

تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر خواص مکانیکی بتن حاوی سرباره آلومینیوم از منظر ریزساختاری

محمد امیری *

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

جهان‌بخش ارزانیان کرم‌اله

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

مرضیه آریانیپور

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

چکیده

سازه‌های بتنی در درجه حرارت‌های زیاد دچار تغییر رفتار و ناپایداری می‌شوند. این تغییر رفتار و ناپایداری در اکثر موارد وابسته به تغییرات نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) از مهم‌ترین بخش‌های فرآیند هیدراتاسیون خمیر سیمان است که در تعیین خواص مقاومتی و مکانیکی بتن نقش اساسی دارند. افزودن سرباره آلومینیوم، به‌عنوان شاخه‌ای از مصالح پوزولانی به ترکیبات سیمانی می‌تواند منجر به بهبود رفتار بتن در درجه حرارت‌های زیاد شود. بر این اساس هدف این مقاله بررسی تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر بتن حاوی درصد‌های مختلف سرباره آلومینیوم از منظر ریزساختاری است. در این راستا نمونه‌های مکعبی حاوی درصد‌های مختلف پودر سرباره آلومینیوم تهیه شده است. آزمون‌ها به مدت ۲۸ روز در حمام رطوبت عمل‌آوری شده سپس به مدت ۶۰ دقیقه تحت دماهای ۲۵ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. آزمایش‌های درصد تغییرات وزنی و مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن برای ارزیابی خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین برای مشاهده خصوصیات ریزساختاری آزمون‌ها در دماهای متفاوت از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) استفاده شد. بر اساس نتایج ساختار پرتلندیت در نمونه‌های حاوی کمتر از ۱۰٪ سرباره در طول فرآیند هیدراتاسیون برای تشکیل نانوساختارهای C-A-S-H و C-A-H، همچنین فعال شدن سرباره مصرف شده است و موجب بهبود مقاومت فشاری شده است. از سوی دیگر با افزایش دما و وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون آب درون پیوند نانوساختاری C-S-H تجزیه شده و در نهایت منجر به تغییر رفتار در مقاومت فشاری می‌شود و مقاومت فشاری آزمون‌ها حاوی ۱۰٪ پودر سرباره آلومینیوم تحت دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس با کاهش ۱۳٪ به ۲۰/۱ MPa رسیده است.

واژه‌های کلیدی: درجه حرارت زیاد، سرباره آلومینیوم، مقاومت فشاری، نانو ساختار C-S-H، SEM.

* نویسنده مسئول: amirri@chmail.ir

۱- مقدمه

C-S-H سهم اصلی در استحکام بتن را دارد. از این رو مقدار تولید بیشتر این فاز باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. این ساختار حدود ۷۵٪ از حجم مواد جامد خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده را تشکیل داده است [۷]. همچنین نسبت C/S و C/S+A نقش مهمی در شکل‌گیری نانو ساختار و مقاومت بتن ایفا می‌کند [۸]. از سوی دیگر دمای زیاد بر عملکرد نانو ساختارهای موجود در بتن تأثیر گذاشته است. نتایج تحقیقات بر روی بتن با سیمان پرتلند معمولی نشان داد که بتن معمولی به علت تغییرات گسترده فیزیکی و شیمیایی در دمای زیاد و تجزیه هیدروکسید رفتار پایداری از خود نشان نمی‌دهد و دچار کاهش مقاومت می‌شود. در دمای ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس آب از نانو ساختار C-S-H از بین می‌رود و این نانو ساختار با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس تجزیه و نابود می‌شود [۱].

آریوز^۳ [۹] مشاهده کرد نمونه‌ها تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس تغییر سطحی قابل توجهی ندارند. در دمای بیش از ۶۰۰ درجه سلسیوس، بتن ترک می‌خورد و تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس این ترک‌ها افزایش می‌یابد. در نهایت تحت دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، نمونه‌ها به طور کامل تجزیه شد و خواص اتصال خود را به علت ترک خوردگی از دست می‌دهد.

ما^۴ و همکاران با بررسی تأثیر حرارت‌های زیاد بر ملات‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سرباره مس پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد و در دمای بیش از ۶۰۰ درجه سلسیوس به علت تجزیه ساختارهای پرتلندیت و اترینگایت همچنین نانو ساختار C-S-H مقاومت افت پیدا می‌کند [۱۰].

لی^۵ و همکاران به بررسی تأثیر دماهای زیاد بر بتن‌های با مقاومت بالا حاوی ۰ تا ۵۵٪ سرباره کوره‌های ذوب آهن پرداختند. نتایج نشان داد تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس ریزترک‌هایی بر سطح بتن ظاهر شده که با افزایش دما این ترک‌ها گسترش یافتند. طبق نتایج SEM ساختار هیدروکسید کلسیم و کربنات کلسیم به ترتیب در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس تجزیه شده است و تا دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس این تخریب ساختاری به علت دمای زیاد

یکی از موضوعاتی که مهندسان در صنعت ساخت به آن بسیار توجه دارند رفتار بتن در دماهای زیاد است. از سویی بازیافت و استفاده مجدد از زباله‌های صنعتی و فرآورده‌های جانبی در صنعت سیمان و تکنولوژی بتن از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. شدت تخریب در آتش، ناشی از میزان حرارت آزاد شده هنگام آتش‌سوزی است. بخشی از این حرارت در فضای آتش‌بخش شده و مابقی جذب مواد ساختمانی و اعضاء می‌گردد [۱]. در شرایط عادی، بیشتر سازه‌های بتنی در معرض بازه گسترده‌ای از دماهای مختلف که شدید یا خیلی شدید نیستند قرار دارند اما صنایع شیمیایی بزرگ، جداره‌های راکتورها و محیط‌های نیروگاه-های اتمی از جمله مواردی هستند که بتن در معرض درجه حرارت زیاد قرار می‌گیرد. این امر تأثیر منفی بر مقاومت و خصوصیات مکانیکی خمیر سیمان دارد [۲]. از این رو نیاز به اصلاح سیمان با جایگزین درصدی از پوزولان‌هایی طبیعی یا مصنوعی مانند دوده سیلیس، آلومینیوم، خاکستر پوسته برنج، سرباره مس، سرباره آهن و پودر شیشه به‌عنوان جایگزین قسمتی از سیمان مصرفی در بتن برای تأمین مقاومت لازم در برابر افزایش پایداری حرارتی نیز احساس می‌شود [۱-۴].

از سویی رفتار بتن در درجه حرارت زیاد بر پارامترهای مکانیکی و ریزساختاری به‌شدت تأثیر می‌گذارد و منجر به تغییرات فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای در بتن می‌شود [۳]؛ بنابراین خصوصیات بتنی که پس از آتش‌سوزی نگهداری می‌شود از نظر اندازه‌گیری ظرفیت باربری و بازسازی سازه اهمیت دارد [۴]. پس از تماس آب با فازهای C_2S و C_3S در ملات سیمانی، یون‌های کلسیم و سیلیکات آزاد می‌شود. پس از به‌اشباع رسیدن، نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم ($C-S-H^1$) با مقیاس‌های نانو تشکیل شده است [۵]. با گذشت زمان و افزایش سن عمل‌آوری آب آزاد بیشتری درون لایه‌ها نفوذ کرده و با C_3S واکنش می‌دهد. در نهایت منجر به تولید زیادتر ساختارهای C-S-H و پرتلندیت (CH^2) می‌شود [۶]. به‌طور کلی مقاومت فشاری با هیدراتاسیون مواد معدنی سیمان ارتباط نزدیکی دارد. نانو ساختار

⁴ Ma

⁵ Li

¹ Calcium Silicate Hydrate

² $Ca(OH)_2$

³ Arioz

آلومینیوم (Al_2O_3) به ترکیبات سیمانی به منظور تسریع به تشکیل نانو ساختار C-S-H و تقویت ناحیه انتقالی بتن استفاده می‌شود [۱۶].

مطالعات بسیاری در مورد بتن همراه با درصد‌های مختلف افزودنی صورت گرفته است. با این حال تأثیر درجه حرارت زیاد بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری بتن به همراه درصد‌های مختلف سرباره آلومینیوم به صورت جامع مطالعه و بررسی نشده است. بر این اساس هدف مقاله حاضر بررسی تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر ریزساختار و خواص مکانیکی بتن به همراه درصد‌های سرباره آلومینیوم با نگرش به تغییرات نانو ساختار C-S-H و C-A-S-H است.

۲- مواد و روش‌ها

بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این مقاله بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است [۱۷]. سنگ‌دانه‌های مصرفی به گونه‌ای انتخاب شد که دارای منحنی دانه‌بندی پیوسته‌ای است و رضایت‌بخش‌ترین نتایج را به همراه دارد. بدین منظور در این تحقیق حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌های مصرفی مطابق با استاندارد ASTM C33 [۱۷]، ۱۹ میلی‌متر و کوچک‌ترین سنگ‌دانه مصرفی نیز برابر با ۰/۱۵ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه در شکل (۱) ارائه شده است. سیمان مصرفی در این تحقیق نیز سیمان معمولی تیپ II است. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند با آزمایش XRF تعیین شد و در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین بر اساس استاندارد ASTM C188 مقدار چگالی سیمان مصرفی 3011 kg/m^3 است.

جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۰/۴۷ و ۱/۱۲ درصد است. همچنین آب مصرفی در ساخت بتن، آب شرب با $\text{pH}=7/43$ است. سرباره آلومینیوم مصرفی نیز از شرکت آلومینیوم ایران (ایرالکو) به صورت پودر خریداری شده است. آنالیز شیمیایی (XRF) سرباره آلومینیوم نیز در جدول (۱) آورده شده است. دانه‌بندی سرباره آلومینیوم مصرفی عبوری از الک نمره ۱۰۰ (۱۵۰ میکرومتر) است.

در طرح اختلاط‌های استفاده شده بتن نسبت‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره آلومینیوم جایگزین سیمان پرتلند شده است. همچنین طرح اختلاط بتن بر اساس آیین‌نامه ACI-211 با مقاومت

ادامه دارد. همچنین با افزایش درصد جایگزینی کوره آهن مقاومت فشاری تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در بتن با مقاومت بالا کاهش یافته است [۱۱].

بر اساس مطالعه پژوهشگران افزایش سرباره آلومینیوم تا ۱۵ درصد موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شده است. از مطالعه کلی می‌توان نتیجه گرفت که بتن که با سرباره آلومینیوم می‌تواند برای ساخت بلوک‌های سیمانی، آجرهای نسوز و برای کاربردهای عادی ساختمانی و عمرانی مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. بهمین و مستوفی نژاد به بررسی خواص مکانیکی بتن مسلح شده به الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچیپ) پرداختند. نتایج نشان داد مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه در تمامی سطوح الیاف بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی آن‌ها بیش از ۸ مگاپاسکال است. همچنین بیش‌ترین تنش گسیختگی مربوط به نمونه‌های مسلح شده با الیاف فولادی حدود ۲۳ مگاپاسکال بود [۱۳]. موسوی و داغی به بررسی اثر نانوتیوب کربنی و ایروژل سیلیس بر مقاومت فشاری، دوام و انتقال حرارت بتن پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب این دو ماده علاوه بر بهبود شرایط مقاومت و دوام باعث کاهش ضریب انتقال حرارت در بتن می‌شود [۱۴].

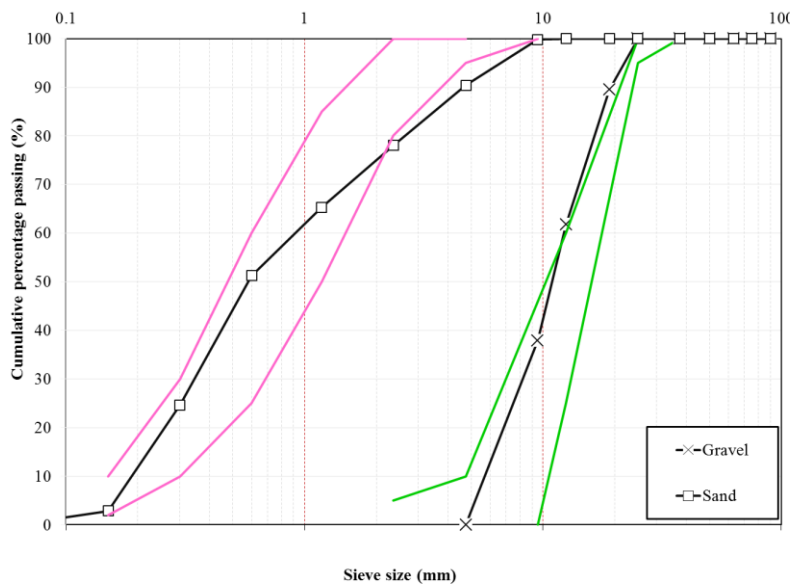
برنجیان و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر درجه حرارت زیاد بر خواص بتن خودمترکم حاوی افزودنی‌های پودری پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن ۲۰٪ متاکائولین و خاکستر بادی به جای پوزولان، سبب افزایش مقاومت فشاری در دمای محیط شده‌اند. همچنین افزایش دما از ۲۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. با افزایش دما مقاومت فشاری نمونه شاهد ۱۱٪ و نمونه‌های حاوی پوزولان ۸٪ افت دارد. در نمونه‌های حاوی پوزولان با افزایش دما کاهش سرعت امواج فراصوتی نسبت به نمونه شاهد کمتر است.

تحقیقات زیادی بر روی بتن معمولی با افزودن نانو ذرات صورت گرفته است. از نانو ذرات سیلیس (SiO_2) برای ارتقای واکنش هیدراتاسیون و تشکیل نانو ساختار C-S-H، به دلیل فعالیت زیاد آن در خمیر سیمان استفاده می‌شود. افزودن کربنات کلسیم ($CaCO_3$) به منظور افزایش واکنش هیدراتاسیون توسط محققان گزارش شده است. نانو ذرات رس نیز به منظور تقویت و سخت شدن ملات سیمان نیز استفاده می‌شود. در نهایت از نانو ذرات

فشاری ۲۵ مگاپاسکال و نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است طرح صفر درصد به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه‌های در جدول ۲ ارائه شده است. طبق استاندارد ASTM C192/192M-2 [۱۷] تعیین کارایی طبق استاندارد ASTM C143 میزان روانی و برای ساخت بتن ابتدا مصالح سنگی (درشت دانه و ریزدانه) به مدت ۱ دقیقه درون میکسر مخلوط می‌شود. سپس سیمان و سرباره گرفته شده است. شایان ذکر است طرح صفر درصد به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه‌های در جدول ۲ ارائه شده است. طبق استاندارد ASTM C192/192M-2 [۱۷] تعیین کارایی طبق استاندارد ASTM C143 میزان روانی و برای ساخت بتن ابتدا مصالح سنگی (درشت دانه و ریزدانه) به مدت ۲ دقیقه افزوده می‌شود. در نهایت آب به ترکیبات خشک اضافه شده است و عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. جهت

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ و سرباره آلومینیوم

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	L.O.I
Cement II	22.00	5.30	4.00	65.00	2.50	0.70	0.50	2.50	2.50
Aluminum Slag	2.1	89.9	<6	1.9	0.87	0.09	--	1.7	--



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح مصرفی (شن و ماسه)

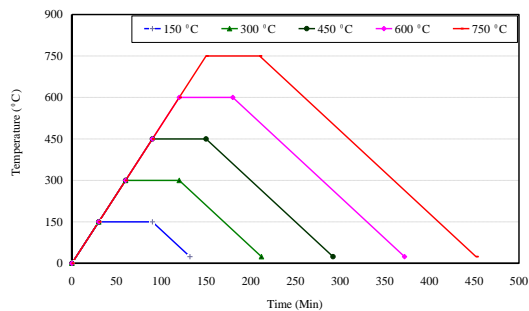
جدول ۲- طرح اختلاط بتن به همراه درصد‌های مختلف سرباره آلومینیوم

Mixture	Cement (kg/m ³)	Aluminum Slag (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
C-AI 0%	350	0			
C-AI 5%	332.2	17.5			
C-AI 10%	315	35	182	992	750
C-AI 15%	297.5	52.5			
C-AI 20%	280	70			

شکل ۲ نتایج اسلامپ (ASTM C 143) طرح‌های مختلف حاوی سرباره آلومینیوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است با افزایش درصد جایگزینی سیمان با سرباره آلومینیوم کارایی و اسلامپ بتن تازه کاهش می‌یابد. میزان اسلامپ طرح اختلاط‌ها به ترتیب ۷۸، ۷۶، ۷۲، ۶۷ و ۶۱ میلی‌متر است. افزودن ۵ درصد سرباره آلومینیوم تأثیر چندانی بر میزان اسلامپ ندارد و میزان اسلامپ طرح تنها دو میلی‌متر با طرح شاهد تفاوت دارد. با افزایش مقدار سرباره آلومینیوم در بتن به بیش از ۵ درصد، اختلاف بین اسلامپ‌ها نیز مشهودتر و شیب نزول آن بیشتر است. به طوری که میزان اسلامپ دو طرح حاوی ۱۵ و ۲۰

تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر خواص مکانیکی بتن ...

بعد از قرار گرفتن در حرارت) اندازه‌گیری شده است. برای تست مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از جک بتن شکن مدل Amsler ساخت کشور آلمان با نرخ بارگذاری ۲ کیلونیوتن بر ثانیه استفاده شده است. در نهایت پودر حاصل از نمونه‌های حرارت دیده برای آزمایش ریزساختاری (SEM) جمع‌آوری شدند. برای بررسی ریزساختاری از آزمایش‌های میزان ترک‌خوردگی و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.



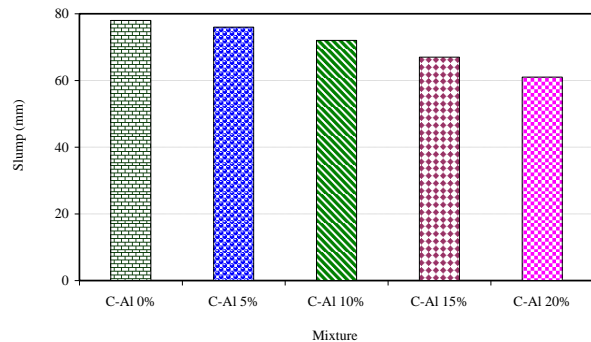
شکل ۳- نمودار حرارت-زمان کوره الکتریکی

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- آنالیز ریزساختار نمونه‌ها در معرض حرارت (SEM)

آزمون تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) بر روی دو گروه از نمونه‌های بتنی شامل بتن معمولی و بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم صورت گرفت. شکل (۴) نمونه‌های ۲۸ روزه بتنی را تحت دماهای ۲۵، ۱۵۰، ۴۵۰، و ۷۵۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. در این تصاویر حفره‌ها، ریزترک‌ها و ساختار مختلفی از جمله نانو ساختار هیدرات‌سیلیکات کلسیم (C-S-H)، پرتلندیت (CH) و اترینگایت^۱ (Aft)^۲ (C₆AS₃H₃₂) نیز مشاهده می‌شود. افزودن سرباره، ریزساختار بتن را به علت تغییرات شیمیایی و هیدراتاسیون بهبود می‌بخشد. از سویی ترکیب درصدی از سرباره با سیمان معمولی منجر به تشکیل یک سیستم پیچیده می‌شود. هیدراتاسیون سیمان پرتلند و واکنش پوزولانی به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد و ممکن است بر روی هم تأثیر بگذارد. عمده مقاومت بتن معمولی را نانو ساختار C-S-H تأمین می‌کند که با افزودن درصدی سرباره نانو ساختارهای دیگری مانند هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) نیز تولید می‌شود.

درصد سرباره آلومینیوم تقریباً ۶ میلی‌متر اختلاف دارند که کاهش اسلامپ بتن مشهودتر است. کاهش میزان کارایی و اسلامپ بتن‌های حاوی سرباره آلومینیوم عمدتاً به دلیل نرمی ذرات آن و جذب بیشتر آب بتن است.



شکل ۲- نتایج آزمایش اسلامپ طرح اختلاط‌ها حاوی سرباره آلومینیوم

مخلوط بتن بر اساس استاندارد ASTM C31 در ۳ لایه با ۲۵ ضربه (جهت تراکم) درون قالب مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ریخته می‌شود [۱۷]. پس از قالب‌گیری نمونه‌ها به مدت زمان ۲۸ روز جهت عمل‌آوری در حمام رطوبت قرار گرفتند. پس از گذشت زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در سنین مختلف برای انجام آزمایش از درون حوضچه آب خارج شدند. برای بررسی تأثیر حرارت مطابق با آیین‌نامه BS (-BS EN 196-8:2010) آزمایش بروی نمونه‌های ۲۸ روزه صورت گرفت. ابتدا نمونه‌ها در سن ۲۷ روزه از حوضچه آب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت جهت جلوگیری از شوک حرارتی تحت دمای زیاد در محیط آزمایشگاه خشک شدند. پس از خشک شدن هر نمونه به صورت جداگانه درون کوره الکتریکی تحت دمای ۲۵، ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰، و ۷۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه گذاشته شد. شایان‌ذکر است نمونه‌های دمای ۲۵ درجه سلسیوس درون کوره قرار نگرفتند. نرخ افزایش دمای کوره ۵ درجه بر دقیقه است. کوره الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق T-1120 از شرکت آزمون تست مینا است. شکل (۳) نمودار حرارت-زمان بر اساس نرخ افزایشی دمای کوره را نشان می‌دهد.

سپس آزمایش‌های افت وزنی (ASTM C1792-14) و مقاومت فشاری (BS 12390-3) بر روی نمونه‌ها انجام شده است. وزن نمونه‌ها توسط ترازو در دو مرحله (قبل از قرارگیری در حرارت و

² Aft: Hexacalcium Alumino Ferrite trisulphate

¹ Ettringite

معمولی را تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. با تبخیر آب آزاد یا فیزیکی از نمونه‌ها، ساختارهای C-S-H و پرتلندیت نیز نسبت به نمونه شاهد بیشتر و با اندازه بزرگ‌تر نیز مشاهده می‌شود. همچنین با حذف آب آزاد از نمونه‌ها ساختار اترینگایت و ترک‌ها نیز به صورت چشم‌گیری نسبت به نمونه شاهد (شکل ۴-الف) کاهش یافته است. مطابق پژوهش‌های صورت گرفته نشان داده شد که با افزایش زمان حرارت تا ۲ ساعت ساختار اترینگایت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس نیز حذف شده است [۱].

شکل ۴-ض) آزمون C-AI 10% تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. همانند بتن معمولی با افزایش دما آب از ساختار فیزیکی نمونه حذف شده است. به موجب حذف آب فیزیکی تمامی ساختارها رشد نموده‌اند. همچنین نانو ساختار سوزنی شکل اترینگایت نیز پس از حذف آب فیزیکی قابل‌رؤیت است.

بر اساس نتایج SEM با افزایش درصد سرباره آلومینیوم فاز منوسولفات و اترینگایت افزایش می‌یابد. این افزایش تا ۲۰٪ سرباره آلومینیوم قابل مشاهده است. علت افزایش اترینگایت و منوسولفات مربوط به توزیع یون آلومینیوم در فازها است [۲۲]. همچنین رفتار بتن بستگی به درصد جایگزین سرباره آلومینیوم دارد از این سو مقدار آلومینیوم در دسترس و تشکیل اترینگایت بر مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد (شکل ۵-د).

مقایسه تصاویر SEM (شکل ۴-ب و ۴-ض) آزمون‌ها تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس، نشان می‌دهد که ساختار اترینگایت در نمونه بتن حاوی بیش از ۱۰٪ سرباره آلومینیوم بیشتر است. همچنین وجود فراوان نانو ساختارهای C-S-H، C-A-S-H و C-A-H موجب پایداری حرارتی بیشتر بتن با سرباره می‌شود.

با افزایش دما به بیش ۳۰۰ درجه سلسیوس تغییرات شیمیایی و فیزیکی گسترده‌ای بر روی بتن معمولی و حاوی سرباره آلومینیوم (مطابق شکل ۴-ج و ۴-ه) صورت گرفته است.

در شکل ۴-ج) بتن معمولی تحت دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. به علت دمای زیاد آب از ساختار فیزیکی شروع به تجزیه می‌کند و فرآیند دی‌هیدراتاسیون رخ می‌دهد. همچنین این کمبود آب بر تغییر شکل ریزساختارهای موجود تأثیر گذاشته است. نانو ساختار C-S-H تحت دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس

شکل ۴-الف) ریزساختار نمونه بتن معمولی را تحت تأثیر دمای محیط نشان می‌دهد. در تصویر ۴-الف) نانو ساختارهای C-S-H (ساختار اسفنجی یا گل‌کلی)، ساختارهای هیدروکسید کلسیم (صفحه‌ای شکل یا ساختارهای شش‌ضلعی) و اترینگایت (سوزنی شکل) مشاهده می‌شود [۱۸]. همچنین در این تصویر حفره‌ها و ترک‌ها نیز قابل‌رؤیت است. از سویی نانو ساختارهای C-S-H که سهم اصلی مقاومت و استحکام بتن را در برابر خوردگی و درجه حرارت زیاد دارد، تحت دمای محیط این ساختار به وفور یافت می‌شود. با گذشت زمان و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون این ساختار رشد کرده و حفره‌ها و ترک‌ها را پر می‌کند. معمولاً در مراحل اولیه هیدراتاسیون سیمان پرتلند معمولی، سولفات موجود در سیمان با فاز آلومینات واکنش می‌دهد و اترینگایت تشکیل می‌شود که وجود این ساختارها سبب ضعف در مقاومت بتن می‌شود [۱۹].

شکل ۴-ر) بتن حاوی ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای محیط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن سرباره به سیمان موجب افزایش تشکیل نانو ساختارهای هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) و هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) می‌شود؛ که این ترکیبات می‌توانند سبب پایداری بیشتر بتن در درجه حرارت‌های زیاد شوند [۲۲].

ریزساختار C-S-H از پیوند کلسیم به زنجیره‌های چهاروجهی سیلیکاتی تشکیل شده است و از دو طرف به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین در نانو ساختار C-A-H آلومینیوم‌ها دارای پیوندهای چهاروجهی سیلیکاتی هستند [۲۰]. هنگامی که سرباره با سیمان معمولی ترکیب می‌شود، فاز پرتلندیت (CH) ایجاد شده در طول فرآیند هیدراتاسیون فعال می‌شود [۲۱]. در ابتدای فرآیند هیدراتاسیون فاز CH افزایش می‌یابد و سپس به دلیل مصرف CH به منظور فعال شدن سرباره، این فاز کاهش می‌یابد [۲۰].

طبق تصاویر SEM (۴-الف و ۴-ر)، مشاهده می‌شود که ساختار پرتلندیت در طول فرآیند هیدراتاسیون برای تشکیل نانو ساختارهای C-A-S-H و C-A-H، همچنین فعال شدن سرباره مصرف شده است؛ بنابراین ساختار پرتلندیت در نمونه‌های C-AI 10% بسیار کمتر از نمونه شاهد دیده می‌شود.

با شروع فرآیند حرارتی از دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس آب آزاد از نمونه‌ها تبخیر می‌شود. شکل ۴-ب) آزمون‌های بتن

شکل (۴-ه) نمونه 10% C-AI تحت دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. نانو ساختارهای C-S-H، C-A-S-H و C-A-H نیز به دلیل وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون تغییر شکل پیدا کرده‌اند اما همچنان این نانو ساختارها که موجب دوام و استحکام بتن در برابر حرارت است، پایدار باقی مانده است. از سویی پس از تجزیه ساختار پرتلندیت، ساختار کربنات کلسیم در نمونه 10% C-AI مشاهده می‌شود. پیش‌بینی می‌شود این نانو ساختارها تا دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس پایدار باشند و پس از آن تجزیه و ذوب شوند. شایان ذکر است در نمونه‌های ۱۰٪ سرباره ساختارهای کریستالی نیز قابل مشاهده است.

طبق شکل (۴-م) و (۴-ه) مشاهده می‌شود ساختار کلی بتن معمولی و حاوی سرباره آلومینیوم تحت تأثیر دمای زیاد تضعیف شده است و ترک‌ها نیز رشد بسیار چشم‌گیرتری داشتند. نتایج مطالعات نشان داد بتن معمولی بر اثر دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به شدت دچار تخلخل و تغییرات شدید ریزساختاری شده و نانو ساختار C-S-H نیز تجزیه شده است. همچنین سایر مواد معدنی در سیمان به کریستال و اکسید کلسیم تبدیل شده که موجب کاهش مقاومت بتن و کاهش ظرفیت اسکلت باربر نمونه می‌شود [۱].

۳-۲- بررسی مقاومت فشاری تحت تأثیر دما

شکل (۵) نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه‌های بتن معمولی و بتن حاوی درصدهای مختلف سرباره آلومینیوم را تحت دمای ۲۵ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری آزمونه‌های بتن حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آلومین که تحت دمای محیط نگهداری شدند به ترتیب ۲۳/۳، ۲۵/۴، ۲۱/۱ و ۱۷/۷ مگاپاسکال و نمونه شاهد ۲۲/۵ مگاپاسکال است. در حقیقت هرچند ساختار اترینگایت مخرب است اما در مقادیر کم آلومین (۵٪) افزایش تشکیل اترینگایت تا حدودی موجب کاهش میزان تخلخل و رشد مقاومت فشاری شده است. بر اساس تصاویر SEM (شکل ۴-م) با افزایش درصد سرباره آلومینیوم، مقدار یون آلومینیوم آزاد شده در فازها افزایش یافته و منجر به تشکیل بیشتر اترینگایت می‌شود. بدین علت است که با افزایش درصد سرباره آلومینیوم تا ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت فشاری آزمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (بتن معمولی) در حدود ۶ و ۲۱ درصد افت دارد.

شروع به تغییر شکل کرده و نسبت به نمونه شاهد این ساختار روبه‌زوال است. از سویی ساختار پرتلندیت نیز به علت فرآیند دی‌هیدراتاسیون در حال تجزیه است. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، نشان داده شد که ساختار پرتلندیت در دمای بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس مطابق رابطه (۱) به بخار آب و کربنات کلسیم تجزیه می‌شود [۶].

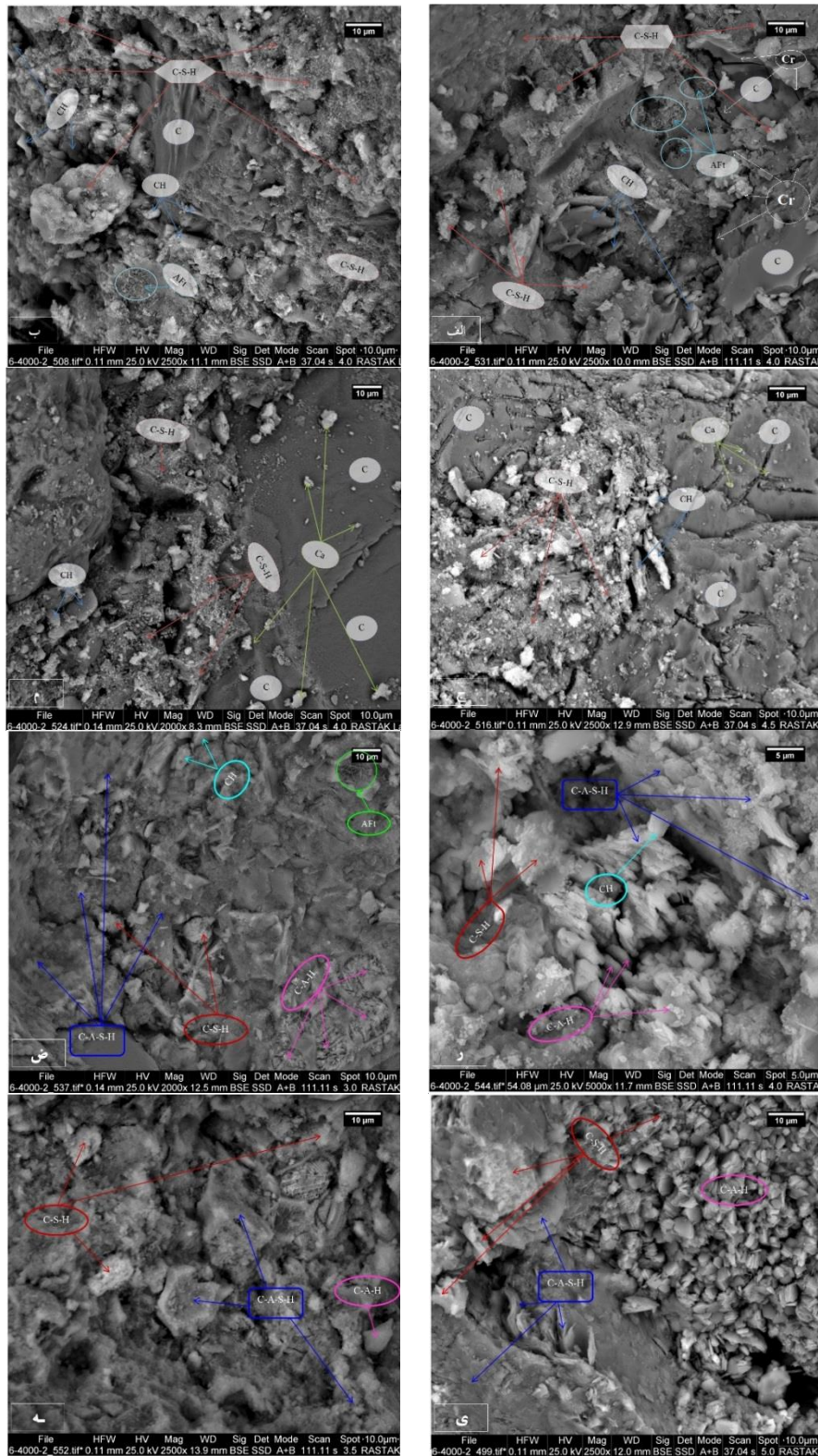


آزمونه 10% C-AI تحت تأثیر دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس در شکل (۴-ی) مشاهده می‌شود. در این دما ساختار اترینگایت به صورت کامل از بین رفته است. بر اثر درجه حرارت زیاد و شروع تبخیر آب از پیوند شیمیایی (فرآیند دی‌هیدراتاسیون) ساختار CH به بخار آب و کربنات کلسیم تجزیه شده است (مطابق رابطه-۱). بر اساس تصاویر موجود نانو ساختار C-S-H بر اثر شروع این فرآیند آغاز به دگرگونی کرده است، اما همچنان نانو ساختارهای C-A-S-H و C-A-H پایدار هستند.

مطابق شکل (۴-ج و ۴-ی) در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود که بر اثر فرآیند دی‌هیدراتاسیون حفره‌ها و میکرو ترک‌ها شروع به گسترش می‌کند. بخشی از ساختار CH در بتن حاوی سرباره آلومینیوم به علت آنکه صرف تشکیل نانو ساختارهای C-A-S-H و C-A-H و اترینگایت شده، بسیار ناپایدارتر از بتن معمولی است و در نهایت تحت دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس کاملاً تجزیه شده است. در صورتی که این ساختار در بتن معمولی تا دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس، با تغییر شکل بر اثر تجزیه آب مشاهده می‌شود.

شکل (۴-م) نمونه بتن معمولی تحت تأثیر دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. نانو ساختار C-S-H تحت این دما به علت تجزیه آب از پیوند شیمیایی با تغییر شکل زیادی مشاهده می‌شود. همچنین بخش اعظمی از ساختار به کربنات کلسیم تجزیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کربنات کلسیم در دمای بیش از ۷۵۰ درجه سلسیوس به اکسید کلسیم و گاز دی‌اکسید کربن تجزیه شده است (رابطه ۲) [۹].



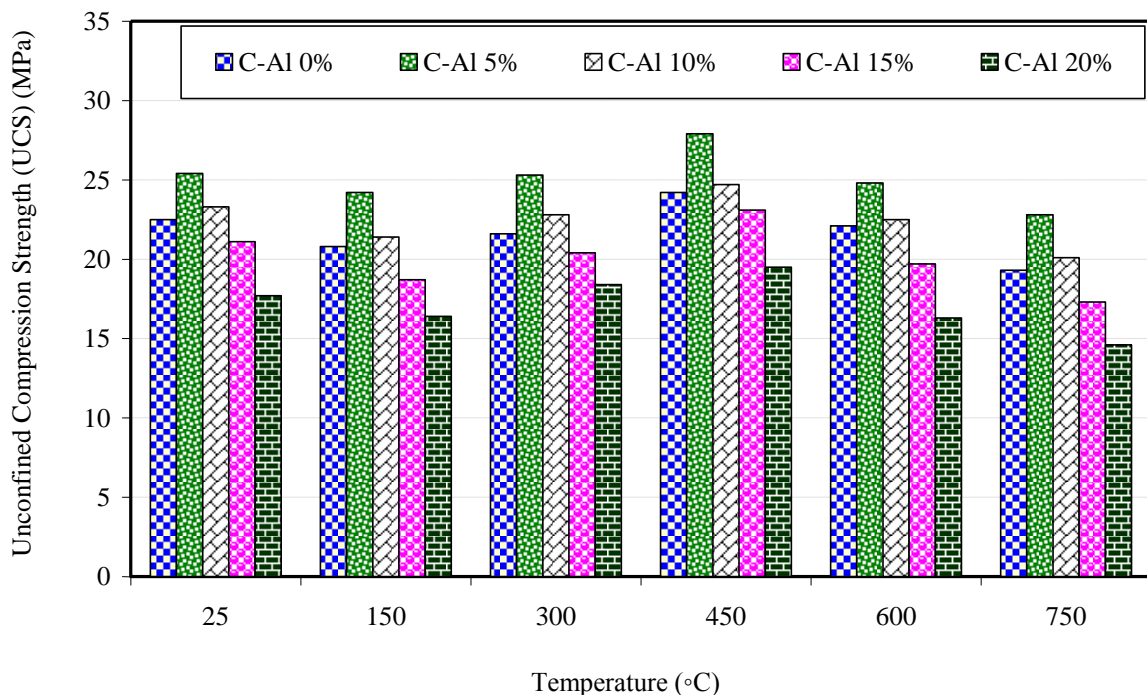


شکل ۴- تصاویر SEM از نمونه‌های، (الف) بتن معمولی در دمای محیط، (ب) بتن معمولی تحت دمای 150°C ، (ج) بتن معمولی تحت دمای 450°C ، (د) بتن معمولی تحت دمای 150°C با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای محیط، (ه) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 150°C ، (و) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 450°C ، (ز) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 150°C ، (ح) بتن معمولی تحت دمای 150°C ، (ط) بتن معمولی تحت دمای 450°C ، (ث) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 450°C ، (ی) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 150°C ، (ک) بتن با ۱۰٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای 450°C

(C-S-H: Calcium Silicate Hydrate; CH: $\text{Ca}(\text{OH})_2$; AFt: Hexacalcium Alumino Ferrite trisulphate; C: Carbonate; C-A-H: Calcium-Aluminum-Hydrate; C-A-S-H: Calcium-Aluminum-Silicate-Hydrate; Cr: Crack)

از طرفی در دماهای کمتر از ۲۰۰ درجه سلسیوس، کاهش مقاومت می‌تواند در نتیجه حالت تنش سه محوره داخلی ظاهری به علت پُر شدن حفره‌های خمیر سیمان با آب باشد. ضمن آنکه اتصالات بین لایه C-S-H در محدوده دمایی ۱۵۰ درجه سلسیوس شکسته شده و این پدیده میزان آب آزاد در بتن را افزایش می‌دهد [۲۶]. در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس با کمتر شدن بخار آب و پایین‌تر آمدن تنش حرارتی مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها نسبت به آزمون‌های تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس رو به افزایش است و این افزایش مقاومت فشاری تا ۴۵۰ درجه سلسیوس ادامه دارد. مقاومت فشاری بتن شاهد تحت دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس ۲۱/۶ مگاپاسکال و بتن حاوی ۱۰٪ سرباره آلومینیوم ۲۲/۸ مگاپاسکال است.

طبق شکل (۵) مشاهده می‌شود با شروع روند حرارتی از ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری آزمون‌ها افت پیدا می‌کند. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی ۵٪ و ۱۵٪ سرباره آلومینیوم تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲۴/۲ و ۱۸/۷ مگاپاسکال و نمونه شاهد ۲۰/۸ مگاپاسکال است. در حقیقت با افزایش دما و شروع تبخیر آب فیزیکی، فشار بخار آب در حال افزایش بوده و تنش حفره‌ای زیاد می‌شود. در نهایت افزایش تنش منجر به افت مقاومت فشاری در نمونه‌ها می‌شود. در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه کاهش مقاومت به کاهش نیروی چسبندگی و اندروالی^۱ میان لایه‌های C-S-H، کاهش سطح انرژی آن و تمایل به تشکیل گروه‌های سیلانولی^۲ (Si-OH:OH-Si) که باعث بروز اتصالات ضعیف‌تر می‌شود، نسبت داده شده است [۲۵].



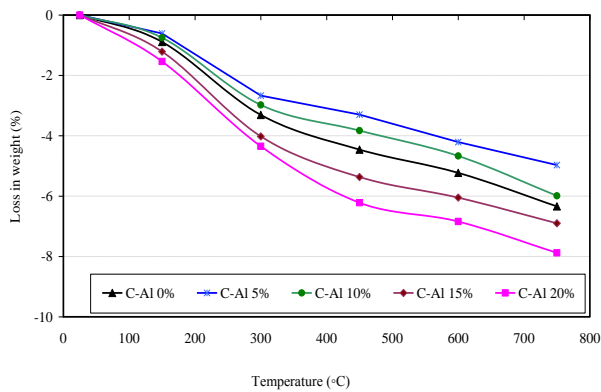
شکل ۵- مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن حاوی درصد‌های مختلف سرباره آلومینیوم تحت تأثیر دمای زیاد

حرارت زیاد ساختار مخرب اترینگایت نیز از بین رفته است. همچنین با افزایش دما به بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس تبخیر آب از پیوند شیمیایی شروع می‌شود و ساختار پرتلندیت نیز در حال تجزیه به کربنات کلسیم و بخار آب است. با افزایش دما افت مقاومت فشاری از دمای ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی ۵

با افزایش دما تا ۴۵۰ درجه سلسیوس آب فیزیکی کاملاً تبخیر شده و تنش ناشی از بخار آب از بین رفته و مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها افزایش پیدا کرده است. این رشد مقاومت فشاری برای نمونه شاهد تحت دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس در حدود ۷/۵٪ و برای بتن حاوی ۵ و ۱۵ درصد سرباره آلومینیوم به ترتیب ۹/۸ و ۹/۴ درصد است. طبق تصاویر SEM (شکل ۴-ج و ۴-ی) برآثر

² Silanol groups

¹ Cohesion of Van der Waal forces



شکل ۶- منحنی تغییرات وزنی بتن حاوی درصد‌های مختلف سرباره آلومینیوم و بتن معمولی

افت وزن نمونه شاهد تحت دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس ۴/۴۶٪ و نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب ۳/۸۳٪ و ۵/۳۷٪ است. این افزایش افت وزن بر اثر حرارت زیاد به دلیل شروع تبخیر آب از پیوند شیمیایی و وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون است. دی‌هیدروکسیلاسیون به خروج یون هیدروکسیل به شکل آب گفته می‌شود؛ که به تبع آن وزن نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین افت ناگهانی وزن معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی‌هیدروکسیلاسیون است. خروج آب شامل دو مرحله دی‌هیدراسیون (خروج آب حفزه‌ای، جذبی و بین لایه‌ای) و دی‌هیدروکسیلاسیون (خروج یون هیدروکسیل از ساختار بتن) می‌شود [۲۷]. با افزایش یافتن دما تا ۶۰۰ درجه سلسیوس افت وزن نمونه‌ها به علت شروع تجزیه آب از نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H شدت بیشتری گرفته است. افت وزنی نمونه حاوی ۵٪ سرباره آلومینیوم حدود ۴/۲۱٪ و نمونه شاهد به ۵/۲۳ درصد است. این افت وزن زیاد نیز منجر به انقباض زیاد نمونه‌ها و در نهایت ایجاد میکروترک‌ها در ساختار بتن می‌شود [۱].

در نهایت افت وزن نمونه‌ها در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس به بیشینه خود رسیده است. افت وزن بتن حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره آلومینیوم به ترتیب ۶/۳۴، ۴/۹۷، ۵/۹۹، ۶/۹ و ۷/۸۸ درصد است. به طور کلی مشاهده می‌شود افت وزنی نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد سرباره آلومینیوم عملکرد بهتری تحت تأثیر حرارت نشان می‌دهد. عامل افت وزن نمونه‌ها شامل تبخیر آب آزاد، فرآیند دی‌هیدراتاسیون و دی‌هیدروکسیلاسیون، خرابی و تجزیه ساختار بتن و تبدیل آن به اکسید کلسیم است [۱].

و ۲۰ درصد سرباره آلومین به ترتیب ۲۴/۸ و ۱۶/۳ مگاپاسکال و نمونه شاهد ۲۲/۱ مگاپاسکال است.

در نهایت تحت دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها رو به افت است. مقاومت فشاری آزمون‌های بتن حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آلومین به ترتیب ۲۲/۸، ۲۰/۱، ۱۷/۳ و ۱۴/۶ مگاپاسکال و نمونه شاهد ۱۹/۳ مگاپاسکال است.

مشاهده می‌شود که افت نمونه شاهد در حدود ۱۴٪ و نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد آلومین ۱۰ تا ۱۸ درصد است. این افت شدید مقاومت فشاری می‌تواند به دلیل افت وزنی نمونه‌ها باشد (شکل ۶). همچنین مطابق تصاویر (۴) مشاهده شد با افزایش دما تا ۷۵۰ درجه سلسیوس نانوساختارهای C-S-H، C-A-S-H و C-A-H بر اثر حرارت و تجزیه آب از پیوند شیمیایی تغییر شکل پیدا نمودند. همچنین نسبت وزنی Ca/Si و Si/Al نیز در دمای زیاد کاهش یافت که این بر کاهش مقاومت فشاری تأثیر گذار است. به طور کلی اضافه کردن حدود ۵٪ تا ۱۰٪ سرباره آلومینیوم به سیمان پرتلند سبب افزایش مقاومت فشاری و عملکرد بهتر بتن چه در معرض حرارت چه در معرض هوای محیط می‌شود.

۳-۳- بررسی تغییرات وزنی آزمون‌ها در معرض حرارت

شکل (۶) منحنی افت وزنی آزمون‌های بتن معمولی و بتن حاوی درصد‌های مختلف سرباره را تحت دماهای مختلف نشان می‌دهد. افت وزنی تمامی آزمون‌ها تحت دمای محیط صفر است. با شروع روند حرارتی افت وزنی نمونه‌ها آغاز می‌شود. با شروع تبخیر آب فیزیکی از آزمون‌ها تحت دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس نمونه حاوی ۵٪ آلومین دارای کمترین افت وزن و نمونه حاوی ۲۰٪ آلومین دارای بیشترین افت وزن است. افت وزنی این نمونه‌ها به ترتیب ۰/۶۱ و ۱/۵۴٪ است. نمونه بتن معمولی نیز تحت این دما دارای افت وزن متعادلی در حدود ۰/۸۹٪ نسبت به آزمون‌های حاوی سرباره آلومین بوده است. شایان ذکر است افت وزنی آزمون‌ها نیز برافت مقاومت فشاری نیز تأثیر گذار است. طبق شکل (۶) به علت شروع فرآیند دی‌هیدراتاسیون با افزایش دما به بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس افت وزن نمونه‌ها زیادتر شده است. افت وزن بتن حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره آلومینیوم به ترتیب ۳/۳۱، ۲/۶۷، ۲/۹۸، ۴/۰۲ و ۴/۳۵ درصد است.

۴- نتیجه‌گیری

- تحت دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری آزمون‌ها افت شدیدی پیدا کرده است. نمونه بتن معمولی ۱۴٪ و نمونه حاوی ۵٪ سرباره آلومینیوم حدود ۱۰٪ افت داشتند.
- افت وزنی تمامی آزمون‌ها با افزایش دما رشد داشته است. بیشترین افت وزنی در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس رؤیت شد. علت آن تجزیه آب پیوند شیمیایی و وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون است. درصد افت وزنی نمونه‌های بتن حاوی ۵٪ و ۲۰٪ سرباره آلومینیوم به ترتیب دارای کمترین (۴/۹۷) و بیشترین (۷/۸۸) درصد افت وزن بود.

۵- مراجع

- [1]. Amiri, M. and M. Aryanpour, The effect of high temperatures on concrete performance with a view to the changes in the C-S-H nanostructure. *Concrete Research*, 2020. article in press.
- [2]. Tian, Q. S. Nakama, and K. Sasaki, Immobilization of cesium in fly ash-silica fume based geopolymers with different Si/Al molar ratios. *Science of the total environment*, 2019. 687: p. 1127-1137.
- [3]. Crozier, D. and J. Sanjayan, Chemical and physical degradation of concrete at elevated temperatures. *Concrete in Australia*, 1999. 25 (1) : p. 18-20.
- [4]. Hertz, K.D. Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research*, 2005. 57(8): p. 445-453.
- [5]. Bellmann, F. T. Sowoidnich, H.M. Ludwig, and D. Damidot, Dissolution rates during the early hydration of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*, 2015. 72: p. 108-116.
- [6]. Tan, H. M. Li, J. Ren, X. Deng, X. Zhang, K. Nie, J. Zhang, and Z. Yu, Effect of aluminum sulfate on the hydration of tricalcium silicate. *Construction and Building Materials*, 2019. 205 :p. 414-424.
- [7]. Chen, J.J. J.J. Thomas, H.F. Taylor, and H.M. Jennings, Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and concrete research*, 2004. 34(9): p. 1499-1519.
- [8]. Kunther, W. S. Ferreiro, and J. Skibsted, Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017. 5(33): p. 17401-17412.
- [9]. Arioiz, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire safety journal*, 2007. 42(8): p. 516-522.
- [10]. Mahinroosta, M. and A. Allahverdi, Hazardous aluminum dross characterization and

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

- بتن با ۵٪ سرباره آلومینیوم دارای بیشترین مقاومت فشاری در حدود ۲۷/۹ مگاپاسکال و بتن با ۲۰٪ سرباره آلومینیوم دارای کمترین مقاومت فشاری در حدود ۱۹/۵ مگاپاسکال است. در حقیقت در مقادیر کم آلومین (۵٪) افزایش تشکیل اترینگایت موجب کاهش تخلخل و رشد مقاومت فشاری شده است. با افزایش درصد سرباره آلومینیوم، مقدار یون آلومینیوم آزاد شده در فازها افزایش یافته و منجر به تشکیل مقادیر زیاد اترینگایت می‌شود، بدین علت است که با افزایش درصد سرباره به بیش از ۱۰ درصد مقاومت فشاری آزمون‌ها نسبت به نمونه شاهد در حدود ۲۱ درصد افت دارد.
- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان می‌دهد از دمای ۲۵ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس به علت وجود فشار بخار آب بر اثر حرارت در بتن مقاومت فشاری آزمون‌ها افت پیدا کرده است. در واقع رطوبت زیاد سبب افزایش فشار منافذ حفره‌ای می‌شود. با افزایش دما از ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها افزایش پیدا کرده است.
- بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حذف آب فیزیکی تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس در بتن معمولی و بتن حاوی کمتر از ۱۰٪ سرباره آلومینیوم موجب ایجاد ساختار تراکم‌تر شده است. از سویی افزودن سرباره آلومینیوم به خمیر سیمان معمولی و واکنش ساختار پرتلندیت با آلومینیوم موجود در سرباره، موجب ایجاد نانو ساختارهای C-A-S-H و C-A-H شده است و نشان‌دهنده تراکم بیشتر ساختار و افزایش مقاومت فشاری است.
- افزایش دما تا ۴۵۰ درجه سلسیوس و شروع تجزیه آب از ساختار نمونه‌ها موجب شده ساختار مخرب اترینگایت بر اثر حرارت از بین برود. همچنین نانو ساختار C-S-H در بتن معمولی بر اثر دمای زیاد و تجزیه آب از پیوند شیمیایی رو به تغییر است؛ اما نمونه‌های حاوی سرباره آلومینیوم به علت داشتن ساختارهای آلومین دار مانند C-A-S-H دارای استحکام بیشتری در مقابل حرارت است.

- [23]. Raki, L. J. Beaudoin, R. Alizadeh, J. Makar, and T. Sato, Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. *Materials*, 2010. 3(2): p. 918-942.
- [24]. Gollop, R. and H. Taylor, Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. V. Comparison of different slag blends. *Cement and Concrete Research*, 1996. 26(7): (p. 1029-1044.
- [25]. Khaliq, W. and V. Kodur, Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2011. 41(11): p. 1112-1122.
- [26]. Fares, H. A. Noumowe, and S. Remond, Self-consolidating concrete subjected to high temperature: mechanical and physicochemical properties. *Cement and Concrete Research*, 2009. 39(12): p. 1230-1238.
- [27]. Brindley, G. Thermal transformations of clays and layer silicates. in *Proceedings of International Clay Conference*. 1975. Applied Publishing Ltd. Wilmette, Illinois, USA.
- recycling strategies: A critical review. *Journal of environmental management*, 2018. 223: p. 452-468.
- [11]. Li, Z. L. Li, J. Wang, and X. Wu, Effect of Elevated Temperature on Meso-and Micro-Structure and Compressive Strength of High-Strength Concrete and Mortar Containing Blast-Furnace Slag. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018. 16(10): p. 498-511.
- [12]. SatishReddy, M and Neeraja, D, Mechanical and durability aspects of concrete incorporating secondary aluminium slag. *Resource-Efficient Technologies*, 2017. 4(2): p. 225-232.
- [13]. bahmani, h. and D. Mostofinejad, Mechanical properties of ultra high performance concrete reinforced by polypropylene fibers and synthetic macro fibers (barchip). *concrete Research*, 2019. 12(1): p. 15-26.
- [14]. mousavi, s. and F. Gharedaghi Effect of Carbon Nanotube and Silica Aerogel on Compressive Strength, Durability and Thermal Conductivity of Concrete. *Concrete Research*, 2019. 12(1): p. 71-79.
- [15]. Berenjjan, 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.
- [16]. Alomayri, T. Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material (Al₂O₃). *Journal of Building Engineering*, 2019. 25: p. 100788.
- [17]. ASTM, American Society for Testing and Materials. 1984.
- [18]. 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.
- [19]. Grattan-Bellew, P. Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes. *Construction and building materials*, 1996. 10(1): p. 3-16.
- [20]. Geng, H. and Q. Li, *RETRACTED: Development of microstructure and chemical composition of hydration products of slag activated by ordinary Portland cement*. 2014, Elsevier.
- [21]. Escalante-Garcia, J.I. and J. Sharp, The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 2004. 26(8): p. 967-976.
- [22]. Tarighat, A. and y. modarres, Thermodynamic modeling of sulfate attack on hardened cement paste containing slag and investigation of the effect of various sulfate solutions. 2017.

Efficacy of Elevated Temperatures on Mechanical Properties of Concrete Containing Aluminum Slag from the Microstructural Perspective

M. Amiri *

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

J. Arzanian karamallah

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

M. Aryanpour

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

Abstract

Concrete structures undergo behavior change and instability at elevated temperatures. In most cases, these behavioral variations and instability are related to the changes in calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) nanostructures, which is an important part of the cement paste hydration process and plays a crucial role in determining the strength and mechanical properties of concrete. Application of aluminum dross as a type of pozzolanic material to cementitious composites can improve concrete behavior at elevated temperatures. Considering, this article aims to investigate the effects of elevated temperatures on concrete containing different percentages of aluminum slag from the microstructural perspective. For this purpose, cubic samples containing different percentages of aluminum slag powder were prepared. The specimens were cured in a humidity bath for 28 days and then heated for 60 min at temperatures of 25 to 750 °C. To evaluate the mechanical properties, the percentage of weight and compressive strength changes of concrete samples were investigated. Scanning electron microscopy (SEM) images were also used to observe the microstructural properties of the samples at different temperatures. According to the results, in samples containing slag less than 10% due to its activation as well as the hydration process and the formation of C-A-S-H and C-A-H nanostructures, the portlandite phase was formed which has improved the compressive strength. On the other hand, the elevated temperature and the occurrence of the dehydroxylation process lead to water decomposition within the bonds of C-S-H nanostructure which subsequently results in the change in compressive strength behavior. So the compressive strength of the specimen containing 10% aluminum slag powder treated at the temperature of 750 °C decreased by 13% to 20.1 MPa.

Keywords: Concrete, Aluminum Slag, Elevated Temperature, Compressive Strength.

* Corresponding Author: amirri@chmail.ir

