

## بررسی اثر استفاده از نانوسیلیس بر روی خصوصیات مکانیکی ملات ماسه سیمان تحت تأثیر حرارت با نگرش به تغییرات نانوساختارهای سیمانی

مطهره ناصحی گشویبه

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران.

محمد امیری \*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

محسن ملکی نژاد

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران.

### چکیده

دماهای زیاد یکی از مهم‌ترین فرایندهای زوال فیزیکی است که دوام سازه بتنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عملکرد مصالح پایه سیمانی به شدت به ویژگی‌های ذرات جامد در مقیاس نانو و یا تخلخل‌های نانومتری در ناحیه انتقالی داخلی بین ذرات سیمان و سنگ‌دانه وابسته هستند و حرارت می‌تواند تأثیر مهمی بر ویژگی این ذرات و اتصال بین آن‌ها بگذارد. بر این اساس در پژوهش حاضر تلاش شد تأثیر نانو سیلیس بر پارامترهای مقاومتی ملات ماسه-سیمان در درجه حرارت‌های زیاد بررسی شود. بدین منظور ملات ماسه-سیمان با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان با نانوسیلیس تهیه شد و پس از عمل‌آوری در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روز تحت درجه حرارت‌های ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بررسی اثر درجه حرارت‌های زیاد بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات ماسه-سیمان توسط آزمایش‌های درشت ساختاری مقاومت فشاری، افت وزنی و جذب آب و آزمایش‌های ریزساختاری پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، رفتار درشت ساختاری ملات ماسه-سیمان به شدت وابسته به ریزساختار و تغییرات نانوساختارهای سیمانی طی اعمال حرارت است. در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  پرتو پراش اولیه کاملاً تخریب و با خروج آب،  $\text{CaO}$  تشکیل شده است. در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  نیز از تخریب نانوساختار C-S-H علاوه بر آلیت ( $\text{C}_3\text{S}$ ) و بلیت ( $\text{C}_2\text{S}$ )، بتا و لاستونیت نیز تشکیل شده است. افزودن نانوسیلیس باعث بهبود خصوصیات مقاومتی ملات ماسه-سیمان در برابر حرارت شده است به طوری که مقاومت فشاری آزمون‌های ۲۸ روزه فاقد نانوسیلیس با افزایش دما تا  $800^{\circ}\text{C}$  با ۵۷٪ افت مواجه شده و از ۳۱/۱ MPa به ۱۳/۳ MPa رسیده است در حالی که مقاومت فشاری آزمون‌های ملات ماسه-سیمان حاوی ۱۵٪ نانوسیلیس با اعمال درجه حرارت  $800^{\circ}\text{C}$  کمتر دچار افت مقاومت شده و با ۵۲٪ کاهش از ۴۰/۲ MPa به ۱۹/۲ MPa رسیده است.

واژه‌های کلیدی: ملات ماسه-سیمان، بتن با حرارت زیاد، نانو ساختارهای سیمانی، نانوسیلیس، مقاومت فشاری.

\* نویسنده مسئول: amirri@hormozgan.ac.ir

## ۱- مقدمه

سیلیکات کلسیم شده که در نهایت منجر به شکست این ساختار و نابودی آن می‌شود [۱، ۲]. پرتلندیت و اترینگایت نیز تحت دمای زیاد تجزیه شده و از بین می‌روند. به‌طور کلی آزمون‌های حاوی نسبت اکسید کلسیم به سیلیسیم دی‌اکسید ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) پایین عملکرد ضعیفی در مواجهه با حرارت زیاد دارند [۱۴].

استفاده از موادی که روند تولید و مقدار نانو ساختارهای C-S-H را در خمیر کامپوزیت سیمانی افزایش دهد و با ایجاد پیوندهای قوی در میکروساختارهای موجود در ملات سیمانی استحکام آن را بالا ببرد، می‌تواند روشی مناسب جهت بهبود عملکرد بتن در مواجهه با تنش‌های حرارتی بالا باشد. نانو ذرات به علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای آن‌ها، خصوصیات ویژه‌ای را در طرح اختلاط بتن از خود نشان داده اند [۱۵]. نانوسیلیس به واسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان فعال و پرکننده‌ای بسیار مؤثر در بتن است. سیلیس آمورف (غیر بلوری) موجود در نانوسیلیس می‌تواند با محصولات هیدراتاسیون وارد فعل و انفعالات شیمیایی شده و ساختار خمیر سیمان را اصلاح کند [۱۶، ۱۷]. بهبود مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته و سرعت امواج آلتراسونیک با استفاده از نانوسیلیس در بتن دیده شده است [۱۸].

الحوات و همکاران (2019) گزارش کردند که نانوسیلیس به علت داشتن سطح مخصوص زیاد، سرعت فرایند هیدراتاسیون سیمان و مقدار نانو ساختارهای سیمانی را افزایش می‌دهد. مقدار زیاد محصولات هیدراتاسیون، منجر به افزایش تراکم و همگن‌تر شدن ماتریس بتن شده است [۱۹]. بر اساس پژوهش هانگجیان دو و همکاران (2015) با افزودن نانوسیلیس به بتن، ناحیه انتقال سطحی (ITZ) فشرده‌تر و متراکم‌تر شد و با افزودن ۱٪ نانو سیلیس مقاومت در برابر نفوذ آب و یون کلرید بهبود یافت [۲۰]. وانگ و همکاران (2020)، با مقایسه آزمون‌های فاقد نانوسیلیس و حاوی نانوسیلیس مشاهده نمودند که با افزودن نانوسیلیس به سیمان از مقدار کریستال CH در ماتریس کاسته شده و مقدار نانو ساختار C-S-H افزایش می‌یابد که با توجه به عملکرد بهتر C-S-H در مواجهه با دما شاهد عملکرد بهتر آزمون‌های حاوی نانوسیلیس در دمای  $400^\circ\text{C}$  مشاهده می‌شود [۹].

امیری و همکاران (2021) نشان دادند که جایگزینی ۵٪ سرباره فولاد به سیمان تحت شرایط دمایی  $800^\circ\text{C}$  منجر به افزایش مقاومت فشاری آزمون‌ها می‌شود که در مقایسه با آزمون‌های

بتن و ملات‌های بر پایه سیمان همواره در طول عمر بهره‌برداری خود تحت تأثیر تنش‌های مختلف قرار می‌گیرند. یکی از شرایطی که بتن ممکن است تحت آن قرار گیرد تغییر شدید دمای محیط پیرامون بتن تحت شرایط آتش‌سوزی و یا کاربرد آن در سازه‌های خاص مانند راکتورهای هسته‌ای، مخزن‌های نگهداری از مواد شیمیایی است که می‌تواند بتن را تحت تنش‌های حرارتی زیاد قرار دهد [۱، ۲]. تنش‌های حرارتی بر عملکرد بتن، به‌خصوص میکروساختار خمیر سیمان تأثیر می‌گذارد، لذا بررسی رفتار کامپوزیت سیمانی تحت دماهای زیاد می‌تواند دید مناسبی را به مهندسان جهت طراحی سازه‌ها مقاوم در شرایط خاص را دهد [۳]. حرارت زیاد در بتن می‌تواند اثرات مخربی بر ریزساختار و درشت-ساختار بتن داشته باشد، حرارت اغلب از طریق خروج آب از حفرات و فضاهای مویینه در ریزساختار بتن موجب تضعیف در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن می‌شود. حرارت زیاد می‌تواند موجب گسستگی در نانو ساختارهای هیدراته موجود در ملات سیمان شود و نقش بسزایی در تضعیف پیوندهای بین نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) داشته باشد. با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم هیدراته منجر به خرابی بتن در دمای بیش از  $450^\circ\text{C}$  می‌شود، تغییرات قابل توجهی از خواص مکانیکی بتن تحت دمای بین  $27^\circ\text{C}$  تا  $100^\circ\text{C}$  مشاهده نمی‌شود اما کاهش تا ۴۰٪ در مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، بعد از اعمال دمای  $350^\circ\text{C}$  در مراحل اولیه اتفاق می‌افتد [۴، ۵]. حرارت بین  $500^\circ\text{C}$  الی  $900^\circ\text{C}$  موجب تغییرات کریستالی، تخریب پرتلندیت و نانو ساختارهای سیمانی و تشکیل کانی‌های کربناتی در ماتریس بتن می‌شود [۶، ۷]. یکی از عواملی که در ایجاد مقاومت بتن نقش اساسی دارد، نانو ساختارهای C-S-H می‌باشد که حاصل واکنش آب با فازهای مختلف کلسیم سیلیکات ( $\text{C}_2\text{S}$  و  $\text{C}_3\text{S}$ ) است [۸-۱۰]. نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم که در شرایط هیدراتاسیون کامل ۷۵٪ ذرات خمیر سیمان را در کامپوزیت‌های سیمانی تشکیل می‌دهد، تحت شرایط دمایی بالا دچار تغییر شده و از بین می‌رود که این سبب کاهش شدید مقاومت بتن تحت تنش‌های حرارتی زیاد می‌شود [۱۱-۱۳]. در واقع بررسی‌ها نشان می‌دهد دمای زیاد سبب تجزیه هیدروکسید و بخار آب موجود در ساختار هیدرات

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- مصالح

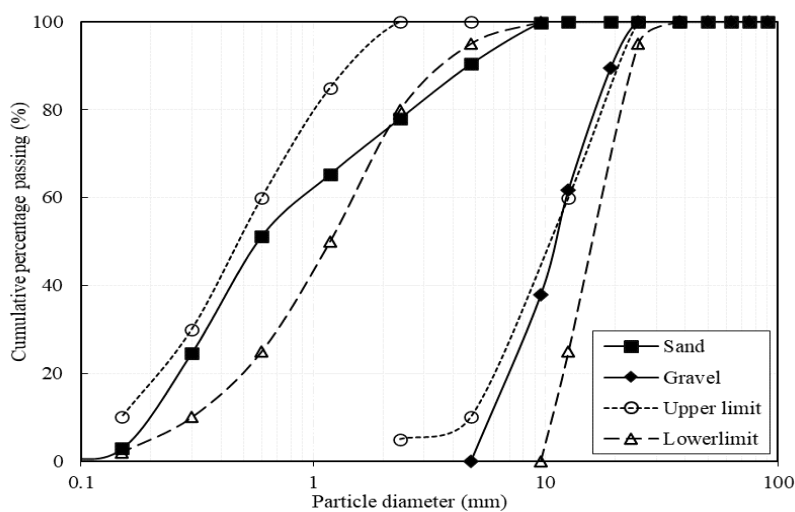
در پژوهش حاضر جهت تهیه نمونه‌ها از سیمان، ماسه و نانوسیلیس استفاده گردید. جهت ساخت تمامی نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ II هرمزگان استفاده شد. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [۲۴]. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و نانوسیلیس با آزمایش XRF تعیین شد و در جدول (۱) ارائه شده است. 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، رضایت‌بخش‌ترین نتایج را به همراه دارد. بدین منظور دانه‌بندی ملات سیمانی برای ماسه و شن به ترتیب از استاندارد ASTM C136-96 و ASTM C136 استفاده شده است.

منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه در شکل (۱) ارائه شده است. جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۰/۱۶ و ۱/۰۳ درصد است. در این تحقیق حداکثر قطر سنگ‌دانه‌های استفاده شده mm ۵/۹ و همچنین آب مصرفی در ساخت بتن، آب شرب هرمزگان با pH=۷/۸ است. نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق نیز از شرکت شیمی سازه آرمانی تهیه شده است. جدول (۲) مشخصات فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. کلیه مصالح مورد استفاده الزامات موجود در استانداردهای ASTM و DIN و ACI را ارضا می‌نماید.

معمولی عملکرد بهتری از خود نشان داده است [۱۲].

بررسی تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر خصوصیات ملات سیمانی حاوی نانوسیلیس نشان داد که در دمای بالاتر از  $400^{\circ}\text{C}$  افت شدید مقاومت فشاری، رشد ترک‌ها و افزایش تخلخل در بتن مشاهده شد [۲۱]. بر اساس نتایج پژوهش مهاباترا و بارای<sup>۱</sup> (2019) تحت عنوان بررسی تأثیر حرارت بر بتن حاوی خاکستر بادی و نانوسیلیس و مسلح شده با هیبرید فیبر<sup>۲</sup>، تا دمای  $400^{\circ}\text{C}$  نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نمونه‌های حاوی خاکستر بادی مقاومت فشاری قابل قبولی از خود نشان دادند اما با افزایش دما به  $600^{\circ}\text{C}$ ، کیفیت مقاومت نمونه‌های حاوی نانوسیلیس کاهش یافت [۲۲]. لیئو و همکاران (2022) گزارش کردند که بتن حاوی نانوسیلیس در معرض حرارت کمتر دچار تخریب و افت مقاومت شده است. کاهش مقدار پرتلندیت در اثر افزودن نانوسیلیس، یکی از عوامل تأثیرگذار در کاهش اثرات مخرب ناشی از حرارت است [۲۳].

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته مطالعه جامعی از منظر ریزساختاری بر روی تأثیر نانوسیلیس بر پارامترهای مقاومتی ملات ماسه سیمان در مواجهه با تنش‌های حرارتی زیاد صورت نگرفته است، لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا اثر استفاده از نانوسیلیس بر روی خصوصیات مکانیکی ماسه سیمان تحت تأثیر حرارت با نگرش به تغییرات نانو ساختارهای سیمانی مورد بررسی قرار گیرد.



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

<sup>2</sup> hybrid fiber

<sup>1</sup> Mahapatra and Barai

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II هرزگان و نانوسیلیس

Parameters Product type	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
Cement type II	22	5.30	4.00	65.00	2.50	0.70	0.50	2.50	2.50
Nanosilica	96.4	1.32	0.87	0.49	0.97	1.01	0.31	0.10	0.6

جدول ۲- برخی از مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

Physical form	Powder
Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	200-350
Density (kg/cm <sup>3</sup> )	2.2-2.35
Particles Shape	Amorphous
Color	Light gray

## ۲-۲- آماده سازی نمونه ها

زمان عمل آوری، آزمون‌ها در سنین مختلف برای انجام آزمایش از درون حوضچه آب خارج می‌شود. قبل از حرارت دیدن آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون در دمای ۱۰۰°C خشک می‌شود. پس از خشک شدن، هر آزمون در یک دمای مشخص به صورت جداگانه درون کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت گذاشته می‌شود. حرارت کوره با نرخ ۵ درجه بر دقیقه به طور اتوماتیک افزایش یافته و پس از رسیدن به دمای مورد نظر ۲ ساعت در این دما باقی می‌ماند، سپس کوره خاموش شده و آزمون‌ها درون کوره خشک شده و به دمای محیط می‌رسد. آزمون‌ها تحت دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس آزمایش شده‌اند. شایان ذکر است که آزمون دمای ۱۰۰°C در آون قرار نمی‌گیرد. سپس آزمایش‌های افت وزنی (ASTM C1792-14)، آزمایش جذب آب (ASTM C642) و مقاومت فشاری (ASTM C39) بر روی آزمون‌ها انجام شده است [۲۴].

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر حرارت بر میکرو و نانوساختار ملات سیمانی حاوی نانوسیلیس، با استفاده از استاندارد ASTM C1384-18e1 مطابق با مشخصات جدول (۳)، چهار تیپ طرح اختلاط تهیه شد [۲۵]. برای تولید ملات مطابق با استاندارد ASTM C109-90 عمل شد. ابتدا سیمان و نانوسیلیس (با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵) به همراه مصالح درشت‌دانه و ریزدانه درون میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شود. سپس آب به ترکیبات خشک اضافه شده است و عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. مخلوط تازه در ۳ لایه و با ۲۵ ضربه درون قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت عمل آوری آغاز شد. پس از قالب‌گیری، عمل آوری به مدت زمان ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه در حوضچه آب اشباع شده از آهک با دمای ۲۳±۲°C انجام شده است. پس از گذشت

جدول ۳- طرح اختلاط آزمون‌ها

Nanosilica	Sand	Water	Cement	Water:Cement	Mixture	Number
NS	S	W	C	W/C	TYPE	
kg	kg	kg	kg	%		
0	1375	225	500	0.45	C	1
25	1306.25	225	475	0.45	C5S	2
50	1237.5	225	450	0.45	C10S	3
75	1168.75	225	425	0.45	C15S	4

## ۲-۳- روش شناسی

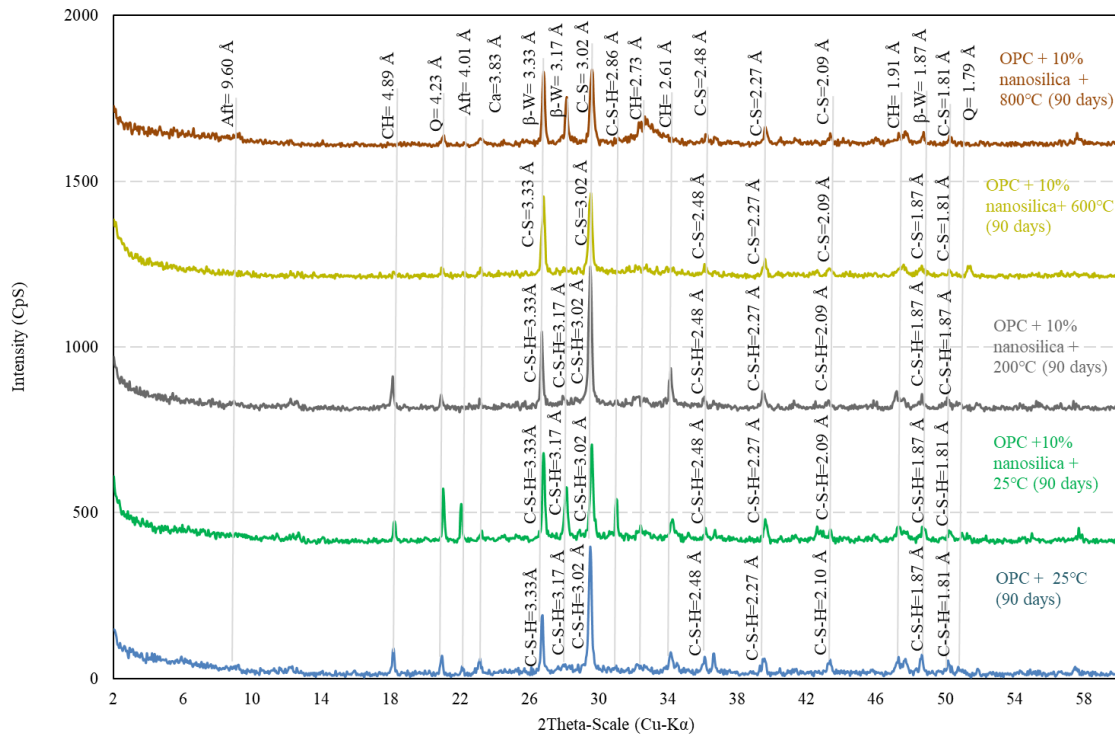
وزن آزمونه‌ها توسط ترازو دیجیتال در دو مرحله (قبل از قرارگیری در حرارت و بعد از قرار گرفتن در حرارت) اندازه‌گیری شده‌است. سپس برای تست مقاومت فشاری تمامی آزمونه‌ها زیر چک بتن شکن گذاشته شدند. تست مقاومت فشاری آزمونه‌ها توسط چک مکانیکی شرکت آزمون با سرعت ۷۵ kg/sec انجام شده‌است. در نهایت پودر حاصل از آزمونه‌ها برای آزمایش‌های ریزساختاری SEM و XRD جمع‌آوری شدند. جهت تهیه آزمونه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) از هر آزمونه حدود ۵ گرم با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد و در مقابل اشعه با طول موج ۱/۵۴ Å (مربوط به  $\alpha$  عنصر Cu) و محدوده ۲۰ تا ۶۰ درجه قرار گرفت. آزمونه‌ها با دستگاه اشعه ایکس مدل X-Ray Diffractometer (D8-ADVANCE) ساخت شرکت Bruker آلمان مورد آزمایش قرار گرفتند [۲۶]. جهت تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از هر آزمونه، مقدار ۱ گرم با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده‌است. برای ایجاد رسانایی و آماده‌سازی آزمونه‌ها جهت انجام آزمایش از پوشش‌دهی طلا استفاده می‌شود. ریخت‌شناسی آزمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (TESCAN vega3) مورد بررسی قرار گرفت [۲۷]. به منظور انجام آزمایش جذب آب، آزمونه‌های عمل‌آوری شده، پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه و توزین (وزن خشک اولیه:  $m_0$ ) به مدت ۳۳۰ دقیقه، ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت داخل آب غوطه‌ور می‌شوند. سپس از داخل آب خارج شده و سطح آن‌ها با یک پارچه خشک و سپس توزین می‌شوند (وزن اشباع:  $m_1$ ). مقدار درصد جذب آب آزمونه‌ها از رابطه (۱) بدست آمده‌است (ASTM C642).

$$\text{Water absorption (\%)} = 100(m_1 - m_0) / m_0 \quad (1)$$

## ۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌ها در معرض حرارت نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) در شکل (۲) ارائه شده‌است که نمایانگر ساختارهای کریستالی و نانوساختار سیمانی C-S-H است. نانوساختار C-S-H با ساختارهای لایه‌ای نامنظم و منقطع تشکیل شده‌است بنابراین تشخیص آن در الگوی XRD اندکی دشوار است. نانوساختار سیمانی C-S-

H از هیدراتاسیون ترکیبات حاوی کلسیم موجود در سیمان از جمله آلایت ( $C_3S$ ) و بلیت ( $C_2S$ ) تشکیل شده و بخش اعظمی از فراورده هیدراتاسیون سیمان است [۲۸، ۲۹]. فازهای کریستالی از جمله کوارتز (در فواصل ۴/۲۳ Å و ۱/۷۹ Å) و کلسیت (در فاصله ۳/۸۳ Å) و فازهای هیدراته از جمله C-S-H (در فواصل ۳/۳۳ Å، ۳/۱۷ Å، ۳/۰۲ Å، ۲/۸۲ Å، ۲/۴۸ Å، ۲/۲۷ Å، ۲/۱۰ Å، ۱/۸۷ Å و ۱/۸۱ Å)، پرتلندیت به فرمول شیمیایی  $Ca(OH)_2$  (در فواصل ۴/۸۹ Å، ۲/۷۳ Å، ۲/۶ Å و ۱/۹ Å) و اترینگایت (در فواصل ۹/۶ Å و ۴/۰۱ Å) برای آزمونه ۹۰ روزه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس در دمای ۲۵°C به تفکیک قابل مشاهده‌است. مقایسه بین آزمونه فاقد نانوسیلیس و آزمونه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس نشان‌دهنده افزایش تعداد قله-های C-S-H در آزمونه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس است. بر اساس نتایج، فاز غالب ماتریس ملات ماسه-سیمان حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس، نانوساختار C-S-H است. قله اصلی مربوط به نانوساختار C-S-H ( $3/02 \text{ \AA}$ ) برابر با  $304 \text{ Cps}$  است و در اثر اعمال حرارت مجدداً تشکیل نمی‌شود. با افزایش دما به ۲۰۰°C شدت قله C-S-H افزایش یافته‌است. با حذف آب حفزه-ای بازتاب پرتو ایکس افزایش یافته و موجب افزایش شدت قله این نانوساختار شده‌است. با افزایش حرارت ۶۰۰°C و ۸۰۰°C قله نظیر C-S-H حذف شده و به سیلیکات‌های کلسیمی آلایت و بلیت تبدیل شده‌است. این روند برای قله‌های دیگر نانوساختار C-S-H نیز وجود دارد. تغییر فاز در ترکیبات سیمانی به خصوص C-S-H به نسبت  $Ca/SiO_2$ ، میزان  $SiO_2$  یا کوارتز، درجه حرارت و مقدار فشار اعمال شده بستگی دارد. مقدار آب موجود در صفحات C-S-H تاثیر قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی بتن دارد و دهیدراته شدن C-S-H با افزایش تخلخل در آزمونه‌ها همراه است [۶]. دی-هیدراسیون C-S-H از دمای ۲۰۰°C با تبخیر آب موجود در منافذ سطحی این نانوساختار صورت می‌گیرد و در دمای ۴۰۰°C با نرخ شدیدتری صورت می‌گیرد. در محدوده حرارتی ۶۰۰°C از تخریب C-S-H، ترکیبات سیمانی آلایت ( $C_3S$ ) و بلیت ( $C_2S$ ) تشکیل می‌شود. با افزایش دما به ۸۰۰°C بتا-ولاستونیت تشکیل شده که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) آزمونه‌ها در معرض حرارت.

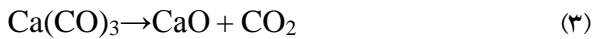
(Aft: Ettringite, C3S: Alite, C2S: Belite, C-S-H: Calcium Silicate Hydrate, CH: Portlandite, Q: Quartz, Ca: Calcite, β-W: β-Wollastonite)

شدت قله‌ی اصلی پرتلندیت ( $4/89 \text{ \AA}$ ) برابر با  $74 \text{ Cps}$  است. افزودن نانوسیلیس به دلیل مصرف پرتلندیت هنگام هیدراتاسیون و افزایش تولید C-S-H، منجر به کاهش پرتلندیت در ماتریس ملات شده است. با افزایش دما به  $200^\circ\text{C}$  شدت قله پرتلندیت به دلیل حذف آب سطحی و در نتیجه افزایش بازتاب پرتو ایکس، افزایش یافته است. در دمای  $200^\circ\text{C}$  وضوح پرتلندیت و C-S-H در تصاویر SEM نیز به همین دلیل است. با افزایش دما به  $600^\circ\text{C}$  و  $800^\circ\text{C}$  قله اصلی پرتلندیت حذف و به آهک زنده و آب تبدیل شده است [30]. مطابق الگوی پراش پرتو ایکس در دمای  $600^\circ\text{C}$  و  $800^\circ\text{C}$  قله‌های پرتلندیت مشاهده می‌شود. پرتلندیت اولیه در دمای  $550^\circ\text{C}$  کاملاً تخریب می‌شود و مطابق رابطه (۲) در دمای  $600^\circ\text{C}$  از واکنش آب آزاد شده به دلیل دلیل دی-هیدراتاسیون پرتلندیت اولیه و آهک زنده حاصل از تجزیه کربنات-ها، پرتلندیت ثانویه مشاهده می‌شود [29, 30]. با افزایش دما مقدار پرتلندیت ثانویه افزایش می‌یابد که به وضوح در الگوی XRD قابل مشاهده است. پرتلندیت ثانویه به دلیل تشکیل در شرایط بحرانی، در دمای پایین‌تری نسبت به پرتلندیت اولیه، دهیدراته و

باعث افزایش حجم ملات ماسه-سیمان، افزایش ترک-ها و در نتیجه افت مقاومت فشاری شده است [29, 30].



قله کلسیت در فاصله  $3/8 \text{ \AA}$  با شدت  $45 \text{ Cps}$  مشاهده می‌شود. با افزایش دما به  $200^\circ\text{C}$  شدت قله کلسیت تغییر محسوسی نداشته است. با افزایش دما به  $600^\circ\text{C}$  قله کلسیت کاهش یافته و در دمای  $800^\circ\text{C}$  به  $80 \text{ Cps}$  رسیده است. کلسیت در دمای  $850^\circ\text{C}$  با آزادسازی گاز  $\text{CO}_2$  و تبدیل به  $\text{CaO}$  کاملاً حذف می‌شود (رابطه (۳)) [31].



در دمای  $600^\circ\text{C}$  از تخریب C-S-H ترکیبات سیمانی کلسیم سیلیکات‌های آلایت ( $\text{C}_3\text{S}$ ) و بلیت ( $\text{C}_2\text{S}$ ) تشکیل می‌شود. تمایز بین آلایت و بلیت تشکیل شده به علت حرارت، دشوار است و از قله‌های  $\text{C}_3\text{S}$  یا  $\text{C}_2\text{S}$  می‌توان برای نشان دادن هر دو استفاده کرد. می‌توان گفت که موقعیت آلایت و بلیت در الگوی پراش پرتو ایکس یکسان است [32]. با افزایش دما، مقدار آلایت و بلیت

و نانوساختار C-S-H فاز غالب است. با افزایش دما به  $200^{\circ}\text{C}$  اترینگایت تخریب شده. در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  همزمان با تخریب کامل CH و C-S-H، آلایت و بلیت فاز غالب ماتریس ملات را تشکیل می‌دهند. با افزایش دما به  $800^{\circ}\text{C}$  ماتریس ملات متشکل از ترکیبات سیمانی آلایت، بلیت و بتا و لاستونیت است. مقادیر اندکی پرتلندیت ثانویه و بقایای کلسیت نیز مشاهده شده است. مقایسه بین آزمون فاقه نانوسیلیس و آزمون حاوی نانوسیلیس نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوسیلیس در کاهش اثرات مخرب حرارت است.

### ۳-۲- ریخت شناسی آزمون‌ها در معرض حرارت

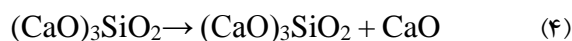
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی آزمون‌های ۹۰ روزه را در معرض حرارت‌های متفاوت نشان می‌دهد. براساس تصاویر ارائه شده میکروتترک‌ها، حفره‌ها و ساختارهای پرتلندیت (CH)، نانوساختار C-S-H و اترینگایت (Aft) قابل تشخیص است.

در شکل (۳-ا) آزمون فاقه نانوسیلیس تحت دمای  $25^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است، در دمای محیط، ماتریس ملات ماسه-سیمان نسبتاً فشرده است، بلورهای هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) به صورت ساختار شش ضلعی و نانوساختار C-S-H به صورت لخته‌ای و نسبتاً نامنظم است و اندازه آن کوچک و مقدار آن کم است. ذرات سفیدرنگ کلسیت نیز قابل مشاهده است.

ماتریس ملات به صورت چسبنده و تعداد کمی ریز ترک و حفره وجود دارد. سولفات موجود در آب حفره‌ای سنگ‌دانه‌ها در واکنش با سیمان، باعث تشکیل ساختار سوزنی شکل اترینگایت شده که بر عملکرد ملات ماسه-سیمان تأثیر منفی دارد.

در شکل (۳-ب) آزمون حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس تحت دمای  $25^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. آزمون دارای نانوسیلیس بافت یکنواخت‌تری نسبت به آزمون فاقه نانوسیلیس (شکل (۳-ا)) دارد. خلل و فرج و ساختار نامرغوب و سوزنی شکل اترینگایت کاهش یافته است. ذرات نانوسیلیس می‌توانند با تسریع فرایند هیدراتاسیون سیمان، در واکنش با کریستال‌های پرتلندیت (CH) تولید نانوساختار سیمانی C-S-H را افزایش دهند که باعث کاهش اندازه و مقدار کریستال‌های CH می‌شود [۳۸]. نانوساختار سیمانی C-S-H روی یکدیگر قرار گرفته و همپوشانی دارند و در نتیجه با افزایش چگالی

افزایش می‌یابد به طوری که در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  قله‌های جدید کلسیم سیلیکات‌های آلایت ( $\text{C}_3\text{S}$ ) و بلیت ( $\text{C}_2\text{S}$ ) در فاصله‌های  $3702\text{ \AA}$ ،  $248\text{ \AA}$ ،  $227\text{ \AA}$  و  $209\text{ \AA}$  و با شدت  $238\text{ CpS}$ ،  $37\text{ CpS}$  و  $66\text{ CpS}$  تشکیل شده است [۳۳، ۶]. به تدریج با اعمال حرارت مقداری از آلایت به بلیت تبدیل می‌شود (واکنش (۲)) و در نتیجه در دماهای بالا مقدار بلیت در مقایسه با آلایت بیشتر است [۲۹].



در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  قله‌های جدید و لاستونیت در فواصل  $3733\text{ \AA}$ ،  $317\text{ \AA}$  و  $187\text{ \AA}$  و با شدت  $231\text{ CpS}$ ،  $154\text{ CpS}$  و  $50\text{ CpS}$  تشکیل شدند. پس از تخریب C-S-H، علاوه بر آلایت و بلیت، در محدوده حرارتی  $800^{\circ}\text{C}$  بتا-ولاستونیت تشکیل می‌شود و جز فازهای غالب آزمون حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس است [۲۹].

قله‌های مربوط به ساختار نامرغوب و مخرب اترینگایت در فواصل  $96\text{ \AA}$  و  $401\text{ \AA}$  و با شدت  $37\text{ CpS}$  و  $107\text{ CpS}$  قابل مشاهده است. اترینگایت در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  تخریب می‌شود [۳۴].

فاصله  $423\text{ \AA}$  مربوط به کانی کوارتز با شدت  $170\text{ CpS}$  مشاهده می‌شود. با افزایش حرارت قله مربوط به کوارتز کاهش یافته است.

در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  آلفا کوارتز به بتا کوارتز تغییر فاز داده است. کوارتز پایین‌ترین شکل دمایی سیلیس است. در فشار  $1\text{ atm}$  آلفا

کوارتز<sup>۱</sup> (کوارتز پایینی یا کوارتز دما پایین) تحت حرارت  $573^{\circ}\text{C}$ ، به بتا کوارتز<sup>۲</sup> (کوارتز بالایی یا کوارتز دما بالا) تبدیل می‌شود. این واکنش به سرعت رخ می‌دهد. بتا کوارتز از لحاظ ساختاری شبیه آلفا کوارتز است البته اندکی اعوجاج در ساختار بتا کوارتز مشاهده می‌شود [۳۵]. این فرایند تا دمای  $800^{\circ}\text{C}$  قابل برگشت است و ذرات کوارتز با آزادسازی گرما و تحمل تنش‌های کششی به آلفا کوارتز تبدیل می‌شوند که منجر به ایجاد فضای خالی در ملات می‌شود. با تغییر فاز کوارتز، در ماتریس آزمون، تخلخل و انبساط رخ می‌دهد و در کاهش مقاومت فشاری آزمون‌ها تأثیر گذار است [۳۶، ۳۷].

به طور خلاصه در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  فاز غالب ملات ماسه-سیمان، نانو-ساختار C-S-H و پرتلندیت است. در آزمون حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس به دلیل افزودن نانوسیلیس از مقدار CH کاسته می‌شود

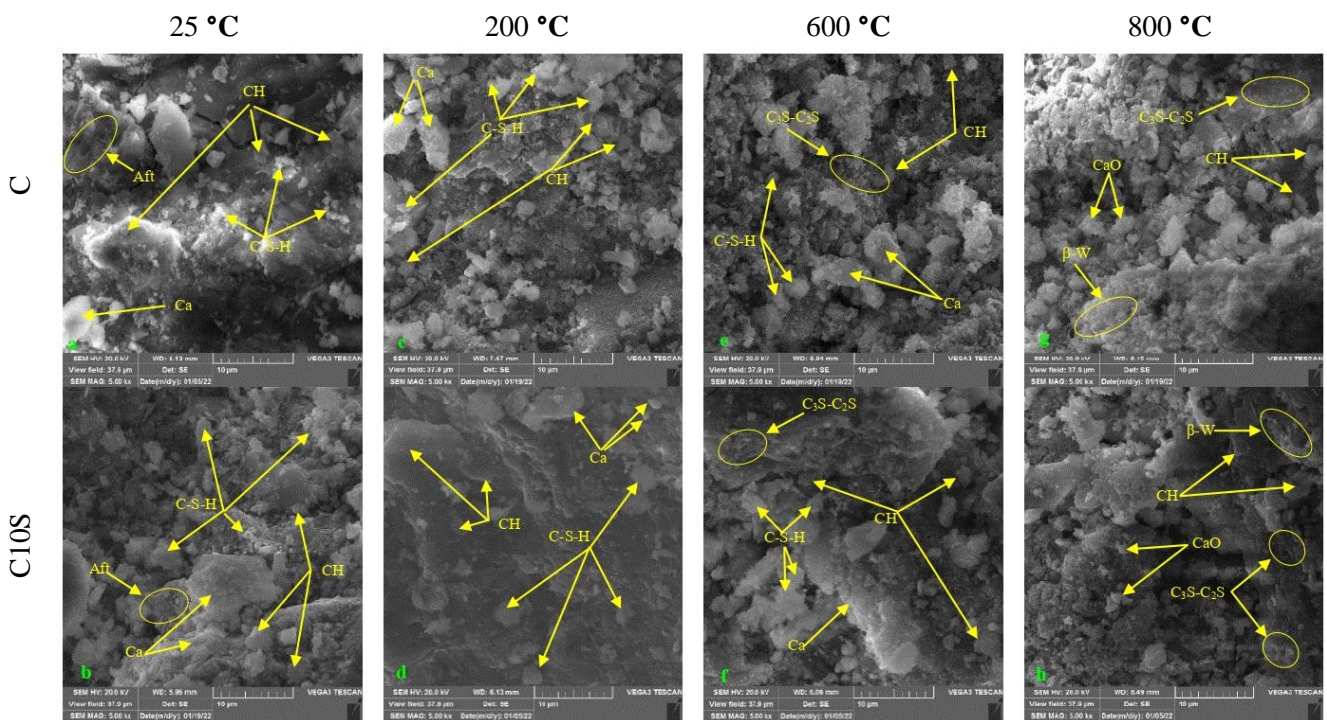
<sup>۲</sup> High Quartz Or  $\beta$ -Quartz

<sup>۱</sup> Low Quartz Or  $\alpha$ -Quartz

نشان‌دهنده بافت منسجم‌تر آزمون‌های حاوی ۱۰٪ نسبت به آزمون‌های فاقد نانوسیلیس است. بافت ملات با افزایش دما دچار تخریب شده است. ماتریس ملات از فشرده به متخلخل تبدیل شده است. در حقیقت فضای بین ماتریس ملات به تدریج افزایش و انسجام بافت ملات کاهش یافته است. در شکل (۳-۳) و (۳-۴) به ترتیب آزمون‌های فاقد نانوسیلیس و آزمون‌های حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس تحت دمای ۶۰۰°C نشان داده شده است. هنگامی که دما به ۶۰۰°C افزایش می‌یابد، بیشتر محصولات فرایند هیدراتاسیون سیمان، تجزیه شده، اتصالات بین ذرات بسیار ضعیف شده و ساختار ملات به شدت تکه تکه و دارای منافذ شده است. بخش زیادی از نانوساختار سیمانی C-S-H با تبدیل به آلیت و بلیت تخریب و ساختار شبکه‌ای و منسجم آن نابود شده است. ساختار لایه‌ای منظم پرتلندیت اولیه کامل از بین رفته است و ساختار ضعیف پرتلندیت ثانویه مشاهده می‌شود.

ماتریس ملات ماسه-سیمان، عملکرد را بهبود می‌بخشد. مقاومت فشاری نانوساختار سیمانی C-S-H بیشتر از کریستال‌های CH است که یکی از دلایل افزایش مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی نانوسیلیس است [۳۹].

در شکل (۳-۳) و (۳-۴) به ترتیب آزمون‌های فاقد نانوسیلیس و آزمون‌های حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس تحت دمای ۲۰۰°C نشان داده شده است. در محدوده حرارتی ۲۵°C تا ۱۰۰°C آب مویرگی و آب جذبی تبخیر می‌شوند. اترینگایت نیز تجزیه شده است. کریستال‌های CH و نانوساختار C-S-H دست نخورده باقی مانده است. با تبخیر آب موجود در حفرات و پیوندهای شیمیایی نانوساختار C-S-H، همچنین مقدار زیادی از نانوساختار C-S-H قابل مشاهده است. ذرات سفیدرنگ کلسیت نیز در دمای ۲۰۰°C پایداری خود را همچنان حفظ کرده است. مقایسه شکل (۳-۳) و (۳-۴) همچنان



شکل (۳). تصاویر SEM از آزمون‌های ۹۰ روزه: (a) آزمون C در دمای محیط، (b) آزمون C10S در دمای محیط، (c) آزمون C تحت دمای ۲۰۰°C، (d) آزمون C10S تحت دمای ۲۰۰°C، (e) آزمون C تحت دمای ۶۰۰°C، (f) آزمون C10S تحت دمای ۶۰۰°C، (g) آزمون C تحت دمای ۸۰۰°C، (h) آزمون C10S تحت دمای ۸۰۰°C

و اندازه افزایش و اتصال ذرات کاهش یافته است. شکل (۳-۳) و (۳-۴) نشان می‌دهد آزمون‌های حاوی ۱۰٪ عملکرد بهتری در برابر حرارت از خود نشان داده است و افزودن نانوسیلیس باعث کاهش اثرات تخریبی ناشی از حرارت شده است.

کریستال‌های آلیت و بلیت که حاصل تجزیه پرتلندیت هستند باعث ایجاد ترک و منافذ در ماتریس ملات شده است. لایه‌ای منظم و کامل از بین رفته است [۳۴]. به دلیل تجزیه حرارتی محصولات هیدراتاسیون سیمان، ماتریس ملات دچار انبساط شده



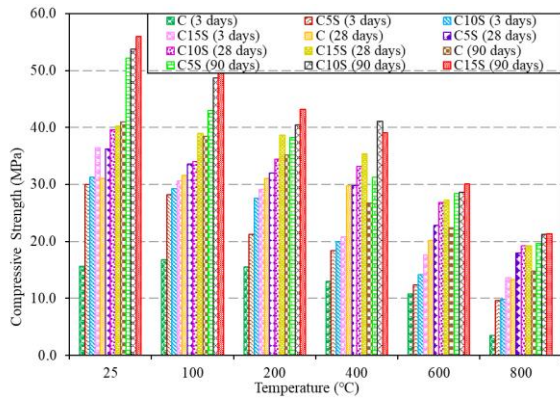
را افزایش دهند که باعث کاهش اندازه و مقدار کریستال‌های CH می‌شود [۳۸]. نانوساختار سیمانی C-S-H روی یکدیگر قرار گرفته و همپوشانی دارند و در نتیجه با افزایش چگالی ماتریس ملات ماسه-سیمان، خصوصیات مقاومتی ملات را بهبود می‌بخشند. مقاومت فشاری نانوساختار سیمانی C-S-H بیشتر از کریستال‌های CH است که یکی از دلایل افزایش مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی نانوسیلیس است. [۳۹].

با افزایش دما مقاومت فشاری ۹۰ روزه آزمون‌های حاوی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نانوسیلیس به ترتیب از ۴۱ MPa، ۵۲/۲ MPa، ۵۳/۸ MPa و ۵۶ MPa در دمای طبیعی به ۳۸/۵ MPa، ۴۳ MPa، ۴۸/۷ MPa و ۴۹/۶ MPa در دمای ۱۰۰ °C کاهش یافته است. روند مشابه برای مقاومت فشاری آزمون‌ها تحت درجه حرارت ۲۰۰ °C رخ داده است و با افزایش دما، افت مقاومت فشاری رخ داده است. با افزایش دما، مقاومت فشاری به دلیل کانال‌های ناشی از حذف آب مویرگی و دی‌هیدراتاسیون آب سطحی آزمون‌ها اندکی کاهش یافته است. شایان ذکر است در محدوده حرارتی ۱۰۰ °C تا ۲۰۰ °C همچنان عملکرد ملات ماسه-سیمان قابل قبول است. با افزایش دما به ۴۰۰ °C مقاومت فشاری آزمون‌ها با نرخ شدیدی کاهش یافته است بطوریکه مقاومت فشاری ۹۰ روزه آزمون‌های ملات ماسه-سیمان حاوی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نانوسیلیس به ترتیب با ۳۵٪، ۴۰٪، ۲۴٪ و ۳۰٪ افت به ۲۶/۷ MPa، ۳۱/۳ MPa، ۴۱/۱ MPa و ۳۹/۱ MPa رسیده است. پرتلندیت اولیه در دمای ۴۰۰ °C الی ۵۵۰ °C تخریب و مطابق رابطه (۲) به آب و آهک زنده تبدیل شده است. از طرفی دی‌هیدراتاسیون C-S-H از دمای ۲۰۰ °C آغاز و در دمای ۴۰۰ °C با نرخ شدیدتری رخ می‌دهد، بنابراین بخش زیادی از نانوساختار C-S-H به دلیل افزایش بی‌نظمی‌ها و کم‌آبی در دمای ۴۰۰ °C تخریب شده است. تخریب پرتلندیت اولیه و نانوساختارهای سیمانی از جمله C-S-H، باعث افت شدید مقاومت در درجه حرارت‌های بالا (۴۰۰ °C تا ۸۰۰ °C) شده است [۴۰]. مطابق تصاویر SEM نیز در دمای ۴۰۰ °C فضای بین ماتریس ملات افزایش و انسجام بافت ملات و مقاومت فشاری آزمون‌ها کاهش یافته است. شایان ذکر است مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی نانوسیلیس در درجه حرارت ۴۰۰ °C بیشتر از آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس است. نانوسیلیس با ایجاد بافتی منسجم و افزایش چگالی ماتریس ملات ماسه-سیمان منجر به کاهش اثرات

در شکل (۳-g) و (۳-h) به ترتیب آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس و آزمون‌ها حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس تحت دمای ۸۰۰ °C نشان داده شده‌است. همانطور که در هر دو شکل دیده می‌شود، ساختار منظم پرتلندیت اولیه و نانوساختار سیمانی C-S-H به طور کامل تخریب شده است. با تخریب پرتلندیت اولیه، ذرات CaO مشاهده می‌شود (مطابق رابطه ۲). همچنین ساختار نامنظم و ضعیف پرتلندیت ثانویه مشاهده می‌شود. در دمای ۸۰۰ °C فاز غالب آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس و آزمون‌ها حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس سیلیکات‌های کلسیمی آلایت و بلیت (حاصل از تخریب C-S-H و پرتلندیت اولیه) و ساختار میله‌ای شکل بتاولاستونیت حاصل از تجزیه C-S-H است [۱۳، ۳۴]. ماتریس ملات تحت تأثیر دمای زیاد به ساختار شیشه‌ای تغییر نموده است و با تشکیل ساختارهای جدید، تخلخل نیز افزایش یافته است. از طرفی در محدوده دمای ۶۰۰ °C تا ۸۰۰ °C کلسیت موجود در ملات مطابق رابطه (۳) با آزادسازی گاز CO<sub>2</sub> به اکسید کلسیم تبدیل شده که این فرایند منجر به تخلخل بیشتر آزمون‌ها و افزایش ترک در ماتریس ملات شده است [۳۱]. تخلخل ایجاد شده به دلیل تخریب کامل C-S-H و پرتلندیت اولیه و تجزیه کلسیت موجود در ملات، منجر به گسترش ترک‌ها و تخریب ناحیه انتقال سطحی میان سنگ‌دانه و خمیر سیمان و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری آزمون‌ها شده است. در تمامی تصاویر SEM مشاهده شد که افزودن نانوسیلیس باعث انسجام بیشتر ماتریس ملات شده است و اثرات مخرب حرارت را کاهش داده است.

### ۳-۳- تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌ها در معرض حرارت

شکل (۴) نمودار مقاومت فشاری آزمون‌های ملات ماسه-سیمان حاوی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نانوسیلیس تحت دمای ۲۵ °C تا ۸۰۰ °C طی دوره عمل‌آوری ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ۳ روزه آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس ۱۵/۶ MPa است و با افزودن ۵٪ با ۹۲٪ افزایش به ۳۰ MPa رسیده است. مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها با افزایش درصد نانوسیلیس و سن آزمون‌ها افزایش یافته است به گونه‌ای که بیشترین مقاومت متعلق به آزمون‌ها حاوی ۱۵٪ نانوسیلیس و برابر با ۵۶ MPa است. ذرات نانوسیلیس می‌توانند با تسریع فرایند هیدراتاسیون سیمان، در واکنش با کریستال‌های پرتلندیت (CH) تولید نانوساختار سیمانی C-S-H



شکل ۴- منحنی تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌ها در معرض حرارت

#### ۳-۴- تغییرات وزنی آزمون‌ها در معرض حرارت

شکل (۵) افت وزنی آزمون‌های شاهد و آزمون‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس را تحت دماهای مختلف نشان می‌دهد. افت وزنی تمام آزمون‌ها در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  برابر صفر است. با شروع فرایند حرارتی و تبخیر آب فیزیکی و سطحی آزمون‌ها روند افت وزن آغاز می‌شود. در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  آزمون‌ها ملات ماسه-سیمان معمولی دارای کمترین افت وزن و آزمون‌ها حاوی ۵٪ نانوسیلیس دارای بیشترین افت وزن است. افت وزنی این آزمون‌ها به ترتیب ۱/۵٪ و ۲/۹٪ است. به‌طور کلی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  آب آزاد و آب حفره‌ای از بتن خارج می‌شود و در این منحنی دمایی این پدیده عامل افت وزن است [۴۲]. علاوه بر تبخیر آب آزاد و آب حفره‌ای که در محدوده حرارتی  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  رخ می‌دهد، تبخیر محدود آب بین پیوند ساختارهایی همچون C-S-H و اترینگایت در بازه دمایی  $60^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$  نیز بر افت وزنی تأثیرگذار است [۴۳].

با افزایش دما تا  $200^{\circ}\text{C}$  میزان افت وزنی آزمون‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانوسیلیس به ترتیب ۱/۷٪، ۳/۴٪، ۲/۸٪ و ۳/۹٪ است. در دماهای کمتر از  $200^{\circ}\text{C}$  به دلیل از دست رفتن رطوبت سطحی افت وزن رخ می‌دهد. در محدوده حرارتی  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $105^{\circ}\text{C}$  نیز اترینگایت دچار تخریب شده و عامل دیگر افت وزنی آزمون‌ها است [۴۳]. در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  افت وزن‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانوسیلیس به ترتیب ۲/۹٪، ۲/۴٪ و ۱/۹٪ است. در محدوده حرارتی  $100^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  نانوساختار C-S-H دچار دی‌هیدراتاسیون شده و در نتیجه افت وزنی آزمون‌ها افزایش یافته است [۱۳].

با افزایش دما به  $400^{\circ}\text{C}$  افت وزنی آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس ۴/۷٪

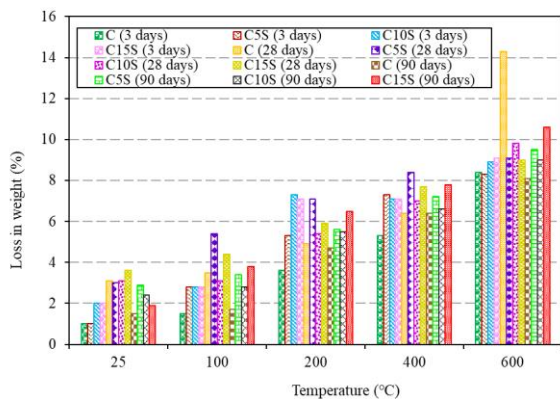
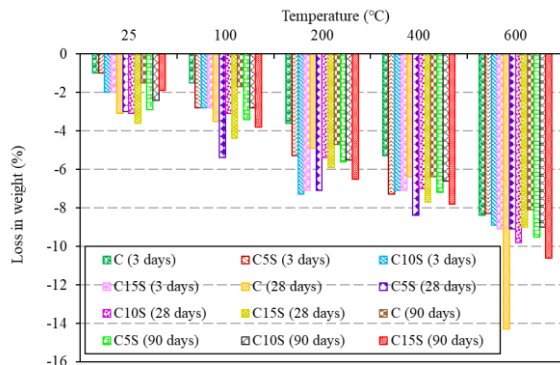
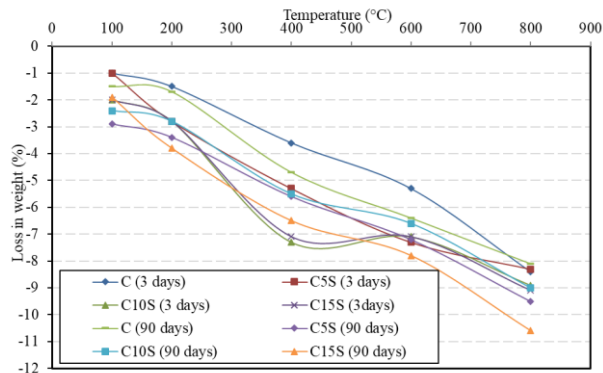
تخریبی حرارت شده است [۷].

با افزایش دما به  $600^{\circ}\text{C}$  بیشتر محصولات فرایند هیدراتاسیون سیمان تجزیه شده، اتصالات بین ذرات بسیار ضعیف شده و مطابق تصاویر SEM ساختار ملات به شدت تکه تکه و دارای منافذ شده است. و مطابق نتایج XRD، بخش زیادی از نانوساختار C-S-H با تبدیل به آلپت و بلیت تخریب و ساختار منسجم آن از بین رفته است. تخریب پرتلندیت اولیه و تشکیل پرتلندیت ثانویه که ساختاری ضعیف دارد، موجب افت مقاومت فشاری شده است [۳۴].

با افزایش درجه حرارت، روند افت مقاومت فشاری آزمون‌ها دلیل تجزیه CH و C-S-H، انبساط سنگ‌دانه‌ها، افزایش تنش در ماتریس ملات و ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) و در نتیجه رشد ترک‌ها ادامه یافته است. کمترین میزان مقاومت فشاری آزمون‌ها در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  مشاهده شده است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه آزمون‌های فاقد نانوسیلیس و حاوی ۱۰٪ به ترتیب  $14/8\text{ MPa}$  و  $21/3\text{ MPa}$  است که نسبت به دمای طبیعی ۶۵٪ و ۶۰٪ کاهش یافته است. علاوه بر تخریب نانوساختارهای سیمانی، تجزیه کلسیت در محدوده حرارتی  $600^{\circ}\text{C}$  تا  $800^{\circ}\text{C}$  و در نتیجه خروج گاز  $\text{CO}_2$  منجر به افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری شده است [۴۱]. تغییر فاز آلفا کوارتز به بتا کوارتز همراه با تنش‌های کششی، رشد میکروترک‌ها و در نتیجه افزایش تخلخل در بافت ملات همراه است که در کاهش مقاومت فشاری نیز تأثیرگذار است [۳۷]. در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  نیز مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی نانوسیلیس بیشتر از آزمون‌ها فاقد نانوسیلیس است و نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوسیلیس در خصوصیات مقاومتی ملات ماسه-سیمان تحت درجه حرارت بالا است.

به‌طور خلاصه تقریباً در تمامی دماها ( $25^{\circ}\text{C}$  تا  $800^{\circ}\text{C}$ ) در آزمون‌های حاوی ۱۵٪ نانوسیلیس بیشترین مقدار مقاومت فشاری مشاهده شده است. نانوسیلیس با مصرف  $\text{Ca(OH)}_2$  و تبدیل آن به نانوساختار سیمانی C-S-H موجب استحکام و دوام بیشتر بتن در درجه حرارت‌های بالا می‌شود. به گونه‌ای که سبب رشد نانوساختارهای C-S-H طولانی و نازک با اشغال فضای کمتر در ماتریس بتن در درجه حرارت زیاد می‌شود که در نتیجه تراکم ریزساختار، کاهش میکرو ترک‌ها در زمان تنش‌های حرارتی را در پی دارد [۷، ۱۷].

تجزیه کربنات کلسیم (کلسیت) در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  آغاز و در دمایی حدود  $850^{\circ}\text{C}$  به صورت کامل تجزیه می‌شود. تجزیه کربنات کلسیم ( $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ) به علت حرارت، با آزادسازی گاز دی‌اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) به اکسید کلسیم یا آهک زنده ( $\text{CaO}$ ) تبدیل می‌شود (رابطه ۳) [۳۱]. خروج گاز  $\text{CO}_2$  منجر به افزایش تخلخل و رشد ترک‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌ها (شکل (۴)) شده است که در ادامه بررسی شده است.



شکل ۵- منحنی تغییرات وزنی آزمونه‌ها در معرض حرارت

به‌طور کلی مشاهده می‌شود افت وزنی آزمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد نانوسیلیس عملکرد بهتری تحت تأثیر حرارت نشان می‌دهند. عامل افت وزن آزمونه‌ها شامل تبخیر آب آزاد (دمای  $100^{\circ}\text{C}$ )، تخریب اترینگایت و حذف آب موجود در منافذ C-S-H (دمای

است که با افزودن ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نانوسیلیس مقادیر افت وزنی با اندکی افزایش به ۶/۵٪، ۵/۵٪ و ۶/۵٪ رسیده است. در دمای بالاتر از  $300^{\circ}\text{C}$  به تدریج فرایند تخریب نانو ساختار C-S-H رخ می‌دهد که علاوه بر افت وزنی، بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها نیز تأثیر گذار است. از طرفی دی‌هیدراته شدن بخشی از پرتلندیت در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  آغاز شده است و منجر به خروج آب و تشکیل آهک زنده و افت وزنی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  شده است که در نتایج الگوی پراش پرتو ایکس نیز مشاهده شد [۱۳، ۴۴]. عامل دیگر افت وزنی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  وقوع فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون است که در محدوده دمایی  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  رخ می‌دهد. دی‌هیدروکسیلاسیون به خروج یون هیدروکسید به شکل آب گفته می‌شود؛ که به تبع آن وزن آزمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین افت ناگهانی وزن معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی‌هیدروکسیلاسیون است. خروج آب شامل دو مرحله دی‌هیدراسیون (خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای) و دی‌هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسید از ساختار بتن) می‌شود [۲، ۴۵].

با افزایش دما تا  $600^{\circ}\text{C}$  افت وزن آزمونه‌ها به علت شروع تجزیه آب از نانو ساختارهای C-S-H و C-A-S-H شدت بیشتری گرفته است. افت وزنی آزمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانوسیلیس به ترتیب ۶/۴۲٪، ۷/۲٪، ۶/۶٪ و ۷/۸٪ است. بر اساس نتایج حاصل، افت وزنی در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  شدت یافته است. پرتلندیت (C-H) در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  کاملاً دی‌هیدراته و تخریب شده و با خروج آب به آهک زنده ( $\text{CaO}$ ) تبدیل می‌شود (رابطه ۲). مجموعه‌ی عوامل یاد شده، باعث افت وزنی آزمونه‌ها در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  شده است [۳۰]. این افت وزن نیز منجر به انقباض و زیاد آزمونه‌ها و در نهایت ایجاد میکرو ترک‌ها در ساختار ملات و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری می‌شود. شایان ذکر است نتایج حاصل از افت وزنی با تصاویر SEM، الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و تغییرات مقاومت فشاری (شکل (۴)) هم‌خوانی دارد.

در نهایت افت وزن آزمونه‌ها در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به دلیل تجزیه کربنات کلسیم و در نتیجه خروج گاز  $\text{CO}_2$  به بیشینه مقدار خود رسیده است. افت وزنی آزمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانوسیلیس به ترتیب ۸/۱٪، ۹/۵٪، ۹٪ و ۱۰/۶٪ است. اساس مطالعات پژوهشگران، تصاویر SEM و همچنین نتایج XRD

دینای استاندارد ASTM C642 انجام شده است. جدول (۴) نشان دهنده نتایج حاصل از تست جذب آب بر روی تمامی آزمون‌ها در طی زمان است. میزان جذب آب توسط آزمون‌ها با افزودن نانوسیلیس کاهش می‌یابد که این کاهش در آزمون‌های حاوی ۵٪ به بیشترین میزان خود می‌رسد. بر اساس تصاویر SEM و نتایج مقاومت فشاری دلیل اصلی این امر عملکرد فیلری نانوسیلیس است که با پر کردن خلل و فرج موجود در ماتریس ملات میزان جذب آب را کاهش می‌دهد [۱۸].

جدول (۴)، نشان دهنده میزان تأثیر نانوسیلیس بر جذب آب آزمون‌ها در طی زمان است. در طی زمان مقدار جذب آب آزمون‌ها نیز افزایش می‌یابد. با این حال نرخ این افزایش در آزمون‌های حاوی نانوسیلیس پایین تر از آزمون‌ها شاهد است.

جدول ۴- جذب آب ۲۸ روزه کلیه طرح‌ها

Water absorption (72 hours)	Water absorption (48 hours)	Water absorption (24 hours)	Water absorption (30 minutes)	Mixture
5.37%	5.33%	5.27%	4.51%	C
4.08%	4.04%	3.97%	3.15%	C5SF
4.99%	4.94%	4.86%	4.06%	C10SF
4.96%	4.89%	4.82%	4.16%	C15SF

مقاومت فشاری آزمون‌ها افزایش یافته و از ۴۱ MPa در آزمون‌ها ۹۰ روزه فاقد نانوسیلیس به ۵۶ MPa در آزمون‌ها حاوی ۱۵٪ رسیده است.

✓ ذرات نانوسیلیس از طریق واکنش مداوم با کریستال‌های CH، سبب تولید و گسترش C-S-H می‌شوند که این امر به بهبود سرعت هیدراتاسیون سیمان و محتوای نانوساختار C-S-H کمک می‌کند.

✓ افزودن نانوسیلیس به ملات سبب افزایش پایداری حرارتی بتن و کاهش افت حرارتی آزمون‌ها می‌شود که دلیل اصلی آن نیاز به دمای بیشتر جهت تجزیه نانوکامپوزیت‌های تشکیل شده در ماتریس ملات است.

✓ افت قابل توجه مقاومت فشاری برای تمامی آزمون‌ها، در دماهای ۴۰۰ °C - ۸۰۰ °C اتفاق افتاده است. تخریب CH و C-S-H و تجزیه کربنات‌ها از عوامل مهم افت مقاومت در دماهای بالاتر از ۶۰۰ °C است.

۲۰۰ °C)، فرایند دی هیدراتاسیون C-S-H و دی هیدروکسیلاسیون (دمای ۴۰۰ °C - ۶۰۰ °C)، تخریب کامل پرتلندیت و C-S-H و تبدیل به سیلیکات‌های کلسیمی (دمای ۶۰۰ °C)، تجزیه کربنات کلسیم همراه با خروج CO<sub>2</sub> و تشکیل اکسید کلسیم (دمای ۸۰۰ °C) است [۴۶].

### ۳-۵- تغییرات جذب آب آزمون‌ها

جذب آب یکی از مشخصات بتن است که بیانگر خصوصیات ریزساختار آن از لحاظ خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها باهم است. اکثر واکنش‌های مخربی که در بتن به مرور زمان اتفاق می‌افتد، به علت نفوذ آب است و همواره آب یک عامل آغازکننده یا تسریع‌کننده واکنش‌های مخرب در بتن بوده است. در این تحقیق آزمون تعیین درصد جذب آب بر روی آزمون‌های ۲۸ روزه بر

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مهندسی ملات ماسه-سیمان در معرض حرارت، از منظر ریزساختاری مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مهم آن به شرح ذیل است.

✓ با اعمال رژیم‌های حرارتی تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مهندسی ملات تابعی از تغییر درجه حرارت آزمون‌ها است. در محدوده حرارتی ۲۰۰ °C تغییرات جزئی در رفتار ملات ماسه-سیمان، به دلیل حذف آب فیزیکی و فرایند دی هیدراتاسیون است. عمده تغییرات در دمای ۴۰۰ °C تا ۸۰۰ °C رخ می‌دهد.

✓ با افزایش دما، افت وزنی شدت یافته است به نحوی که در دمای ۸۰۰ °C با تخریب کامل محصولات حاصل از فرایند هیدراتاسیون سیمان (CH و C-S-H) و خروج گاز CO<sub>2</sub> بیشترین افت وزنی رخ داده است. آزمون‌های حاوی ۵٪ و ۱۰٪ نانوسیلیس عملکرد بهتری تحت تأثیر حرارت نشان می‌دهند.

✓ با افزایش سن عمل‌آوری و درصد وزنی نانوسیلیس مقدار

Experimental and analytical study of hybrid fiber reinforced concrete prepared with basalt fiber under high temperature, *Fire and Materials* 46(1) (2022) 205-226.

[6] M. Tantawy, Effect of high temperatures on the microstructure of cement paste, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 5(11) (2017) 33.

[7] H.M. Elkady, A.M. Yasien, M.S. Elfeky, M.E. Serag, Assessment of mechanical strength of nano silica concrete (NSC) subjected to elevated temperatures, *Journal of Structural Fire Engineering* (2019).

[8] M. Amiri, M. Aryanpoor, The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H), *Concrete Research Quarterly Journal of Guilan University of Iran* 12(4) (2019) 69-80.

[9] Y. Wang, H. Lu, J. Wang, H. He, Effects of Highly Crystallized Nano CSH Particles on Performances of Portland Cement Paste and Its Mechanism, *Crystals* 10(9) (2020) 816.

[10] M. Amiri, M. Sanjari, F. Porhonor, Microstructural Evaluation of the Cement Stabilization of Hematite-Rich Red Soil, *Case Studies in Construction Materials* (2022).

[11] M. Amiri, K. Arzaniyan karamallah, M. Aryanpoor, Efficacy of Elevated Temperatures on Mechanical Properties of Concrete Containing Aluminum Slag from the Microstructural Perspective, *Concrete Research Quarterly Journal University of Guilan (Iran)*. 13(3) (2020) 19-32.

[12] M. Amiri, A. Vatanpour Aghjeh Mashhad, M. Aryanpour, S. Ghasemi, Studying the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Steel Slang exposed to High Temperature, *Concrete Research Quarterly Journal of Guilan University of Iran* 14(1) (2021) 21-35.

[13] M.J. DeJong, F.-J. Ulm, The nanogranular behavior of CSH at elevated temperatures (up to 700 C), *Cement and Concrete Research* 37(1) (2007) 1-12.

[14] B. Fernandes, A.M. Gil, F. Bolina, B.F. Tutikian, Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 10 (2017) 838-863.

[15] J. Huang, Y. Zhou, X. Yang, Y. Dong, M. Jin, J. Liu, A Multi-scale Study of Enhancing Mechanical Property in Ultra-High Performance Concrete by Steel-fiber and Nano-silica, *Construction and Building Materials* 342 (2022) 128069.

[16] S. Bakhtiyari, A. Allahverdi, M. Rais-

افت مقاومت در بازه دمایی  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  برای طرح‌های حاوی نانوسیلیس، به دلیل خاصیت پوزولانی نانوسیلیس و واکنش با CH و در نتیجه افزایش C-S-H در آزمون‌ها، کمتر است. به نحوی که مقاومت ۹۰ روزه آزمون فاکد نانوسیلیس و آزمون حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس به ترتیب  $14/8\text{ MPa}$  و  $21/3\text{ MPa}$  است.

✓ میزان جذب آب توسط آزمون‌ها با افزودن نانوسیلیس کاهش می‌یابد که این کاهش در آزمون‌های حاوی ۵٪ به بیشترین میزان خود می‌رسد. دلیل اصلی این امر عملکرد فیلری نانوسیلیس است. ✓ تغییر فاز آلفا کوارتز به بتا کوارتز در اثر حرارت منجر به تغییر خصوصیات مهندسی ملات از جمله افزایش تخلخل و جذب آب در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  شده است.

✓ بر اساس تصاویر SEM، افزودن نانوسیلیس باعث انسجام بیشتر ماتریس ملات شده است و اثرات مخرب حرارت را کاهش داده است.

✓ بررسی SEM آزمون‌های حرارت دیده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و  $800^{\circ}\text{C}$  نشان‌دهنده تشکیل پرتلندیت ثانویه است. پرتلندیت ثانویه به دلیل واکنش آب (حاصل از دی‌هیدراته و تخریب شدن پرتلندیت اولیه) با CaO (حاصل از تجزیه کلسیت) تشکیل شده است. پرتلندیت ثانویه دارای ساختاری ضعیف است.

## ۵- مراجع

[1] M. Mansourghanaei, M. Biklaryan, A. Mardookhpour, Comparison of ultrasonic pulse passage velocity, in high-strength concrete and ordinary concrete, under high temperature based on XRD and SEM test, for use in pavement, *Journal of Transportation Research* (2020).

[2] M. Amiri, M. Aryanpour, F. Porhonor, Microstructural study of concrete performance after exposure to elevated temperatures via considering C-S-H nanostructure changes, *High Temperature Materials and Processes* 41(1) (2022) 224-237.

[3] g. Pachideh, m. Gholhaki, Investigating the Post-Heat Behavior of Self-Compacting Light Aggregate Concrete Containing Spring and Fiber, *Concrete Research Quarterly Journal of Guilan University of Iran* 12(2) (2019) 5-18.

[4] R. Siddique, D. Kaur, Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures, *Journal of Advanced Research* 3(1) (2012) 45-51.

[5] M. Khan, M. Cao, X. Chaopeng, M. Ali,

- [29] H. Sabeur, G. Platret, J. Vincent, Composition and microstructural changes in an aged cement pastes upon two heating-cooling regimes, as studied by thermal analysis and X-ray diffraction, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 126(3) (2016) 1023-1043.
- [30] L. Bodnarova, J. Valek, L. Sitek, J. Foldyna, Effect of high temperatures on cement composite materials in concrete structures, *Acta geodynamica et geomaterialia* 10(2) (2013) 173-180.
- [31] C. Rodriguez-Navarro, E. Ruiz-Agudo, A. Luque, A.B. Rodriguez-Navarro, M. Ortega-Huertas, Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals, *American Mineralogist* 94(4) (2009) 578-593.
- [32] G.-F. Peng, Z.-S. Huang, Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures, *Construction and building materials* 22(4) (2008) 593-599.
- [33] M. Heikal, Effect of temperature on the structure and strength properties of cement pastes containing fly ash alone or in combination with limestone, *Ceramics Silikaty* 50(3) (2006) 167.
- [34] E.T. Rodriguez, K. Garbev, D. Merz, L. Black, I.G. Richardson, Thermal stability of CSH phases and applicability of Richardson and Groves' and Richardson C-(A)-SH (I) models to synthetic CSH, *Cement and Concrete research* 93 (2017) 45-56.
- [35] E. Ringdalen, Changes in quartz during heating and the possible effects on Si production, *Jom* 67(2). 484-492 (2015).
- [36] I. Štubňa, T. Húlan, T. Kaljuvee, L. Vozár, Investigation of dynamic mechanical properties of Estonian clay Arumetsa during firing, *Applied Clay Science* 153 (2018) 23-28.
- [37] W. Pabst, E. Gregorová, Elastic properties of silica polymorphs—a review, *Ceramics-Silikaty* 57(3) (2013) 167-184.
- [38] A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini, Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete, *Construction and Building Materials* 113 (2016) 188-201.
- [39] B.B. Mukharjee, S.V. Barai, Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 55 (2014) 29-37.
- [40] A. Sadrumontazi, S.H. Gashti, B. Tahmouresi, Residual strength and microstructure of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures, *Construction and Building Materials* 230 (2020) 116969.
- [41] M. Amiri, M. Aryanpour, The effect of high Ghasemi, B. Zarrabi, T. Parhizkar, Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste, *Thermochimica acta* 514(1-2) (2011) 74-81.
- [17] G. Anto, K. Athira, N.A. Nair, T.Y. Sai, A.L. Yadav, V. Sairam, Mechanical properties and durability of ternary blended cement paste containing rice husk ash and nano silica, *Construction and Building Materials* 342 (2022) 127732.
- [18] P. Abhilash, D.K. Nayak, B. Sangoju, R. Kumar, V. Kumar, Effect of nano-silica in concrete; a review, *Construction and Building Materials* 278 (2021) 122347.
- [19] M. Alhawat, A. Ashour, A. El-Khoja, Influence of using different surface areas of nano silica on concrete properties, *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2019, p. 020007.
- [20] H. Du, S. Du, X. Liu, Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials* 82 (2015) 114-122.
- [21] M. Bastami, M. Baghbadrani, F. Aslani, Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures, *Construction and building materials* 68 (2014) 402-408.
- [22] C.K. Mahapatra, S.V. Barai, Temperature impact on residual properties of self-compacting based hybrid fiber reinforced concrete with fly ash and colloidal nano silica, *Construction and Building Materials* 198 (2019) 120-132.
- [23] H. Liu, Q. Li, S. Ni, L. Wang, G. Yue, Y. Guo, Effect of nano-silica dispersed at different temperatures on the properties of cement-based materials, *Journal of Building Engineering* 46 (2022) 10.3750.
- [24] ASTM, American Society for Testing and Materials, 1984.
- [25] M. Bustillo Revuelta, *Mortars*, Construction Materials, Springer 2021, pp. 307-337.
- [26] D. Moore, R. Reynolds Jr, *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, 2nd edn Oxford University Press, New York, NY (1997).
- [27] V. R. Ouhadi, R. Yong, Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis, *Elsevier Appl. Clay Sci. J* 23(1-4) (2003) 141-148.
- [28] H.M. Jennings, Refinements to colloid model of CSH in cement: CM-II, *Cement and Concrete Research* 38(3) (2008) 275-289.

temperatures on concrete performance with a view to the changes in the C-S-H nanostructure, Concrete Research article in press (2020).

[42] O. Babalola, P.O. Awoyera, D.-H. Le, L.B. Romero, A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite, Construction and Building Materials 296 (2021) 123448.

[43] M. Aly, M. Hashmi, A. Olabi, M. Messeiry, E. Abadir, A. Hussain, Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar, Materials & Design 33 (2012) 127-135.

[44] A.M. Said, M.S. Zeidan, M. Bassuoni, Y. Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica, Construction and building materials 36 (2012) 838-844.

[45] M. Amiri, B. Kalantari, M. Dehghani, F. Porhonar ,M. Papi, R. Salehian, S. Taheri, Microstructural Investigation of Changes in Engineering Properties of Heated Lime-Stabilized Marl Soil, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement (2021) 1-29.

[46] V. Swathi, S. Asadi, An influence of pozzolanic materials with hybrid fibers on structural performance of concrete: A review, Materials Today: Proceedings 43 (2021) 1956-1959.

## Examining the Effects of Using Nano-silica on the Mechanical Properties of Sand-cement Mortar Under the Effects of Heat, Considering Cementitious Nanostructure Changes

M. Nasehi Geshooieh

Ph.D. Candidate of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran.

M. Amiri \*

Associate professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

M. Malekinejad

Associate professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

### Abstract

High temperatures are the most important factors that cause physical degradation and affect the durability of concrete structures. Cement-based material performance highly depends on solid nanoparticle properties or nanometer porosities in the internal transfer area between the cement and aggregate particles, as heat can affect the properties of these particles and the bonding between them. Accordingly, the present research investigates the effects of nano-silica on strength parameters of sand-cement mortar at high temperatures. For this, sand cement mortar replacing 5, 10 and 15 wt% of cement with nano-silica was prepared. The mortar, having been processed at 3, 28 and 90-day ages, was subjected to 25, 100, 200, 400, 600 and 800 °C, respectively. Effects of high-temperature rates on the physical and mechanical properties of the sand-cement mortar were examined by macrostructural experiments of compressive strength, weight loss and water uptake, as well as microstructural experiments using XRD and SEM. The research found that the macrostructural behavior of sand-cement mortar was highly dependent on microstructures and nanostructure cementitious changes when subjected to heat. At 600 °C, the initial portlandite was fully degraded, which caused the CaO to form as water exited. At 800 °C, in addition to alite ( $C_3S$ ) and Belite ( $C_2S$ ),  $\beta$ -Wollastonite was formed from the degradation of the C-S-H nanostructure. The addition of nano-silica improved the strength properties of the sand cement mortar against heat, with the compressive strength of the 28-day samples without nano-silica experiencing a 57% weight loss as the temperature rose to 800 °C, decreasing from 31.1 MPa to 13.3 MPa. On the other hand, the compressive strength of the sand cement mortar samples containing 15% nano-silica experienced lesser strength loss (52%) at 800 °C, decreasing from 40.2 MPa to 19.2 MPa.

**Keywords:** Sand Cement Mortar, High-temperature Concrete, Cementitious Nanostructures, Nano-silica, Compressive Strength.

---

\* Corresponding Author: amirii@hormozgan.ac.ir