

مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی پودر میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی در شرایط پس از دماهای بالا

قاسم پاچیده

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

مجید قلهکی*

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

امین مشتاق

مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران.

چکیده

در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد پس از حرارت ملات‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی پرداخته شد. بدین منظور نمونه‌های ملات در قالب‌های استاندارد جهت انجام تست مقاومت فشاری، کششی و خمشی حاوی ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد پوزولان به‌عنوان جایگزین سیمان مصرفی ساخته شد. همچنین به‌منظور انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ افزایش دمای استاندارد قرار گرفته و پس از اتمام فرآیند حرارت دهی و سرد شدن نمونه‌ها، آزمایش‌های لازم بر روی هر یک انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیر استفاده از سرباره کوره آهن گدازی و میکروسیلیس به ترتیب در دماهای پایین (تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و دماهای بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر) با رشد ۷۳٪ و ۱۸۰٪ مقاومت فشاری، ۴۵٪ و ۱۰۰٪ مقاومت کششی و ۱۰۶٪ و ۱۱۲٪ مقاومت خمشی قابل‌مشاهده است. همچنین با افزایش دما، اندازه دانه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی در آزمایش XRD، دچار افت کمتری تا حدود ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است.

واژه‌های کلیدی: ملات سیمانی، میکروسیلیس، سرباره کوره آهن گدازی، حرارت، آزمایش XRD.

* نویسنده مسئول: mgholhaki@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

تعداد زیادی مطالعات در زمینه استفاده از پودر شیشه بازیافتی، سرباره کوره آهن‌گدازی و زئولیت طبیعی در بتن به جهت بهبود کارایی، خصوصیات مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی و دوام آن انجام شده است. در چند دهه اخیر، افزودن مواد معدنی به بتن مانند پودر شیشه بازیافتی، سرباره کوره آهن‌گدازی و زئولیت طبیعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است و به تدریج در پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار گرفته است. زیرا ترکیب این افزودنی‌های مواد معدنی، باعث کاهش هزینه تولید، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی محیط‌زیست [۱۷-۱۴] و همچنین باعث افزایش مقاومت بتن در برابر مواد شیمیایی مضر و کاهش نفوذپذیری آن می‌شود [۲۱-۱۸]. استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به‌طور فزاینده‌ای در سازه‌های بزرگ مهندسی عمران گسترش یافته است. علاوه بر مزایای اقتصادی و محیطی، تعدادی از مزایای ساخت در نشریات گزارش شده است [۲۰ و ۲۲ و ۲۳]، از جمله الف) بهبود خواص تازه بتن مانند روانی و تراکم‌پذیری آسان‌تر، ب) کاهش تدریجی حرارت هیدراتاسیون و پ) کاهش نفوذ یون کلراید و...

Chaipanicha و همکاران [۲۴] به بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی به ملات سیمانی حاوی سیمان پرتلند معمولی و سیمان حاوی میکروسیلیس پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی و فشاری ملات سیمانی حاوی میکروسیلیس بیشتر از ملات حاوی سیمان پرتلند معمولی است. همچنین با افزودن نانولوله‌های کربنی به ملات، مقاومت‌ها افزایش بیشتری داشته به‌طوری‌که مقدار استفاده ۰/۵ درصد از نانولوله کربنی، به‌عنوان درصد بهینه در ملات انتخاب شد.

Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۵] سعی در بهبود مقاومت نفوذپذیری ملات‌های سیمانی با افزودن نانوسیلیسیوم و میکروسیلیس به‌عنوان ماده محافظ سطح نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیلیسیوم و میکروسیلیس با ایجاد سطح یکپارچه بر روی ملات، مقاومت بسیار عالی در برابر نفوذ از خود به‌جای می‌گذارند. همچنین می‌توان با طراحی مواد سیمانی، ملات‌های سیمانی مقاوم در برابر فرسایش زیست‌محیطی نیز تولید نمود.

Jiang و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۶] با تحقیق بر روی ملات‌های سیمانی حاوی پلی‌اکریلیک استر و میکروسیلیس به این نتیجه دست‌یافتند که افزودن این دو ماده به ملات باعث مقاومت

میکروسیلیس یک ترکیب معدنی معمولی با مقاومت نهایی و سطح ویژه بالا و فعالیت پوزولانی در مواد سیمانی است [۳-۱]. افزودن میکروسیلیس به ملات‌های سیمانی باعث کاهش تخلخل و افزایش عملکرد مکانیکی ملات می‌شود [۵ و ۴]. همچنین افزودن میکروسیلیس باعث بهبود خصوصیات دوام از جمله مقاومت سولفات، نفوذپذیری آهن کلرید و مقاومت یخ‌زدگی می‌شود [۸-۶].

در سال ۱۹۹۹ تحقیقاتی توسط Aköz و همکاران [۹] تحت عنوان تأثیر دمای محیط اسیدی سولفات سدیم و سولفات منیزیم بر روی مقاومت ملات‌های با و بدون میکروسیلیس بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای محلول اسیدی باعث شتاب بخشی به سرعت تخریب داخلی ملات گشته و همچنین باعث بهبود برخی خواص نیز شده است.

Leung و همکاران [۱۰] تأثیر افزودن خاکستر بادی و میکروسیلیس به ملات‌های سیمانی خودتراکم را بررسی نمودند. این تحقیق نشان داد که استفاده از میکروسیلیس و خاکستر بادی در ملات سیمانی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ باعث کاهش حجم حفرات داخل ملات می‌شود. Siddique [۱۱] بیان کرد که با افزایش میزان خاکستر بادی، خاصیت اشباع ملات خودتراکم افزایش می‌یابد.

به‌تازگی مطالعات بسیاری بر روی رفتار ملات‌های با عملکرد بالا در دماهای بالا انجام شده است. بر طبق تحقیقات Yuzeer و همکاران [۱۲]، درجه حرارت بالا موجب آسیب‌دیدگی و کاهش خواص مکانیکی ملات با و بدون میکروسیلیس گردید. به‌ویژه نمونه‌هایی که در آب خنک شدند، کاهش قابل توجهی در مقاومت مکانیکی آن‌ها در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد [۱۳]. Chan و همکاران [۱۴] به این نتیجه دست‌یافتند که مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا، در دماهای بالا به‌ویژه زمانی که نمونه‌ها تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین اثر دما بر مقدار مدول الاستیسیته مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری می‌باشد.

C'ulfik و همکاران [۱۳] اظهار داشتند که مقاومت خمشی ملات‌ها در دماهای بالا تحت تأثیر مقاومت فشاری‌شان است.

در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده، به بررسی خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی ملات‌های سیمانی حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس در مقادیر مختلف در شرایط پس از دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته شد. در نهایت آزمایش‌ها XRD (آزمایش پراش اشعه ایکس) جهت بررسی میکروساختار آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل به صورت رابطه ریاضی درجه اول ارائه گردید.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله تعداد در مجموع ۳۷۸ عدد نمونه مکعبی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر جهت انجام تست مقاومت فشاری، نمونه منشوری به ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی‌متر جهت انجام تست مقاومت کششی و نمونه پایونی (بریکت) برای انجام تست مقاومت کششی در مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزین سیمان در ملات سیمانی ساخته شد. نمونه‌ها با نرخ رشد ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، در دماهای ۲۵ (دمای معمولی)، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند.

۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

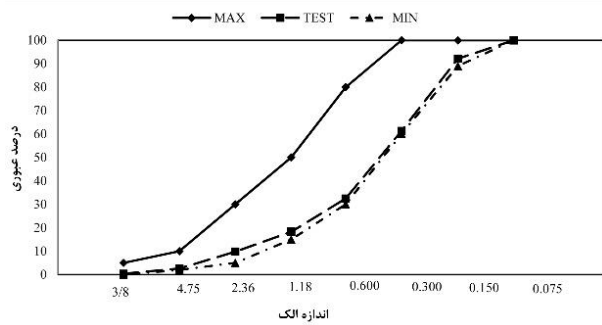
سیمان استفاده شده در اختلاط ملات، از نوع تیپ ۲ (پرکاربردترین و مناسب‌ترین نوع سیمان در شرایط محیطی معمولی) تولیدی کارخانه سیمان شاهرود و ماسه مصرفی نیز از نوع طبیعی دو بار شور تیز گوشه با ضریب نرمی ۲/۷۶، وزن مخصوص ۲/۷ و درصد جذب آب ۲/۸ درصد می‌باشند. همچنین آب مصرفی در ساخت ملات، آب شرب شهر تهران بوده است و روان کننده مصرفی نیز از نوع ابر روان کننده کربوکسیلاتی رده C20 تولیدی کارخانه بتن شیمی خاتم می‌باشد. پوزولان‌های استفاده شده شامل میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب از کارخانه فروسیلیس شهر سمنان و کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شدند. جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت ملات‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات شیمیایی پوزولان‌ها و سیمان استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است.

محصورشدگی بالاتر، افت و جمع شدگی کمتر، مقاومت فرسایشی بالاتر و... نسبت به ملات بدون پلی‌اکریلیک استر و میکروسیلیس می‌شود. همچنین با افزودن ۳۰ درصد وزنی سیمان پلی‌اکریلیک استر و ۱۰ درصد وزنی سیمان میکروسیلیس، مقاومت فرسایشی ملات به حدود ۳۷ کیلوگرم بر مترمربع رسیده که در حدود ۵۳ درصد بیش‌تر از نمونه شاهد است.

تولید سیمان‌های آمیخته در اروپا به دلیل مسائل پایداری افزایش یافته است [۲۷]. به‌طور خاص، سرباره کوره آهن‌گدازی به‌عنوان یکی از عناصر اغلب مورد استفاده در اروپا است که اثرات مثبت آن بر بتن و ملات به‌خوبی شناخته شده است. به‌عنوان مثال، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی در محیط‌های تهاجمی مانند مناطق ساحلی توصیه می‌شود [۲۸]. سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند سطح کافی برای تشکیل هسته فرآورده‌های هیدراتاسیون را نیز فراهم کند [۲۹]. یکی از معایب سیمان‌های ساخته شده از سرباره کوره آهن‌گدازی، مقاومت کربناسیون پایین آن‌ها به‌ویژه در زمانی که در سنین کم عمل‌آوری به کار گرفته شوند، می‌باشند [۳۰-۳۳].

Aydın در سال ۲۰۰۸ [۳۴] به بررسی تأثیر افزایش دمای بالاتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی ملات‌های سیمانی ساخته شده با پومیس حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی پرداخت. مقاومت فشاری و خمشی ملات‌های ساخته شده پس از قرار گرفتن در دماهای بالا بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی به ملات ساخته شده با پومیس، مقاومت آن بیش‌تر از حالتی است که از سرباره استفاده نشده باشد. همچنین در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری ملات‌های حاوی ۸۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی تنها حدود ۲۳ درصد مقاومت را کاهش داده اما در حالتی که از سرباره استفاده نشد، مقاومت فشاری تا ۷۰ درصد نسبت به دمای معمولی کاهش یافت.

هنگامی که سرباره کوره آهن‌گدازی با سرعت در آب غوطه‌ور می‌شود، به ساختار دانه‌های شیشه‌ای شکل تبدیل می‌شوند. سرد شدن سریع سرباره، ساختارهای بلوری را به حداقل رسانده و سرباره مذاب را به ذرات جامد بزرگ تبدیل کرده که متشکل از مواد غیرمرسوم می‌باشند. به دلیل مقادیر بالای سیلیس و آلومینا در یک حالت خاص، سرباره‌های کوره آهن‌گدازی رفتاری مشابه پوزولان‌های طبیعی از خود نشان می‌دهند [۳۵].



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی در بتن

سیمان	تیپ ۲ (شاهرود)
ماسه	دوبارشور
آب	آب شرب شهر تهران
روان کننده	ابر روان ساز کربوکسیلاتی (C20)
میکروسیلیس	کارخانه فروسیلیس سمنان
سرباره کوره	کارخانه ذوب آهن اصفهان
آهن گدازی	

جدول ۲- آنالیز شیمیایی پوزولان‌ها و سیمان استفاده شده

ترکیب	سرباره کوره	میکروسیلیس	سیمان
H ₂ O	۷-۱	۰/۸	-
SiC	-	۰/۵	-
C	-	۰/۳	-
SiO ₂	۴۰-۳۴	۹۶/۴	۲۱/۱۱
Fe ₂ O ₃	۱/۳-۰/۳	۰/۸۷	۳/۹۶
Al ₂ O ₃	۱۱-۷	۱/۳۲	۴/۴۲
CaO	۴۰-۳۴	۰/۴۹	۶۳/۳۶
MgO	۹-۶	۰/۹۷	۱/۵۱
Na ₂ O	۰/۷۵-۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۳۲
K ₂ O	۱/۳-۰/۳	۱/۰۱	۰/۵۱
P ₂ O ₅	-	۰/۱۶	۰
SO ₃	-	۰/۱۰	۲/۷۰
CL	-	۰/۰۴	۰
S	۱/۵-۰/۹	-	۰
C ₃ S	-	-	۵۳
C ₂ S	-	-	۲۰/۸
C ₃ A	-	-	۵

۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۳ که جزئیات طرح‌های اختلاط ملات را نشان می‌دهد، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شد. در نهایت تمامی طرح‌ها در قالب سه تست مقاومت فشاری، کششی و خمشی تحت دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند.

جدول ۳- خلاصه طرح‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)

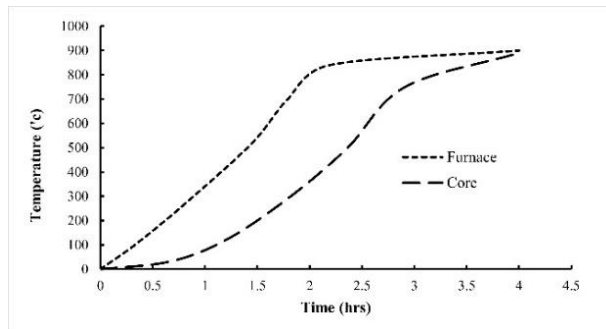
نام طرح	ماسه	آب	سیمان	M	S	روان کننده
A	۱۱۷۰	۲۸۰	۷۰۰	۰	۰	۰/۷
M7	۱۱۷۰	۲۸۰	۶۵۱	۴۹	۰	۱/۹۶
M14	۱۱۷۰	۲۸۰	۶۰۲	۹۸	۰	۳/۹۲
M21	۱۱۷۰	۲۸۰	۵۵۳	۱۴۷	۰	۵/۸۸
S7	۱۱۷۰	۲۸۰	۶۵۱	۰	۴۹	۱/۹۶
S14	۱۱۷۰	۲۸۰	۶۰۲	۰	۹۸	۳/۹۲
S21	۱۱۷۰	۲۸۰	۵۵۳	۰	۱۴۷	۵/۸۸

همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، نمونه شاهد (نمونه‌ای که هیچ‌گونه پوزولانی در آن بکار نرفته باشد) با حرف A و نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی به ترتیب با حرف M و S نشان داده شده‌اند. اعداد مقابل حرف M و S نمایانگر درصد جایگزینی آن‌ها با سیمان در اختلاط ملات می‌باشند.

۲-۳- روش آزمایش

نحوه اختلاط و عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C192 پس از ۲۸ روز قرارگیری در حوضچه آب انجام شدند. ابتدا به میزان موردنظر (طبق طرح اختلاط جدول ۳) مخلوط ملات به همراه پوزولان و ابر روان‌کننده ساخته شد، سپس فرایند نمونه‌گیری در نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر جهت

بر روی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن، آزمایش دانه‌بندی انجام شد. بر طبق این پژوهش، به ذرات عبوری از الک نمره ۴ ماسه اطلاق می‌شود. با توجه به اینکه در ملات‌های سیمانی صرفاً می‌توان از ماسه استفاده نمود، بنابراین تنها مصالح سنگی به کاررفته در اختلاط ملات، ماسه بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سنگ‌دانه‌ها از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده و محدوده وسیعی از اندازه‌ها را در بر گرفته است.



شکل ۲- نرخ تغییرات دمای داخل کوره و مرکز بتن نسبت به زمان



شکل ۳- فضای داخلی کوره الکتریکی

پس از اتمام عملیات حرارتی و سرد شدن کامل نمونه‌ها، کلیه نمونه‌ها در زیر جک، تحت آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۳۶] انتخاب گردید. در شکل ۴، تصاویر برخی از نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تبخیر قسمتی از آب و خمیر سیمان، حفرات و ترک‌های متعددی در داخل نمونه‌ها ایجاد شده و جدایش بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها به وضوح قابل مشاهده است که این پدیده سبب کاهش مقاومت و دوام نمونه‌ها خواهد شد.



الف) رشد ترک در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) ب) رشد ترک در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

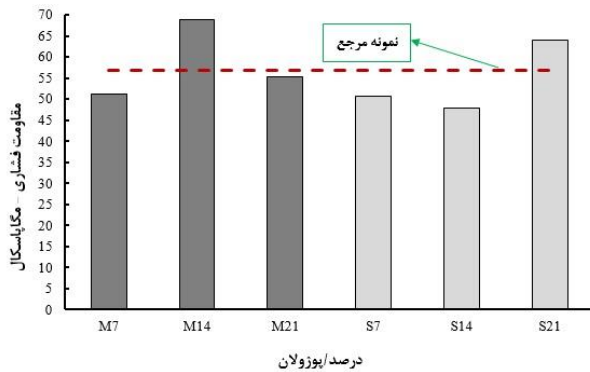
شکل ۴- نحوه رشد ترک در نمونه‌ها

انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی‌متر جهت انجام تست مقاومت خمشی و نمونه‌های پایونی (بریکت) برای انجام تست مقاومت کششی (برای هر دما و هر تست، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شدند. قالب‌ها، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار ویرنه گردیدند. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و داخل حوضچه آب (دمای حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفته‌اند و پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه آب خارج و سپس در کوره الکتریکی قرار داده شدند.

پس از اتمام فرایند عمل‌آوری نمونه‌ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره الکتریکی به ترتیب ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد موردبررسی قرار گرفت. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای موردنظر برابر ۵ درجه سانتی‌گراد بر هر دقیقه انتخاب گردید. به منظور حصول اطمینان از رسیدن تمامی قسمت‌های بیرونی و داخلی نمونه‌ها به دمای موردنظر، برای هر دما به تعداد ۲ عدد نمونه آزمایشی ساخته شد و در مرکز آن ترموکوپل سری K با قابلیت رسیدن به حداکثر دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، قرار داده شد. طبق نتایج به دست آمده به‌طور میانگین بسته به شدت دمای اعمالی به نمونه حدود ۶۰ دقیقه زمان صرف شد تا تمام قسمت‌های بتن به دمای موردنظر برسد. شکل ۲ نرخ تغییرات دمای داخل کوره و مرکز نمونه‌های بتنی را برحسب ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حدفواصل زمانی بین رسیدن دمای داخل کوره و مرکز بتن به دمای موردنظر، حدود یک ساعت به طول انجامید. بنابراین نمونه‌ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای موردنظر، به منظور اینکه قسمت درونی ملات نیز به دمای موردنظر برسد و تمام قسمت‌های نمونه هم‌دما شود، در همان دما باقی ماندند. به علت اینکه کاهش دمای نمونه‌ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت یک ساعت نیز در حالت خاموش قرار گرفته و سپس درب کوره به آرامی و به تدریج باز شد و پس از چند دقیقه نمونه‌ها خارج شدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه‌ها هنگام سرد شدن می‌گردد. شکل ۳ فضای داخلی کوره الکتریکی با مشخصات مدل A160 شرکت ATBIN که به صورت سه فاز کار می‌کند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، دهانه ورودی کوره الکتریکی به ابعاد ۴۵×۴۵ سانتی‌متر به عمق ۶۵ سانتی‌متر است که دما را به صورت یکنواخت از دیواره‌ها و کف توزیع می‌کند.

۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

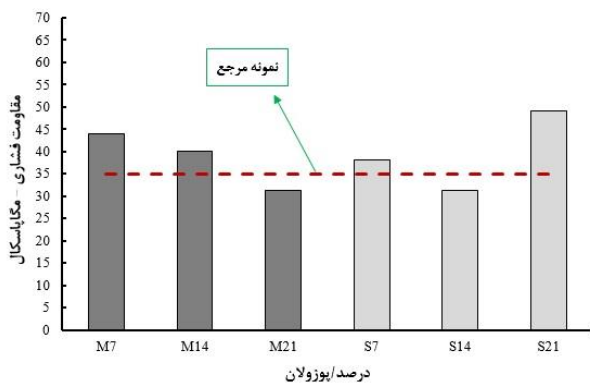
با توجه به اینکه در این مقاله رفتار پس از حرارت نمونه‌ها بایستی بررسی شود، بنابراین هنگامی که نمونه‌ها از داخل کوره الکتریکی خارج شدند، حدود ۲۴ ساعت صبر کرده تا دمای داخلی ملات به حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسیده و سپس مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.



شکل ۵- مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM C109 انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به بعد ۵ سانتی‌متر توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. اشکال ۵ تا ۱۰ روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها به تفکیک دماهای مختلف را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های M14 و S21 به ترتیب دارای مقاومتی تا ۱/۲۱ و ۱/۱۳ برابر نمونه مرجع می‌باشند. اما در سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری کمتر از نمونه شاهد



شکل ۶- مقاومت فشاری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

همان‌طور که از شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها بجز نمونه S14 بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در نمونه‌های M7، M14، M21، S7 و S21 مقاومت فشاری به ترتیب ۶۴، ۵۵، ۲۴، ۲۳ و ۷۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. بنابراین با استفاده از مقادیر ۷ درصد میکروسیلیس و ۲۱ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی در ملات‌های سیمانی، می‌توان انتظار مقاومت بسیار بالایی از ملات (نسبت به حالت بدون استفاده از پوزولان) داشت. لازم به ذکر است که با افزایش دما از ۲۵ به ۱۰۰ و سپس به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به تدریج مقاومت فشاری نمونه‌ها رو به افزایش نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت استفاده از میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در شرایط پس از حرارت مقاومت بهتری را نسبت به حالتی که تنها ماده چسباننده در ملات سیمان باشد، ارائه می‌دهد.

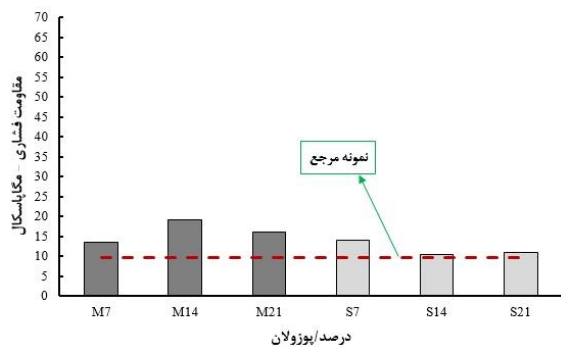
با توجه به نتایج به‌دست آمده از تست مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۸)، تقریباً روندی مشابه تغییرات مقاومت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شده است. به‌طوری‌که همچنان استفاده از ۱۴ درصد میکروسیلیس در ملات، مقاومت فشاری را کاهش داده است. در سایر نمونه‌ها روند افزایش

شده است. بنابراین درصد بهینه استفاده از میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۴ و ۲۱ درصد می‌باشد. اما در سایر نسبت‌ها که مقاومت فشاری کمتر از نمونه شاهد است، نمونه‌های حاوی میکروسیلیس از وضعیت بهتری برخوردار بوده به‌طوری‌که درصد کاهش مقاومتشان نسبت به نمونه شاهد در حدود ۱۰ و ۲ درصد بوده که این وضعیت در نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی در حدود ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشد. علت این امر را می‌توان به این مسئله مرتبط دانست که استفاده از میکروسیلیس در ملات یا بتن تقریباً تا سن ۲۸ روز به مقاومت نهایی خود رسیده اما در رابطه با استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی، در سنین بالاتر به مقاومت نهایی خود می‌رسد.

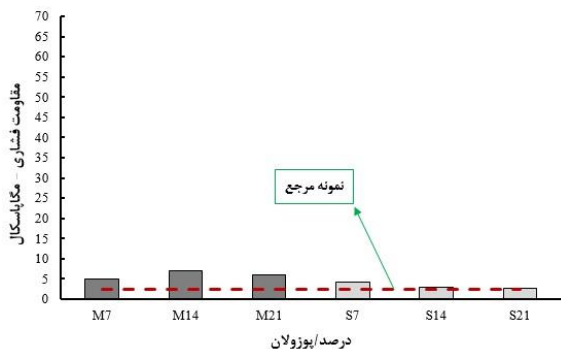
باتوجه به شکل ۶ که مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، به دلیل انجام برخی واکنش‌ها در میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها بجز M21 و S14 بیشتر از نمونه شاهد شده است. به‌طوری‌که مقاومت فشاری نمونه‌های M7، M14، S7 و S21 به ترتیب ۲۵، ۱۴، ۹ و ۴۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد.

به نمونه شاهد افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۴۳، ۱۰۲، ۶۸، ۴۷، ۹ و ۱۶ درصد افزایش داشته است. بنابراین می‌توان گفت هرچه دما افزایش یابد، نقش میکروسیلیس در افزایش مقاومت (نسبت به سرباره کوره آهن‌گدازی) نمایان‌تر خواهد بود.

شکل ۱۰ نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این دما نیز مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد از ۱۶ تا ۱۸۰ درصد افزایش یافته است. در این دما نیز در تمامی درصدها مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیش از نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد. در نهایت به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی و مقایسه‌ای از نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان به این نکته دست یافت که با افزایش دما به تدریج از ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، حضور مواد پوزولانی از جمله میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در مقادیر بکار رفته در این مقاله، باعث بهبود مقاومت فشاری نسبت به حالتی که از هیچ ماده پوزولانی استفاده نشده باشد، خواهد شد و هرچه این دما افزایش یابد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد رشد بیشتری خواهد داشت.

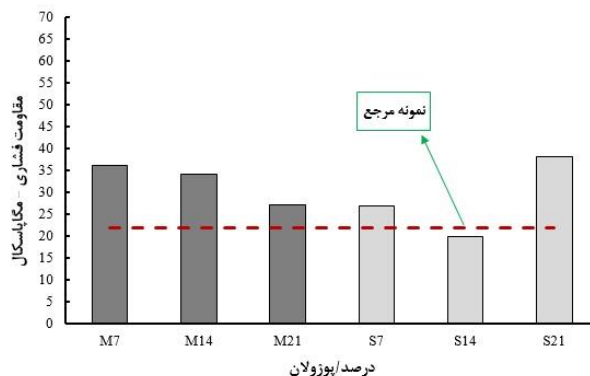


شکل ۹- مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

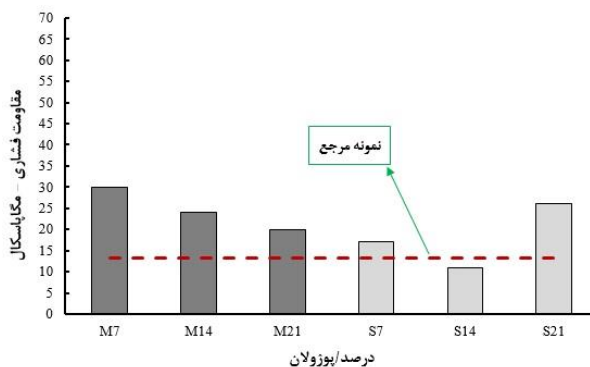


شکل ۱۰- مقاومت فشاری در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

مقاومت نسبت به نمونه شاهد رخ داده است. در نمونه‌های M7، M14، M21، S7 و S21 مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۲۸، ۸۲، ۵۲، ۳۰ و ۹۷ درصد افزایش داشته است. بنابراین می‌توان گفت هرچه دما افزایش یافته است، تأثیر افزودن پوزولان‌ها به ملات سیمانی بیشتر شده و افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷- مقاومت فشاری در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۸- مقاومت فشاری در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد

با توجه به شکل ۹ که نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد، کلیه نمونه‌ها در این دما در داخل کوره به رنگ سرخ و آتشین تبدیل شده است و تقریباً قسمت اعظمی از سیمان و پوزولان در ملات می‌سوزد. حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما نسبت به حداکثر مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۳/۵ برابر کاهش یافته است، که این مطلب نشان‌دهنده احتراق و تبخیر زیاد خمیر سیمان و ایجاد حفرات بسیار زیاد در ملات می‌باشد. در این دما (۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) عملاً سیمان از مجموعه حذف شده و نقش چندانی در افزایش مقاومت فشاری ملات نداشته و تنها پوزولان‌ها نقش بسزایی در این رابطه دارند، به‌طوری‌که مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها نسبت

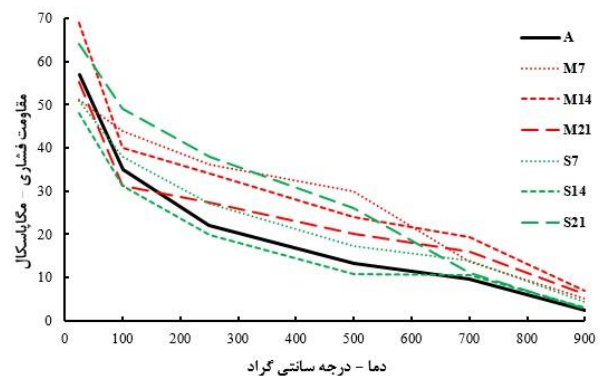
با توجه به شکل ۱۳، روند کلی تغییرات مقاومت کششی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد مشابه روند تغییرات در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بوده با این تفاوت که مقاومت کششی نمونه M14 نسبت به نمونه شاهد افزایش ۱۲ درصدی داشته است. در سایر نمونه‌ها شامل M7، M21، S7، S14 و S21 این افزایش مقاومت به ترتیب برابر با ۷۸، ۶۵، ۴۵، ۶ و ۲۷ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، استفاده از میکروسیلیس به جهت بهبود مقاومت کششی مناسب‌تر می‌باشد.

روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این دما مقاومت تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد بیشتر شده که بیشترین آن‌ها مربوط به نمونه‌های M7 و S21 بوده که به ترتیب ۴۳ و ۳۶ درصد افزایش داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مقادیر بیش از ۷ درصد میکروسیلیس و مقادیر کمتر از ۲۱ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی در ملات سیمانی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد، به لحاظ فنی توجیه ندارد.

با توجه به شکل ۱۵ که مربوط به تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد می‌باشد، با وجود اینکه تقریباً در تمامی نمونه‌ها مقاومت افزایش داشته است اما این افزایش مقاومت بسیار اندک (۱۷ درصد) بوده و مقاومت تمامی نمونه‌ها در نزدیکی مقاومت نمونه شاهد می‌باشد. البته می‌توان با تحقیقات بیشتر در این زمینه به جزئیات دقیق‌تری از آن دست یافت.

در شکل ۱۶ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت کششی نمونه‌ها در این دما نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی گراد حداقل ۴/۵ برابر کاهش داشته است. بنابراین سیمان نقش چندانی در مقاومت کششی نداشته است و عمده مقاومت توسط سنگدانه‌ها و پوزولان بکار گرفته شده است. مقاومت کششی در این دما در نمونه‌های حاوی ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی (بجز S7 که ۵ درصد کاهش یافت) به ترتیب ۳۲، ۳، ۴۳، ۷ و ۲۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

همچنین در شکل ۱۱ به صورت جامع روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در دماهای مختلف آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بجز نمونه‌های S14 روند کلی در سایر نمونه‌ها افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. همچنین تقریباً در تمامی نمونه‌ها، مقاومت فشاری پس از دمای ۲۵ درجه سانتی گراد دچار افت محسوسی شده که در نمونه‌های M7 و S7 این افت کمتر از سایرین بوده است. اما در دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد به علت اینکه عمده حجم و فضای داخل نمونه را سیمان و میکروسیلیس یا سرباره کوره آهن‌گدازی اشغال نموده، و همچنین به علت تبخیر و سوختن تدریجی مواد سیمانی، افت مقاومت محسوسی در هیچ‌یک از نمونه‌ها مشاهده نشده است.



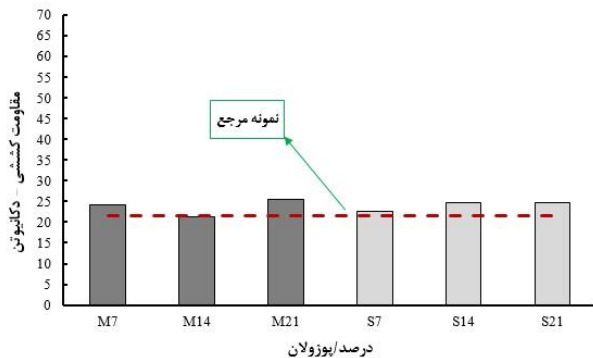
شکل ۱۱- نمودار تغییرات مقاومت فشاری بر حسب افزایش دما

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

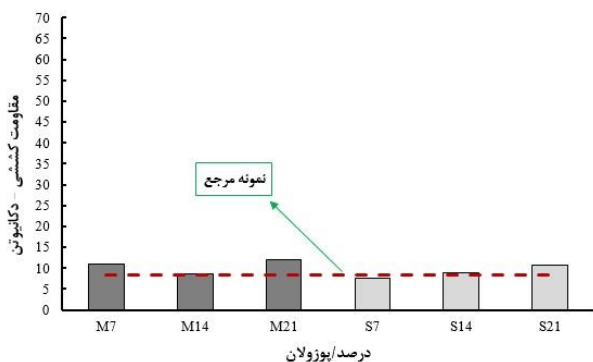
برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش مستقیم نمونه طبق استاندارد ASTM C348 استفاده شد. جک هیدرولیک دارای ظرفیت ۱۵۰ دکانیوتن بوده و با سرعت یک دکانیوتن بر ثانیه بار را اعمال می‌کند.

شکل ۱۲ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. طبق نتایج در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه M14 مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته که این افزایش در نمونه‌های M7 و S7 بیش از بقیه نمونه‌ها می‌باشد. به طوری که مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد در نمونه‌های M7، M21، S7، S14 و S21 به ترتیب ۲۶، ۰، ۳۱، ۸ و ۱۴ درصد افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت که در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی در ملات سیمانی مناسب‌تر می‌باشد.

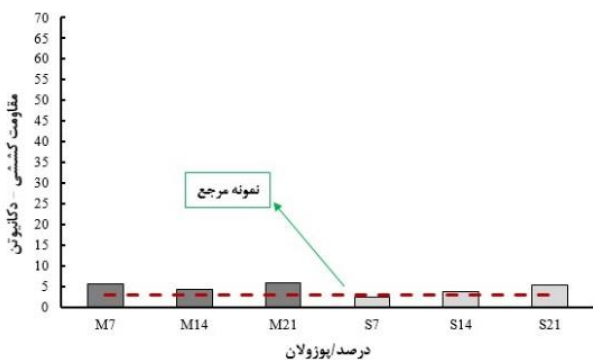
مقاومت نسبت به نمونه شاهد همچنان حفظ شده، بنابراین استفاده از پوزولان‌ها در ملات می‌تواند نقش مؤثری در عملکرد پس از حرارت آن‌ها داشته باشد. به‌عنوان یک روند کلی، در تغییرات مقاومت کششی استفاده از میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی مناسب بوده و تنها بایستی به مقدار استفاده از آن در ملات در دمای موردنظر توجه نمود.



شکل ۱۵- مقاومت کششی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد

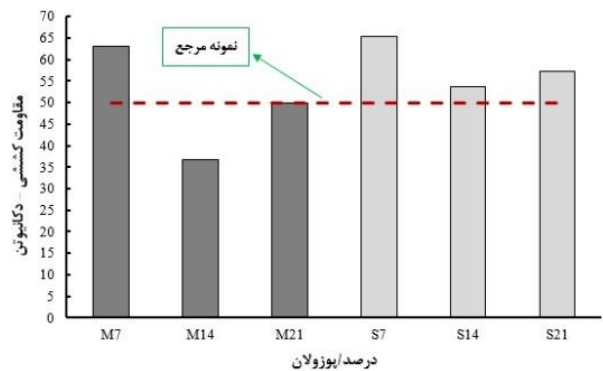


شکل ۱۶- مقاومت کششی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

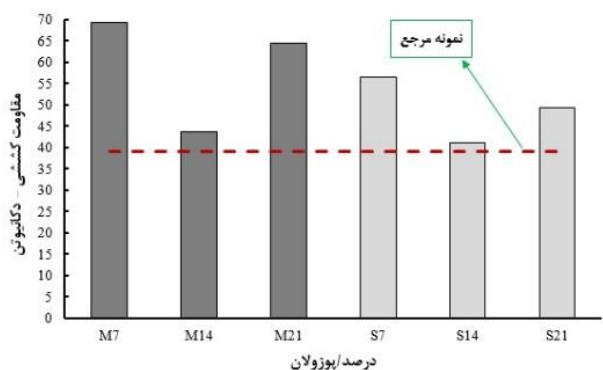


شکل ۱۷- مقاومت کششی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

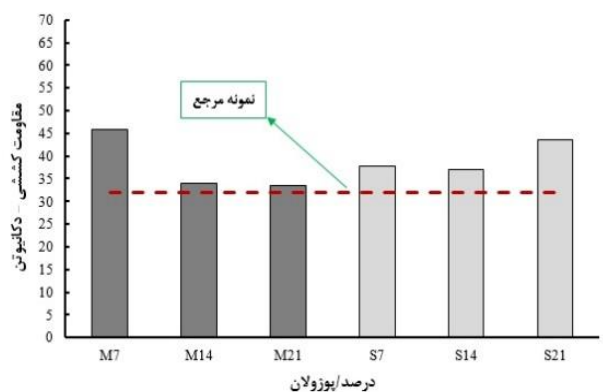
همچنین در شکل ۱۸ به‌صورت جامع روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دماهای مختلف آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی مقاومت کششی نمونه شاهد از سایر نمونه‌ها کمتر بوده و در تمامی نمونه‌ها پس از دمای ۲۵۰ درجه



شکل ۱۲- مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۳- مقاومت کششی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

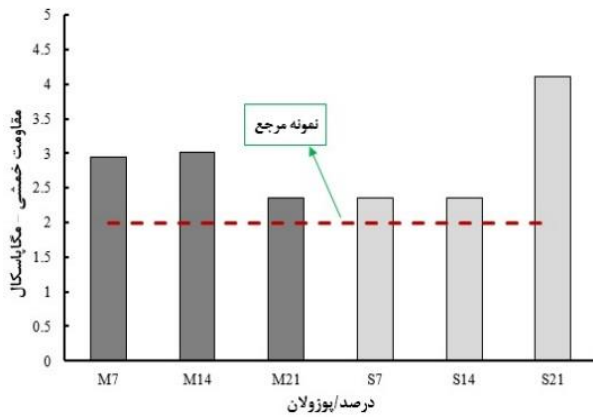


شکل ۱۴- مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد

همچنین در شکل ۱۷ که مربوط به تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، بجز نمونه S7 که ۱۷ درصد کاهش مقاومت داشته است، در مابقی نمونه‌ها از ۲۷ تا ۱۰۰ درصد افزایش مقاومت رخ داده است. در این دما به‌طوری کلی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نتایج مناسب‌تری را ارائه داده‌اند.

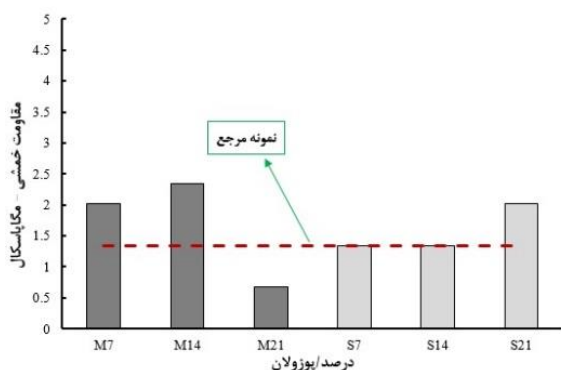
در نهایت به‌عنوان جمع‌بندی کلی از نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، با وجود اینکه با افزایش دما مقدار افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد تقریباً کاهش داشته اما روند بهبود

خمشي نسبت به نمونه شاهد به ترتيب ۴۷، ۵۱، ۱۸، ۱۸ و ۱۰۲ درصد افزايش يافته است. بنابر اين در مقادير کم میکروسيليس و مقادير زياد سرباره کوره آهن گدازي، نمونه ها مقاومت خمشي بهتري از خود نشان مي دهند.



شکل ۱۹- مقاومت خمشی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

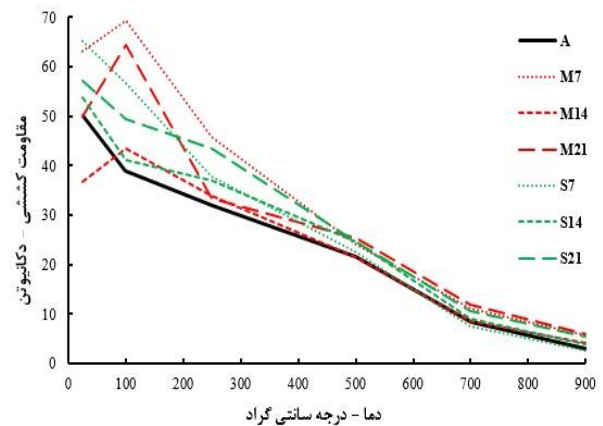
با توجه به شکل ۲۰ که مربوط به مقاومت خمشی نمونه ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد می باشد، با وجود استفاده از سرباره کوره آهن گدازي در ملات، اما در مقادير ۷ و ۱۴ درصد مقاومت خمشی برابري با نمونه شاهد مشاهده می شود. علت اين امر را می توان به کافي نبودن درصد جایگزینی دانست، به گونه ای که در مقدار ۲۱ درصد، افزايش مقاومتی تا ۵۱ درصد مشاهده می شود. اما در نمونه های حاوی میکروسيليس در نمونه M21 مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۱۰۰ درصد کاهش داشته اما در نمونه های M7 و M14 به ترتيب ۵۱ و ۷۵ درصد افزايش داشته است.



شکل ۲۰- مقاومت خمشی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد

در شکل ۲۱ که مربوط به دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد است، روندی تقریباً مشابه دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد بوده و مقاومت خمشی

سانتی گراد، شیب کاهش مقاومت در حدود ۶ درصد می باشد. در نمونه های حاوی میکروسيليس در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی گراد افزايش مقاومت مشاهده شده اما در نمونه های حاوی سرباره کوره آهن گدازي پیوسته از مقدار مقاومت کششی کاسته شد.



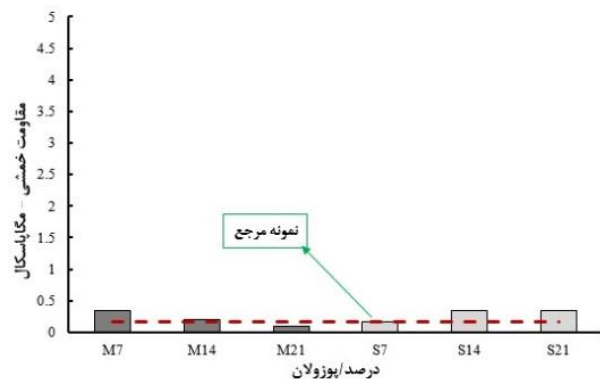
شکل ۱۸- نمودار تغییرات مقاومت کششی بر حسب افزایش دما

۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

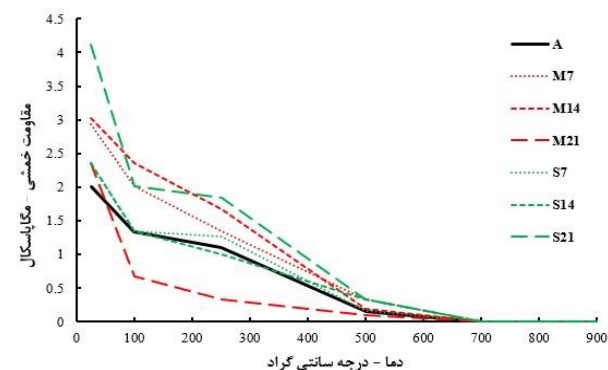
به منظور انجام آزمایش مقاومت خمشی بر روی ملات ها، نمونه ها در قالب هایی منشوری به ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متر طبق استاندارد ASTM C1609 ساخته شدند. پس از اتمام فرآیند عمل آوری ۲۸ روزه بر روی کلیه نمونه های خمشی و پس از انجام عملیات حرارتی (دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد) به کمک آزمایش خمش چهار محوره که حالت خمش خالص را ایجاد خواهد نمود، آزمایش مقاومت خمشی انجام پذیرفت. به علت مقاومت خمشی بسیار اندک ملات ها و ترد بودن آن ها در خمش، سرعت بارگذاری دستگاه اندک بوده (حدود ۰/۰۵ مگاپاسکال بر ثانیه) به طوری که مانع از ایجاد شوک و ضربه در نمونه ها شود.

همان طور که از شکل ۱۹ مشاهده می شود، با افزودن میکروسيليس و سرباره کوره آهن گدازي به ملات سیمانی، مقاومت خمشی نمونه ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نسبت به نمونه شاهد (نمونه ای که هیچ گونه پوزولانی در آن بکار نرفته باشد) افزايش یافته است. در این دما مقاومت خمشی نمونه شاهد برابر ۲ مگاپاسکال می باشد. در نمونه های حاوی میکروسيليس و سرباره کوره آهن گدازي در مقادير استفاده ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد، مقاومت

نمونه‌ها مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. همچنین در نمونه‌های حاوی ۲۱ درصد میکروسیلیس یا سرباره کوره آهن‌گدازی، از دمای ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افت مقاومت محسوسی تا ۳/۵ و ۲ برابر رخ داده است.



شکل ۲۲- مقاومت خمشی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲۳- نمودار تغییرات مقاومت خمشی بر حسب افزایش دما

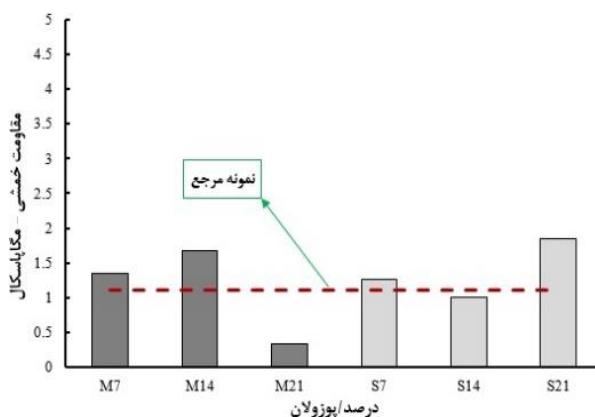
۴- بررسی و تفسیر نتایج آزمایش‌های

با توجه به انجام آزمایش‌های حرارتی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه‌ها، نتایج به دست آمده به صورت زیر مقایسه می‌شوند.

۴-۱- تغییرات وزنی پس از حرارت

از آنجایی که عمدتاً تست مقاومت فشاری و نتایج آن ملاک کار محققان می‌باشد، لذا با توجه به اینکه اعمال حرارت و افزایش دما باعث تبخیر بخشی از سیمان و آب درون ملات خواهد شد، درصد کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های M21 و نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی افت وزنی کمتری

نمونه‌های M14 و S21 بیش از سایر نمونه‌ها می‌باشد. در این حالت مقاومت خمشی نمونه مرجع برابر ۱/۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۲۰ که مربوط به مقاومت خمشی نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده پیش‌بینی می‌شد، نمونه‌های M21 و S14 مقاومتی کمتر از نمونه شاهد داشته‌اند. همان‌طور که از شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، مقاومت خمشی نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بسیار ناچیز بوده به طوری که تا ۱۵ برابر نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. در این بین نمونه‌های M7، S14 و S21 دارای مقاومتی یکسان و ۱/۱۲ برابر نمونه شاهد دارند.

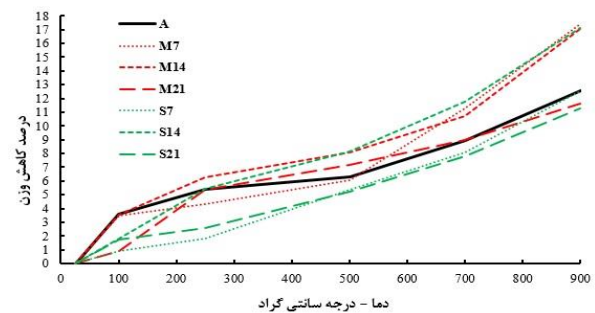


شکل ۲۱- مقاومت خمشی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد

از آنجایی که به‌طور کلی مقاومت خمشی ملات‌های سیمانی نسبت به مقاومت فشاری و کششی‌شان بسیار ناچیز بوده و همچنین با وجود اعمال عملیات حرارتی تا ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، این نمونه‌ها تاب و مقاومتی در برابر این دماها نداشته، لذا پس از انجام عملیات حرارتی و سرد شدن و قرارگیری در زیر جک، با اعمال حداقل نیرو (کمتر از یک کیلوگرم) منهدم شده و لذا امکان ثبت عدد مقاومت وجود نداشته است. البته با توجه به مقاومت بسیار اندک نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، انتظار چنین پدیده‌ای دور از ذهن نبوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت طبق طرح اختلاط استفاده شده در این مقاله، نمی‌توان انتظار مقاومت مناسب در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) را از ملات‌های سیمانی داشت.

در شکل ۲۳ روند تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌ها در دماهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در کلیه نمونه‌ها از دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به بعد مقاومت خمشی کمتر از ۰/۵ مگاپاسکال می‌باشد. به‌طور کلی بجز نمونه M21 در مابقی

نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. همچنین در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های M7، S7 و S21 افت وزنی کمتر و مابقی نمونه‌ها افت وزنی بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته است. در دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در تمامی نمونه‌ها بجز S7 و S21 درصد افت وزنی نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تنها نمونه‌های M21 و S21 درصد افت وزنی کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. بنابراین با تخمین مناسبی می‌توان بیان نمود که نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی، به علت ترکیبات آهنی که دارند و نقطه ذوب بالاترشان افت وزنی کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارند. لازم به ذکر است که درصد کاهش وزن در نمونه‌ها دلیل محکمی برای بیشتر یا کمتر بودن مقاومت نمونه‌ها نخواهد بود و هدف از ارائه چنین مطلبی در این قسمت، آگاهی بیشتر خواننده مقاله و شناخت بیشتر پوزولان‌ها در تغییرات وزنی پس از حرارت نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۲۴- درصد کاهش وزن نمونه‌ها پس از حرارت

۴-۳- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی

با توجه به اینکه مقادیر به‌دست‌آمده از این پژوهش، از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی‌های درجه اول برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها در جدول ۵ پیشنهاد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب رگرسیون (R^2) تمامی روابط نزدیک به ۱ بوده، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط F_c ، F_t و F_r به ترتیب مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها و θ پارامتر مربوط به دما برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لازم به ذکر است روابط فوق برای طرح اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه روابط بیشتر در آینده قابل ارائه است.

جدول ۴- مقاومت ماکزیمم در دماهای مختلف

S21	S14	S7	M21	M14	M7	A	دما (°C)	
				*			۲۵	
*							۱۰۰	بیشترین مقاومت فشاری
*					*		۲۵۰	
				*	*		۵۰۰	
				*	*		۷۰۰	
		*					۹۰۰	
						*	۲۵	بیشترین مقاومت کششی
					*	*	۱۰۰	
			*		*	*	۲۵۰	
			*		*	*	۵۰۰	
			*				۷۰۰	
*							۹۰۰	
				*			۲۵	بیشترین مقاومت خمشی
*					*	*	۱۰۰	
*	*				*	*	۲۵۰	
*	*					*	۵۰۰	

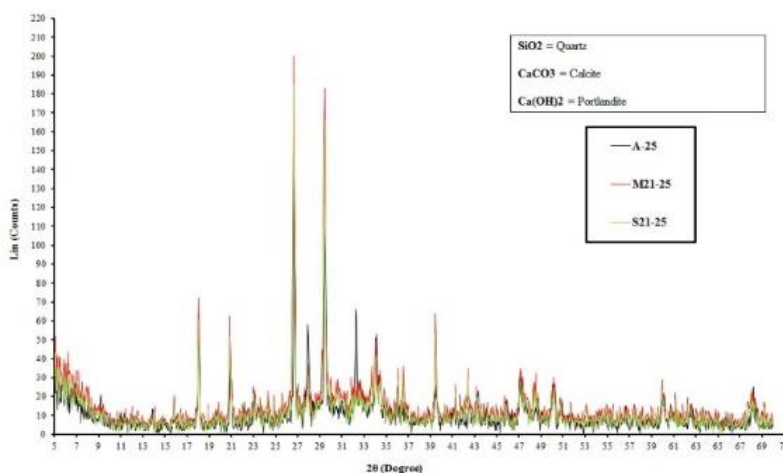
جدول ۵- روابط پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت نمونه‌ها

نوع آزمایش	تابع رگرسیون	ضریب رگرسیون (R^2)
مقاومت فشاری	$F'_C = -0.052 \theta + 44.7$	0.83
	$F'_C = -0.050 \theta + 50.8$	0.98
	$F'_C = -0.056 \theta + 55.3$	0.83
	$F'_C = -0.043 \theta + 43.9$	0.81
	$F'_C = -0.047 \theta + 44.6$	0.92
	$F'_C = -0.043 \theta + 38.5$	0.83
	$F'_C = -0.065 \theta + 58.9$	0.97
مقاومت کششی	$F_T = -0.051 \theta + 46.9$	0.97
	$F_T = -0.075 \theta + 67.7$	0.95
	$F_T = -0.044 \theta + 43.3$	0.95
	$F_T = -0.060 \theta + 56.6$	0.88
	$F_T = -0.072 \theta + 62$	0.96
	$F_T = -0.055 \theta + 50.9$	0.97
	$F_T = -0.061 \theta + 57$	0.98
مقاومت خمشی	$F_R = -0.002 \theta + 1.7$	0.88
	$F_R = -0.003 \theta + 2.4$	0.87
	$F_R = -0.003 \theta + 2.7$	0.89
	$F_R = -0.001 \theta + 1.4$	0.55
	$F_R = -0.002 \theta + 1.9$	0.84
	$F_R = -0.002 \theta + 1.8$	0.84
	$F_R = -0.004 \theta + 3.1$	0.79

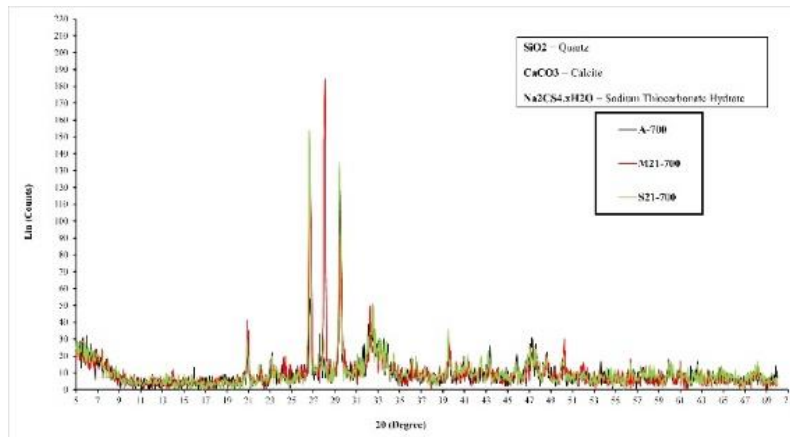
۵- آزمایش XRD

دی کربنات هیدرات شده است. حضور میکروسیلیس و سربراره کوره آهن‌گدازی به ترتیب سبب افزایش مقدار کانتها (Counts) تا حدود ۲/۵ و ۳ برابر نسبت به نمونه شاهد شده است که با افزایش دما، این مقدار در کلیه نمونه‌ها کاهش یافت. همچنین اندازه دانه نمونه‌ها برحسب نانومتر طبق رابطه شرر که از آزمایش XRD به‌دست آمده است، در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی با افزایش دما و از بین رفتن برخی از ترکیبات در اثر حرارت، اندازه دانه نمونه‌ها تا حدود ۳۰٪ کوچک‌تر شده است، که اندازه دانه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سربراره کوره آهن‌گدازی در اثر حرارت افت کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته است.

به‌منظور بررسی اثر حرارت بر مقدار و ترکیبات اصلی ساختار نمونه‌ها، برخی از نمونه‌هایی که در شرایط دمایی ۲۵ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شدند (A21 - A - S21)، تحت آزمایش XRD (آزمایش پراش اشعه ایکس) قرار گرفتند. همان‌طور که از اشکال ۲۵ و ۲۶ مشاهده می‌شود، ترکیبات اصلی نمونه‌ها عبارت‌اند از کوارتز (Quartz)، کلسیت ($CaCO_3$)، سدیم دی‌کربنات هیدرات (Sodium Thiocarbonate Hydrate) و پرتلندیت (Portlandite). اعمال حرارت بر روی نمونه‌ها تغییر چندانی بر ترکیبات کوارتز و کلسیت ایجاد نکرده اما پرتلندیت از ترکیب مواد حذف شده و تبدیل به سدیم



شکل ۲۵- آزمایش XRD بر روی نمونه‌های با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲۶- آزمایش XRD بر روی نمونه‌های با دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد

جدول ۶- اندازه دانه نمونه‌های آزمایش XRD (D بر حسب نانومتر - θ بر حسب درجه)

A-25	2θ	18.0	20.9	26.6	29.4	32.2	34.1	39.5
	D	45.4	38.4	46.1	43.6	47.5	33.8	35.2
M21-25	2θ	18.2	20.8	26.6	29.5	34.2	36.5	
	D	49.1	44.7	46.0	44.0	47.8	34.0	
S21-25	2θ	18.0	20.8	26.6	29.4	39.4	59.9	
	D	51.5	48.3	44.8	44.8	49.6	34.2	
A-700	2θ	26.7	29.4	39.5	43.2			
	D	41.0	35.3	35.5	35.5			
M21-700	2θ	20.9	26.7	28.0	29.5	39.5	50.2	
	D	40.5	38.1	45.9	37.3	38.0	38.4	
S21-700	2θ	29.8	26.6	27.9	29.4	39.4		
	D	36.5	43.4	41.1	37.4	49.6		

۶- نتیجه گیری

آهن گذاری (۷۳ درصد)، ۷٪ میکروسیلیس (۱۲۸ درصد)، ۱۴٪ میکروسیلیس (۱۰۲ درصد) و ۱۴٪ میکروسیلیس (۱۸۰ درصد) می‌باشد. همچنین به‌طور کلی بجز نمونه حاوی ۷٪ سرباره کوره آهن‌گدازی، مقاومت فشاری در مابقی نمونه‌ها در همه دماها بیش از نمونه شاهد می‌باشد.

- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، تقریباً در تمامی نمونه‌ها با افزودن پوزولان به ملات، مقاومت کششی افزایش داشته است، به‌طوری‌که در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقاومت کششی به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۷٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۳۱ درصد)، ۷٪ میکروسیلیس (۷۸ درصد)، ۷٪ میکروسیلیس (۴۳ درصد)، ۱۴٪ و ۲۱٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۱۴ درصد)، ۲۱٪ میکروسیلیس (۴۳ درصد) و ۲۱٪ میکروسیلیس (۱۰۰ درصد) می‌باشد.

در این مقاله، خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی) و میکرو ساختار ملات‌های سیمانی حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس با مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد جایگزینی سیمان در شرایط پس از دماهای ۲۵ - ۱۰۰ - ۲۵۰ - ۵۰۰ - ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت که نتایج ذیل حاصل شد:

- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها نشان داد که به‌طور کلی با افزایش مقدار استفاده از پوزولان در ملات و با افزایش درجه حرارت، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است، به‌طوری‌که بیشترین افزایش مقاومت در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۴٪ میکروسیلیس (۲۱ درصد)، ۲۱٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۴۰ درصد)، ۲۱٪ سرباره کوره

- [5] Rostami M and Behfarnia K (2017) The effect of silica fume on the durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials* 134: 262–268, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.072>.
- [6] Farahani A, Taghaddos H and Shekarchi M (2015) Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment. *Cement and Concrete Composites* 59: 10–17, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.006>.
- [7] Mardani-Aghabaglou A, Sezer GI and Ramyar K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials* 70: 17–25, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.089>.
- [8] Sezer GI (2012) Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials* 26(1): 613–618.
- [9] Aköz, F. Türker, F. Koral, S. Yüzer, N. “Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume”. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 537–544.
- [10] H.Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, J. Jaganathan, M.P. Anwar, Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 369–375.
- [11] R. Siddique, Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1444–1450.
- [12] Yüzer N, Aköz F, Öztürk LD. Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. *Cement and Concrete Research* 2004; 34:1803–1807.
- [13] Culfik M. S, Özturan T. Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. *Cement and Concrete Research* 2002; 32:809–816.
- [14] Chan YN, Luo X, Sun W. Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 8000°C. *Cement and Concrete Research* 2000; 30:247–251.
- [15] Oner A, Akyuz S. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites* 2007; 29(6):505–514.
- [16] Canpolat F, Yilmaz K, Köse MM, Şüner M, Yurdusev MA. Use of zeolite coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement

– با توجه به نتایج حاصل از مقاومت خمشی نمونه‌ها، به علت مقاومت بسیار اندک نمونه‌های خمشی در دماهای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، کلیه نمونه‌ها نیرویی نزدیک به صفر را تحمل نموده و هیچ کدام ظرفیت کافی برای ثبت مقاومت نداشته‌اند. اما در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، بیشترین افزایش مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۲۱٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۱۰۲ درصد)، ۱۴٪ میکروسیلیس (۷۵ درصد)، ۲۱٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۶۸ درصد) و ۷٪ میکروسیلیس و ۱۴٪ و ۲۱٪ سرباره کوره آهن‌گدازی (۱۱۲ درصد) می‌باشد. به‌طورکلی بجز نمونه‌های حاوی ۱۴٪ میکروسیلیس، در مابقی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت خمشی مشاهده شد.

– نتایج حاصل از آزمایش XRD نشان داد که به‌طورکلی با افزایش دما از ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و از بین رفتن برخی از ترکیبات در اثر حرارت، اندازه دانه نمونه‌ها تا حدود ۳۰٪ کوچک‌تر شده است، که اندازه دانه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی در اثر حرارت افت کمتری (حدود ۶ درصد) نسبت به نمونه شاهد داشته است.

۲- مراجع

- [1] Giustozzi F (2016) Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials* 111: 502–512, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136>.
- [2] Medina NF, Barluenga G and Hernández-Olivares F (2015) Combined effect of polypropylene fibers and silica fume to improve the durability of concrete with natural pozzolans blended cement. *Construction and Building Materials* 96: 556–566, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050>.
- [3] Mohammadi M, Moghtadaei RM and Samani NA (2014) Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete. *Construction and Building Materials* 51: 141–150, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.048>.
- [4] Çakır Ö and Sofyanlı ÖÖ (2015) Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal* 11(2): 157–166.

- [29] N. De Belie, J. Kratky, S. Van Vlierberghe, Influence of pozzolans and slag on the microstructure of partially carbonated cement paste by means of water vapour and nitrogen sorption experiments and BET calculations, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 1723–1733. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.014>
- [30] M.A. Sanjuán, A. Piñero, O. Rodríguez, Ground granulated blast furnace slag efficiency coefficient (k value) in concrete. Applications and limits, *Mater. Constr.* 61 (2011) 303–313. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2011.60410>.
- [31] M. Collepardi, S. Collepardi, J. J. Ogoumah Ola got, F. Simonelli, The influence of slag and fly ash on the carbonation of concrete, in: V. M. Malhotra (Ed.), Eighth CANMET/ACI Int. Conf. on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, Proceedings ACI SP-221-29, Las Vegas, Nevada, USA, 2004, pp. 483-493.
- [32] G.G. Litvan, A. Meyer, Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure, in: V. M. Malhotra (Ed.), Second Int. Conf. On fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Proceedings ACI SP-91, Madrid, Spain, 1986, pp. 1445–1462.
- [33] K. Sisomphon, L. Franke, Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1647–1653. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.01>.
- [34] Aydın, S. “Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice”. *Fire Safety Journal*, 43 (2008) 610–617.
- [35] C.D. Atis, C. Bilim, Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag, *Build. Environ.* 42 (8) (2007) 3060–3065.
- [36] NF EN 12390-13 AFNOR, 2013, Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 418–455.
- production. *Cement and Concrete Research* 2004; 34:731–735.
- [17] Yang EH, Yang YZ, Li VC. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Materials Journal* 2007; 104(6):620–628.
- [18] Dhir PK, Hewlett PC, Chan YN. Near-surface characteristics of concrete prediction of carbonation resistance. *Magazine of Concrete Research* 1989; 148:122–128.
- [19] Sugiyama T, Bremner TW, Tsuji Y. Determination of chloride diffusion and coefficient and gas permeability of concrete and their relationship. *Cement and Concrete Research* 1996; 26(5):781–790.
- [20] Song HW, Saraswathy V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview. *Journal of Hazardous Materials* 2006; 138(2):226–233.
- [21] Roy DM, Arjunan P, Silsbee MR. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement and Concrete Research* 2001; 31(12):1809–1813.
- [22] Bamforth PB. The water permeability of concrete and its relationship with strength. *Magazine of Concrete Research* 1991; 43(137):233–241.
- [23] McCarthy MJ, Dhir RK. Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel* 2005; 84(11):1423–1432.
- [24] Chaipanicha, A. Rianyoi, R. Nochaiya, T. “The effect of carbon nanotubes and silica fume on compressive strength and flexural strength of cement mortars”. *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017) 6065–6071.
- [25] B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, X. Ji, Nano-silica, and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability, *Cement and Concrete Composites* (2018), doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012.
- [26] Jiang, C. Huang, S. Gao, P. Chen, D. “Experimental study on the bond and durability properties of mortar incorporating polyacrylic ester and silica fume”. *Advances in Cement Research*, 2018, 30(2), 56–65. <http://dx.doi.org/10.1680/jadcr.17.00053>.
- [27] M.A. Sanjuán, C. Argiz, The new European standard on common cement specifications EN 197-1:2011, *Mater. Construct.* 62 (2012) 425-430. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2012.07711>.
- [28] H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry*, second ed., Thomas Telford Publishing, London, 1997.

Laboratory study of mechanical properties and microstructure of cement mortar containing Silicafume and Granulated Blast- Furnace Slag in post-high temperature conditions

Ghasem Pachideh

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Majid Gholhaki *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Amin Moshtagh

MSc, Department of Civil Engineering, Garmsar University, Garmsar, Iran.

Abstract

Sandstone shrinks on heating, and therefore, it counteracts to some extent the expansion of the quartz grains. The loss in strength of sandstone mortars on exposure to fire is, however, often high, and therefore sandstone does not form a good fire-resistant aggregate. This paper deals with an experimental study on the post-heat performance of cement mortars containing silica fume and granulated blast-furnace slag (GBFS). In doing so, the mortar specimens were provided in standard formworks to perform compressive, tensile and flexural tests containing 7, 14 and 21% of pozzolanic materials as a replacement for cement. Moreover, for the sake of heating process, the specimens were placed in an electric furnace exposed to temperatures of 25, 100, 250, 500, 700 and 900^{0c} with standard temperature increment and once the heating process ended and the specimens were cooled, the tests were carried out on them. Based on the results obtained, the maximum effect of utilizing granulated blast-furnace slag (GBFS) and silica fume respectively takes place in low (up to 250^{0c}) and high (500^{0c} and greater degrees) temperatures. Quantitatively, the compressive, tensile and flexural strengths were raised by 73 and 180%, 45 and 100%, 106 and 112%, respectively in low and high temperatures. In addition, as the temperature rises, the particles of specimens containing silica fume and granulated blast-furnace slag (GBFS) shrinks less in size compared to the reference specimen.

Keywords: Cement Mortar, Silica Fume, granulated blast-furnace slag (GBFS), Heat, XRD Analysis.

* Corresponding Author: mgholhaki@semnan.ac.ir

