

بررسی اثر دمای بالای عمل آوری بر مقاومت فشاری و زمان گیرش ملات و خمیر قلیا فعال سرباره‌ای آمیخته با میکروسیلیس

ناصر صامتی

دانشجوی دکتری گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.

ابراهیم قیاسوند *

استادیار گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا.

احسان الله ضیغمی

استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.

سید محمد حسینی

استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.

چکیده

سرباره قلیا فعال به عنوان جایگزین سیمان پرتلند در بتن یا ملات، ضمن برتری به لحاظ برخی خواص، مانند مقاومت مکانیکی و دوام، مشکلاتی نظیر سرعت گیرش بالا و انقباض زیاد را نیز به همراه داشته است. در این پژوهش، تغییرات مدت زمان گیرش خمیر و مقاومت فشاری ملات در اثر جایگزینی میکروسیلیس به میزان صفر، پنج و ده درصد و عمل آوری در دماهای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ، 40°C و 80°C مورد مطالعه قرار گرفت. بیشترین مقاومت فشاری، با پنج درصد جایگزینی میکروسیلیس و دمای عمل آوری 80°C حاصل شد و طرح مربوط به جایگزینی ده درصد میکروسیلیس و دمای عمل آوری $23 \pm 2^\circ\text{C}$ طولانی ترین زمان گیرش را به دنبال داشت. در مجموع، با ملاحظه هر دو پارامتر مقاومت فشاری و مدت زمان گیرش و همچنین صرفه جویی اقتصادی و مصرف انرژی کمتر، می توان طرح مربوط به جایگزینی پنج درصد میکروسیلیس و عمل آوری در دمای 40°C را به عنوان طرح بهینه معرفی نمود. در ضمن جهت صحت سنجی نتایج، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: سرباره قلیا فعال، عمل آوری حرارتی، میکروسیلیس.

* نویسنده مسئول: e.ghiasvand@basu.ac.ir

۱- مقدمه

می‌سازد. لذا برخی محققین در راستای کاهش سرعت گیرش آن روش‌های گوناگونی را آزمایش نمودند. El-Yamani و همکاران [۱۵] با افزودن لاتکس به میزان ۵٪ و ۱۰٪ موفق شدند زمان گیرش اولیه را تا ۲۵۰٪ افزایش دهند. Narimani و Zamanabadi همکاران [۱۹] با استفاده از ۱۰٪ میکروسلیس جایگزین و با نسبت‌های مختلف سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید، زمان گیرش نهایی سرباره قلیا فعال را بین ۱۱ تا ۲۲٪ افزایش دادند. Moeini و همکاران [۲۰] جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسلیس را برای افزایش زمان گیرش سرباره قلیا فعال آزمایش نمودند. بهترین نتیجه مربوط به ۵٪ جایگزینی بود و به ترتیب، ۳۰٪ و ۲۷/۳٪ افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی را در برداشت. Aliques-Granero و همکاران [۲۱] با افزودن ۲٪ محلول آب آهک زمان گیرش اولیه سرباره قلیا فعال را از پنج، به ۶۲ دقیقه افزایش دادند. Rakhimova و همکارش [۲۲] با افزودن میکروسلیس فوق ریزدانه تا ۲۰٪ وزنی، زمان گیرش اولیه سرباره قلیا فعال را تا ۲ برابر افزایش دادند.

اما به منظور بهبود خواص سرباره قلیا فعال، برخی محققین عمل-آوری حرارتی را به کار گرفتند اما با نتایج متفاوتی روبه رو شدند. Bakharev و همکاران [۲۳] با عمل‌آوری حرارتی سرباره در دمای ۷۰°C شاهد حدود ۳۰٪ کاهش مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه نسبت به عمل‌آوری در دمای اتاق بودند. Aliabdo و همکاران [۲۴] مقاومت فشاری سرباره قلیا فعال را با عمل‌آوری در دماهای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه سلسیوس بررسی نمودند. که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ و ۹۰ درجه سلسیوس نسبت به عمل‌آوری در دمای ۳۰°C به ترتیب، کاهش ۹ و ۱۶ درصدی نشان دادند. Aliques-Granero و همکاران [۲۱] عمل‌آوری در دمای ۳۵ و ۸۰ درجه سلسیوس را برای سرباره قلیا فعال مورد آزمایش قرار دادند. که به ترتیب، کاهش مقاومت فشاری فشاری ۲۸ روزه، به میزان ۱۲٪ و ۱۵٪ نسبت به عمل‌آوری در دمای اتاق را ثبت نمودند. El-Feky و همکاران [۲۵] برای عمل‌آوری حرارتی سرباره قلیا فعال در اجاق، دمای ۸۰°C را به کار بستند. که موجب ۱۷٪ افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه گردید. Bilim و همکاران [۲۶] به منظور کاهش انقباض،

تولید گازهای گلخانه‌ای و عواقب زیست محیطی مترتب بر آن، یکی از مهم‌ترین چالش‌های فراوری بشر امروزی است. گاز دی‌اکسید کربن بیشترین نقش را در این راستا، ایفا نموده است. تولید سیمان پرتلند به‌عنوان ماده چسباننده در بتن، سالانه ۱/۵ بلیون تن دی‌اکسید کربن را وارد جو زمین می‌کند و سهم ۶ درصدی از آلودگی ناشی از این گاز، مربوط به فعالیت‌های بشری را به خود اختصاص داده است. استفاده از مواد قلیا فعال، به‌عنوان ماده چسباننده بتن از جمله راه‌های کاستن این اثر به شمار می‌رود؛ که بتن حاصل از آن به لحاظ خواص مکانیکی و دوام، نسبت به بتن با پایه سیمان پرتلند برتری دارد [۷-۱]. یکی از کارآمدترین این مواد، سرباره کوره آهن‌گدازی است. سرباره، به‌عنوان یک محصول جانبی صنعت فولاد، دارای هردو خاصیت سیمانی و پوزولانی است. از این رو به‌عنوان یک ماده چسباننده شبه سیمانی شناخته می‌شود و توسط محلول‌های قلیایی دارای pH بالا، فعال می‌گردد [۹ و ۸ و ۶]. ترکیب شیمیایی سرباره، عمدتاً شامل CaO، MgO، Al₂O₃ و SiO₂ می‌شود. برای تعیین فعالیت هیدرولیکی سرباره عامل ضریب هیدراسیون توسط برخی محققین معرفی شده است که با فعالیت هیدرولیکی سرباره نسبت مستقیم دارد $(HM^1 = (CaO + MgO + Al_2O_3) / (SiO_2))$ [۹]. میزان بیش از ۱/۴ برای این ضریب، حاکی از واکنش‌پذیری بیشتر سرباره است [۱۰]. از مزایای بتن یا ملات با پایه سرباره قلیا فعال، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: خواص مکانیکی چشمگیر و دوام بیشتر در برابر محیط‌های مهاجم، خواص رضایت‌بخش در حضور سنگدانه‌های واکنش‌زا در برابر محیط‌های قلیایی و سرعت کسب مقاومت بیشتر نسبت به سیمان پرتلند. اما در کارهای پژوهشی گذشته، مشکلاتی نظیر انقباض زیاد، شوره نمکی، سرعت گیرش بالا، ترکیبات متغیر، و نتایج متناقض در خصوص کربناسیون نیز گزارش شده است [۱۱-۱۶ و ۸]. یکی از مواد جایگزین سرباره جهت بهبود خواص بتن یا ملات قلیا فعال سرباره‌ای، میکروسلیس است. که به‌عنوان افزودنی معدنی به کار رفته و تأثیر مثبت آن بر خواص مکانیکی و دوام بتن مشاهده شده است [۱۷ و ۱۸ و ۶]. گیرش سریع سرباره قلیا فعال، کاربرد آن را در کارگاه محدود

¹ Hydration Modulus

با پایه سیمان پرتلند و سرباره قلیا فعال از نسبت آب به مواد جامد ۰/۴۸۵ استفاده شد. در مخلوط‌های قلیا فعال، از نسبت محلول فعال‌ساز به سرباره ۰/۴۵ بهره گرفته شد و برای هر مخلوط، میزان آب مورد نیاز برای تأمین نسبت آب به مواد جامد فوق، اضافه گردید.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان، سرباره و میکروسیلیس

ترکیبات شیمیایی	سیمان نوع ۲ (%)	سرباره (%)	میکروسیلیس (%)
SiO ₂	۲۲/۲۸	۳۵/۱	۹۳/۱۶
Al ₂ O ₃	۴/۷۱	۱۰/۳	۱/۱۳
Fe ₂ O ₃	۲/۸۵	۰/۸	۰/۷۲
CaO	۶۵/۶۵	۳۶	-
MgO	۱/۹۵	۱۰/۸	۱/۶
Na ₂ O	۰/۱۵۵	۰/۷۱	-
K ₂ O	۰/۴۸۴	۰/۶۱	-
SO ₃	-	-	۰/۰۵
LOI	۱/۴۱	۵/۳۵	۲/۲۶

غلظت سدیم هیدروکسید در محلول فعال‌ساز، چهار مول و نسبت سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات برابر با سه مد نظر قرار گرفت. بنابراین نسبت SiO₂/Al₂O₃ برای طرح‌های اختلاط با میزان جانیشینی میکروسیلیس صفر، پنج و ۱۰ درصد، به ترتیب ۳/۴۷، ۳/۸۴ و ۴/۲۰ محاسبه گردید. در تحقیقات پیشین، محلول‌های قلیایی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات، بیشترین کاربرد را به‌عنوان فعال‌ساز سرباره داشته‌اند و ترکیب این دو، منتج به مقاومت مکانیکی بالاتر گردیده است [۳۰]. میزان غلظت فعال-ساز و نسبت سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات به‌کار رفته در تحقیقات مشابه [۱۵]، متفاوت بوده است. لذا با توجه به نزدیک‌تر بودن ضریب هیدراسیون سرباره در تحقیق حاضر (HM=1.63) به مقدار این ضریب در پژوهش رستمی و بهرنیا [۵] (HM=1.68)، غلظت و ترکیب فعال‌ساز این پژوهش، مبنای کار قرار گرفت.

در بیشتر مطالعات، درصد بهینه جایگزینی میکروسیلیس در سیستم با پایه سرباره، بین پنج تا ده درصد گزارش شده است [۳۰ و ۲۲ و ۱۹ و ۱]. بنابراین در این تحقیق، درصد‌های جایگزینی

سرباره قلیا فعال را تحت عمل آوری حرارتی با دمای ۶۵°C قرار داده و با نسبت‌های مختلف افزودنی کاهنده انقباض، بررسی کردند. نمونه‌هایی که تحت عمل آوری حرارتی قرار گرفتند ضمن داشتن انقباض کمتر، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به عمل آوری در دمای اتاق از خود نشان دادند. Mao-chieh Chi [۲۷] نیز به منظور کاهش انقباض با نسبت‌های مختلف محلول فعال‌ساز به سرباره و ماسه به سرباره، همراه با عمل آوری حرارتی با دمای ۶۵°C و ۸۵°C و با طرح اختلاط‌های مختلف به نتایج متفاوتی رسیدند. اما به طور کلی، در سن ۵۶ روزه دمای عمل آوری ۶۵°C نتایج بهتری را حاصل نمود. تحقیقات فوق از نظر عوامل گوناگون مانند نحوه عمل آوری حرارتی، ترکیب سرباره، مواد افزودنی، نوع و غلظت فعال‌ساز قلیایی و نسبت فعال‌ساز به سرباره متفاوت بودند. این موضوع، مقایسه و نتیجه‌گیری کلی در خصوص تأثیر عمل آوری حرارتی بر خواص سرباره قلیا فعال را دشوار می‌سازد. اما در پژوهش حاضر، تأثیر مشترک جایگزینی میکروسیلیس و عمل آوری حرارتی بر زمان گیرش خمیر و روند کسب مقاومت فشاری ملات با پایه سرباره قلیا فعال مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و مصالح و طرح مخلوط

۲-۱- مواد و مصالح

مواد به‌کار رفته برای ساخت خمیر و ملات عبارتند از: ماسه استاندارد مطابق با استاندارد ASTM C778-17 [۲۸]، سرباره کوره آهن‌گدازی دان شده محصول جانبی کارخانه ذوب آهن در نواحی مرکزی ایران با بلین ۴۵۰۰ cm²/gr، میکروسیلیس و سیمان پرتلند نوع ۲ از کارخانه‌هایی در منطقه غرب ایران، ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات با نسبت ۳ به ۱ برای فعال‌سازی سرباره که سدیم هیدروکسید به صورت جامد با خلوص ۹۸/۶٪ و سدیم سیلیکات به صورت محلول در آب با خلوص ۴۴/۵٪ و مدول سیلیکاتی ۲/۰۷ به کار گرفته شد. ترکیب شیمیایی سیمان، سرباره و میکروسیلیس در جدول ۱، نمایش داده شده است.

۲-۲- طرح مخلوط

نمونه‌های ملات جهت تعیین مقاومت فشاری، در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلیمتر و مطابق با استاندارد ASTM-C 109/C 109M-20b [۲۹] ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌های

صفر، پنج و ده درصد، مورد مطالعه واقع شدند. با توجه به تحقیقات گذشته [۲۷-۲۳ و ۲۱]، در این پژوهش، دماهای عمل آوری حرارتی 40°C ، 60°C و 80°C در مقایسه با عمل آوری در دمای محیط داده شده است.

جدول ۲- طرح مخلوط ماده سیمانی نمونه‌ها

طرح مخلوط	سیمان پرتلند نوع ۲ (%)	سرباره (%)	میکروسیلیس (%)	دمای عمل آوری ($^{\circ}\text{C}$)
PC*	۱۰۰	۰	۰	23 ± 2
S.SF0.23**	۰	۱۰۰	۰	23 ± 2
S.SF0.40	۰	۱۰۰	۰	۴۰
S.SF0.60	۰	۱۰۰	۰	۶۰
S.SF0.80	۰	۱۰۰	۰	۸۰
S.SF5.23	۰	۹۵	۵	23 ± 2
S.SF5.40	۰	۹۵	۵	۴۰
S.SF5.60	۰	۹۵	۵	۶۰
S.SF5.80	۰	۹۵	۵	۸۰
S.SF10.23	۰	۹۰	۱۰	23 ± 2
S.SF10.40	۰	۹۰	۱۰	۴۰
S.SF10.60	۰	۹۰	۱۰	۶۰
S.SF10.80	۰	۹۰	۱۰	۸۰

* PC: سیمان پرتلند

** S.SFX.Y (S: سرباره، SF: میکروسیلیس، X: درصد جایگزینی میکروسیلیس، Y: دمای عمل آوری)

۳- نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمایش

۳-۱- مقاومت فشاری

نمونه‌های ملات مورد نظر برای تعیین مقاومت فشاری، پس از قالب‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و درون کیسه پلاستیک درزبندی شده جای گرفتند.

سپس از قالب‌ها خارج گردیده و نمونه‌های منظور شده برای عمل-آوری در دمای محیط، در شرایط غرقابی نگهداری شدند و مابقی در کیسه‌های پلاستیکی درزبندی شده درون اجاق، به مدت ۲۴ ساعت تحت عمل آوری حرارتی قرار گرفتند و پس از رسیدن به دمای محیط، در شرایط غرقابی مستقر شدند. سپس نمونه‌ها در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه از آب خارج شده و بلافاصله، مقاومت فشاری آنها اندازه‌گیری و ثبت گردید.

۳-۲- زمان گیرش

آزمایش تعیین زمان گیرش خمیر مخلوط‌ها مطابق با استاندارد ASTM C191-19 [۳۱] انجام شد. میزان نفوذ سوزن دستگاه

ویکات برای نمونه خمیر سیمان پرتلند هر ۱۵ دقیقه یک بار مورد سنجش قرار گرفت. اما با توجه مطالعات گذشته، انتظار می‌رفت زمان گیرش نمونه‌های خمیر مربوط به سرباره قلیا فعال، نسبت به سیمان پرتلند کمتر باشد. لذا اندازه‌گیری میزان نفوذ سوزن دستگاه ویکات در نمونه خمیر مربوط به آن، هر پنج دقیقه تکرار شد. نمونه‌های مورد نظر برای سنجش در دماهای 40°C ، 60°C و 80°C ، در کیسه پلاستیکی و در شرایط درزبندی شده درون اجاق (که قبلاً دمای آن به دمای مورد نظر رسیده بود) قرار داده شدند و زمان گیرش اولیه و نهایی آنها اندازه‌گیری شد. برای کاهش تغییر دمای خمیر نمونه، دستگاه ویکات کنار اجاق گذاشته شد و پس از خارج کردن نمونه، درب اجاق بسته شده، نمونه از کیسه پلاستیکی خارج گردیده، میزان نفوذ سوزن دستگاه ویکات اندازه‌گیری و بلافاصله داخل پلاستیک و درون اجاق قرار داده شد. این فرآیند در زمان ۴۰-۳۰ ثانیه انجام شد. در این فرآیند، تغییر دمای نشان داده شده در نمایشگر دمای اجاق به حداکثر یک درجه سانتیگراد رسید.

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

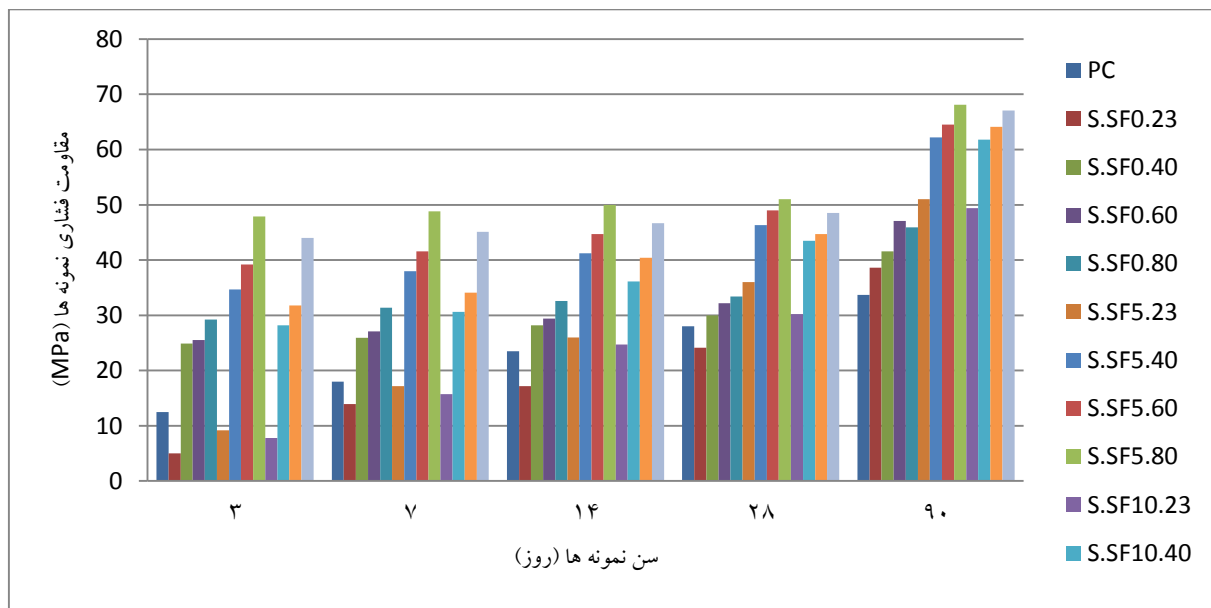
برای مطالعه ریزساختار نمونه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نمونه‌ها پس از خردایش، به منظور خارج شدن رطوبت باقیمانده، به جهت توقف توسعه مقاومت و نداشتن رطوبت حین انجام فرایند تصویربرداری، به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای 50°C نگهداری شدند. سپس تا فرارسیدن زمان تصویربرداری، بلافاصله درون کیسه‌های پلاستیکی درزبندی شده قرار گرفتند. قبل از عمل تصویربرداری، سطح نمونه‌ها با روکش طلا پوشش داده شد.

۴- بحث در نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

در شکل ۱ نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، مقاومت فشاری

ملات با پایه ۱۰۰ درصد سرباره و عمل آوری شده در دمای محیط، در سنین اولیه و حتی تا سن ۲۸ روزه، نسبت به ملات با پایه سیمان پرتلند، کمتر بود؛ ولی در سن ۹۰ روزه نتیجه برعکس شد. روند کند توسعه مقاومت در سنین اولیه را می‌توان به نسبت پایین Si/Al مخلوط در این تحقیق (تقریباً برابر با ۳/۵) مرتبط دانست. این پدیده، در یافته‌های برنال^۱ و همکاران [۳۲] نیز مشاهده شد. اما همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، طی انجام تحقیقات گذشته در خصوص تأثیر عمل آوری حرارتی بر مقاومت فشاری ملات قلیا فعال سرباره‌ای، نتایج متفاوتی گزارش شده است. برخی کاهش مقاومت نمونه‌های عمل آوری شده در دمای بالا را نسبت به عمل آوری در دمای محیط ثبت کردند [۲۴ و ۲۳ و ۲۱] و برخی دیگر خلاف آن را شاهد بودند [۲۷-۲۵].



شکل ۱- روند توسعه مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط

عوامل گوناگون در پژوهش‌های پیشین نتیجه‌گیری در خصوص نحوه تأثیر این عوامل بر کاهش یا افزایش مقاومت فشاری سرباره قلیا فعال را بسیار دشوار می‌سازد. دلیل افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، تحت تأثیر عمل آوری حرارتی در پژوهش حاضر را می‌توان اینگونه بیان نمود: فارغ از نحوه عمل آوری، برخی از مواد حاوی آلومینوسیلیکات در سیستم، واکنش نیافته (نابالغ) باقی می‌مانند. با افزایش دمای سیستم در سنین اولیه، میزان واکنش‌پذیری

این نتایج متفاوت، می‌تواند مرتبط با عوامل متعددی باشد. یکی از عوامل کاهش مقاومت فشاری ناشی از عمل آوری حرارتی، از دست رفتن برگشت ناپذیر رطوبت مورد نیاز برای واکنش است؛ که توقف روند افزایش مقاومت و یا حتی کاهش مقاومت را به دنبال دارد [۳۳]. در برخی مقالات یاد شده، توضیح دقیقی در مورد نحوه عمل آوری حرارتی داده نشده است. بنابراین مقایسه آنها از این منظر میسر نیست. اما همانطور که قبلاً بیان شد، تفاوت در

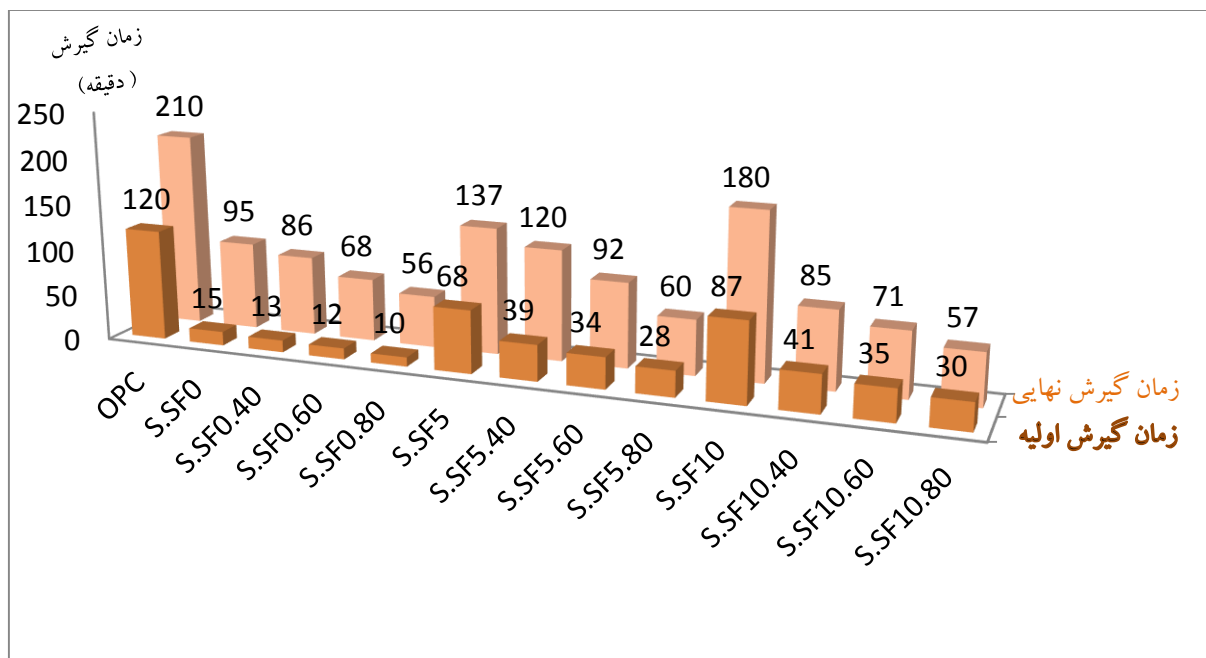
¹ Bernal

بود. به شکلی که کاربرد این ماده سیمانی را در کارگاه‌های ساختمانی با مشکل مواجه می‌سازد [۳۸]. با جایگزینی میکروسیلیس زمان گیرش اولیه و نهایی، افزایش چشمگیری نشان داد. بیشترین افزایش مربوط به ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس در نمونه عمل‌آوری شده در دمای اتاق بود که زمان گیرش اولیه و نهایی به ترتیب ۴۸۰٪ و ۸۹/۵٪ افزایش یافت. این پدیده را می‌توان به دو عامل زیر مرتبط دانست: ۱- رقابت بین ذرات میکروسیلیس و سرباره برای جذب یون OH^- موجود در محلول فعال‌ساز [۱۹ و ۲۰] ۲- تأخیر در انجام واکنش پوزولانی میکروسیلیس به لحاظ لزوم تشکیل $Ca(OH)_2$ حاصل از واکنش قلیایی سرباره [۳۹]. اما عمل‌آوری حرارتی در همه مخلوط‌ها، کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی را به دنبال داشت. بیشترین کاهش مربوط به عمل‌آوری در دمای $80^\circ C$ برای مخلوط با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس بود. میزان این افزایش به ترتیب ۶۵/۵٪ و ۶۸/۳٪ برای گیرش اولیه و نهایی ثبت شد. افزایش دمای سیستم، موجب تسریع در واکنش قلیایی سرباره و همچنین شتاب گرفتن واکنش پوزولانی میکروسیلیس می‌شود و از این طریق سبب کاهش زمان گیرش می‌گردد [۱۳ و ۳۹].

و تولید محصولات واکنش، از طریق انتشار یون‌های هیدروکسید و سیلیکات موجود در ژل تشکیل شده اولیه، افزایش می‌یابد و باعث افزایش زنجیره‌های پلیمری و توسعه سرعت انحلال مواد آلومینوسیلیکات و در نتیجه، کاهش ذرات نابالغ در سیستم می‌شود [۳۴ و ۳۵]. اما دیگر پدیده قابل مشاهده، افزایش مقاومت به سبب جایگزینی سرباره با میکروسیلیس است. میکروسیلیس جایگزین شده در مخلوط، از طرفی دارای خاصیت پوزولانی است؛ که تولید ژل C-S-H را در سیستم افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، به لحاظ ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سرباره، موجب پر شدن منافذ خمیر سیمانی می‌گردد. هر دو عامل فوق، افزایش مقاومت فشاری سیستم را به دنبال خواهند داشت [۳۶ و ۱۸ و ۵]. بهترین نتایج به دست آمده از حیث مقاومت فشاری، از جایگزینی میکروسیلیس به میزان ۵ درصد و عمل‌آوری حرارتی با دمای $80^\circ C$ حاصل شد. این نتایج، با تحقیقات مشابه [۳۷ و ۳۰ و ۲۶ و ۲۲ و ۲۰] مطابقت دارد.

۴-۲- زمان گیرش

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، زمان گیرش خمیر سرباره قلیا فعال، نسبت به خمیر سیمان پرتلند به میزان قابل توجهی کمتر



شکل ۲- زمان گیرش اولیه و نهایی (دقیقه) خمیر مخلوط طرح‌های مختلف

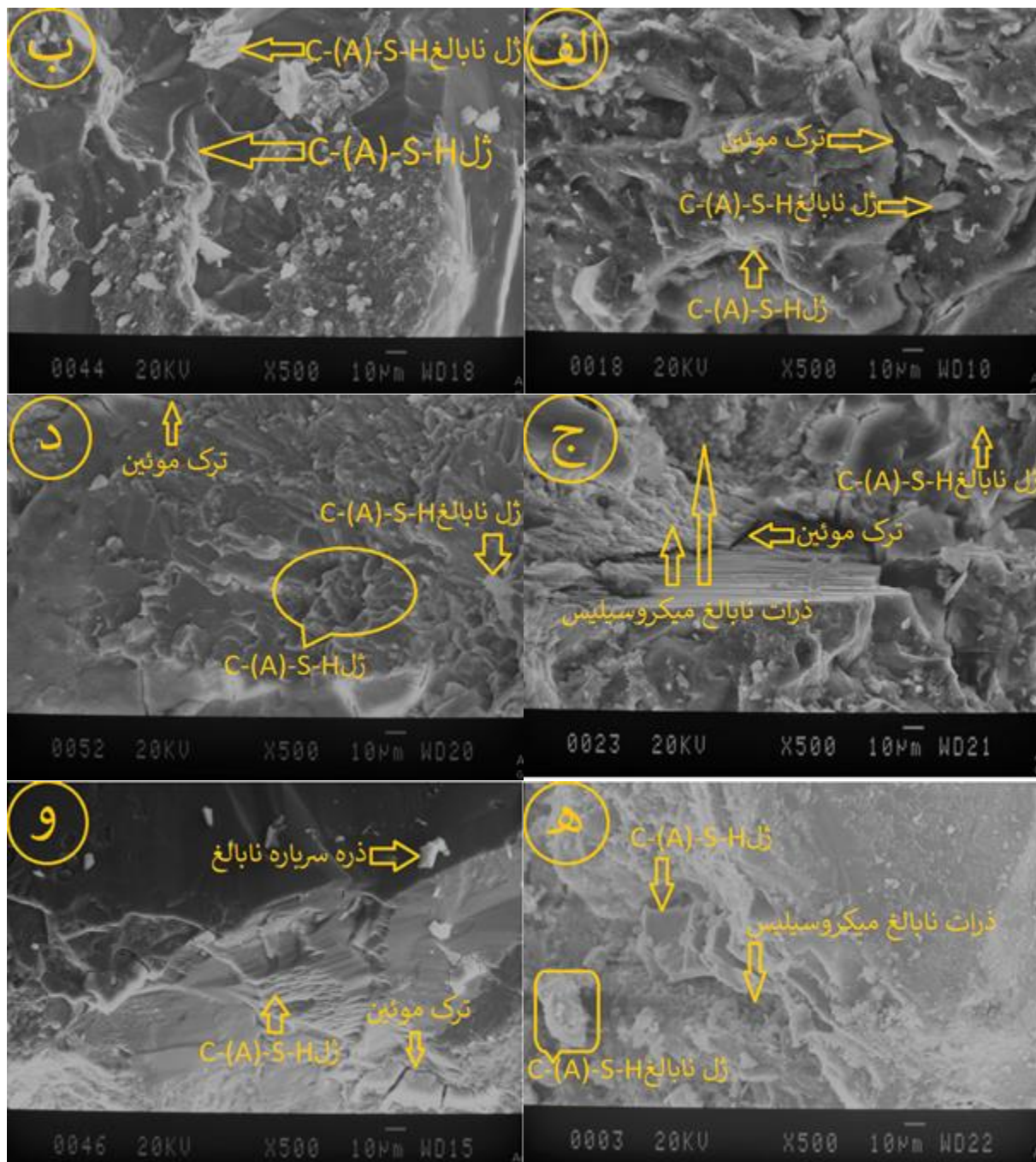
مقایسه نتایج این پژوهش با کارهای پژوهشی یاد شده در بخش مقدمه، نتایج حاصله در پژوهش حاضر قابل پذیرش بود.

همانطور که قبلاً اشاره شد، تحقیقات مشابه گذشته با ترکیب سرباره و فعال‌ساز قلیایی متفاوت صورت پذیرفته است. ولی با

آن تشکیل کامل تر ژل C-(A)-S-H در اثر عمل آوری حرارتی است. ترک‌های موئین که در سطح ژل نابالغ C-(A)-S-H مشاهده می‌شود، مربوط به واکنش سریع بین فعال‌ساز و سرباره در سنین ابتدایی است [۳۹]. همچنین نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه دارای ۱۰۰ درصد سرباره، از تراکم ساختاری بیشتری برخوردار بودند که نشان دهنده پر شدن منافذ توسط ذرات میکروسیلیس واکنش یافته است.

۳-۴- ریزساختار

برای مطالعه ریزساختار نمونه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد؛ که تصاویر مربوط به طرح‌های برگزیده، در سن ۹۰ روزه در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نمونه‌هایی که تحت عمل آوری حرارتی قرار گرفتند، نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط، دارای ساختار متراکم‌تر بودند و ترک‌ها و منافذ کمتری داشتند؛ که دلیل



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی طرح‌های منتخب

(الف: S.SF0.23، ب: S.SF0.80، ج: S.SF5.23، د: S.SF5.80، ه: S.SF10.23، و: S.SF10.80)

• با در نظر گرفتن اثر مشترک دو عامل عمل آوری حرارتی و جایگزینی میکروسیلیس، بر مقاومت فشاری و زمان گیرش، طرح مربوط به جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و عمل آوری با دمای 80°C حائز رتبه نخست گردید. اما چنانچه صرفه اقتصادی و مصرف انرژی کمتر و زمان گیرش طولانی تر مدنظر باشد، می توان طرح مخلوط مربوط به جایگزینی ۵ درصد میکروسیلیس و دمای عمل آوری 40°C را به عنوان طرح بهینه انتخاب نمود.

۶- مراجع

- [1] Ramezani pour A.A., Moeini M.A., Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume, *Construction and Building Materials*, 163, pp 611-621, 2018.
- [2] Saggaf, A.alkhaff, A Review of Underground Building Towards Thermal Energy Efficiency and Sustainable Development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp 692-713, 2016
- [3] Nasr D., Pakshir A.H., Ghayour H., The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars, *Construction and Building Materials*, 190, pp 108-119, 2018.
- [4] JordiPaya, Agrela F., Rosales J., Morales M.M. and Borrachero M.V., Application of alkali-activated industrial waste, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Chapter: 13, 2018.
- [5] Rostami M., Behfarnia K., The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 134, pp 262-268, 2017.
- [6] Garcia-Lodeiro I., Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Low environmental impact hybrid cement: reducing clinker content, *ALCONPAT Journal*, 5, pp 1-15, 2015.
- [7] Tänzer R., Yu Jin, Stephan D., Effect of the inherent alkalis of alkali activated slag on the risk of alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 98, pp 82-90, 2017.
- [8] Shi C., Fernandez Jimenez A., Palomo A., New cement for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 41, pp 750-763, 2011.
- [9] Yuksel I., Waste and Supplementary Materials in Concrete, Chapter: 12, 2018.
- [10] Tole I., Rajczakowska M., Kothari A. and Cwirzen A., Geopolymer Based on Mechanically Activated Air-Cooled Blast Furnace Slag, *materials*, 13, 1134, 2020.

با مقایسه تصاویر «الف»، «ج» و «ه»، تراکم بیشتر در ژل -C-(A)-S-H و کاهش ذرات سرباره واکنش نیافته، در نمونه های حاوی میکروسیلیس، نسبت به نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره مشاهده شد؛ که مؤید افزایش مقاومت فشاری نمونه ها در اثر جایگزینی میکروسیلیس است. اما مشاهده کاهش ذرات نابالغ سرباره و میکروسیلیس و تراکم بیشتر در تصاویر «ب»، «د» و «و» (طرح های تحت عمل آوری حرارتی در دمای 80°C)، در قیاس با مورد متناظر خود در تصاویر «الف»، «ج» و «ه» (طرح های عمل آوری شده در دمای محیط)، افزایش مقاومت در اثر عمل آوری حرارتی را به اثبات رساند.

پدیده دیگر، رؤیت ذرات واکنش نیافته میکروسیلیس در تصاویر «ج» و «ه» (مربوط به جایگزینی پنج و ده درصد میکروسیلیس و عمل آوری در دمای محیط) است. این ذرات ممکن است به دلیل ابعاد ریزتر نسبت به سرباره و چسبندگی ناشی از آن، در نقاطی از خمیر، به صورت تجمعی کنار یکدیگر باقی مانده و در دمای محیط، فرصت واکنش کامل را از دست داده باشند. اما همانطور که در تصاویر «د» و «و» (به ترتیب، مربوط به پنج و ده درصد جایگزینی میکروسیلیس و عمل آوری در دمای 80°C)، مشاهده می گردد، این ذرات نابالغ میکروسیلیس دیده نمی شوند. همانطور که قبلاً اشاره شد، دمای بالا موجب تسریع در واکنش سرباره و میکروسیلیس می گردد و بنابراین، ذرات واکنش نیافته کمتری در سیستم، باقی می مانند.

۵- نتیجه گیری

- نتایج این پژوهش را می توان به اختصار، به ترتیب زیر بیان نمود:
- جایگزینی میکروسیلیس در ملات با پایه سرباره قلیا فعال، از طرفی موجب افزایش مقاومت فشاری گردید که بیشترین افزایش مقاومت، مربوط به جایگزینی به میزان پنج درصد بود. از سوی دیگر، این جایگزینی، تأخیر قابل ملاحظه در زمان گیرش را به دنبال داشت که جایگزینی ۱۰ درصد، بیشترین تأخیر را موجب شد.
 - عمل آوری حرارتی با سرعت بخشیدن به واکنش فعال سازی سرباره و به تبع آن، واکنش پوزولانی میکروسیلیس، موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی ملات قلیا فعال سرباره ای شد. با دمای عمل آوری 80°C بیشترین مقاومت فشاری حاصل گردید.

- of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, pp 1619-1625, 1999.
- [24] Aliabdo A.A., Abd Elmoaty A.M., Emam M.A., Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete, *Construction and Building Materials*, 197, pp 339-355, 2019.
- [25] El-Feky M.S., Kohail M., El-Tair A.M., Serag M.I., Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes, *Construction and Building Materials*, 233, 117268, 2020.
- [26] C. Bilim, O. Karahan, C.D. Atiş and S. Ilkentapar, Effects of Chemical Admixtures and Curing Conditions on some Properties of Alkali-Activated Cementless Slag Mixtures, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 0, 1-9, 2015.
- [27] M. Chi, J. Chang and R. Huang, Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Paste and Mortar, *Advances in Civil Engineering*, 579732, 1-7, 2012.
- [28] ASTM C778-17, Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [29] ASTM C109 / C109M-20b, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [30] Rashad A.M., A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer, *Construction and Building Materials*, 47, pp 29-55, 2013.
- [31] ASTM C191-19, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [32] Bernal S.A., Mejia de Gutierrez R., Provis J.L., Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends, *Construction and Building Materials*, 33, pp 99-108, 2012.
- [33] Komljenović M., Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, Chapter: 7
- [34] Elyamany H.E., Abd Elmoaty A.M., Elshaboury A.M., Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders, *Construction and Building Materials*, 187, pp 974-983, 2018.
- [35] Noushini A., Castel A., The effect of heat curing on transport properties of low-calcium fly
- [11] Aydin S., Baradan B., Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars, *Materials and Design*, 35, pp 374-383, 2012.
- [12] Yoon H.N., Park S.M., Lee H.K., Effect of MgO on chloride penetration resistance of alkali-activated binder, *Construction and Building Materials*, 178, pp 584-592, 2018.
- [13] Gebregziabiher B.S., Thomas R.J., Peethamparan S., Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders, *Construction and Building Materials*, 113, pp 783-793, 2016.
- [14] Ellis K., Silvestrini R., Varela B., Alharbi N., Modeling setting time and compressive strength in sodium carbonate activated blast furnace slag mortars using statistical mixture design, *Cement and Concrete Composites*, 74, pp 1-6, 2016.
- [15] El-Yamany H.E., El-Salamawy M.A., El-Assal N.T., Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag mortar modified with latex, *Construction and Building Materials*, 191, pp 32-38, 2018.
- [16] Awoyera P., Adesina A., A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00268, 2019.
- [17] Rostami M., Behfarnia K., Effect of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 131, pp 206-213, 2017.
- [18] Chandra S., Berntsson L., Use of Silica Fume in Concrete, *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*, Chapter: 9, 1996.
- [19] Narimani Zamanabadi S., Zareei S.A., Shoaie P., Ameri F., Ambient-cured alkali-activated slag paste incorporating micro-silica as repair material: Effect of alkali activator solution on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 229, 116911, 2019.
- [20] Moeini M.A., Bagheri M., Joshaghani A., Ramezani-pour A.A., Moodi F., Feasibility of Alkali Activated Slag Paste as Injection Material for Rehabilitation of Concrete Structures, *J. Matter. Civ. Eng.*, 30(10), 04018252, 2018.
- [21] Aliques-Granero J., Tohoue Tognonvi M., Tagnit-Hamou A., Durability study of AAMs: Sulfate attack resistance, *Construction and Building Materials*, 229, 117100, 2019.
- [22] Rakhimova N.R. and Rakhimov R.Z., Alkali-Activated Slag-Blended Cements with Silica Supplementary Materials, *Inorganic Materials*, 48(9), pp 960-964, 2012.
- [23] Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.-B., Effect of elevated temperature curing on properties

ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112, pp 464-477, 2016.

[36] Rashad A.M., Khalil M.H., A preliminary study of alkali-activated slag blended with silica fume under the effect of thermal loads and thermal shock cycles, *Construction and Building Materials*, 40, pp 522-532, 2013.

[37] Rajarajeswari A., Dhinakaran G., Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing, *Construction and Building Materials*, 126, pp 552-559, 2016.

[38] Chang J.J., A study on setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, pp 1005-1011, 2003.

[39] McCarthy M.J., Dyer T.D., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Chapter: 9, 2019.

Assessment of elevated temperature curing on compressive strength and setting time of alkali activated slag mortar and paste, associated with silica fume

Naser Sameti

Department of civil Engineering Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Ebrahim Ghiasvand *

Department of civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Ehsanollah Zeighami

Department of civil Engineering Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Seyyed Mohammad Hoseini

Department of civil Engineering Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Abstract

One of the most attractive alternatives to ordinary Portland cement (OPC) as a binder material for applying in concrete and mortar in order to reduce its destructive environmental impact, due to CO₂ emission, is alkali activated slag. Use of this material as a replacement of OPC, in spite of preference for purpose of some properties, like mechanical strength and durability of concrete or mortar against aggressive environmental conditions, has some problems like short setting time, high contraction and inconstant chemical composition. The last item causes contradictory behavior for carbonation and elevated temperature curing. To improve the setting time and compressive strength of alkali activated slag (AAS) based paste and mortar, this research carried out to investigate the synergic effect of using Silica Fume (SF) and elevated temperature on setting time and compressive strength of AAS paste and mortar by substitution of SF at 0 w%, 5w% and 10w% of slag and elevated temperature curing at 40°C, 60°C and 80°C. Combination of sodium silicate and sodium hydroxide was applied for activation of slag. The concentration of sodium hydroxide solution was 4M and the ratio of sodium hydroxide to sodium silicate was 3 and the ratio of alkaline solution to slag was 0.45. Curing temperature at 80°C had the highest compressive strength, and the lowest setting time among the made mortars and pastes. On the other hand, 5w% replacement of silica fume, was the best choice for compressive strength aspect, and 10w% replacement represented the longest setting time. In terms of the synergic effect of substitution of slag with silica fume and heat treatment, with desirability of longer setting time, the substitution of 5w% silica fume, conjoint with 40°C heat curing, yielded the optimum results. The obtained resultants, was verified by means of Scanning Electron Microscope (SEM) pictures.

Keywords: Alkali activated slag, elevated temperature curing, silica fume.

* Corresponding Author: e.ghiasvand@basu.ac.ir

