cm}^2$ ،  $262 \text{ kg/cm}^2$  و  $270 \text{ kg/cm}^2$  است. با توجه به شکل (۲-الف) به علت گسترش نانو ساختار C-S-H مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش سن زیادتر می‌شود و عملاً در سن ۲۸ روز بیشترین نانو ساختار C-S-H وجود دارد که موجب افزایش مقاومت فشاری شده‌است. شایان به ذکر است مقاومت فشاری ارائه شده برای نمونه‌های  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$  است. تحت دمای ۵۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه به  $280 \text{ kg/cm}^2$  رسیده‌است. این افزایش  $3/7$  مقاومت فشاری در این سن به علت تبخیر سطحی نمونه است. با افزایش حرارت، مقاومت فشاری نمونه‌ها تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس رو به افزایش است. مقاومت فشاری نمونه‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب  $180 \text{ kg/cm}^2$ ،  $224 \text{ kg/cm}^2$ ،  $280 \text{ kg/cm}^2$  و  $309 \text{ kg/cm}^2$  است. در حقیقت علت افزایش مقاومت فشاری با توجه به شکل (۲-ب) حذف ساختار غیر مرغوب اترینگایت و همچنین گسترش بیشتر نانو ساختار C-S-H است. مطابق شکل (۳) مقاومت فشاری نمونه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب  $24/73$ ،  $43/51$  و  $34/81$  درصد افزایش داشته‌است. این افزایش در دمای ۲۰۰ درجه به علت تغییرات شیمیایی و فیزیکی است [۴]. آب فیزیکی در بتن تحت دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس کاملاً متصاعد و خارج می‌شود و موجب می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در حالت خشک زیادتر از نمونه‌های در حالت اشباع باشد. در حقیقت مقاومت کمتر در بتن اشباع شده احتمالاً می‌تواند بر اثر وجود فشار جداکننده در خمیر سیمان باشد. در واقع رطوبت فشار منافذ را زیاد کرده و باعث کاهش مقاومت می‌شود. با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری نمونه‌ها ۱، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب سن  $168 \text{ kg/cm}^2$ ،  $290 \text{ kg/cm}^2$  و  $315 \text{ kg/cm}^2$  رسیده‌است. به علت از بین رفتن آب درون پیوند شیمیایی و بین لایه‌های هیدرات‌های نانو ساختار C-S-H و سولفوآلومینات در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری شروع به کاهش می‌کند. همچنین مطابق شکل (۲-ج) مشاهده شد نانو ساختار C-S-H رو به تجزیه است و در نتیجه آب پیوند شیمیایی در این ساختار از بین خواهد رفت. به صورت کلی تر



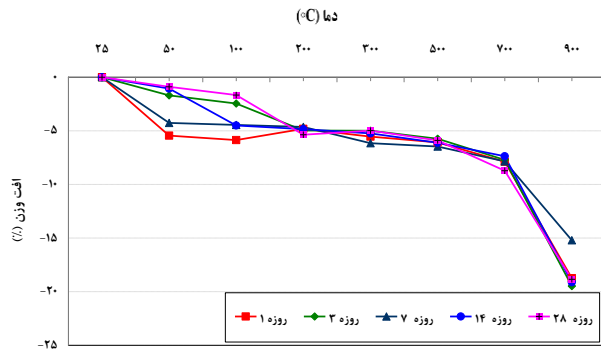
شکل ۳- منحنی تغییرات مقاومت فشاری بتن با سیمان پر تلند در دماهای متفاوت

### ۳-۳- تغییرات وزنی نمونه‌ها تحت تأثیر دما

شکل ۴ نمودار افت وزنی نمونه سیمانی تحت تأثیر دما را نشان می‌دهد. درصد افت وزنی نمونه‌هایی که در دمای محیط نگهداری شدند، صفر است. با شروع افزایش دما، روند نزولی افت وزنی نمونه‌ها آغاز می‌شود. نمونه ۱ و ۲۸ روزه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بیشترین و کمترین افت وزنی با مقادیر به ترتیب ۵/۸۶ و ۱/۶۶ درصد را دارد. علت این کاهش وزن در دمای مشخص حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس، تبخیر آب آزاد درون بتن است. همچنین در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس اترینگایت شروع به تجزیه می‌کند. با افزایش نرخ دما از ۳۰۰ درجه سلسیوس، سرعت افت وزنی نمونه‌ها شدت می‌یابد. درصد افت وزنی نمونه‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵/۵، ۴/۹، ۶/۱، ۵/۲ و ۴/۹ درصد است. شیب نمودار افت وزنی تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس متعادل بوده است اما از این دما به بعد افت شدید وزنی مشاهده شده است. در حقیقت می‌توان دلیل این افت وزن را به ۳ دسته تقسیم کرد. از دمای ۲۵ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس افت وزنی کمی حدود ۵٪ وجود دارد. ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس افت وزنی کند حدود ۶/۵٪ و از ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس روند افت وزن سریع حدود ۹٪ می‌شود. دلیل اصلی این تغییرات فیزیکی و شیمیایی بتن حرارت دیده در دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس کم شدن آب نانوساختار C-S-H است. این کاهش نانوساختار C-S-H

تصاویر SEM (شکل ۲) قابل مشاهده بود. همچنین افزایش افت وزن بین این دما به خروج آب درون بتن از هیدراتاسیون نانوساختار C-S-H و تجزیه گچ مربوط می‌شود. در دمای بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس بتن حدود ۶۵ تا ۸۰ درصد کل حجم آب را از دست می‌دهد. به طور کلی آب در اشکال مختلف درون بتن است. این آب‌ها شامل آب آزاد (مویرگی)، آب جذب شده و آب موجود در پیوند شیمیایی است [۱۰]. آب‌های موجود در بتن (آزاد، جذب شده، پیوند شیمیایی) به تدریج بخار می‌شود که این نشان دهنده افت وزن در بتن است.

مطابق شکل ۴ افت وزنی نمونه‌های ۱۴ روزه در دماهای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶/۱۰، ۷/۳۷ و ۱۹/۱۲ درصد و برای نمونه‌های ۲۸ روزه به ترتیب ۵/۸۹، ۸/۷۲ و ۱۸/۸۴ درصد است. بیشترین تغییرات وزنی در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس حدود ۱۹٪ بوده است. علت کاهش وزن بتن تحت تأثیر دمای زیاد می‌تواند به تغییر خواص مکانیکی بتن مرتبط باشد. مطابق نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۲) با تجزیه نانوساختار C-S-H به مرور حرارت دیدن تغییرات وزنی نمونه‌ها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در شکل (۲-الف) به علت وجود تمامی محصولات هیدراتاسیون (پرتلندیت، اترینگایت، منوسولفات آلومینات و C-S-H) تغییر وزنی مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش حرارت تا ۱۰۰ درجه سلسیوس (شکل ۲-ب) به علت حذف ساختار اترینگایت و



شکل ۴- منحنی تغییرات افت وزنی بتن تحت تاثیر دما

### ۳-۴- بررسی تغییرات طولی در معرض حرارت

نتایج تغییرات طولی نمونه‌های سیمانی تحت تاثیر دما در شکل ۵ نشان داده شده است. نمونه‌های بتن که در دمای محیط نگهداری شده است، تغییرات طولی محسوسی نداشته‌اند. با شروع فرایند حرارت دهی، اکثر نمونه‌ها از دمای ۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس افت طولی پیدا کردند. میزان افت طولی نمونه ۳ و ۱۴ روزه در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس ۰/۱ و ۰/۶۵ درصد است که کمترین و بیشترین تغییرات طولی در این بازه دمایی به این نمونه‌ها مربوط می‌شود. همچنین در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نمونه ۱۴ روزه ۰/۹۱ درصد افت دارد. با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس افت طولی نمونه ۷ روزه با بیشترین انقباض حدود ۱/۵۳ درصد مشاهده شد. اما نمونه ۳ و ۱۴ روزه در همین دما با مقادیر ۰/۱ و ۰/۷ درصد انبساط طولی پیدا کردند. به طور کلی نمونه‌های بتن هنگامی که در معرض دمای حدود ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند، افزایش طول پیدا می‌کند. از دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به بعد این افزایش طول قابل درک‌تر است. کمینه و بیشینه تغییرات طولی نمونه‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در حدود ۰/۲۸ تا ۱/۲۶ درصد مشاهده شد. همچنین مطابق شکل ۵ روند افزایشی طول نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به بیشترین حد خود می‌رسد. به گونه‌ای که نمونه ۱ روزه در این دما افزایش چشم‌گیر ۷/۹۹ درصدی دارد. نمونه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۲/۱۵، ۱/۵۳، ۱/۴۳ و ۲/۰۷ درصد افزایش طول دارند. مشاهده می‌شود با افزایش سن نمونه‌ها انبساط طولی آنها تحت دما، روند کندی را طی می‌کند. ساختار پرتلندیت  $(Ca(OH)_2)$  یکی از مهم‌ترین ترکیبات در ملات سیمان است، که در دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس

منوسولفات آلومینات تغییرات وزنی اندکی در شکل ۴ مشاهده شد. مطابق شکل (۲-ج) با افزایش دما و شروع تغییر شکل ساختار پرتلندیت (شروع تجزیه) و همچنین کاهش نانو ساختار C-S-H در محدوده دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییرات وزنی زیادی مطابق شکل ۴ صورت گرفته است. در نهایت بر اساس شکل (۲-ی) تمام ساختار خمیر سیمان به خصوص نانو ساختار C-S-H تجزیه و نابود شده‌اند و به این علت است که در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس (شکل ۴) افت وزنی شدیدی مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد افت وزنی در بتن به علت تبخیر آب از نانو ساختار C-S-H است که با نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز همخوانی دارد [۲۳-۲۴]. از سوی دیگر افت وزن در بتن وابسته نسبت آب به سیمان و نوع سنگ‌دانه‌ها است. آب در نانو ساختار C-S-H بین دو لایه (به صورت  $H_2O$  یا  $-OH$ ) وجود دارد. مولکول‌های آب روی سطح بتن می‌تواند تبخیر شود. در نهایت منافذ باریک (با قطر ۱۰ تا ۵۰ نانومتر در خمیر هیدراته و ۳ تا ۵ میکرومتر در سنین اولیه) بین دسته‌های C-S-H می‌تواند حاوی آب آزاد باشد [۲۳]. ممکن است کاهش اولیه تحت تاثیر خشک شدن ناکافی باشد. اما از دمای ۸۰ درجه سلسیوس واضح است علت تبخیر آب از ساختار C-S-H است. مقدار نسبت H/S در پیوند شیمیایی آب از ساختار C-S-H به صورت معادله (۱) تخمین زده شده است [۲۴].

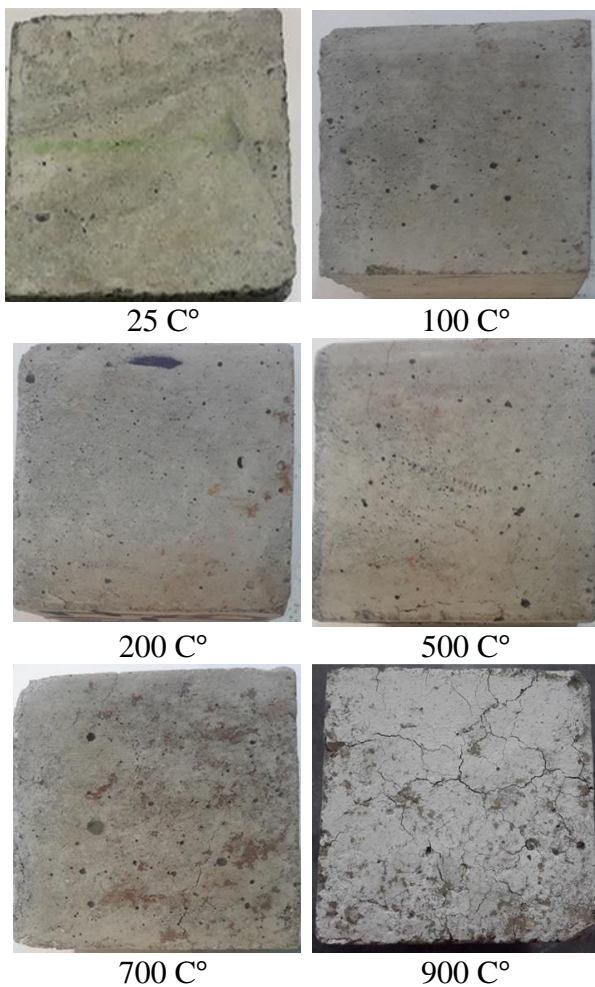
$$W_{C-S-H} = W_{Tot} - W_{CH} - W_{Aft} - W_{Afm} - W_{cal} \quad (1)$$

$W_{Tot}$  کاهش وزن کلی از دمای ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس است. علت افت وزن در  $W_{CH}$ ،  $W_{Aft}$  و  $W_{Afm}$  به ترتیب ترکیب آب در ساختار پرتلندیت، اترینگایت و منوسولفات آلومینات است. همچنین کاهش وزن  $W_{cal}$  به دلیل کربنات کلسیم است. کاهش وزن در دمای ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس، عدم هیدراتاسیون در فاز  $Afm$  و  $Aft$ ، C-S-H است. کاهش وزن در دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت از دست دادن آب هیدروکسید کلسیم ( $W_{CH}$ ) است. همچنین دلیل افت وزن در دمای ۶۰۰ تا ۷۸۰ درجه سلسیوس، از دست دادن وزن کربوناتاسیون است [۲۴]. در حقیقت در این دما ساختار پرتلندیت کاملاً تجزیه شده است. تمام افت وزن از محدوده ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به نانو ساختار C-S-H مربوط می‌شود. به طور کلی بر اساس نتایج ارائه شده افت وزنی نمونه‌های بتنی با افزایش دما افزایش می‌یابد.



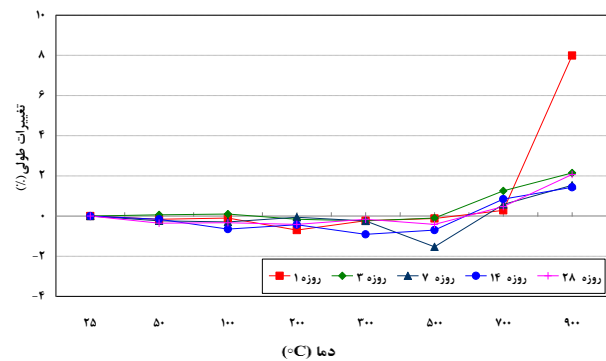
تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر عملکرد بتن با نگرش ...

طبق شکل (۶) تغییر رنگ نمونه‌ها نکته حائز اهمیتی است که با افزایش حرارت دیده می‌شود. نمونه‌ها تا دمای حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس تغییر رنگ خاصی ندارد. اما با زیادتر شدن دما، حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس رنگ مایل به خاکستری روشن به خود می‌گیرد. به علت از دست دادن آب شیمیایی و آب جذب شده سطحی، این آب در نزدیکی سطح جامد قرار دارد، تغییر رنگ نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد دارای روشنی بیشتری است. در نهایت در دماهای زیاد رنگ نمونه‌ها به سفید میل می‌کند. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس سطح بتن پوسته پوسته و سفید می‌شود. علت آن می‌تواند به تغییرات ساختاری بتن مربوط باشد که در حدود این دما سنگ‌دانه‌های موجود در نمونه تبدیل به اکسید کلسیم یا آهک می‌شود. بررسی تغییر رنگ نمونه‌ها همزمان با افزایش دما در تحقیقات بسطامی و همکاران نیز مد نظر گرفته شده است که نتایج مشابهی در پی داشت [۲۷].



شکل ۶- تغییرات نمونه‌های بتن تحت حرارت

منجرب به انقباض بتن می‌شود. انقباض در بتن ممکن است به علت تجزیه  $CaCO_3$  به  $CaO$  و  $CO_2$  باشد و با تغییر حجم باعث تخریب بتن می‌شود [۲۵]. به صورت کلی در دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس آب آزاد در بتن تبخیر می‌شود که افزایش فشار منافذ حفره‌ای را در ساختار سیمان به همراه دارد. در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، کم آب شدن هیدروکسید کلسیم و فاز C-S-H شروع می‌شود (شکل ۲-ج) که منجرب به انقباض و کاهش مقاومت بتن شده است. مطابق شکل ۵ نمونه ۷ و ۲۸ روزه تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱/۵۳ و ۰/۴۱ درصد افت طول داشتند که در همین بازه مقاومت فشاری دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۹/۴ و ۲۲/۲ درصد کاهش داشته است.



شکل ۵- منحنی درصد تغییرات طولی بتن تحت تاثیر دما

### ۳-۵- بررسی تاثیر خواص ظاهری حرارت بر بتن

تصاویر نمونه‌های بتن که در معرض حرارت قرار گرفتند در شکل (۶) ارائه شده است. با بررسی تصاویر سطح نمونه‌ها بعد از قرارگیری در معرض حرارت اولین نکته‌ای که به چشم می‌خورد افزایش حفره‌های سطحی است که با افزایش دما این حفره‌ها بیشتر و عمیق‌تر می‌شود. ضمن آن که ترک‌های مویی در دمای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس بر روی سطح مشاهده شده است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در محدوده دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس ترک‌های ریزی که مشاهده می‌شود به دلیل خروج آب از هیدرات‌های مختلف است که خود عامل ایجاد تخلخل می‌شود. همچنین در شرایط دمای زیادتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس ریزساختار بتن (شکل ۲) رو به تخریب می‌رود که این امر نتیجه تغییرات بلورها و تخلخل بالای ۷٪ است [۲۶].

#### ۴- نتیجه گیری

بر اساس مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته مهمترین نتایج به شرح ذیل است.

۱- بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در نمونه‌های ۲۸ روزه ساختار نمونه‌ها در محدوده دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بسیار منسجم‌تر است. همچنین فازهای پرتلندیت، هیدرات سیلیکات کلسیم و اترینگایت نیز در این تصاویر قابل رویت است. ساختار فاز CH و C-S-H تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس تغییری نمی‌کند. با افزایش دما بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس ساختارهای موجود تغییر و تخریب می‌شود. ساختار پرتلندیت و نانو ساختار C-S-H در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نسبت به نمونه شاهد رو به زوال است. ساختار شش ضلعی پرتلندیت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییر ظاهر می‌دهد و همچنین نانو ساختار C-S-H تجزیه می‌شود. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس این ساختارها از بین رفته‌اند و به اکسید کلسیم تبدیل می‌شود.

۲- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس نشان داد که با افزایش دما مقاومت افزایش می‌یابد. در حقیقت مقاومت کمتر در بتن اشباع شده به علت وجود فشار جدا کننده در خمیر سیمان است. در واقع رطوبت فشار منفذی را زیاد کرده و باعث کاهش مقاومت می‌شود.

۳- نمونه‌هایی که تحت دمای زیاد، در محدوده دمای ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، قرار گرفتند با افت مقاومت فشاری مواجه شدند. بیشترین افت مقاومت فشاری در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. نمونه ۱ روزه در این دما هیچ مقاومتی از خود نشان نداد. اما نمونه ۲۸ روزه در همین دما  $kg/cm^2$  ۴۴ مقاومت کرد. افت مقاومت فشاری در این دما به علت تجزیه نانو ساختار C-S-H است.

۴- افت وزنی نمونه‌ها همواره با افزایش دما رشد داشته‌است. بیشترین افت وزنی در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس رویت شد. علت آن تجزیه کامل آب از ماتریس سیمان و تجزیه نانو ساختار C-S-H است. درصد افت وزنی نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه در این دما به ترتیب ۱۹/۱۲ و ۱۸/۸۴ درصد است.

۵- تغییرات طولی نمونه‌های بتنی از دمای ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت تجزیه هیدروکسید کلسیم، از دمای ۳۰۰

درجه سلسیوس به بعد، رو به کاهش است. تجزیه هیدروکسید کلسیم خود عامل انقباض در بتن است. همچنین با افزایش دما در محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس، طول نمونه‌ها افزایش زیادی داشته به نحوی که در نمونه ۱ روزه در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس بیشترین افزایش طول (۷/۹۹) درصد مشاهده می‌شود.

۶- تصاویر سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های بتنی تحت دمای زیاد تغییر رنگ می‌دهد. ابتدا به خاکستری روشن و سپس به رنگ سفید میل می‌کند. همچنین سطح نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس پوسته پوسته می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1]. Standard, A., Standard test method for measurement of fracture toughness. ASTM, E1820-01, 2001: p. 1-46.
- [2]. Hertz, K.D., Concrete strength for fire safety design. Magazine of Concrete Research, 2005. 57(8): p. 445-453.
- [3]. Bakhtiyari, S., A. Allahverdi, M. Rais-Ghasemi, B. Zarrabi, and T. Parhizkar, Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. Thermochemica acta, 2011. 514(1-2): p. 74-81.
- [4]. Crozier, D. and J. Sanjayan, Chemical and physical degradation of concrete at elevated temperatures. Concrete in Australia, 1999. 25(1): p. 18-20.
- [5]. Taylor, H.F., Cement chemistry. 1997: Thomas Telford.
- [6]. Topcu, I. and A. Demir, Effect of fire and elevated temperatures on reinforced concrete structures. Bull. Chamber Civil Eng, 2002. 16: p. 34-36.
- [7]. Arioiz, O., Effects of elevated temperatures on properties of concrete. Fire safety journal, 2007. 42(8): p. 516-522.
- [8]. Sakr, K. and E. El-Hakim, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. Cement and concrete research, 2005. 35(3): p. 590-596.
- [9]. Savva, A., P. Manita, and K. Sideris, Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. Cement and Concrete Composites, 2005. 27(2): p. 239-248.
- [10]. Maanser, A., A. Benouis, and N. Ferhoune, Effect of high temperature on strength and mass loss

- [23]. Beaudoin, J.J., V.S. Ramachandran, and R.F. Feldman, Interaction of chloride and C-S-H. Cement and Concrete Research, 1990. 20(6): p. 875-883.
- [24]. Gallucci, E., X. Zhang, and K. Scrivener, Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (CSH). Cement and Concrete Research, 2013. 53: p. 185-195.
- [25]. Yüzer, N., F. Aköz, and L.D. Öztürk, Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. Cement and Concrete Research, 2004. 34(10): p. 1803-1807.
- [26]. Fares, H., S. Remond, A. Noumowe, and A. Cousture, High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties. Cement and Concrete Research, 2010. 40(3): p. 488-496.
- [27]. Bastami, M., A. Chaboki-Khiabani, M. Baghadrani, and M. Kordi, Performance of high strength concretes at elevated temperatures. Scientia Iranica, 2011. 18(5): p. 1028-1036.
- of admixed concretes. Construction and Building Materials, 2018. 166: p. 916-921.
- [11]. Caetano, H., G. Ferreira, J.P.C. Rodrigues, and P. Pimienta, Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. Construction and Building Materials, 2019. 199: p. 736-717.
- [12]. Hamzeh Keykha, A., The Effect of High Temperature on Compressive and Flexural Strength of Concretes Containing Glass Fiber. Concrete Research, 2017. 10(1): p. 63-73 in persian.
- [13]. Berenjian, J., N. Tila, M.J. Taheri Amiri, and A. Ashrafian, Investigating the Effect of High Temperatures on Long-term Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Containing Powdery Binary Admixtures. Concrete Research, 2018. 11(1): p. 119-128 in persian.
- [14]. ASTM, American Society for Testing and Materials. 1984.
- [15]. Taylor, P.C., S.H. Kosmatka, and G.F. Voigt, Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual. 2006.
- [16]. Bilodeau, A., V. Kodur, and G. Hoff, Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. Cement and Concrete Composites, 2004. 26(2): p. 163-174.
- [17]. Noumowe, A.N., R. Siddique, and G. Debicki, Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 C). Construction and Building Materials, 2009. 23(5): p. 1855-1861.
- [18]. Varona, F., F.J. Baeza, D. Bru, and S. Ivorra, Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete. Construction and Building Materials, 2018. 159: p. 73-82.
- [19]. Alarcon-Ruiz, L., G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlacher, The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete research, 2005. 35(3): p. 609-613.
- [20]. Hager, I., Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2013. 61(1): p. 145-154.
- [21]. Lim, S., Effects of elevated temperature exposure on cement-based composite materials. 2015, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [22]. Alonso, C. and L. Fernandez, Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. Journal of materials science, 2004. 39(9): p. 3015-3024.

## The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)

M. Amiri \*

Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

M. Aryanpoor

Master Student, Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering.

### Abstract

Concrete behavior at high temperatures has significant implications for structural safety under specific loads and for measuring the load-bearing capacity of a structure for its continued utilization. The calcium silicate hydrate (C-S-H) is a nanostructure produced by the hydration of cement paste and plays a significant part in enhancing concrete strength; however, its behavior varies with changes in temperature. Thus, this paper aims to investigate the effect of different temperatures on the strength parameters of concrete made with Portland cement from a nanostructural viewpoint based on the nanostructural changes in C-S-H. Accordingly, 300 samples were cured for 1, 3, 7, 14, and 28 days in a moisture room. After that, all samples were exposed to temperatures of 25, 50, 100, 200, 300, 500, 700, and 900 degrees Celsius for two hours. The changes in length and weight, compressive strength, and cracking behavior in the concrete samples were studied. Moreover, scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the microstructural behavior of samples at different temperatures. Based on the results, the behavior of C-S-H nanostructure causes the changes in length, weight, and compressive strength of the samples to be dependent on the C-S-H nanostructure behavior. With the onset of C-S-H decomposition due to heat, the compressive strength and weight decrease and the cracks spread. The results indicated that the compressive strengths of the 14- and 28-day samples reduced from 262 kg/cm<sup>2</sup> and 270 kg/cm<sup>2</sup> to 36 kg/cm<sup>2</sup> and 44 kg/cm<sup>2</sup>, respectively. SEM analysis indicated that this reduction was due to the complete decomposition of the C-S-H nanostructure and Portlandite in the cement structure.

**Keywords:** High Temperatures, Concrete, Compressive Strengths, C-S-H, SEM.

---

\* Corresponding Author: amirii@chmail.ir