

بررسی آزمایشگاهی اثر مدول و غلظت محلول قلیایی بر خصوصیات بتن قلیا فعال سرباره‌ای

کیاچهر بهفرنیا

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

حامد تقوایی یزدلی *

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

چسباننده‌های قلیا فعال سرباره‌ای (AAS)، می‌توانند به عنوان یک جایگزین برای سیمان پرتلند به کار روند. بتن AAS از فعال‌سازی سرباره با مواد قلیایی و بدون استفاده از سیمان پرتلند ساخته می‌شود. با توجه به تأثیر مواد قلیایی بر خصوصیات بتن AAS، در این تحقیق اثر غلظت محلول قلیایی و مدول سیلیکات سدیم بر زمان گیرش، اسلامپ، مقاومت فشاری و جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن قلیا فعال سرباره‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید. بدین منظور تعداد ۲۰ طرح اختلاط با نسبت‌های مختلف غلظت قلیایی و مدول سیلیکات سدیم ساخته شدند و آزمایش‌های زمان گیرش خمیر و اسلامپ بتن در حالت تازه انجام شد و علاوه بر آن مقاومت فشاری ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه بتن و جمع‌شدگی خشک‌شدگی نمونه‌های بتنی تا ۴۰۰ روز اندازه‌گیری شد. در بیشتر طرح‌ها، افزایش غلظت قلیایی و مدول سیلیکات سدیم محلول فعال‌ساز سبب افزایش اسلامپ بتن تازه و سرعت کسب مقاومت فشاری اولیه طرح مخلوط‌ها می‌شود ولی زمان گیرش را کاهش می‌دهد. با این حال در غلظت‌های قلیایی و مدول‌های سیلیکات بالا کاهش مقاومت فشاری و افزایش زمان گیرش با افزایش پارامترهای محلول فعال‌ساز دیده می‌شود. هرچند که با افزایش مدول سیلیکات سدیم و همچنین افزایش غلظت محلول قلیایی فعال‌ساز، سرعت اولیه جمع‌شدگی نمونه‌ها افزایش یافت اما مشاهده شد که تأثیر مدول سیلیکات سدیم نسبت به غلظت محلول قلیایی بر مقدار نهایی جمع‌شدگی خشک‌شدگی نمونه‌ها بسیار بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: قلیا فعال سرباره‌ای، فعال‌ساز قلیایی، مقاومت فشاری، کارایی، جمع‌شدگی خشک‌شدگی.

* نویسنده مسئول: h.taghvayyi87@gmail.com

۱- مقدمه

سیلیکات ۰/۶ تا ۱/۵ حاصل می‌شود [۱۷ و ۱۸]. همچنین برخی از محققین افت مقاومت فشاری برای محلول‌های با مدول سیلیکات بیش از یک گزارش کردند [۱۹]. با بالا رفتن غلظت قلیایی محلول قلیایی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، اما غلظت‌های قلیایی بالا سبب تضعیف ساختار ژل چسباننده می‌شود [۲۰-۲۲]. در خمیرهای با درصد Na_2O یکسان، فعال‌سازی با سدیم سیلیکات مقاومت بیشتری نسبت به سدیم هیدروکسید نتیجه می‌دهد [۲۳].

جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS بیشتر از بتن با سیمان پرتلند معمولی (OPC) است [۱۱] به طوری که مقدار جمع‌شدگی خشک‌شدگی تا ۳/۳۳ برابر بیشتر از بتن OPC گزارش شده است [۲۴]. بنابراین شناخت عوامل تأثیرگذار بر جمع‌شدگی بتن AAS اهمیت زیادی دارد. دلایل جمع‌شدگی بیشتر چسباننده‌های AAS نسبت به OPC، وجود حفرات میانی بیشتر در چسباننده‌های AAS [۲۵] و وجود مواد منبسط شونده از قبیل اترینگایت و پرتلندایت در محصولات چسباننده OPC می‌باشد [۲۶]. مقدار جمع‌شدگی مصالح AAS با خصوصیات ویسکوز و بازترتیب ورق‌های C-A-S-H تحت تنش‌های موئینه مرتبط است و ارتباط مستقیمی با آب ازدست‌داده ندارد و در رطوبت نسبی ۵۰٪ حفرات میانی و جمع‌شدگی خشک‌شدگی، بیش‌ترین مقدار را دارد [۲۷]. غلظت مواد قلیایی و مدول سیلیکات رابطه مستقیمی با جمع‌شدگی خشک‌شدگی چسباننده‌های AAS دارد [۱۷ و ۱۲] به طوری که کاهش تخلخل و ریز شدن حفرات با افزایش قلیابیت مخلوط دیده شده است [۱۰]. استفاده از فعال‌ساز سیلیکات سدیم بیش‌ترین جمع‌شدگی خشک‌شدگی را نسبت به سایر فعال‌سازهای رایج در بتن AAS نتیجه می‌دهد که بیش‌ترین مقدار جمع‌شدگی خشک‌شدگی با استفاده از محلول سیلیکات سدیم با مدول سیلیکات ۱ حاصل می‌شود [۱۲].

جمع‌شدگی خشک‌شدگی با ترک خوردگی سازه‌های مقید در ارتباط است و ترک‌ها مشکلاتی را مانند نفوذ بیشتر آب و مواد مضر به داخل بتن، ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، تغییر شکل‌های ناشی از جمع‌شدگی می‌تواند سبب ازدست‌دادن نیروی پیش‌تنیدگی در اعضای بتنی پیش‌تنیده شود؛ بنابراین درک بهتر جمع‌شدگی خشک‌شدگی و مکانیسم‌های آن، به‌منظور بهبود دوام سازه‌های بتنی، لازم است.

استفاده از محصولات فرعی صنعتی به عنوان چسباننده می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند معمولی باشد. تولید جهانی سیمان پرتلند در سال ۲۰۱۷ به میزان ۴/۲ بیلیون تن بود [۱]؛ در حالی که تولید ۱ تن سیمان حدود ۰/۹ تن گاز CO_2 آزاد می‌کند که بیشتر این گاز ناشی از حرارت دادن سنگ آهک به منظور تشکیل فازهای سیلیکاتی و آلومیناتی هست [۳ و ۲]. در طول قرن اخیر، استفاده از چسباننده‌های قلیا فعال با پایه مصالح با کلسیم بالا مانند سرباره‌ی کوره بلند و سایر محصولات فرعی صنعتی توسعه یافته است [۴].

ساختار ژل چسباننده که در فعال‌سازی سرباره شکل می‌گیرد وابسته به فعال‌ساز و خصوصیات مصالح خام می‌باشد [۵]. آنیون‌های موجود در فعال‌ساز با Ca^{2+} روی ذرات سرباره واکنش می‌دهد و ترکیباتی به وجود می‌آورند که نسبت به $\text{Ca}(\text{OH})_2$ در برابر شستگی و حملات شیمیایی مقاوم‌ترند [۶ و ۷]. با این حال استفاده از چسباننده‌های چسباننده‌های قلیا فعال سرباره‌ای (AAS)^۱ به دلیل کارایی کم، جمع‌شدگی خشک‌شدگی زیاد و نرخ بالای کربناسیون محدود شده است [۸ و ۹]. به منظور استفاده گسترده از بتن AAS در صنعت ساخت، لازم است اثر فاکتورهای مختلف روی خواص بتن AAS بررسی شود.

Neto و همکاران نشان دادند که افزایش قلیابیت خمیر AAS سبب افزایش سرعت و مقدار گرمای آزاد شده می‌شود و آن‌ها نتیجه گرفتند که این عامل می‌تواند درجه هیدراسیون را افزایش دهد [۱۰ و ۱۱]. زمان‌گیری با افزایش مدول سیلیکات و غلظت سدیم هیدروکسید محلول قلیایی کاهش می‌یابد ولی در غلظت قلیایی زیاد، افزایش زمان‌گیری بعد مدول سیلیکات ۱/۲ مشاهده شده است [۱۲ و ۱۳]. کاهش دمای عمل‌آوری [۱۴] و جایگزینی سرباره با مواد کلسیم-پایین سبب افزایش زمان‌گیری و کاهش جمع‌شدگی خشک‌شدگی می‌شود [۱۵ و ۱۶].

استفاده از فعال‌ساز سیلیکات سدیم بیش‌ترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر فعال‌سازهای رایج، در بتن AAS نتیجه می‌دهد [۱۲]. به طوری که مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقاومت فشاری با استفاده از محلول سیلیکات سدیم با مدول

¹ Alkali activated slag

(آب شیشه) با مدول $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ برابر $2/32$ شامل 52% آب با محلول سدیم هیدروکسید مخلوط شد و به عنوان فعال ساز در بتن AAS استفاده شد، تا محلولی با مدول M_s در محدوده $0/45$ تا $1/05$ و n (درصد وزنی Na_2O به سرباره) در محدوده $3/5$ تا $7/5$ تهیه شود. ماسه رودخانه‌ای با مدول نرمی $3/06$ مطابق با ASTM C33 به عنوان ریزدانه و شن شکسته با بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه $12/5 \text{ mm}$ به عنوان درشت‌دانه انتخاب شد.

جدول ۱- درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سرباره و سیمان

قلیایی‌ها	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
سرباره (%)	9/5	0/5	36	9/5	35/5	
سیمان (%)	2/4	3/3	63/5	5/3	21/5	

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

برای فعال‌سازی سرباره حداقل غلظت قلیایی (n) $3/5$ درصد انتخاب شد. همچنین برای دستیابی به کارایی مناسب و جلوگیری از گیرش سریع و مقاومت بهینه بتن، حداکثر n برابر $7/5$ درصد و M_s در محدوده $0/35$ تا $1/05$ انتخاب شد [۳۰، ۲۹، ۱۹]. در این تحقیق n برابر $3/5$ ، $4/5$ ، $5/5$ ، $6/5$ و $7/5$ درصد و M_s برابر $0/45$ ، $0/65$ ، $0/85$ و $1/05$ انتخاب شد. ترکیبات اختلاط بتن AAS در جدول ۲ نشان داده شده است. نسبت آب به چسباننده برای دستیابی به کارایی مناسب، $0/43$ ثابت نگه داشته شد. مقدار آب، حاصل جمع آب موجود در محلول سیلیکات سدیم و آب اضافه‌شده به مخلوط می‌باشد. همچنین چسباننده شامل سرباره، سدیم هیدروکسید و قسمت جامد محلول سیلیکات سدیم است. مقدار سرباره در مخلوط بتن 400 kg/m^3 بود. نسبت وزنی سنگ‌دانه‌ها به مخلوط بتن $0/75$ و نسبت وزنی درشت‌دانه به کل سنگدانه‌ها برابر $0/575$ بود بر این اساس مقدار درشت‌دانه 1035 kg/m^3 و ریزدانه 765 kg/m^3 بود. نمونه‌های بتن OPC نیز به منظور مقایسه با بتن AAS ساخته شدند. مقدار سیمان به کاررفته در طرح OPC برابر با 436 kg/m^3 برابر با مقدار مواد جامد چسباننده در طرح N55M85 انتخاب شد. در فرایند مخلوط کردن اجزاء تشکیل دهنده بتن AAS، شن و ماسه و سرباره به مدت ۲ دقیقه باهم مخلوط شدند و سپس محلول فعال‌ساز به مخلوط اضافه شد و مخلوط کردن به مدت ۵ دقیقه ادامه پیدا کرد.

تعداد زیادی مطالعه روی جمع‌شدگی بتن معمولی انجام شده است که بر این اساس مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی جمع‌شدگی بتن OPC ارائه شده است که در [۲۸] ACI209 جمع‌آوری شده‌اند. به دلیل مطالعات اندک صورت گرفته بر روی جمع‌شدگی بتن AAS پیش‌بینی جمع‌شدگی این بتن به سختی انجام می‌شود. با توجه به تأثیر مدول سیلیکات سدیم و غلظت قلیایی محلول روی رفتار کوتاه مدت و بلندمدت چسباننده‌های AAS، لازم است آزمایش‌ها و مطالعات اولیه انجام شود تا طرح‌های مورد بررسی کارایی و مقاومت فشاری مناسبی برای کاربردهایشان داشته باشند. در این تحقیق محدوده مشخصی از غلظت قلیایی و مدول سیلیکات برای ساخت بتن در نظر گرفته می‌شود تا مقاومت فشاری و روانی مطلوبی برای ساخت داشته باشد. جمع‌شدگی خشک‌شدگی طرح‌ها در طول 400 روز اندازه‌گیری می‌شود.

به نظر می‌رسد لازم است جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS در مخلوط‌هایی که دارای مقاومت و کارایی مناسب می‌باشد بررسی شود. بنابراین در این تحقیق اثر غلظت محلول قلیایی و مدول سیلیکات آن بر کارایی، مقاومت فشاری و جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS بررسی شد. تا بتوان اثر پارامترهای مختلف محلول فعال‌ساز را بر روی خواص این بتن پیش‌بینی کرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

در این تحقیق به منظور ساخت بتن AAS، سرباره کوره آهن‌گدازی با ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات فعال شد. سرباره استفاده‌شده در این تحقیق محصول کارخانه ذوب‌آهن اصفهان می‌باشد که وزن مخصوص آن $2/85 \text{ gr/cm}^3$ و سطح مخصوص آن برابر $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ می‌باشد. ضریب پایه $K_b = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ برابر است با $1/01$. برای طرح کنترل OPC از سیمان محصول شرکت سیمان سپاهان استفاده شد.

ترکیبات سرباره و سیمان مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۱ نشان داده شده است. سدیم هیدروکسید جامد با خلوص $0/98$ برای ساخت محلول قلیایی مورد استفاده قرار گرفت و حداقل دو ساعت قبل از ریختن داخل بتن، برای تکمیل واکنش‌های شیمیایی و رسیدن به تعادل دمایی، با آب ترکیب شد. سدیم سیلیکات مایع

جدول ۲- طرح مخلوط‌های بتن AAS

طرح	n	M _s	آب شیشه (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	W _{add} ^a (kg/m ³)
N35M45	۰/۰۳۵		۱۸/۷۸	۱۴/۵۶	۱۷۲/۳۷
N45M45	۰/۰۴۵		۲۴/۱۵	۱۸/۷۲	۱۷۲/۴۷
N55M45	۰/۰۵۵	۰/۴۵	۲۹/۵۲	۲۲/۸۸	۱۷۲/۵۸
N65M45	۰/۰۶۵		۳۴/۸۸	۲۷/۰۳	۱۷۲/۶۹
N75M45	۰/۰۷۵		۴۰/۲۵	۳۱/۱۹	۱۷۲/۷۹
N35M65	۰/۰۳۵		۲۷/۱۳	۱۳/۰۰	۱۶۹/۰۸
N45M65	۰/۰۴۵		۳۴/۸۸	۱۶/۷۱	۱۶۸/۲۵
N55M65	۰/۰۵۵	۰/۶۵	۴۲/۶۳	۲۰/۴۳	۱۶۷/۴۱
N65M65	۰/۰۶۵		۵۰/۳۸	۲۴/۱۴	۱۶۶/۵۸
N75M65	۰/۰۷۵		۵۸/۱۴	۲۷/۸۶	۱۶۵/۷۵
N35M85	۰/۰۳۵		۳۵/۴۸	۱۱/۴۴	۱۶۵/۷۹
N45M85	۰/۰۴۵		۴۵/۶۱	۱۴/۷۱	۱۶۴/۰۲
N55M85	۰/۰۵۵	۰/۸۵	۵۵/۷۵	۱۷/۹۸	۱۶۲/۲۵
N65M85	۰/۰۶۵		۶۵/۸۹	۲۱/۲۵	۱۶۰/۴۸
N75M85	۰/۰۷۵		۷۶/۰۲	۲۴/۵۲	۱۵۸/۷۰
N35M105	۰/۰۳۵		۴۳/۸۳	۹/۸۹	۱۶۲/۵۱
N45M105	۰/۰۴۵		۵۶/۳۵	۱۲/۷۱	۱۵۹/۸۰
N55M105	۰/۰۵۵	۱/۰۵	۶۸/۸۷	۱۵/۵۴	۱۵۷/۰۸
N65M105	۰/۰۶۵		۸۱/۳۹	۱۸/۳۶	۱۵۴/۳۷
N75M105	۰/۰۷۵		۹۳/۹۱	۲۱/۱۸	۱۵۱/۶۶
OPC	C=۴۳۶ kg/m ³ w/c=۰/۴۳				

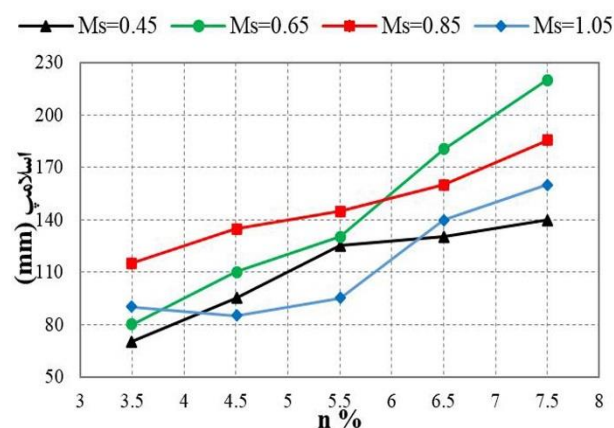
^aW_{add}: آب اضافه شده به مخلوط.

نگهداری شدند. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد و مقدار مقاومت فشاری برابر میانگین ۳ نمونه بود. در این تحقیق از نمونه‌های منشوری شکل به ابعاد mm ۷۵×۷۵×۲۸۵ برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی خشک‌شدگی طبق استاندارد ASTM C157 [۳۱] استفاده شد. در هر طرح از ۳ نمونه منشوری برای اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌ها استفاده شد. اندازه‌گیری کرنش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه دمک گنج با نقاطی که در دو طرف نمونه ثابت شده بودند با دقت ۸ میکرون انجام شد که کمتر از حداکثر خطای ۱۰ میکرون توصیه شده در ASTM C157 می‌باشد. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری با یک پوشش پلاستیکی پوشانده شدند و پس از ۲۴ ساعت از داخل قالب بیرون آورده شده و پس از اولین قرائت، در اتاق خشک شدن با دمای (C) ۲۳±۲ و رطوبت نسبی RH=۵۰٪ نگهداری شدند. اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌ها تا ۴۰۰ روز پس از اولین قرائت ثبت شدند.

۳- نتایج و بحث‌ها

۳-۱- اسلامپ

شکل ۱ مقادیر اسلامپ برای مخلوط‌های بتن AAS نشان می‌دهد. در بیشتر مخلوط‌ها با افزایش غلظت قلیایی اسلامپ بتن AAS افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده با مرجع [۲۴ و ۳۴] انطباق دارد.



شکل ۱- اثر n و M_s روی اسلامپ بتن تازه

با توجه به نتایج به دست آمده توسط محققین طرح اختلاط‌هایی که از غلظت محلول بالایی برخوردارند، افت کارایی و اسلامپ سریعی دارند. افزایش مقدار مدول سیلیکات و غلظت قلیایی نرخ هیدراسیون را افزایش خواهد داد و زمان گیرش را کم می‌کند. لازم است کارایی بتن تا زمان بتن‌ریزی در وضعیت مطلوبی نگه داشته شود.

۳-۲- روش انجام آزمایش

کارایی نمونه‌های بتنی با آزمون اسلامپ طبق ASTM C143 [۳۱] بر روی فاز تازه بتن انجام شد و اندازه‌گیری زمان‌های گیرش طبق ASTM C191 [۳۲] اصلاح شده با نفوذ سوزن و یکات به داخل نمونه‌های خمیر چسباننده، انجام شد. بدین منظور خمیر با نسبت آب به چسباننده ۰/۴۳ داخل قالب ریخته شد و مدت زمان نفوذ سوزن در داخل خمیر به عمق ۲۵ و ۲ میلی‌متر به ترتیب به عنوان زمان اولیه و نهایی گیرش ثبت شد.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری طبق استاندارد BS1881 [۳۳] مکعب‌های mm ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ آماده شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای (C) ۲۳±۲ آزمایشگاه از قالب خارج می‌شود و تا زمان انجام آزمایش داخل آب آهک اشباع شده

۲-۳- زمان گیرش

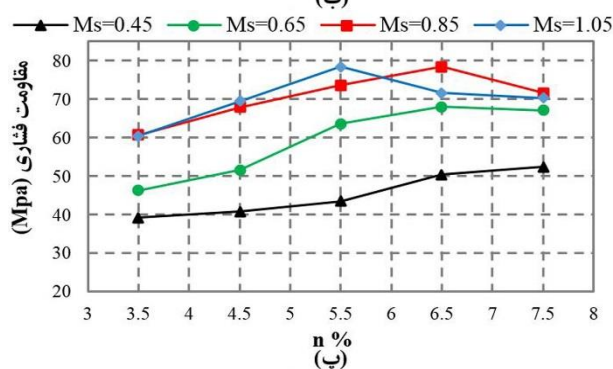
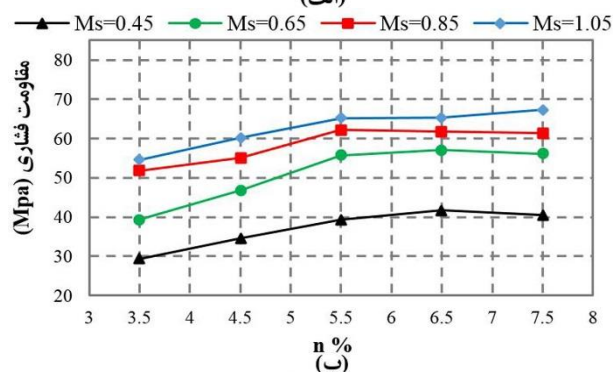
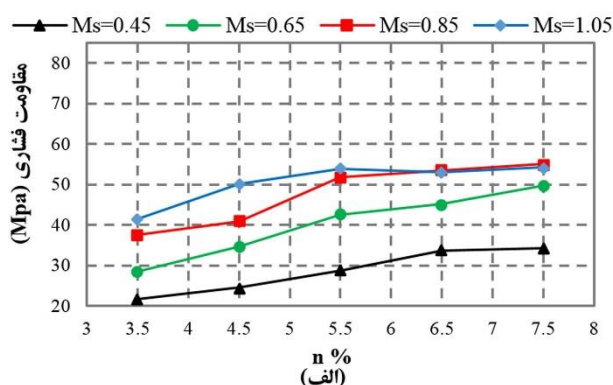
نتایج زمان گیرش اولیه و نهایی در جدول ۳ نشان داده شده است. در بیشتر طرح‌ها، زمان گیرش با افزایش M_s و n کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش نرخ تجزیه و رسوب عناصر سرباره می‌باشد [۳۵-۳۷].

جدول ۳- اثر پارامترهای محلول فعال‌ساز روی زمان گیرش اولیه و نهایی

M_s	n (%)				
	۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۵	۷/۵
۰/۴۵	۷۱۲ ^a	۶۱۵	۲۱۳	۱۸۰	۲۱۷
	(۹۲۰) ^b	(۸۶۰)	(۳۱۵)	(۲۷۶)	(۲۷۰)
۰/۶۵	۶۴۰	۵۴۳	۱۷۰	۱۳۴	۱۶۰
	(۸۹۰)	(۸۴۱)	(۲۷۰)	(۲۰۰)	(۲۱۰)
۰/۸۵	۵۹۲	۴۲۸	۱۱۱	۷۸	۱۳۵
	(۷۸۰)	(۶۰۸)	(۲۸۱)	(۱۳۱)	(۱۸۴)
۱/۰۵	۵۵۰	۷۹	۴۸	۳۰	۴۳
	(۸۳۰)	(۲۳۱)	(۱۲۸)	(۹۵)	(۹۳)

^a زمان گیرش اولیه (دقیقه)

^b زمان گیرش نهایی (دقیقه)



شکل ۲- اثر n و M_s روی مقاومت فشاری بتن AAS (الف) مقاومت فشاری ۷ روزه، (ب) ۲۸ روزه و (پ) ۹۰ روزه

نتایج مقاومت فشاری برای مخلوط‌های با M_s برابر ۰/۸۵ و ۱/۰۵ نزدیک به هم هستند و حتی مقاومت فشاری ۹۰ روزه در طرح‌های با n برابر ۶/۵ و ۷/۵ درصد و $M_s=1/05$ ، کمتر از طرح‌های با n مشابه و

در محدوده غلظت قلیایی ۳/۵ تا ۵/۵ درصد افزایش غلظت قلیایی تأثیر قابل توجهی بر کاهش زمان گیرش دارد. ولی برای محلول‌هایی با غلظت قلیایی n بالاتر از ۵/۵ مقدار تغییرات زمان گیرش کمتر است و حتی افزایش زمان گیرش در غلظت قلیایی بالاتر از ۶/۵ درصد برای مدول‌های محلول برابر یا کمتر از ۰/۸۵ مشاهده شد که به معنی کاهش تولید ژل C-S-H است [۳۰ و ۳۸].

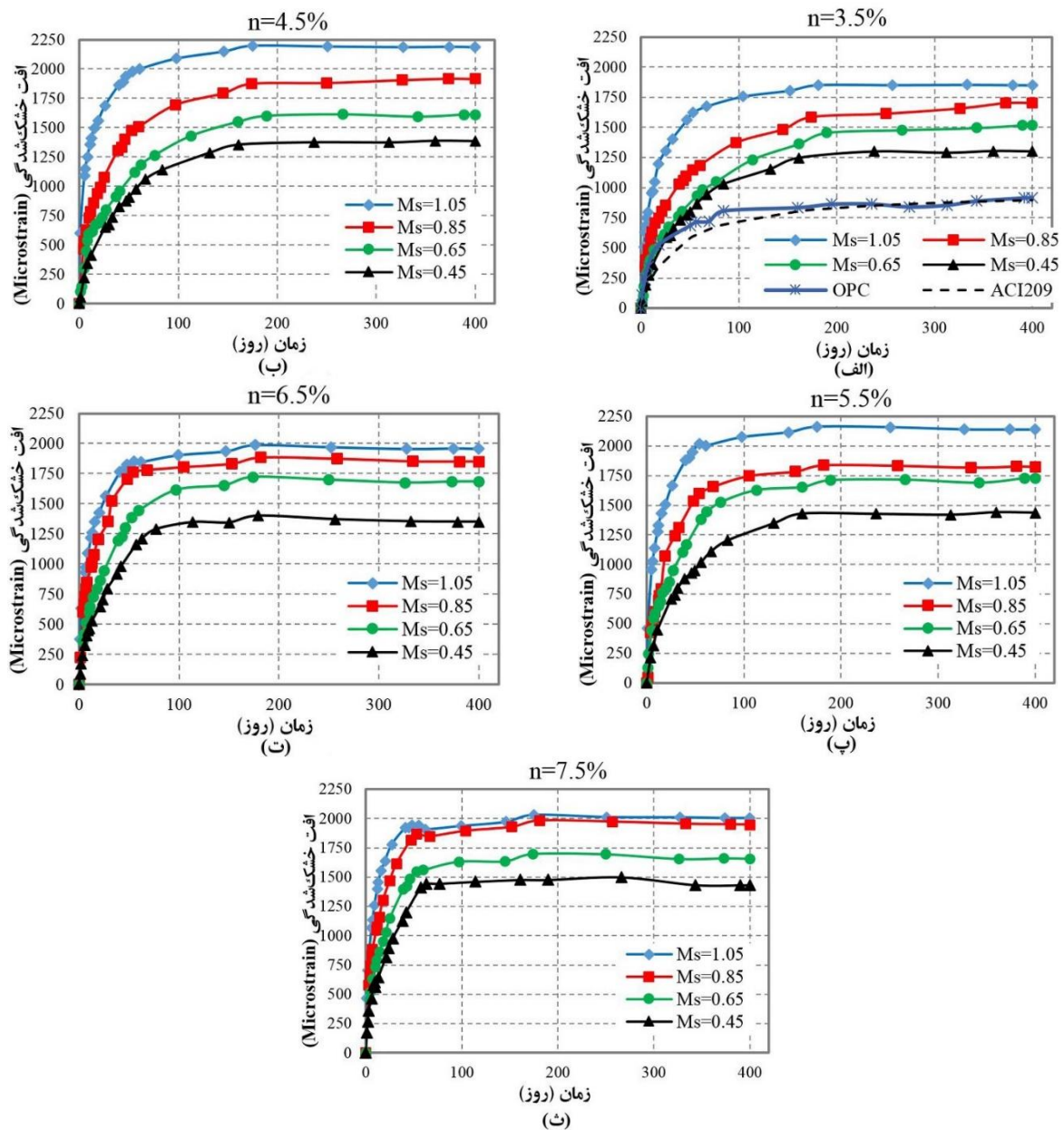
۳-۳- مقاومت فشاری

شکل ۲ اثر غلظت قلیایی و مدول سیلیکات را بر مقاومت فشاری ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه در بتن AAS نشان می‌دهد. در بیشتر حالت‌ها مشاهده می‌شود زمانی که n و M_s افزایش می‌یابد مقاومت فشاری و نرخ توسعه مقاومت افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده مبنی بر افزایش درجه هیدراسیون و تولید ژل C-S-H منطبق است [۳۹ و ۴۰]. با توجه به شکل ۳ (الف) با افزایش غلظت قلیایی بیشتر از ۶/۵ درصد، مقاومت فشاری ۷ روزه افزایش می‌یابد اما مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه تغییر قابل توجهی ندارند و در بیشتر حالات اندکی کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. کاهش مقاومت در غلظت‌های قلیایی بالا، می‌تواند با واکنش هیدراسیون سرباره با یک محلول قلیایی توضیح داده شود به طوری که در طول واکنش قلیایی

با $M_s=0/85$ است. در مطالعه دیگری کاهش مقاومت فشاری در مخلوط‌هایی با مدول سیلیکات بیشتر از ۱ مشاهده شده بود و نتایج بین مدول‌های ۰/۷۵ تا ۱ بسیار نزدیک به هم بودند [۱۳]. تجمع محصولات واکنش اطراف ذرات سرباره سبب جلوگیری از واکنش هیدراسیون سرباره در مخلوط‌هایی با M_s بالا می‌شود [۴۳ و ۴۴]. با توجه به نتایج، مخلوط‌هایی با غلظت قلیایی و مدول سیلیکات بالا، سرعت کسب مقاومت بالاتری دارند. برای مثال نسبت مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به مقاومت ۹۰ روزه برای مخلوط N35M45 به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۷۵ می‌باشد درحالی‌که برای مخلوط N75M105، این نسبت‌ها به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۹۶ می‌باشد.

۳-۴- جمع‌شدگی خشک‌شدگی

نمودارهای جمع‌شدگی و مقادیر نهایی جمع‌شدگی خشک‌شدگی نمونه‌های بتنی در طول مدت ۴۰۰ روز به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS بین ۱۳۰۰ تا ۲۲۰۰ میکرواسترین پس از ۴۰۰ روز اندازه‌گیری شد در صورتی که این مقدار برای بتن OPC ۹۱۵ میکرواسترین بود. مطابق شکل ۳-الف، مدل پیش‌بینی ACI 209R-92 انطباق خوبی با نتایج بتن OPC دارد با این حال جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر بیشتر از بتن OPC می‌باشد.



شکل ۳- اثر M_s روی جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS (الف). ($n=3/5$ ، ب). ($n=4/5$ ، پ). ($n=5/5$ ، ت). ($n=6/5$ ، ث). ($n=7/5$ ، ج)

به طوریکه همان طور که در بخش گذشته مشاهده شد، در برخی از طرح‌ها با افزایش n به بیش از ۶/۵٪ مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یافت. این موضوع سبب کاهش تراکم ساختار ژل و کاهش تنش‌های کششی موئینه در ساختار خمیر AAS می‌شود و جمع‌شدگی خشک‌شدگی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر غلظت قلیایی و مدول سیلیکات سدیم محلول فعال‌ساز بر اسلامپ، زمان گیرش، مقاومت فشاری و جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن قلیافعال سرباره‌ای بررسی شد. از این تحقیق نتایج زیر می‌تواند به دست آید:

- افزایش غلظت قلیایی در بیشتر طرح‌ها، سبب افزایش اسلامپ می‌شد ولی افزایش n و M_s نرخ هیدراسیون را افزایش می‌دهد و سبب کاهش زمان گیرش می‌گردد. افزایش غلظت قلیایی از ۳/۵ تا ۵/۵ درصد تأثیر قابل توجهی بر کاهش زمان گیرش داشت ولی غلظت‌های قلیایی بیشتر تأثیر کمتری بر کاهش زمان گیرش دارد.
- افزایش n و M_s به ترتیب تا ۶/۵ درصد و ۰/۸۵، سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شد. با این حال مقادیر بالاتر n و M_s تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری نداشت، حتی افت مقاومت فشاری ۹۰ روزه نیز در بعضی طرح‌ها مشاهده شد.
- در طرح‌هایی که با محلول فعال‌ساز با مدول سیلیکات و غلظت قلیایی کمتری ساخته می‌شوند، مقاومت اولیه پایینی دارند ولی نرخ رشد مقاومت آن‌ها بیشتر از طرح‌های ساخته‌شده با n و M_s است.
- مقدار جمع‌شدگی نهایی در طرح‌های بتن AAS نسبت به بتن OPC بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر بیشتر بود.
- افزایش مدول سیلیکات و غلظت قلیایی سبب افزایش سرعت جمع‌شدگی خشک‌شدگی در کوتاه مدت شد ولی مدول سیلیکات در مقایسه با غلظت قلیایی تأثیر قابل توجهی بر مقدار جمع‌شدگی نهایی دارد.

۵- مراجع

[1]. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2017-cemen.pdf>, U.G.S.M.c.s.c.

جدول ۴- مقدار اندازه‌گیری شده جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS پس از ۴۰۰ روز (microstrain)

		n (%)				
		۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۵	۷/۵
M_s	۰/۴۵	۱۳۰۱	۱۳۸۵	۱۴۲۷	۱۳۵۰	۱۴۳۲
	۰/۶۵	۱۵۲۰	۱۶۱۱	۱۸۲۹	۱۶۸۸	۱۶۵۷
	۰/۸۵	۱۷۰۸	۱۹۱۵	۱۸۲۶	۱۸۵۰	۱۹۴۸
	۱/۰۵	۱۸۵۰	۲۱۸۵	۲۱۴۰	۱۹۵۷	۲۰۰۵

نرخ جمع‌شدگی خشک‌شدگی در ابتدا با افزایش درصد قلیایی و مدول محلول افزایش یافته به طوریکه ۵۰ درصد جمع‌شدگی خشک‌شدگی در طرح N35M45 ($M_s=4/5$ و $n=3/5\%$) که کمترین n و M_s را داشت، به صورت تقریبی در مدت ۳۲ روز و برای طرح N75M105 ($M_s=1/05$ و $n=7/5\%$) که بیشترین مقدار پارامترهای فعال‌ساز در بین طرح‌ها داشت، در مدت ۵ روز اتفاق افتاد. نرخ جمع‌شدگی خشک‌شدگی را می‌توان با نرخ انجام واکنش و تشکیل ژل C-A-S-H مرتبط دانست.

مقدار نهایی جمع‌شدگی خشک‌شدگی وابستگی زیادی به مدول محلول، M_s دارد ولی در M_s ثابت تغییرات n تأثیر قابل توجهی بر مقدار نهایی جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS ندارد و مقادیر جمع‌شدگی نزدیک به هم به دست آمده است. تأثیر قابل توجه مدول سیلیکات سدیم بر جمع‌شدگی خشک‌شدگی بتن AAS را می‌توان با ارتباط بین جمع‌شدگی خشک‌شدگی و اندازه‌ی حفرات مرتبط است [۲۵] به‌طوریکه فعال‌سازی با آب‌شیشه باعث ایجاد تخلخل کم و حفراتی ریز نسبت به فعال‌ساز سدیم هیدروکسید می‌گردد [۴۵] و افزایش مدول محلول سبب ریزتر شدن اندازه حفرات می‌گردد [۴۶] و می‌تواند باعث افزایش تنش‌های کششی موئینه و در نتیجه افزایش مقدار جمع‌شدگی خشک‌شدگی نهایی گردد [۴۷ و ۴۸].

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در طرح‌هایی با غلظت‌های قلیایی ۶/۵ و ۷/۵٪ مقادیر جمع‌شدگی خشک‌شدگی برای مدول‌های سیلیکات ۰/۸۵ و ۱/۰۵ نزدیک به هم بودند و حتی در مدول سیلیکات ۱/۰۵ جمع‌شدگی خشک‌شدگی نهایی برای غلظت‌های قلیایی ۶/۵ و ۷/۵٪ کمتر از غلظت‌های قلیایی ۴/۵ و ۵/۵٪ است. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که غلظت‌های قلیایی سبب جلوگیری از هیدراسیون سرباره و تولید ژل C-S-H می‌شود

- and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 2002. 32(8): p. 1181-1188.
- [18]. Gao, X., Q. Yu, and H. Brouwers, Assessing the porosity and shrinkage of alkali activated slag-fly ash composites designed applying a packing model. *Construction and Building Materials*, 2016. 119: p. 175-184.
- [19]. Wang, S.-D., K.L. Scrivener, and P. Pratt, Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and concrete research*, 1994. 24(6): p. 1033-1043.
- [20]. Cheng, T. and J. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 2003. 16(3): p. 205-210.
- [21]. Wang, H., H. Li, and F. Yan, Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005. 268(1): p. 1-6.
- [22]. Shojaei, M., K. Behfarnia, and R. Mohebi, Application of alkali-activated slag concrete in railway sleepers. *Materials & Design*, 2015. 69: p. 89-95.
- [23]. Haha, M.B., et al., Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*, 2011. 41(3): p. 301-310.
- [24]. Collins, F. and J. Sanjayan, Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 1999. 29(3): p. 455-458.
- [25]. Collins, F. and J. Sanjayan, Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000. 30(9): p. 1401-1406.
- [26]. Yuan, X.-h., et al., Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, 2014. 66: p. 422-428.
- [27]. Ye, H. and A. Radlińska, Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 2016. 88: p. 126-135.
- [28]. Committee, A.C.I., ACI 209.2 R-08: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. 2008, American Concrete Institute Committee.
- [29]. Bakharev, T., J. Sanjayan, and Y.-B. Cheng, Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 1999. 29(10): p. 1619-1625.
- [30]. Marjanović, N., et al., Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly [2]. Taylor, M., C. Tam, and D. Gielen, Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. *Korea*, 2006. 50(2.2): p. 61.7.
- [3]. Gartner, E., Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*, 2004. 34(9): p. 1489-1498.
- [4]. Pacheco-Torgal, F., et al., Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. 2014: Elsevier.
- [5]. Duxson, P., et al., The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research*, 2007. 37(12): p. 1590-1597.
- [6]. Taylor, H.F., *Cement chemistry*. 1997: Thomas Telford.
- [7]. Shi, C. and R. Day, Selectivity of alkaline activators for the activation of slags. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1996. 18(1): p. 8-14.
- [8]. Rostami, M. and K. Behfarnia, The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2017. 134: p. 262-268.
- [9]. Behfarnia, K. and M. Rostami, An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2017. 157: p. 1-9.
- [10]. Neto, A.A.M., M.A. Cincotto, and W. Repette, Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(4): p. 565-574.
- [11]. Douglas, E., A. Bilodeau, and V. Malhotra, Properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Materials Journal*, 1992. 89(5): p. 509-516.
- [12]. Bakharev, T., J.G. Sanjayan, and Y.-B. Cheng, Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 1999. 29(1): p. 113-120.
- [13]. Atiş, C.D., et al., Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 2009. 23(1): p. 548-555.
- [14]. Gu, Y.-m., et al., Properties and microstructure of alkali-activated slag cement cured at below-and about-normal temperature. *Construction and Building Materials*, 2015. 79: p. 1-8.
- [15]. Chi, M. and R. Huang, Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 2013. 40: p. 291-298.
- [16]. Lee, N., J. Jang, and H. Lee, Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. *Cement and Concrete Composites*, 2014. 53: p. 239-248.
- [17]. Krizan, D. and B. Zivanovic, Effects of dosage

- [44]. Fernández-Jiménez, A. and F. Puertas, Alkali-activated slag cements: kinetic studies. *Cement and Concrete Research*, 1997. 27(3): p. 359-368.
- [45]. Shi, C., Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 1996. 26(12): p. 1789-1799.
- [46]. Aydın, S. and B. Baradan, Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars. *Composites Part B: Engineering*, 2014. 57: p. 166-172.
- [47]. Mehta, P.K. and P. Monteiro, *Concrete: Structure, Properties and Materials*. Unpublished manuscript for revision of Mehta, PK and Monteiro, PJM *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 1993.
- [48]. Slowik, V., M. Schmidt, and R. Fritzsche, Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *Cement and Concrete Composites*, 2008. 30(7): p. 557-565.
- ash-blast furnace slag blends. *Ceramics International*, 2015. 41(1): p. 1421-1435.
- [31]. ASTM, C., 157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2008.
- [32]. ASTM, C., 191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2008.
- [33]. BS, Testing concrete, Part 116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes. 1983.
- [34]. Wang, W.-C., H.-Y. Wang, and M.-H. Lo, The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. *Construction and Building Materials*, 2015. 84: p. 224-229.
- [35]. Shi, C. and R.L. Day, A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 1995. 25(6): p. 1333-1346.
- [36]. Altan, E. and S.T. Erdoğan, Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(2): p. 131-139.
- [37]. Bernal, S.A., et al., Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 2011. 33(1): p. 46-54.
- [38]. Yip, C. and J. Van Deventer, Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, 2003. 38(18): p. 3851-3860.
- [39]. Chang, J., A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 2003. 33(7): p. 1005-1011.
- [40]. Song, S., et al., Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Science*, 2000. 35(1): p. 249-257.
- [41]. Yip, C.K., G. Lukey, and J. Van Deventer, The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(9): p. 1688-1697.
- [42]. Burciaga-Díaz, O. and J.I. Escalante-García, Structure, Mechanisms of Reaction, and Strength of an Alkali-Activated Blast-Furnace Slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013. 96(12): p. 3939-3948.
- [43]. Fernandez-Jimenez, A., F. Puertas, and A. Arteaga, Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 1998. 52(3): p. 945-955.

Experimental Investigation on the Effect of Modulus and Concentration of Alkaline Solution on properties of the Alkali-Activated Slag Concrete

Kiachehr Behfarnia

Associate professor, Department of civil engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Hamed Taghvayi Yazdeli*

Ph.D. Student, Department of civil engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract

Alkali activated slag (AAS) binders can be used as a replacement to Portland cement. AAS concrete is made by slag activation with alkalis without the use of Portland cement. Due to the effect of alkalis on the properties of AAS concrete, in this study the effect of alkali concentration and sodium silicate modulus of alkaline solution on the setting time, slump, compressive strength and drying shrinkage of AAS concrete were investigated experimentally. For this purpose, 20 mix designs with different ratios of alkali concentration and sodium silicate modulus were cast and the setting time of paste and slump were tested in fresh state and in addition, concrete compressive strength of 7, 28 and 90 days and drying shrinkage of concrete samples up to 400 days, were measured. In most mixes, with increasing the alkali concentration and the sodium silicate modulus of the activator solution, the slump of fresh concrete was increased and the rate of the initial compressive strength development of the mixtures was enhanced but the setting time was lowered. However, in high alkali concentrations and silicate moduli, a decrease in compressive strength and an increase in setting time were observed with increasing the parameters of activator solution. However, with increasing the sodium silicate modulus and the concentration of the alkaline solution, the initial shrinkage rate of the samples was increased, but it was observed that the effect of the sodium silicate modulus is much higher than the alkali concentration on the final amount of the drying shrinkage of the samples.

Keywords: Alkali activated slag, Alkaline activator, Compressive strength, Workability, Drying shrinkage.

* Corresponding Author: h.taghvayi87@gmail.com