

مطالعه رفتاری خصوصیات مکانیکی و ریزساختار بتن حاوی سرباره فولاد در معرض دمای زیاد

محمد امیری *

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، استادیار مدعو دانشکده فنی مرودشت، دانشگاه فنی و حرفه‌ای.

افشین وطن پور اغچه مشهد

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

مرضیه آریانیپور

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

صدیقه قاسمی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی.

چکیده

حرارت چه در حالت گذرا چه در حالت پایدار موجب تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بتن می‌شود. از سوی دیگر استفاده از سرباره به همراه سیمان پرتلند بر توسعه ریزساختار بتن تأثیرگذار است. محصولات اصلی فرایند هیدراتاسیون خمیر سیمان و سرباره که نقش مهمی در افزایش مقاومت بتن دارد، نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینوفیریت کلسیم (C-A-Fe-H) است. بر این اساس به منظور درک عمیق‌تر از تغییر رفتار نانوساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H بر اثر اعمال درجه حرارت‌های زیاد، بتن حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا حدود ۱۵۰ نمونه مکعبی بتن با جایگزینی صفر، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ سرباره فولاد به سیمان پرتلند به مدت ۲۸ روز در حمام رطوبت عمل‌آوری شده است. سپس همه آزمون‌ها به مدت ۱ ساعت در دماهای ۲۵ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته است. درصد تغییرات وزنی، مقاومت فشاری و رفتار ترک‌خوردگی در تمام آزمون‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی رفتار ریزساختاری آزمون‌ها در دماهای مختلف از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر ماهیت رفتار آزمون‌های بتنی وابسته به تغییرات نانوساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H تحت دمای زیاد است. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد نسبت به نمونه بتن معمولی افزایش داشتند. دلیل این افزایش بر اساس تصاویر SEM تراکم بیشتر نانوساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H و هیدروکسید آهن (FeO(OH)) است. از سویی جایگزینی ۵٪ تا ۱۰٪ سرباره فولاد موجب بهبود در عملکرد خواص مکانیکی بتن تحت تأثیر حرارت شده است. به نحوی که مقاومت فشاری آزمون ۲۸ روزه حاوی ۵٪ سرباره فولاد تحت دمای محیط ۲۴/۷ مگاپاسکال است که با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سلسیوس حدود ۶٪ کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سرباره فولاد، درجه حرارت زیاد، مقاومت فشاری، ریزساختار C-S-H و C-A-Fe-H، SEM.

* نویسنده مسئول: amirii@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

هیدراتاسیون تشکیل شده شامل C_2AH ، C_4AFH و C_4FH است [۷، ۸]. کلسیم آلومینوفریت هیدراته با فرمول شیمیایی $(C-A-F-H) 3CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3.6H_2O$ در دمای ۱۵ تا ۳۵ درجه سلسیوس تشکیل می شود و با میزان محلول هیدروکسید کلسیم ارتباط دارد [۸]. رشد آهسته نانو ساختار C-S-H در سیمان های سرباره موجب کاهش مقاومت اولیه آن ها شده است. به مرور زمان تراکم و چگالی این نانو ساختار بیشتر شده که با افزایش مقاومت بتن همراه است [۹]. همچنین تشکیل نانو ساختار اترینگایت در مراحل اولیه هیدراتاسیون سرباره در بتن معمولی به عنوان یک چسب عمل می کند که منجر به مقاومت زیاد تر این بتن می شود.

لیو^۲ و وانگ^۳ به بررسی تأثیر افزودن سرباره فولاد و میکروسیلیس روی خواص بتن پرداختند. نتایج نشان داد که میکروسیلیس به طور قابل توجهی هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ مصرف می کند که منجر به افزایش ارتباط بین سطح ذرات سرباره فولاد و نانو ساختار C-S-H می شود. جایگزینی درصد مناسب سیمان با افزودنی مواد معدنی می تواند ساختار حفره ها را در طولانی مدت، مقاومت در برابر خوردگی یون کلرید، مقاومت در برابر کرناسیون و مقاومت در برابر حمله سولفات بتن را بهبود بخشد. همچنین افزودن مواد معدنی باعث کاهش انقباض ناشی از خشک شدن بتن شود [۱۰]. وانگ^۴ و همکاران به بررسی مقاومت مکانیکی و خاصیت دوام بتن های حاوی سرباره فولاد و مصالح طبیعی پرداختند. سرباره فولاد با نسبت های ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ جایگزین سیمان شدند. نتایج نشان داد تخلخل و ضریب نفوذ پذیری به طور کلی افزایش یافته است. همچنین افزودن سرباره فولاد تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی دارد [۱۱]. ساباثرا^۵ و همکاران مطالعه ای بر روی بررسی دوام بتن حاوی سرباره فولاد در شرایط محیطی مختلف انجام شد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که بتن حاوی سرباره فولاد در شرایط شدید نسبت به بتن معمولی عملکرد بهتری دارد [۱۲]. هوآریا^۶ و همکاران به بررسی اثر دمای زیاد بر نفوذ پذیری دو نوع بتن (بتن معمولی و بتن حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی) پرداختند [۱۳].

آتش سوزی برای سازه های بتنی به دلیل ضعف سیمان پرتلند معمولی در برابر تجزیه آب تحت درجه حرارت زیاد می تواند آسیب جدی در سازه ایجاد کند. درجه حرارت زیاد در بتن موجب کاهش خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و پایداری می شود [۱]. علت اصلی از بین رفتن مقاومت بتن معمولی در درجه حرارت زیاد دی هیدراتاسیون و دی هیدروکسیلاسیون ساختارهای C-S-H، $Ca(OH)_2$ و تنش های داخلی است [۲، ۳].

نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم ($C-S-H^1$) که مهم ترین بخش هیدراتاسیون در تعیین خواص مکانیکی و مقاومتی بتن است، در دمای نزدیک به محیط تشکیل می شود و همچنین مقاومت بتن را افزایش می دهد. نانو ساختار C-S-H از طریق واکنش هیدراسیون سیلیکات تری کلسیم (C_3S) یا b-دی کلسیم سیلیکات (C_2S -b) به وجود می آید که حدود ۷۵٪ از وزن یک سیمان پرتلند معمولی را تشکیل می دهند [۴]. هنگامی که نانو ساختار C-S-H در معرض حرارت زیاد قرار می گیرد دچار کم آبی و در نهایت تجزیه می شود. در دمای ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس آب از نانو ساختار C-S-H تجزیه و با افزایش دما تا ۹۰۰ درجه سلسیوس این نانو ساختار به طور کامل تجزیه و به ساختار سرامیکی متخلخل تبدیل شده است [۲]؛ که این امر تأثیر به سزایی در کاهش مقاومت بتن معمولی تحت حرارت زیاد دارد. از این رو جهت ارتقای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن معمولی از مواد جایگزین سیمان یا مکمل سیمان مانند پوزولان ها طبیعی یا مصنوعی نظیر دوده سیلیس، آلومینیوم، خاکستر پوسته برنج، سرباره مس، سرباره آهن و پودر شیشه نیز استفاده می شود [۵].

فاز آلومینات و فریت حدود ۲۰٪ از حجم خمیر سیمان را تشکیل می دهد [۶]. واکنش آن ها در خمیر سیمان بسیار مهم است و به طور چشم گیری در هیدراتاسیون C-S-H تأثیر می گذارد. هیدراتاسیون C_3A نسبت به C_3S بسیار سریع است [۶]. در صورت نبود افزودنی، C_3A با آب واکنش می دهد و ساختار CAH را تشکیل می دهد [۶]. همچنین بر اساس مطالعه تأثیر آب بر روی عمل آوری و خواص کلسیم آلومینو فریت، محصولات

4 Wang

5 Subathra

6 Houaria

1 Calcium Silicate Hydrate

2 Liu

3 Wang

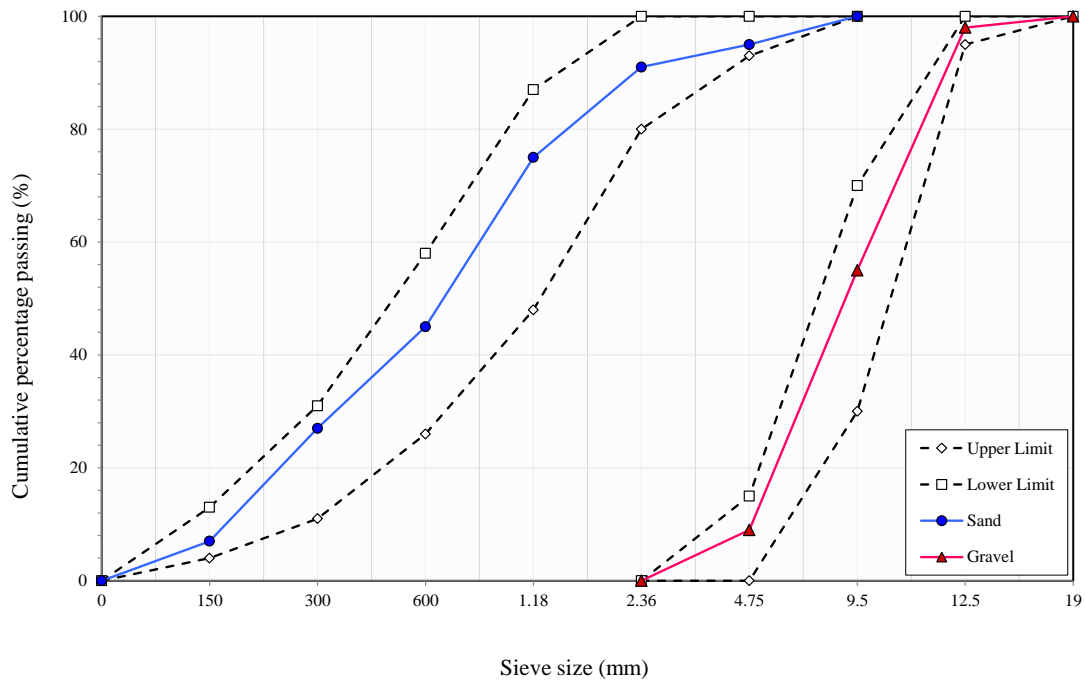
مطالعات بسیاری در مورد بتن حاوی با درصدهای مختلف افزودنی صورت گرفته است. با این حال تأثیر درجه حرارت زیاد بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری بتن حاوی درصدهای مختلف سرباره فولاد به صورت جامع از منظر ریزساختاری مطالعه و بررسی نشده است. بر این اساس هدف مقاله حاضر بررسی تأثیر درجه حرارت‌های زیاد بر ریزساختار و خواص مکانیکی بتن به همراه درصد‌های سرباره فولاد با نگرش به تغییرات نانوساختار C-S-H و C-A-Fe-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 هرمزگان 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 شهری بندرعباس با $\text{pH}=7/43$ است. سرباره فولاد مصرفی نیز از شرکت فولاد هرمزگان به صورت پودر خریداری شده است. آنالیز شیمیایی (XRF) سرباره فولاد نیز در جدول (۱) آورده شده است. در طرح اختلاط‌های استفاده شده بتن نسبت‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره فولاد جایگزین سیمان پرتلند شده است. طبق مشخصات مندرج در جدول (۲)، مجموع سه اکسید سیلیکا SiO_2 ، آلومینا Al_2O_3 و اکسید آهن Fe_2O_3 در سرباره فولاد حدود ۸۵ درصد است که نشان‌دهنده ویژگی‌های پوزولانی مناسب این ماده طبق ASTM C618 است [۱۷].

نتایج این مطالعه نشان داد، افزودن پوزولان باعث افزایش مقاومت فشاری نسبی نسبت به بتن شاهد در دمای محیط شده است. کاهش نفوذپذیری با افزایش درجه حرارت، به جزء دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، مشاهده شد. بیش‌ترین تغییر در نفوذپذیری از دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس برای بتن حاوی پوزولانی ثبت شد [۱۳]. مانصر^۱ و همکاران [۱۴] به بررسی تأثیر حرارت زیاد بر مقاومت فشاری و کاهش وزن بتن با درصد‌های مختلف افزودنی پرداختند. آن‌ها 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. برنجیان و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر درجه حرارت زیاد بر خواص بتن خود متراکم 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. امیری و آریانپور به بررسی مقایسه رفتار ریزساختار بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت درجه حرارت زیاد پرداختند. نتایج نشان داد هم‌زیستی دو نانوساختار C-S-H و C-A-S-H در ژئوپلیمرها منجر به تشکیل یک شبکه/ ساختار محکم‌تری نسبت به بتن معمولی شده است. در نتیجه مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری (۵۹/۲۳ مگاپاسکال) بیش از ۲ برابر بتن معمولی است. در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس به علت وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون ساختارهای موجود در نمونه‌ها از بین رفته و ساختارهای جدیدی تشکیل شده است. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس ساختار بتن ژئوپلیمری بر اثر حرارت زیاد (تجزیه کربنات کلسیم به اکسید کلسیم) به ساختار شیشه‌ای پایدار و متخلخل تبدیل شده است. این ساختار علاوه بر افزایش حجم، کاهش ۸۹٪ مقاومت فشاری را به همراه دارد؛ اما در بتن‌های معمولی پس از قرار گرفتن تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس نانوساختار C-S-H تجزیه و ساختار کلی نمونه‌ها دچار ضعف و کاهش مقاومت شده است. همچنین مقاومت فشاری تا حدود ۸۳٪ کاهش داشته است [۱۶].

¹ Maanser



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

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

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	21.47	5.4	3.82	62.52	1.31	0.43	0.65	2.88	1.52
Steel Slag	19.8	6.2	14.8	46.9	5.3	-	-	0.5	-

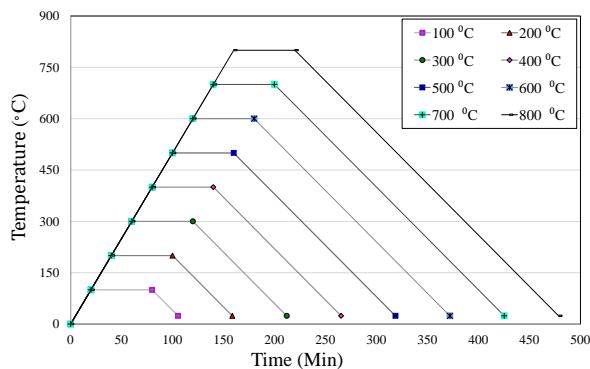
همچنین طرح اختلاط بتن بر اساس آیین نامه ACI-211 با طبق استاندارد ASTM C192/192M-2 [۱۷] برای ساخت بتن مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر ابتدا مصالح سنگی (درشت دانه و ریزدانه) مخلوط می شود. سپس گرفته شده است. شایان به ذکر است طرح صفر درصد به عنوان سیمان و سرباره فولاد افزوده و در نهایت آب به ترکیبات خشک نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه های در اضافه شده است. جهت تعیین کارایی طبق استاندارد ASTM C143 میزان روانی و اسلامپ طرح های مختلف اندازه گیری شد. جدول (۲) ارائه شده است.

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

Mixture	Cement (kg/m ³)	Steel Slag (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
C-SS 0%	350	0	157.5	992	750
C-SS 5%	332.2	17.5			
C-SS 10%	315	35			
C-SS 15%	297.5	52.5			
C-SS 20%	280	70			

شکل (۲) نتایج اسلامپ (ASTM C 143) طرح های مختلف قابل مشاهده است با افزایش درصد جایگزینی سیمان با سرباره حاوی سرباره فولاد را نشان می دهد. همان طور که در شکل (۲) فولاد کارایی و اسلامپ بتن تازه افزایش می یابد. علت افزایش

بهسان است. شکل (۳) نمودار حرارت-زمان بر اساس نرخ افزایش دمای کوره و شکل کوره را نشان می‌دهد.

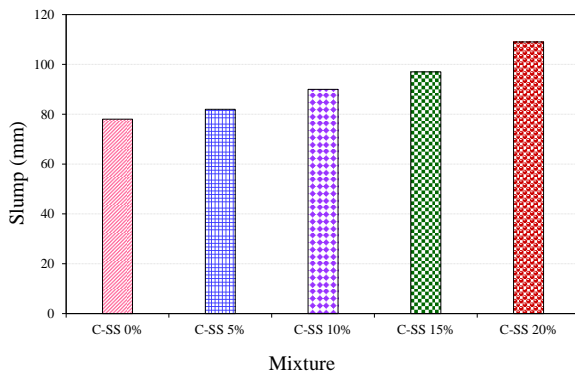


شکل ۳- تصویر کوره الکتریکی و نمودار حرارت-زمان کوره الکتریکی

سپس آزمایش‌های افت وزنی (ASTM C1792-14) و مقاومت فشاری (ASTM C39) بر روی نمونه‌ها انجام شده است. وزن نمونه‌ها توسط ترازو در دو مرحله (قبل از قرارگیری در حرارت و بعد از قرار گرفتن در حرارت) اندازه‌گیری شده است. برای تست مقاومت فشاری تمامی آزمونه‌ها از جک مکانیکی شرکت آزمون با نرخ بارگذاری ۲ کیلو نیوتن بر ثانیه استفاده شده است. در نهایت پودر حاصل از نمونه‌های حرارت دیده در دماهای ۲۵، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس حاوی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد سرباره فولاد برای آزمایش ریزساختاری تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوایکس (EDS) جمع‌آوری شدند.

برای ارزیابی ریزساختاری نمونه‌ها نیز از آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDX) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) توسط دستگاه‌های TESCAN-Vega3 در دانشگاه شیراز استفاده شده است. شایان ذکر است برای آماده سازی نمونه‌ها از روکش طلا استفاده شده است.

کارایی در سرباره فولاد وجود دانسیته زیادتر نسبت به سیمان و میزان جذب آب کمتر است که سبب افزایش مقدار آب آزاد در بتن می‌شود. این آب آزاد نیز منجر به بیشتر شدن روانی و افزایش اسلامپ بتن خواهد شد. با توجه به شکل (۲) میزان اسلامپ طرح C-SS 20% و C-SS 15%، C-SS 10%، C-SS 5% نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۵/۱، ۱۵/۴، ۲۴/۴ و ۳۹/۷ درصد افزایش یافته است. بر این اساس استفاده از سرباره فولاد در بخش بتن تازه اثرات مثبتی بر اسلامپ دارد.



شکل ۲- نتایج آزمایش اسلامپ طرح اختلاط‌ها حاوی سرباره فولاد

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 آزمونه‌ها 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 12390-3 آزمایش بروی آزمونه‌های ۲۸ روزه صورت گرفت [۱۸]. ابتدا آزمونه‌ها در سن ۲۷ روزه از حوضچه آب خارج شده جهت جلوگیری از شوک حرارتی به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای ۷۰ درجه سلسیوس در گرمخانه خشک شدند. پس از خشک شدن هر نمونه به صورت جداگانه درون کوره الکتریکی تحت دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه گذاشته شد [۱۸]. شایان به ذکر است نمونه‌های دمای ۲۵ درجه سلسیوس درون کوره قرار نگرفتند. نرخ افزایش دمای کوره ۵ درجه بر دقیقه است. مدل کوره الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق مدل SHD96A ساخت شرکت

۳- بحث و بررسی نتایج

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

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) حاوی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد سرباره فولاد در دماهای ۲۵، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس قابل مشاهده است. در شکل (۴) ریزترک‌ها، حفره‌ها و بافت نانو ساختارهای C-S-H، C-A-Fe-H و CH مشاهده می‌شود. همچنین ساختار هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) به صورت ساختار شش ضلعی، نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) اسفنجی مانند و ساختار اترینگایت سوزنی شکل است [۱۹]. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نانو ساختار C-S-H در شکل‌های مختلفی از جمله به صورت الیاف، پوسته، لانه زنبوری، دانه‌های بسته بندی شده یا به عنوان یک ماده مترکم وجود دارد [۲۰].

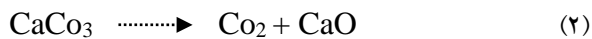
شکل (۴-الف) مورفولوژی سطحی آزمون بتن معمولی را تحت دمای محیط نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-الف) نانو ساختار C-S-H، ساختار پرتلندیت (هیدروکسید کلسیم) و ساختار اترینگایت (C₆AS₃H₃₂) مشاهده می‌شود. از سویی ساختار اترینگایت در نمونه‌های بتن معمولی به مقدار زیادی دیده می‌شود که این امر سبب کاهش روند کسب مقاومت فشاری شده است (شکل-۵).

با شروع فرآیند حرارتی تبخیر آب از نمونه‌ها آغاز شده است. از دمای ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس آب آزاد یا فیزیکی نمونه‌ها بر اثر حرارت تبخیر شده و با افزایش دما به بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس تجزیه آب از پیوند شیمیایی شروع شده است [۲]. همچنین در دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس ساختار اترینگایت تحت دمای زیاد از بین رفته است و نانو ساختار C-S-H به صورت منسجم تر دیده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری نیز همراه است [۲]. شکل (۴-ب) آزمون بتن معمولی تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. بر اثر حرارت زیاد و وقوع فرایند دی‌هیدراتاسیون تغییرات گسترده‌ای در سطح نمونه‌ها رخ داده است. تبخیر آب از پیوند شیمیایی موجب تغییر شکل نانو ساختار C-S-H شده و نسبت به نمونه تحت دمای محیط این ساختار کاهش یافته است. همچنین در این دما ساختار اترینگایت دیگر وجود ندارد و این

عامل باعث بهبود مقاومت فشاری نسبت به دمای ۲۵ درجه سلسیوس شده است (شکل-۵). 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 [۲۱].



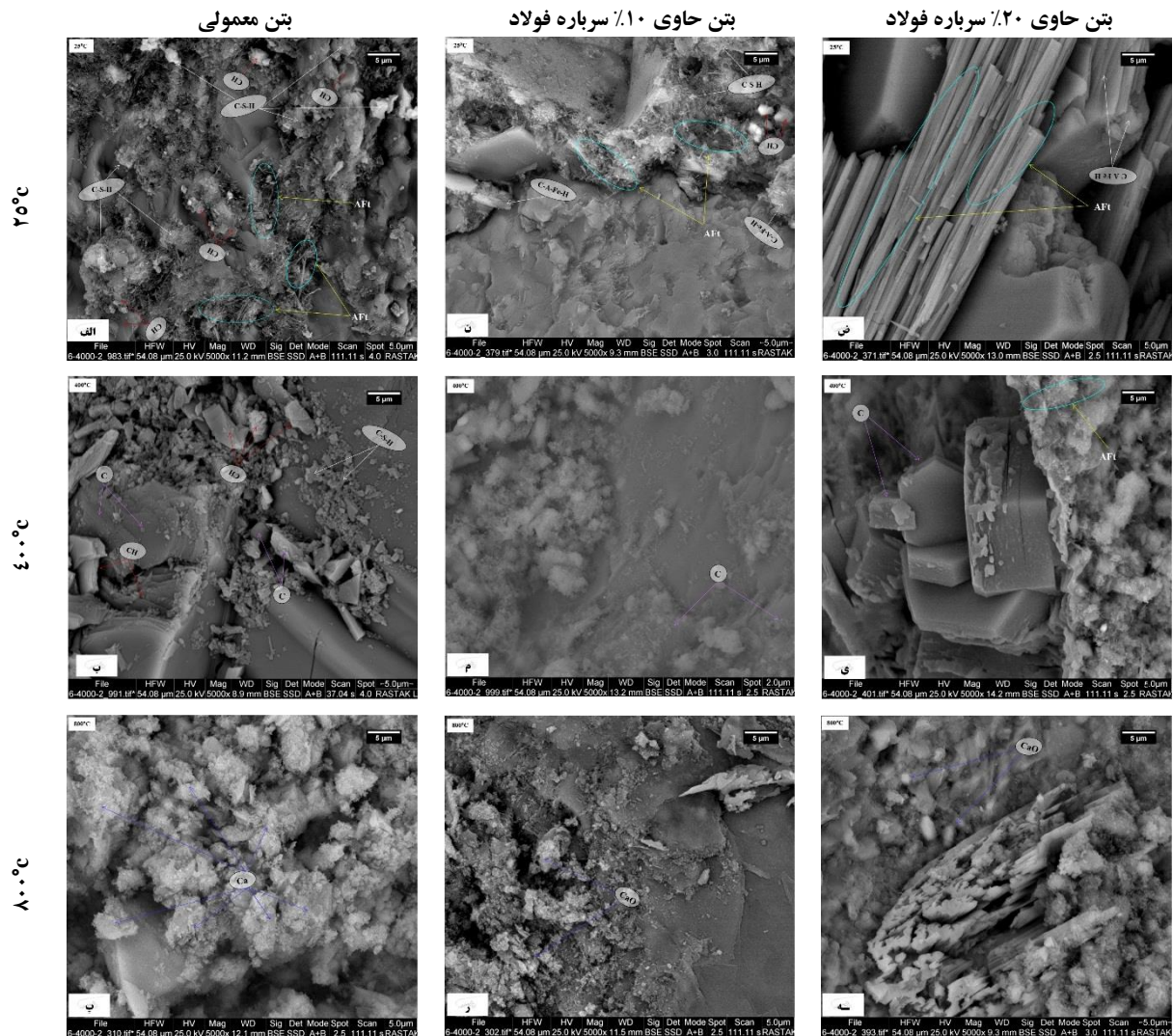
شکل (۴-پ) با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سلسیوس، در نمونه بتن معمولی ریزترک‌ها و حفره‌های بین لایه‌ای و اکسید کلسیم مشاهده می‌شود. همچنین بر اثر تجزیه آب از پیوند شیمیایی، نانو ساختار C-S-H نیز به صورت کلی تغییر شکل پیدا کرده و بخش اعظم آن نابود شده است. این آسیب به ساختار کلی خمیر سیمان بر اثر حرارت موجب افت شدید مقاومت فشاری و افزایش افت وزن آزمون می‌شود (شکل-۵ و شکل-۶). در این دما از دست رفتن آب پیوند شیمیایی در ساختار خمیر سیمان و انبساط سنگ‌دانه‌ها سبب ایجاد ریزترک‌ها و تجزیه نانو ساختار C-S-H و پرتلندیت شده است. نتایج نشان داد که در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس بخش اعظمی از ساختار کربنات کلسیم به اکسید کلسیم و گاز دی‌اکسید کربن تجزیه شده است (رابطه ۲) [۲۲].



افزودن سرباره فولاد موجب بهبود رفتار ریزساختاری بتن به علت تغییرات شیمیایی و هیدراتاسیون می‌شود. از سویی ترکیب درصدی از سرباره فولاد 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 آلومینوفریت کلسیم (C-A-Fe-H)، هیدرات اکسید آهن (FeO(OH)) و هیدرات فریت کلسیم (C-F-H) نیز تولید شود. واکنش‌های پوزولانی C₄AF (تتراکلسیم آلومینوفریت) به همراه هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) موجب تشکیل ساختارهای C-A-H و C-F-H پس از هیدراتاسیون خمیر سیمان سرباره می‌شود (رابطه-۳) [۲۳].

¹ . Aft: Hexacalcium Alumino Ferrite trisulphate



شکل ۴- تصاویر SEM از نمونه‌های (الف) بتن معمولی تحت دمای ۲۵°C، (ب) بتن معمولی تحت دمای ۴۰°C، (پ) بتن معمولی تحت دمای ۸۰°C، (ن) بتن با ۱۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۲۵°C، (م) بتن با ۱۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۴۰°C، (ر) بتن با ۱۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۸۰°C، (ض) بتن با ۲۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۲۵°C، (ی) بتن با ۲۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۴۰°C، (ه) بتن با ۲۰٪ سرباره فولاد تحت دمای ۸۰°C

ساختار پرتلندیت نیز نسبت به نمونه شاهد کمتر شده است. با افزایش درصد سرباره فولاد ساختار اترینگایت به مقدار بسیار زیادی رشد می‌کند.

افزودن ۲۰٪ سرباره فولاد به سیمان پرتلند موجب کاهش عملکرد مناسب بتن می‌شود. با واکنش فازهای آلومینات مقدار زیادی اترینگایت در مقیاس بزرگ‌تر و منظم‌تر تشکیل شده که موجب ایجاد حفره‌های بزرگ و ترک‌های سطحی در خمیر سیمان می‌شود. ساختار موازی و حتی طول زیاد ساختار اترینگایت باعث شکننده‌تر شدن بتن و کاهش رشد نانوساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H شده است. وجود حفره‌های بزرگ و مقدار زیاد اترینگایت در دمای



شکل (۴-ن) و شکل (۴-ض) نمونه‌های ۱۰% C- و C-SS 20% تحت دمای ۲۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. افزودن ۱۰ درصد سرباره فولاد سبب کاهش میزان اترینگایت نسبت به نمونه بتن معمولی می‌شود. ساختار تیره‌رنگ در شکل (۴-ن) نشان‌دهنده FeO(OH) است. به دلیل بهبود واکنش‌پذیری مواد پوزلانی و افزایش نانوساختار C-A-Fe-H، افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های ۱۰% C-SS مشاهده می‌شود (شکل ۵-). همچنین به دلیل شرکت بیشتر هیدروکسید کلسیم در فرایند هیدراتاسیون خمیر سیمان و تولید نانوساختار C-A-Fe-H،

بر اثر حرارت و تجزیه آب رو به نابودی رفته است اما مقدار بسیار کمی در شکل دیده می‌شود که موجب شده در حرارت زیاد اسکلت کلی آزمون فروپاشی نکند. این عوامل سبب افت شدید مقاومت و وزن نمونه‌های C-SS 10% و C-SS 20% در دمای ۸۰۰ سلسیوس نسبت به دما ۴۰۰ درجه سلسیوس شده است (شکل-۵ و شکل-۶).

آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتویکس (EDS) در دماهای ۲۵، ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس بر روی به نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 10% و C-SS 20% صورت گرفته است. عناصری همچون سیلیسیم (Si)، کلسیم (Ca)، آهن (Fe) و آلومینیوم (Al) به وفور در ساختار بتن حاوی سرباره فولاد در دماهای مختلف یافت می‌شود. وجود برخی از این عناصر کمک شایانی به کسب مقاومت و حفظ دوام بتن در شرایط مختلف جوی می‌کند. افزایش میزان سیلیس (Si) می‌تواند به بهبود فرایند هیدراتاسیون کمک کند و تولید نانو ساختار C-S-H در بتن معمولی و نانو ساختار C-A-Fe-H در بتن حاوی سرباره فولاد را افزایش دهد. نتایج آزمون EDS بر روی گروهی از نقاط نشان داد نسبت Ca/Si در نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 10% و C-SS 20% تحت دمای محیط به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۱۵ و ۰/۹ درصد است. نسبت درصد وزنی Ca/Si تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در نمونه‌های ۰/۱، ۰/۲۰ و ۳/۵۱، ۲/۳۵ و ۴/۵۰ درصد است. تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس نسبت Ca/Si افزایش یافته است. نسبت درصد وزنی در نمونه‌های ۰/۱، ۰/۱۰ و ۰/۲۰ به ترتیب ۵/۵۵، ۵/۱۴ و ۶/۲۷ درصد است. افزایش نسبت Ca/Si تأیید کننده تجزیه شیمیایی و تخریب نانو ساختار C-S-H و تشکیل اکسید کلسیم است که موجب افت شدید مقاومت فشاری در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس می‌شود.

به طور کلی افزودن ۱۰٪ سرباره فولاد موجب بهبود عملکرد رفتار نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H شده است. از دمای ۵۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس شروع تجزیه نانو ساختارهای C-S-H، C-A-Fe-H، اترینگایت و سایر هیدرات‌های آمورف حاصل از هیدراتاسیون خمیر سیمان است. تحت دمای ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس فرایند دی‌هیدراتاسیون ساختار CH، فرایند دی‌هیدروکسیلاسیون به همراه تجزیه کربنات کلسیم، تشکیل اکسید کلسیم و دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد.

محیط باعث افت مقاومت فشاری نسبت به دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس شده است (شکل-۵). از سویی می‌توان پیش‌بینی کرد که افزایش مقدار اترینگایت بر انبساط نمونه‌ها تأثیر می‌گذارد.

شکل (۴-م) و (۴-ی) آزمون‌های C-SS 10% و C-SS 20% تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس را نشان داده شده است. با افزایش درجه حرارت آب‌های سطحی، بین حفره‌ای، آب فیزیکی و آب جذبی حاصل از فرآیند دی‌هیدراتاسیون تبخیر شده است. در مورفولوژی سطحی طرح C-SS 10% حفره‌های پراکنده با ابعاد کوچک مشاهده می‌شود. با تجزیه آب از فرایند دی‌هیدراتاسیون نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H تغییر شکل پیدا کرده است و ساختارهای کربنات کلسیم، پرتلندیت و FeO(OH) مشاهده می‌شود.

وجود نانو ساختار C-S-Fe-H موجب افزایش مقاومت در ماتریس سیمان شده است. از این رو تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با وجود شروع فرآیند هیدراتاسیون نانو ساختارهای C-S-H و C-S-Fe-H در مقابل تجزیه حرارتی نسبت به بتن معمولی پایدار باقی مانده است. این امر بر افزایش مقاومت فشاری تأثیر بسزایی می‌گذارد (شکل-۵).

در آزمون C-SS 20% مطابق شکل (۴-ی) با تبخیر آب، ساختارهای بزرگ و منسجم اترینگایت حاصل از جایگزینی ۲۰٪ سرباره فولاد روبه‌زوال رفته است. همچنین نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H بر اثر تجزیه آب تغییر شکل پیدا کرده است. شایان به ذکر است با افزایش دما به بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس ساختار پرتلندیت تجزیه شده و بخار آب به همراه کربنات کلسیم تشکیل می‌شود.

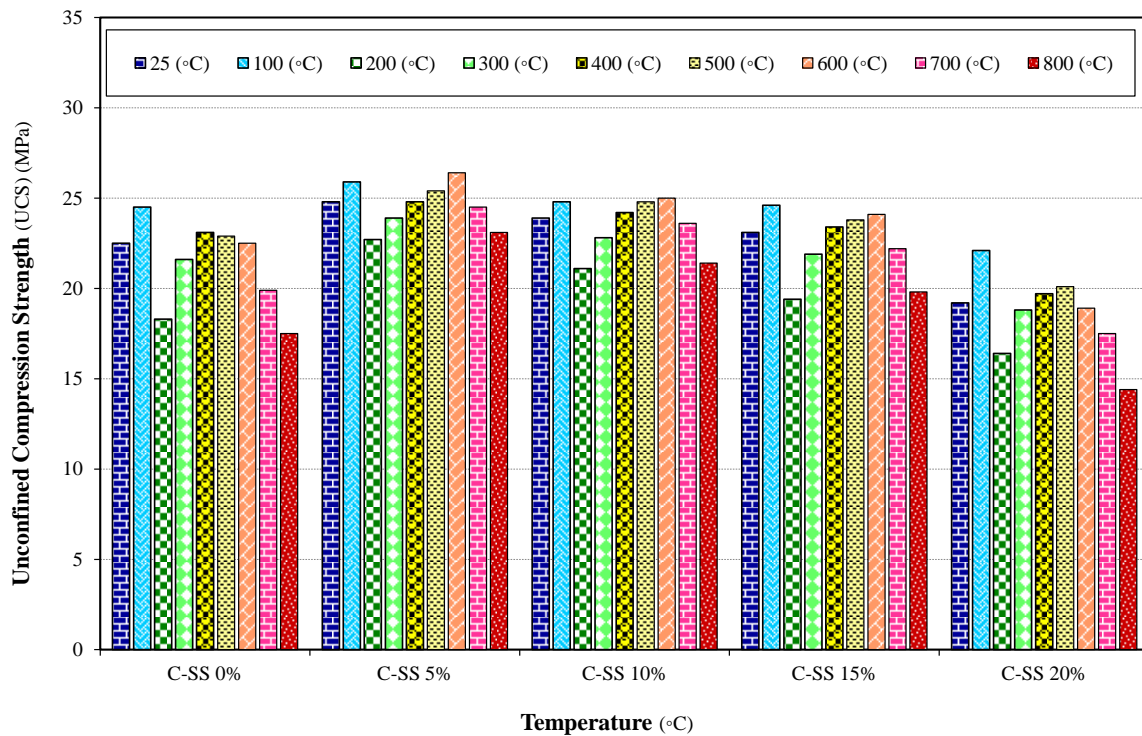
شکل (۴-ر) و (۴-ه) آزمون C-SS 10% و C-SS 20% تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. با افزایش درجه حرارت تا ۸۰۰ درجه سلسیوس نانو ساختارهای موجود بر اثر تبخیر آب از پیوند شیمیایی و وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون به شدت تغییر و کاهش داشته است؛ اما نسبت به نمونه بتن معمولی این ساختارها تحت دمای زیاد پایدار مانده است.

دمای زیاد سبب آسیب جدی به اسکلت و ساختار نمونه می‌شود. تبدیل کربنات کلسیم در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس به گاز دی‌اکسید کربن و اکسید کلسیم موجب کاهش شدید پایداری بتن شده است. همچنین نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H نیز

۲-۳- بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره فولاد تحت تأثیر دما

مگاپاسکال شد. با شروع فرآیند حرارتی و تبخیر آب فیزیکی تحت دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها افزایش پیدا کردند. مقاومت فشاری نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 5%، C-SS 10%، C-SS 15% و C-SS 20% در این دما به ترتیب ۲۴/۵، ۲۵/۹، ۲۴/۸، ۲۴/۶ و ۲۲/۱ مگاپاسکال است. دلیل این افزایش مقاومت فشاری را می‌توان به عبور آب موجود در منافذ نسبت داد که هنگام تبخیر آب فیزیکی از قسمت‌های هیدراته نشده عبور کرده و سبب واکنش مجدد ساختار سیمان شده است. از سویی این واکنش مجدد شیمیایی موجب تشکیل نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H می‌شود.

مقاومت فشاری آزمون‌های ۲۸ روزه حاوی صفر تا ۲۰ درصد سرباره فولاد تحت دماهای ۲۵ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۵) نشان داده شده است. تحت دمای محیط مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۱۹/۲ الی ۲۴/۸ مگاپاسکال است. مقاومت فشاری در شکل (۵)، آزمون‌های C-SS 5%، C-SS 10% و C-SS 15% نسبت به نمونه بتن معمولی (C-SS 0%) افزایش داشتند؛ اما در آزمون ۲۰% C-SS افزودن ۲۰ درصد سرباره فولاد سبب افت مقاومت فشاری از ۲۲/۵ مگاپاسکال (C-SS 0%) به ۱۹/۲



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد در دماهای زیاد

ساختار اترینگایت از بین می‌رود. در حقیقت بر اثر بخار آب فیزیکی از نمونه‌ها در دمای بیش از ۱۱۰ درجه سلسیوس این ساختار تجزیه شده اما افزودن مقدار بیشتر سرباره سبب می‌شود که این ساختار رشد بیشتری پیدا کند که تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس پایدار باشد. بدین دلیل مقاومت فشاری نمونه C-SS 20% دارای افت زیادی است.

تحت دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری آزمون‌های به دلیل از بین رفتن آب آزاد و آب جذب شده در فرآیند

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که آب فیزیکی در بتن تحت دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس کاملاً متصاعد و خارج می‌شود و موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در حالت خشک نسبت به نمونه‌های در حالت اشباع می‌شود. در حقیقت مقاومت کمتر در بتن اشباع شده احتمالاً می‌تواند بر اثر وجود فشار آب موجود در منافذ جداکننده در خمیر سیمان باشد. در واقع رطوبت فشار منافذ را زیاد کرده و باعث کاهش مقاومت می‌شود [۲]. از سویی طبق نتایج SEM (شکل ۴) با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سلسیوس

بیشتری در خواص مکانیکی آن تحت دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد و دلیل آن تجزیه و آهکی شدن محصولات هیدراتاسیون است. در دماهای زیاد تخریب و تجزیه بتن که منجر به افت شدید مقاومت می‌شود، می‌تواند به علت وجود ریز ترک‌ها و رشد آن‌ها نیز صورت گیرد [۲۵، ۲۶].

به‌طور کلی در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس تجزیه نانو ساختار C-S-H باعث افزایش تخلخل و ایجاد حفره در خمیر سیمان شده و این روزه‌ها پیوسته سبب افت شدید مقاومت فشاری خواهند شد. با مقایسه نتایج به دست آمده، نمونه‌های C-SS 5%، C-SS 10%، C-SS 15% نسبت به بتن معمولی عملکرد حرارتی بهتری در تمام دماهای ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود.

۳-۳- بررسی تغییرات وزنی آزمون‌ها در معرض حرارت
 شکل (۶) درصد افت وزن نمونه‌ها تحت تأثیر حرارت زیاد را نشان می‌دهد. وزن نمونه‌های بتنی در معرض دمای زیاد به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی افت می‌کند. وزن تمامی آزمون‌های که در دمای محیط قرار گرفتند به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. با شروع فرایند حرارتی و تبخیر آب آزاد و سطحی نمونه‌ها روند افت وزن آغاز می‌شود. در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزن همه آزمون‌ها کمتر از ۱ درصد است. به‌طور کلی در دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس آب آزاد و آب حفره‌ای از بتن خارج می‌شود و در این محدوده دمایی این پدیده عامل افت وزن است [۲۷].

طبق شکل (۶) درصد کمتر از ۱۵٪ سرباره فولاد در بتن موجب افت وزن کمتری نسبت به بتن معمولی می‌شود و افزودن ۲۰ درصد سرباره فولاد سبب افت وزن بیشتری شده است. به‌طور کلی در دماها کمتر از ۲۰۰ درجه سلسیوس به دلیل از دست رفتن رطوبت سطحی افت وزن رخ می‌دهد. با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سلسیوس میزان افت وزن نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 5%، C-SS 10%، C-SS 15% و C-SS 20% به ترتیب ۱/۷۹، ۰/۸۵، ۱/۰۸، ۱/۴ و ۲/۱ درصد است. افزایش میزان افت وزن نمونه‌ها در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نرخ سریع‌تری دارد. تبخیر آب میان لایه‌های نانو ساختار C-S-H و C-A-Fe-H تقریباً از دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس شروع می‌شود؛ زیرا در این دما تجزیه و شکست جزئی نانو ساختار C-S-H و C-A-Fe-H

هیدراتاسیون و کاهش نیروهای واندروالسی در نانو ساختار C-S-H کاهش می‌یابد [۱]. افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس سبب بهبود مقاومت فشاری کلیه طرح‌ها نسبت به دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 5%، C-SS 10%، C-SS 15% و C-SS 20% تحت دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۸، ۵/۳، ۸/۱، ۱۲/۹ و ۱۴/۶ درصد افزایش داشته است؛ اما مقاومت فشاری همین آزمون‌ها نسبت به آزمون‌های تحت دمای محیط قرار گرفته به ترتیب ۴، ۳/۶، ۴/۶، ۵/۲ و ۲/۱ درصد افت داشته است.

با افزایش دما به بیش از ۲۰۰ درجه سلسیوس و تبخیر آب‌های آزاد و فیزیکی تنش‌های ناشی از بخار آب کاهش می‌یابد و موجب افزایش مقاومت فشاری در حالت خشک می‌شود.

مقاومت فشاری آزمون C-SS 0% تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به اوج خود رسیده و پس از این دما روند کاهش مقاومت فشاری را دارد. مقاومت فشاری نمونه‌های C-SS 0%، C-SS 5%، C-SS 10%، C-SS 15% و C-SS 20% تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲۳/۱، ۲۴/۸، ۲۴/۲، ۲۳/۴ و ۱۹/۷ مگاپاسکال است.

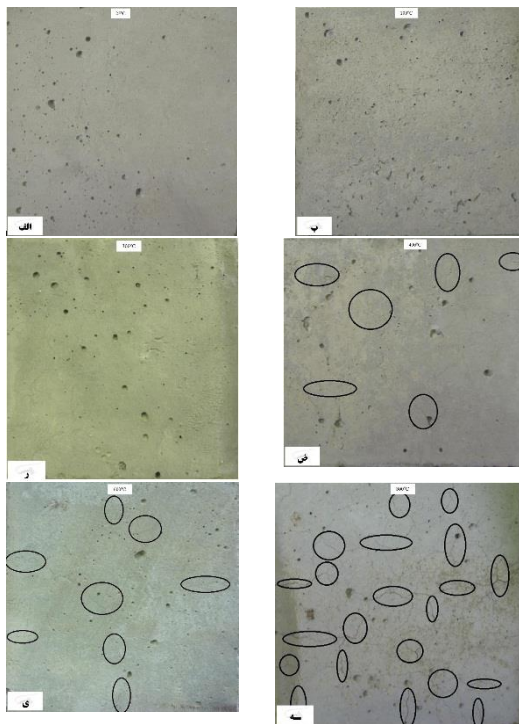
در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس تغییرات فیزیکی و شیمیایی شروع شده و باعث تجزیه آب از نانو ساختار C-S-H می‌شود، زیرا تجزیه شدن نانو ساختار C-S-H به دلیل تبخیر رطوبت و همچنین انبساط سنگ‌دانه‌ها در این دما اتفاق می‌افتد [۲۴]. آزمون‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد روند افزایش مقاومت فشاری را تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس ادامه داده و پس از این دما دچار کاهش مقاومت فشاری می‌شوند.

برای آزمون‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس و برای نمونه حاوی ۲۰ درصد سرباره دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به عنوان نقطه عطف دمایی در نظر گرفته می‌شود. این افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی سرباره فولاد طبق (شکل-۴) به دلیل پایداری نانو ساختارهای C-S-H، C-S-Fe- و H و C-A-Fe-H تحت دمای زیاد است.

تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها کاهش یافته است. میزان انقباض و انبساط هم‌زمان نمونه‌ها باعث خراب شدن پیوند سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان در دماهای زیاد می‌شود. در صورت استفاده از مصالح سنگ آهکی در بتن، افت

۴-۴- تأثیر حرارت بر ویژگی‌های ظاهری بتن

شکل (۷) تصاویری از ترک‌های ایجاد شده بر روی سطح نمونه‌ها در معرض دمای زیاد نشان داده است. با استفاده از بازرسی‌های چشمی می‌توان میزان خسارات وارده را تا حدودی پیش‌بینی کرد. بررسی تعداد، عمق و طول ترک‌های سطحی که بر اثر حرارت‌های زیاد در بتن ایجاد می‌شود، بسیار کاربردی خواهد بود. جایگزین کردن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره فولاد موجب شد که شروع ترک‌های سطحی تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به تأخیر انداخته شود و شروع ترک‌ها از دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس آغاز شود؛ اما شروع ترک‌های سطحی برای بتن معمولی از دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس است.



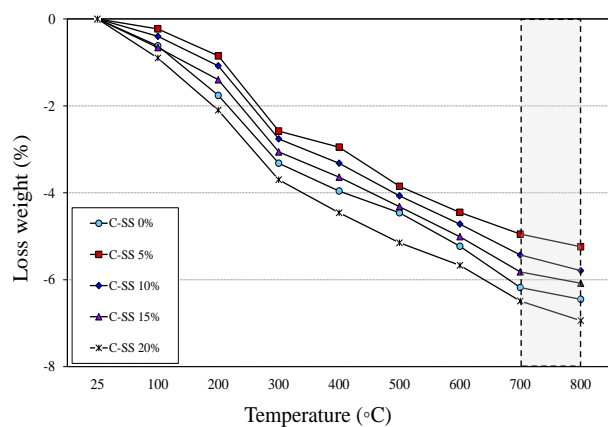
شکل ۷- تغییرات ظاهری بتن تحت حرارت (الف) نمونه بتن معمولی تحت دمای محیط (ب) نمونه 10% C-SS در دمای ۱۰۰°C (ر) نمونه 15% C-SS در دمای ۳۰۰°C (ض) نمونه بتن معمولی در دمای ۴۰۰°C (ی) نمونه 10% C-SS در دمای ۶۰۰°C (ه) نمونه 10% C-SS در دمای ۸۰۰°C

افزایش دما اثر مستقیم بر افزایش تعداد، عمق و طول ترک‌ها دارد؛ اما استفاده از سرباره فولاد به دلیل نقطه ذوب بالا سبب کاهش رشد ترک‌های بتن شده است. عمدتاً ترک‌ها بر اثر تغییرات حجمی سنگ‌دانه‌ها، تبخیر آب منفذی و پیوندی و همچنین فشار ناشی از

آغاز شده و این پدیده انسجام و پیوستگی خمیر سیمان را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۵].

در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس نرخ افت وزن بتن کمتر می‌شود و این پدیده در نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره مشهودتر است. درصد افت وزنی نمونه 5% C-SS تحت دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس ۲/۹۵٪ است که دارای کمترین میزان افت درصد وزنی در میان سایر آزمون‌ها است. در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس به دلیل تجزیه ساختار پرتلندیت و کربناسیون افت وزن زیادی رخ می‌دهد. روند افت وزن آزمون‌ها تا دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس ادامه دارد. افت وزن در محدوده دمای ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس به دلیل تجزیه شدید خمیر سیمان و تبخیر آب پیوندی است [۲۸].

میزان افت وزن نمونه‌های 0% C-SS، 5% C-SS، 10% C-SS، 15% C-SS و 20% C-SS تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶/۴۵، ۵/۲۴، ۵/۷۹، ۶/۰۸ و ۶/۹۴ درصد است. به‌طور کلی در محدوده دمای ۵۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس افت وزن به دلیل تجزیه آب فیزیکی و آب درون حفره‌ای، آزاد و سطحی (دی‌هیدراتاسیون) است. تحت دمای ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس کاهش وزن بر اثر تجزیه ساختار پرتلندیت رخ داده است. از دمای ۵۵۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس کاهش وزن به دلیل کربناسیون و فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون است. در نهایت در دمای بیش از ۸۰۰ درجه سلسیوس کاهش وزن به دلیل تجزیه آب از نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H تشکیل اکسید کلسیم در ساختار کلی نمونه‌ها است.



شکل ۶- درصد افت وزن نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد در دماهای مختلف

تبخیر آب رخ می‌دهد [۲۹]. بیشترین تعداد ترک‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس رخ داده است. رشد ترک‌ها در دمای زیاد نیز می‌تواند بر اثر تجزیه آب از پیوند شیمیایی (فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون) و تجزیه نانو ساختار C-S-H و C-A-Fe-H باشد. در نتیجه فروپاشی داخلی و ضعف در اسکلت باربر نمونه رخ می‌دهد. به دلیل افزایش محصولات هیدراتاسیون و انبساط حرارتی کم دانه‌های سرباره جایگزینی درصدی از سرباره فولاد سبب کاهش چشم‌گیر ترک‌ها می‌شود.

شکل (۷-ب) نمونه حاوی ۱۰ درصد سرباره تحت دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. پس از حذف آب آزاد از نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس حفره‌های کوچکی بر روی سطح نمونه مشاهده می‌شود. با افزایش درجه حرارت حفره‌ها و ترک‌های سطحی به علت فرآیند دی‌هیدراتاسیون و دی‌هیدروکسیلاسیون افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهای دیگر که به صورت چشمی در محل بررسی می‌شود، رنگ بتن است. رنگ تمام نمونه‌های در دمای ۲۵ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس خاکستری است. با افزایش دما تا دمای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس رنگ نمونه‌های حاوی سرباره فولاد مایل به زرد می‌شود. در حالی که در دمای ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس نمونه‌های بتن معمولی دارای همان رنگ خاکستری است. با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سلسیوس رنگ نمونه‌ها روشن‌تر شده و به خاکستری روشن (مایل به سفید) تغییر می‌کند. در تحقیقات مختلفی به تغییرات رنگ بتن زمانی که در معرض حرارت‌های زیاد بود اشاره شده است. این تغییرات رنگ اغلب به دلیل تغییرات شیمیایی خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها است. همچنین وجود سنگ‌دانه‌های سیلیکاتی در بازه دمایی ۳۰۰ الی ۶۰۰ درجه سبب ایجاد رنگ قرمز خواهد شد [۳۰].

برای آزمون‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس و برای نمونه حاوی ۲۰ درصد سرباره دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به عنوان نقطه عطف دمایی در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس تجزیه نانو ساختار C-S-H باعث افزایش تخلخل و ایجاد حفره در خمیر سیمان شده و این روزنه‌ها پیوسته سبب افت شدید مقاومت فشاری خواهند شد. با مقایسه نتایج به دست آمده، نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد نسبت به بتن معمولی عملکرد حرارتی بهتری در تمام دماهای ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس دارند.

در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه با ۵ درصد سرباره فولاد و برابر با ۲۳/۱ مگاپاسکال است. بر طبق تصاویر SEM و آنالیز EDS در دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس با افزایش نسبت Ca/Si و تجزیه نانو ساختار C-S-H که سبب افزایش تخلخل، تشکیل حفره و تبدیل کربنات کلسیم به اکسید کلسیم است که منجر به افت شدید مقاومت بتن شده است. به‌طور کلی در محدوده دمای ۵۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس افت وزن به دلیل تجزیه آب فیزیکی و آب درون حفره‌ای، آزاد و سطحی (دی‌هیدراتاسیون) است. تحت دمای ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سلسیوس کاهش وزن بر اثر تجزیه ساختار پرتلندیت رخ داده است. از دمای ۵۵۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس کاهش وزن به دلیل کربناسیون و فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون است. در نهایت در دمای بیش از ۸۰۰ درجه سلسیوس کاهش وزن به دلیل تجزیه آب از نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H تشکیل اکسید کلسیم در ساختار کلی نمونه‌ها است.

۵- منابع

- [1] Khaliq, W., Mechanical and physical response of recycled aggregates high-strength concrete at elevated temperatures. Fire safety journal, 2018. 96: p. 203-214.
- [2] 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, 2019. 12(4): p. 69-80.
- [3] Park, S.M., J.G. Jang, N. Lee, and H.-K. Lee, Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures. Cement and Concrete Research, 2016. 89: p. 72-79.

۴- نتیجه‌گیری

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

مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۵ درصد سرباره فولاد نسبت به نمونه بتن معمولی افزایش داشتند. دلیل این افزایش بر اساس تصاویر SEM، تراکم بیشتر نانو ساختارهای C-S-H و C-A-Fe-H و هیدروکسید آهن FeO(OH) است. سرباره فولاد می‌تواند به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان مورد استفاده قرار گیرد، بدون آن‌که مقاومت فشاری را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

- [16] Berenjjan, J., N. Tila, M.J. Taheri Amiri, and A. Ashrafiyan, 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.
- [17] Amiri, M. and M. Aryanpour, Assessment of the Geopolymer Concrete Performance Compared to Conventional Concrete at High Temperatures from Microstructural Perspective. *Modares Civil Engineering journal*, 2020. article in press.
- [18] ASTM, American Society for Testing and Materials. 2004.
- [19] EN, B., 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. British Standards Institution, 2002.
- [20] 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.
- [21] Kriskova, L., Y. Pontikes, Ö. Cizer, G. Mertens, W. Veulemans, D. Geysen, P.T. Jones, L. Vandewalle, K. Van Balen, and B. Blanpain, Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags. *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(6): p. 778-788.
- [22] 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: p424-414
- Arioz, O., Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire safety journal*, 2007. 42(8): p. 516-522.
- [23] Ouypornprasert, W., N. Traitruengtatsana, and K. Kamollertvara. Optimum Partial Replacement of Cement by Rice Husk Ash and Fly Ash Based on Complete Consumption of Calcium Hydroxide. 2018. Cham: Springer International Publishing.
- [24] Vieira, J., J. Correia, and J. De Brito, Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 2011. 41(5): p. 533-541.
- [25] Behnood, A. and M. Ghandehari, Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 2009. 44(8): p. 1015-1022.
- [5] Wang, X., W. Ni, J. Li, S. Zhang, M. Hitch, and R. Pascual, Carbonation of steel slag and gypsum for building materials and associated reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 2019. 125: p. 105893.
- [6] 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.
- [7] Gartner, E., J. Young, D. Damidot, and I. Jawed, Hydration of Portland cement. Structure and performance of cements, 2002. 2: p. 57-113.
- [8] Carlson, E.T., Action of water on calcium aluminoferrites. *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry*, 1964. 68(5): p. 453.
- [9] Carlson, E.T., Some properties of the calcium aluminoferrite hydrates. Vol. 6. 1966: US Government Printing Office.
- [10] Tüfekçi, M., A. Demirbaş, and H. Genc, Evaluation of steel furnace slags as cement additives. *Cement and Concrete Research*, 1997. 27(11): p. 1713-1717.
- [11] Liu, J. and D. Wang, Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete. *Powder technology*, 2017. 320: p. 230-238.
- [12] Wang, S., G. Zhang, B. Wang, and M. Wu, Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 271: p. 122590.
- [13] Subathra Devi, V., M. Madhan Kumar, N. Iswarya, and B.K. Gnanavel, Durability of Steel Slag Concrete under Various Exposure Conditions. *Materials Today: Proceedings*, 2020. 22: p. 2764-2771.
- [14] Houaria, M.B.A., M. Abdelkader, C. Marta, and K. Abdelhafid, Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature. *Energy Procedia*, 2017. 139: p. 725-730.
- [15] Maanser, A., A. Benouis, and N. Ferhoune, Effect of high temperature on strength and mass loss of admixed concretes. *Construction and Building Materials*, 2018. 166: p. 916-921.

- [26] Castillo, C., Effect of transient high temperature on high-strength concrete. 1987.
- [27] Ramachandran, V.S. and R.F. Feldman, Concrete science, in Concrete Admixtures Handbook. 1996, Elsevier. p. 1-66.
- [28] Tshimanga, M.K., Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons. Revue Européenne de Génie Civil, 2006. 10(8): p. 1011-1011.
- [29] Mydin, M.O., N.M. Zamzani, and A.A. Ghani, Experimental data on compressive and flexural strengths of coir fibre reinforced foamed concrete at elevated temperatures. Data in brief, 2019. 25: p. 104320.
- [30] Short, N., J. Purkiss, and S. Guise, Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. Construction and building materials, 2001. 15(1): p. 9-15.

Studying the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Steel Slang exposed to High Temperature

M. Amiri *

Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.
Assistant Professor, Technical and Vocational University (TVU), Faculty of Engineering Branch, Marvdasht, Iran

A. Vatanpour Aghjeh Mashhad

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

M. Aryanpour

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

S. Ghasemi

PhD Student, Kharazmi University, Faculty of Engineering, Tehran, Iran.

Abstract

Heat, both in transient and steady state, changes the physical and chemical properties of concrete. In addition, the use of slag with Portland cement is very effective on development of concrete microstructure. The main products of hydration process are cement paste and slag, which plays important role in increasing concrete strength, C-S-H and C-A-Fe-H microstructures. Based on this, this paper has focused on the concrete containing varying degrees of steel slag in order to get a deeper perception of the changing behavior of C-S-H and C-A-Fe-H due to being exposed to high temperature. In this regard, 150 cubic samples of concrete with zero, 5%, 10%, 15% and 20% replacement of steel slag to Portland cement were treated for 28 days in a moisture bath. Then, all samples were exposed for 1 hour to 25 to 800 °C. The percentage of weight change, compressive strength and cracking behavior of samples were investigated. Furthermore, in order to evaluate the microstructural behavior of test samples in different temperatures, SEM photos and EDS were used. Based on the results, the behavior of concrete samples depends on the variations of C-S-H and C-A-Fe-H microstructures under high temperature. The compressive strength of samples containing 5 to 15% steel slag increased as compared to conventional concrete sample. Based on SEM photos, the reason for this increase is higher density of C-S-H and C-A-Fe-H microstructures and FeO(OH).

Keywords: Steel Slang, High Temperature, Compressive Strength, SEM.

* Corresponding Author: amirii@hormozgan.ac.ir

