

ارزیابی دوام روسازی بتن قلیایی حاوی سرباره و دوده سیلیسی

ابوالفضل محمدی جانکی^۱، ابوالفضل حسنی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

hassani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۶/۷]

چکیده

در سال‌های اخیر با استفاده بیش از حد سیمان باعث تولید بی رویه گازهای گلخانه‌ای شده که یکی از عواقب آن گرمایش زمین بوده است. این آثار مخرب باعث شد تا توجه بیشتر به استفاده بهینه از منابع، مواد پوزولانی و ضایعات شود، در همین راستا استفاده از سرباره کوره آهن گدازی و دوده سیلیسی در صنایع مختلف از جمله روسازی راه به عنوان یک راه حل مطرح بوده است. استفاده از بتن سرباره قلیا فعال (ژئوپلیمری) با جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم و جایگزینی به جای سرباره علاوه بر مصرف مصالح ضایعاتی، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان مقاومت و دوام روکش‌های بتنی افزایش یابد. با جایگزینی دوده سیلیسی به جای سرباره مقاومت و دوام بتن کاهش می‌یابد، اما با جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم مقاومت و دوام افزایش می‌یابد. با جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم، افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۴۳/۸٪، افزایش مقاومت خمشی نیز به مقدار ۵۸/۹٪، افزایش دوام در برابر چرخه یخ زدن و آب شدن به میزان ۷۸/۲٪، افزایش دوام در برابر سولفات سدیم به میزان ۵۷/۱٪، افزایش دوام در برابر سولفات منیزیم به میزان ۵۴/۱٪ و کاهش ضخامت دال روسازی به میزان ۲۰/۸٪ نسبت به بتن سیمانی را به دنبال داشته است.

کلید واژه: روسازی بتنی، سرباره فعال شده قلیایی حاوی دوده سیلیسی، دوام ذوب و یخ، حملات سولفات

۱- مقدمه

از فشار تبلور نمک‌ها در منافذ بتن در معرض دماهای بسیار سرد مانند پدیده یخ و ذوب و همچنین حملات سولفات منیزیم و سدیم از جمله موارد قابل توجه در کاهش دوام بتن است. منابع داخلی حمله سولفات می‌تواند شامل حضور سولفات در سیمان، مواد مکمل سیمان و یا سنگدانه‌ها باشد،

لایه‌های روسازی علاوه بر تحمل و کاهش فشار ناشی از چرخ و وسایل نقلیه باید در برابر عوامل جوی و فیزیکی دوام مناسب داشته باشند، از جمله این عوامل چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و حملات سولفات‌ها است [1]. ترک خوردگی ناشی

که منجر به انبساط و خرابی بتن می‌شود. منابع خارجی حمله سولفات شامل حضور سولفات در آب زیر زمینی، آب دریا و آب آبیاری است. این سولفات‌ها بیشتر منابع طبیعی دارند اما می‌توانند از کودهای شیمیایی و فاضلاب‌های صنعتی نیز سرچشمه بگیرند [2].

بتن قلیایی با توجه به ساختار آلومینو سیلیکاتی (Si-O-Al) که دارد می‌تواند دوام بیشتری در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و سولفات‌ها نسبت به بتن سیمانی داشته باشد. پلیمر معدنی آلومینو سیلیکات که به آن بتن با سیمان قلیا فعال (بتن ژئوپلیمری) گفته می‌شود دارای ساختاری سه بعدی است، که خمیر ژئوپلیمر می‌تواند به عنوان یک چسباننده در تولید بتن به جای خمیر سیمان مورد استفاده قرار گیرد [3].

علاوه بر دوام و مقاومت کمتر بتن سیمانی نسبت به بتن قلیایی، صنعت سیمان با چالش انتشار گاز CO_2 ، منابع انرژی برای تولید و مصالح جایگزین مواجه شده است. از سوی دیگر مالیات‌هایی که از طریق جامعه جهانی تحت عنوان مالیات سبز به روی تولید سیمان در کارخانه‌هایی با آلاینده بیش از حد مجاز گذاشته می‌شود باعث بیش از حد گران شدن قیمت آن در بازار جهانی شده است [4, 5]. وانگ^۱ و همکاران عوامل موثر بر مقاومت بتن سرباره قلیا فعال را نسبت $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ، نسبت آب به سرباره و افزودنی، نوع فعال کننده و دمای عمل‌آوری بیان کردند [6]. فو^۲ و همکاران نشان دادند که تخریب سطحی نمونه بتن قلیایی بسیار ناچیز است و مقاومت بسیار خوبی در برابر چرخه یخ زدن و آب شدن دارد [7]. شاه‌رجیان و همکاران بتن سرباره قلیا فعال با درصدهای مختلف نانو سیلیس، نانو آلومین و نانو رس را مقایسه کردند، و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نانو سیلیس بیشترین دوام چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و مقاومت فشاری بدست می‌آید [8]. رستمی و بهفرنیا بتن سرباره قلیا فعال حاوی دوده سیلیسی در شرایط عمل‌آوری با آب و زیر پلاستیک را بررسی کردند، نمونه‌هایی که در آب عمل‌آوری شده بودند مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که در زیر پلاستیک عمل‌آوری شدند را نشان

دادند [9]. دب^۳ و همکاران به بررسی بتن قلیایی حاوی خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی پرداختند و نشان دادند که با افزایش میزان سرباره هنگامی که سایر موارد ثابت باشد کارایی کاهش می‌یابد [10]. بهفرنیا و همکاران آثار استفاده از دوده سیلیسی، متاکائولین و ژئولیت را تحت حمله سولفات منیزیم بررسی کردند، مشاهده کردند که بیشترین مقاومت فشاری را بتن سرباره قلیا فعال حاوی ۱۵٪ دوده سیلیسی دارد [11]. یانگ^۴ و همکاران به بررسی خمیر و بتن قلیایی با سرباره قلیا فعال و خاکستر بادی تحت حمله سولفات سدیم و سولفات منیزیم پرداختند، آن‌ها مشاهده کردند که بتن قلیایی حاوی سرباره و خاکستر بادی از لحاظ شکل ظاهری و مقاوم فشاری عملکرد بهتری دارند. کاهش مقاومت فشاری ۲۳٪-۱۷ برای بتن قلیایی و ۳۷٪-۲۵ برای بتن با سیمان معمولی رخ داده است [12]. رمضانپور و معینی نشان دادند که دوام، مقاومت فشاری و نفوذپذیری کلرید خمیر قلیا فعال حاوی دوده سیلیسی نسبت به نمونه-های حاوی نانو سیلیس کاهش پیدا کرده است [13]. اکی^۵ و همکاران نشان دادند که خواص دوام بتن قلیا فعال با خاکستر بادی حاوی دوده سیلیسی، نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی در برابر اسید سولفوریک و سدیم کلرید دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی دارند [14]. الیمنی^۶ و همکاران به بررسی بتن قلیایی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی در برابر حمله سولفات منیزیم پرداختند، آنها نشان دادند که افزایش دمای عمل‌آوری، مولاریته سدیم هیدروکسید و کاهش محلول قلیایی نسبت به چسباننده مقاومت افزایش پیدا می‌کند. بتن قلیایی با ۵۰٪ خاکستر بادی و ۳۵٪ سرباره و ۱۵٪ دوده سیلیسی بهترین عملکرد را داشته است [15]. لی^۷ و همکاران نمونه‌های بتن قلیایی را تحت ۳۰۰ چرخه یخ زدن و آب شدن قرار دادند و نسبت‌های مخلوط بهینه را ارائه نمودند، متغیرهای آن‌ها، نسبت وزنی فعال کننده به سرباره، وزن سرباره و نسبت ماسه بود [16]. پژوهش‌های فراوان دیگری

3 Deb

4 Yang

5 Okoye

6 Elyamany

7 Li

1 Wang

2 Fu

آسیاب سرباره کوره کارخانه ذوب آهن اصفهان با سطح مخصوص ۳۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۲/۷۵۴ گرم بر سانتی متر مکعب، برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. جدول (۲) درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سرباره را نشان می‌دهد.

۳-۳- دوده سیلیسی

در این پژوهش دوده سیلیسی ازنا به صورت پودر همراه با سرباره به مخلوط اضافه شد. جدول (۲) درصد وزنی ترکیبات شیمیایی دوده سیلیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سرباره و دوده سیلیسی

Silica fume	Slag	Chemical composition
90	33.02	SiO ₂
0.97	40.21	CaO
0.67	9.69	Al ₂ O ₃
0.98	1.59	MnO
0.22	0.59	Fe ₂ O ₃
0.98	0.57	Na ₂ O
0.9	0.93	K ₂ O
1.2	7.72	MgO
-	2.12	TiO ₂
-	0.16	Ba
-	3.26	SO ₃
3.5	a few	P, Cl, Cr, Ni, Rb, Y, Th

Table. 2. Weight of chemical compounds slag and silica fume

۳-۴- فعال کننده

به منظور فعال سازی سرباره از ترکیب هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na₂SiO₃) تهیه شده از شرکت کیمیا سود استفاده شده است. محلول استفاده شده دارای غلظت ۶ مولار است، با توجه به اینکه جرم مولی هیدروکسید سدیم ۴۰ گرم بر مول است، مقدار هیدروکسید سدیم حل شده در یک لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار برابر ۲۴۰ گرم است. یک روز قبل از ساخت بتن محلول فعال کننده آماده شد.

۳-۵- آب

آب استفاده شده برای طرح اختلاط نیز آب شرب بوده است.

در خصوص استفاده از بتن قلیایی و دوده سیلیسی انجام شده است. اما تا کنون پژوهشی در زمینه استفاده از دوده سیلیس جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم انجام نشده است.

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش برای بررسی تاثیر دوده سیلیسی بر خواص مکانیکی و دوام بتن قلیایی، دوده سیلیسی به دو صورت جایگزین سرباره با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ و جایگزینی سیلیس موجود در سیلیکات سدیم با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ استفاده شده است. و یک نمونه با سرباره ۱۰۰ و یک نمونه بتن سیمانی (شاهد) به بررسی مقاومت فشاری، خمشی و دوام در برابر چرخه یخ و ذوب و سولفات‌ها پرداخته شد تا بهترین نسبت‌های مخلوط انتخاب شود.

۳- مصالح مصرفی

مواد و مصالح استفاده شده برای تهیه نمونه‌های بتنی به شرح زیر است.

۳-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های استفاده شده، دارای وزن معمولی و طبیعی هستند. دانه‌بندی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است که مطابق با استاندارد ASTM C33 و نشریه ۳۰۲ ملی ایران است.

جدول ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

2/36	4/75	9/5	19	25	Coarse aggregates
0	8	38	96	100	
0/075	0/15	0/3	0/6	1/18	Fine aggregates
2	7	26	58	82	

Table. 1. Sieve aggregates analysis

۳-۲- سرباره کوره آهن گدازی

سرباره ماده اصلی چسباننده در ترکیب بتن سرباره قلیا فعال است. سرباره از شرکت سیمان سپاهان تهیه شد که به صورت

۳-۶- سیمان

به سیمان ۰/۴۵ به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. نتایج نسبت‌های مخلوط در جدول (۳) آمده است.

۵- برنامه آزمایشگاهی و شرایط نمونه‌ها

در این پژوهش ۹ نسبت‌های مخلوط مورد بررسی قرار گرفته است، برای ساخت بتن، فعال کننده قلیایی (سود و سیلیکات سدیم) به دلیل این که انحلال سدیم هیدروکسید و آب در طی واکنش گرمازا انجام می‌شود، یک روز قبل از آزمایش ساخته شد. سپس کل مصالح سنگی درشت‌دانه را در داخل مخلوط‌کن ریخته و همراه با ۰/۵۰٪ فعال کننده و ۰/۵۰٪ سرباره به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط کرده و سپس کل مصالح ماسه و ۰/۵۰٪ باقی مانده سرباره و فعال کننده اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند.

سیمان استفاده شده در این پژوهش سیمان تیپ ۱ تولید شده توسط کارخانه آبیگ با سطح مخصوص ۳۰۶۹ سانتی‌متر مربع بر گرم است. مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی این سیمان با استاندارد سیمان پرتلند ASTM C150 و استاندارد شماره ۳۸۹ ایران نیز هماهنگی دارد.

۴- نسبت‌های مخلوط

در نسبت‌های مخلوط فعال کننده به گونه‌ای انتخاب شد که Na_2O ۰/۶ وزن مجموع سرباره و دوده سیلیسی باشد. نسبت $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ در کلیه اختلاط‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته شد. آب به اندازه‌ای اضافه شد که نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۲۵ شود و یک نمونه سیمانی به نسبت آب

جدول ۳. نسبت‌های مخلوط بتن قلیایی و سیمانی (Kg/m^3)

Density	Fine aggregates	Coarse aggregates	Silica fume	Slag	Cement	Water	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Mix Design
2420	885	915	-	400	-	157.2	63	16.1	AAS ¹
2407.5	885	915	40	360	-	157.2	63	16.1	AASSi ² 10
2367.2	885	915	80	320	-	157.2	63	16.1	AASSi20
2348.9	885	915	120	280	-	157.2	63	16.1	AASSi30
2371.2	885	915	-	-	400	180	-	-	OPC
2462.2	885	915	2.2	400	-	187.8	56.7	17.3	AASSi10RSO ³
2451	885	915	4.4	400	-	186.8	50.4	18.6	AASSi20RSO
2416	885	915	6.6	400	-	185.9	44.1	19.8	AASSi30RSO
2382	885	915	11	400	-	184	38.5	22.3	AASSi50RSO

Table 3. Mixing design for alkaline and cement concrete

جدول ۴. برنامه آزمایشگاهی و شرایط نمونه‌ها

Number of samples in mix	Sample dimensions	Age (day)	Test	Conditions curing
3	100 × 200 mm Cylinder	28	Compressive strength	Laboratory temperature (One curing day at 30° C and then the samples were transferred to the curing lime water at a temperature of 23 ° C)
3	500 × 100×100 mm	28	Bending strength	
2	370 × 78×78 mm	14	Freezing and thawing cycles	
1	370 × 78×78 mm	14,19,23,28,32,37,41,46,50,54	Ultrasonic	
3	100 × 100×100 mm	208	Durability against Magnesium sulfate	
3	100 × 100×100 mm	208	Durability against Sodium sulfate	

Table 4. Lab program and sample conditions

1 alkali activated slag

2 alkali activated slag/ silica fume

3 alkali activated slag/ silica fume replacement sodium silicate

متعلق به نمونه بتن سیمانی می‌باشد. برای کاربرد بتن در دستگاه‌های اجرای روسازی بتنی، روانی بتن باید در محدوده ۰ تا ۵۰ میلی‌متر باشد [17]. از این‌رو اضافه کردن دوده سیلیسی به سرباره می‌تواند نقش مفیدی در کاهش روانی و افزایش ویسکوزیته برای کاربرد در روسازی بتنی داشته باشد.

۶-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

در این آزمایش بعد از ۲۸ روزه عمل‌آوری نمونه‌های استوانه‌ای طبق استاندارد ASTM C470 زیر فک‌ها دستگاه قرار گرفته و مقاومت فشاری اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری AASSi30RSO از دیگر مخلوط‌ها بیشتر است. در نسبت‌های مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سرباره شد، با افزایش دوده سیلیسی مقاومت فشاری کاهش یافته است. و در نسبت‌های مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم شد، با افزایش دوده سیلیسی مقاومت فشاری افزایش یافته است. با توجه به بیشتر بودن میزان سرباره، عمل کریستالیزه شدن در آن سریع‌تر صورت می‌گیرد و مقاومت بتن بیش‌تر است. شایان ذکر است که این افزایش، مقدار بهینه‌ای دارد که مطابق مطالب بالا حدود ۳۰ درصد دوده سیلیسی جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم است و پس از آن شاهد کاهش مقاومت هستیم.

اختلاط به وسیله همزن مکانیکی صورت گرفته است، سپس مخلوط آماده شده را در داخل قالب در دو لایه ریخته و به هر لایه ۲۵ ضربه وارد کرده، سپس ویبره شده است. جدول (۴) برنامه آزمایشگاهی و شرایط نمونه‌ها را بیان می‌کند.

۶- نتایج و بحث

بر روی بتن تازه و بتن سخت شده آزمایش‌هایی انجام شده است، نتایج آن‌ها در زیر شرح داده شده است.

شکل ۱. نمودار نتایج آزمایش اسلامپ

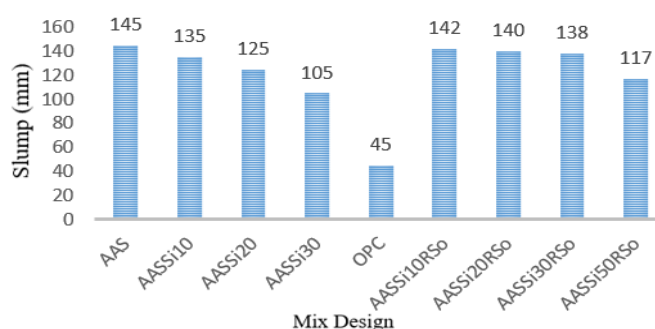


Fig. 1. Slump test result diagram

۶-۱ نتایج آزمایش اسلامپ

بلافاصله بعد از اختلاط آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 روی نمونه‌های قلیایی و سیمانی صورت گرفت. همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش دوده سیلیسی از اسلامپ نمونه‌ها کاسته می‌شود. بالاترین روانی متعلق به نمونه با ۰٪ دوده سیلیسی و پایین‌ترین روانی

شکل ۲. نمودار نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه

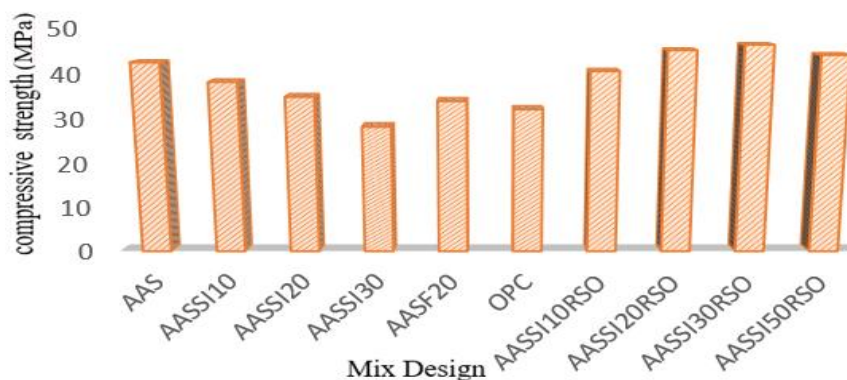


Fig. 2. 28 days Concrete compressive strength diagram

شکل ۳- نمودار نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه

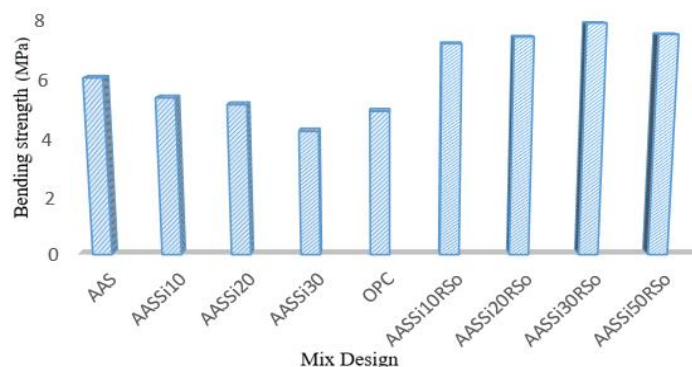


Fig. 3. 28 days Concrete bending strength diagram

۳-۶- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C78 صورت گرفت، مقاومت تیرهای بتنی واقع بر هر تکیه‌گاه ساده، تحت بار ناشی از خمش سه نقطه‌ای تعیین شد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، AASSi30RSO بیش‌ترین مقاومت خمشی را دارد (۷٫۸۷ مگاپاسکال) و مقاومت خمشی آن نسبت به OPC، ۵۸/۹٪ افزایش یافته است. در نسبت‌های مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سرباره شد، با افزایش دوده سیلیسی مقاومت خمشی کاهش یافت و در نسبت‌های مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم شد، مقاومت خمشی افزایش یافته است.

۴-۶- نتایج آزمایش چرخه‌های یخ زدن و آب شدن

برای ارزیابی دوام بتن تحت چرخه‌های یخ زدن و آب شدن از آزمایش التراسونیک و کاهش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C666 استفاده شده است. نمونه‌ها بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری در آب آهک درون دستگاه چرخه یخ زدن و آب شدن قرار گرفتند. نمونه‌ها در بازه بیشینه ۳۶ چرخه‌ای از دستگاه خارج شدند، سرعت پالس عبوری قرائت، و آب آن‌ها تعویض شد. این روند تا زمانی که نمونه‌ها ۳۰۰ چرخه را تجربه کنند، ادامه داشته و در سیکل ۳۰۰ دوباره سرعت پالس عبوری اندازه گرفته شده و سپس روی آن‌ها آزمایش مقاومت خمشی صورت گرفت.

۴-۶-۱- نتایج آزمایش التراسونیک

سرعت پالس التراسونیک عبوری طبق استاندارد ASTM C597 اندازه‌گیری شد. روش سرعت پالس (امواج) مافوق صوت شامل اندازه‌گیری سرعت پالس‌هایی است که توسط فرستنده^۱ از یک طرف بتن ارسال می‌شود و توسط گیرنده^۲ از طرف دیگر بتن دریافت می‌شود. شکل (۴) آزمایش التراسونیک را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش التراسونیک برای نمونه‌های بتنی در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج به خوبی روند کاهش مقاومت نمونه‌ها در اثر قرارگیری تحت چرخه‌های یخ زدن و آب شدن را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در چرخه ۳۰۰، بالاترین سرعت پالس مربوط به نمونه AASSi30RSO و کمترین سرعت پالس مربوط به OPC است. با بررسی سرعت پالس التراسونیک، از چرخه ۱۸۰ در بیشتر نمونه‌ها شیب افت سرعت پالس عبور افزایش یافت و سرعت پالس با آهنگ سریع‌تری کاهش یافته است. از چرخه ۱۸۰ تا ۳۰۰ نمونه‌ها با افزایش آهنگ افت سرعت پالس و یا ادامه همان آهنگ را نشان داده‌اند.

شکل ۴. آزمایش التراسونیک



Fig. 4. Ultrasonic Test

1 transmitting transducer
2 receiving transducer

جدول ۵. سرعت پالس عبوری (m/s)

Number of cycle										Mix Design Name
300	288	252	216	180	144	108	72	36	0	
1770	1897	2245	2606	2969	3330	3689	4049	4429	4830	AAS
1765	1894	2242	2603	2965	3326	3681	4044	4424	4824	AASSi10
1755	1891	2238	2598	2960	3319	3674	4036	4415	4815	AASSi20
1753	1868	2212	2567	2925	3280	3630	3988	4363	4758	AASSi30
1752	1850	2190	2542	2896	3248	3595	3950	4321	4712	OPC
1776	1900	2249	2610	2974	3335	3691	4055	4436	4838	AASSi10RSo
1802	1910	2261	2624	2991	3354	3712	4073	4461	4869	AASSi20RSo
1852	1915	2267	2631	2997	3362	3720	4087	4471	4876	AASSi30RSo
1782	1906	2256	2619	2984	3346	3703	4069	4451	4854	AASSi50RSo

Table 5. Pulse Transmission Speed

شکل ۵. نمودار مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های با انجام چرخه و بدون انجام چرخه یخ زدن و آب شدن

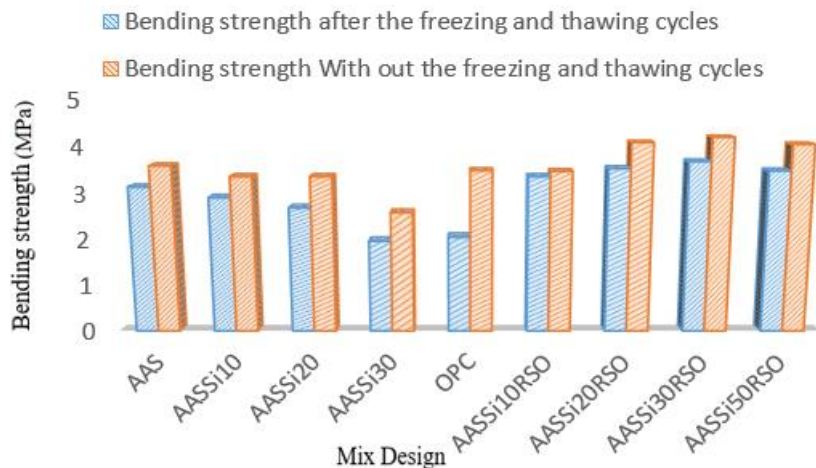


Fig. 5. Comparison of the bending strength of the samples by performing the cycle without the freezing and thawing cycles diagram

شکل ۶. نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بعد از غوطه‌وری در سولفات منیزیم و سولفات سدیم

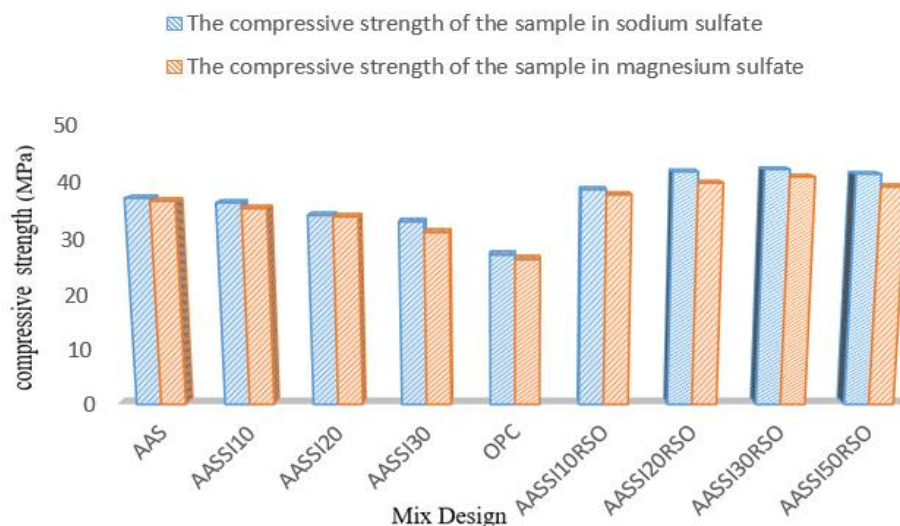


Fig. 6. Test results of compressive strength of concrete samples after immersion in magnesium sulfate and sodium sulfate diagram

۶-۴-۲ نتایج مقاومت خمشی بعد از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن

برای این که بتوان روند افت مقاومت خمشی را بررسی کرد، یکسری از نمونه‌ها در آب آهک عمل‌آوری شدند و یک سری دیگر از نمونه‌ها در دستگاه یخ و ذوب تحت ۳۰۰ چرخه متوالی یخ و ذوب قرار گرفتند و سپس روی آن‌ها آزمایش مقاومت انجام شد. با توجه به نمودار شکل (۵)، بتن قلیایی AASSi30RSo بیشترین میزان مقاومت خمشی قبل و بعد از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن را دارد. مقاومت خمشی بتن سرباره قلیا فعال AASSi30RSo قبل از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن به بعد از چرخه‌های یخ زدن و آب شدن ۱۲/۱۴٪ کاهش یافته است. با ایجاد شرایط مناسب برای خمیر بتن، امکان حصول بتن با تراکم و مقاومت بالاتر و در پایان ایجاد امکان فرار آب در حال یخ‌زدن باعث افزایش دوام بتن قلیایی نسبت به بتن سیمانی شده است.

۶-۵-۵ آزمایش دوام در برابر سولفات سدیم و سولفات منیزیم برای بررسی دوام بتن، نمونه‌های بتنی بعد از عمل‌آوری ۲۸ روز در آب آهک اشباع در محلول سولفات سدیم و سولفات منیزیم ۵٪، به مدت ۱۸۰ روزه غوطه‌ور شدند. تاثیر محلول‌های سولفات با تغییر در مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-116 سنجیده شده است.

همان‌گونه که در نمودار شکل (۶) مشاهده می‌شود، محیط‌های سولفاتی آثار مخربی دارند و باعث از دست دادن مقاومت فشاری در بتن‌ها شده‌اند. سولفات منیزیم آثار تخریبی بیشتری نسبت به سولفات سدیم دارد. بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نسبت‌های مخلوط AASSi10F40 است. در واقع هر چه مقاومت فشاری نمونه‌ها بیشتر باشد دوام آنها در برابر سولفات بیشتر است.

از آنجایی که پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی می‌توانند در افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر مثبت داشته باشند. با کاهش درصد سرباره در بتن قلیایی، نمونه‌ها در برابر سولفات منیزیم فرسایش یافته و مقاومت آن‌ها کاهش یافته است. استفاده از سرباره در مخلوط بتن باعث تصفیه خلل و فرج بتن و بهبود بخشیدن دوام بتن در برابر حمله سولفات شد.

علاوه بر این، تخریب اتصالات سیمان، به دلیل سولفات منیزیم و تجزیه ژل C-S-H به M-S-H که خاصیت سیمانی ندارد، می‌تواند علت دیگری بر این پدیده باشد.

می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم کاهش مقاومت کمتر و با جایگزینی دوده سیلیسی به جای سرباره کاهش مقاومت بیشتر مشاهده شده است. ۶-۶- ضخامت دال روسازی بتنی

روش‌های کنونی طراحی روسازی بتنی بر اساس تحلیل الاستیک خطی بر مبنای معادلات تنش وسترگارد صورت می‌گیرد. در این معادلات تنش مجاز در بتن توسط مقاومت خمشی بتن یا مدول گسیختگی^۱ محدود شده است. در روش تئوری خطوط تسلیم^۲، با افزایش بار، تنش خمشی زیر بار برابر با مقاومت خمشی بتن می‌شود. با استفاده از تئوری خطوط تسلیم و با صرف نظر از مقاومت بستر می‌توان نشان داد که بار خرابی در خمش (P_u) از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید. در این رابطه M_p و M_n به ترتیب لنگر مقاوم مثبت نهایی دال و لنگر مقاوم منفی نهایی دال است.

$$P_u = 2\pi (M_p + M_n) \quad (1)$$

لنگرهای مقاوم مثبت و منفی نهایی دال به ترتیب با روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند. در این روابط $f_{ctk, fl}$ مقاومت خمشی بتن (N/mm^2)، h ضخامت دال (mm) و γ_c : ضریب ایمنی جزیی بتن است که معمولاً ۱/۵ فرض می‌شود.

$$M_p = M_n = \frac{f_{ctk, fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h^2}{6} \right) \quad (2)$$

بار نهایی متمرکز مجاز را می‌توان از رابطه ۴ محاسبه نمود و برای یک بار متمرکز مشخص ضخامت مورد نیاز از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

شکل ۷. نمودار ضخامت نمونه‌های بتن سیمانی و قلیایی

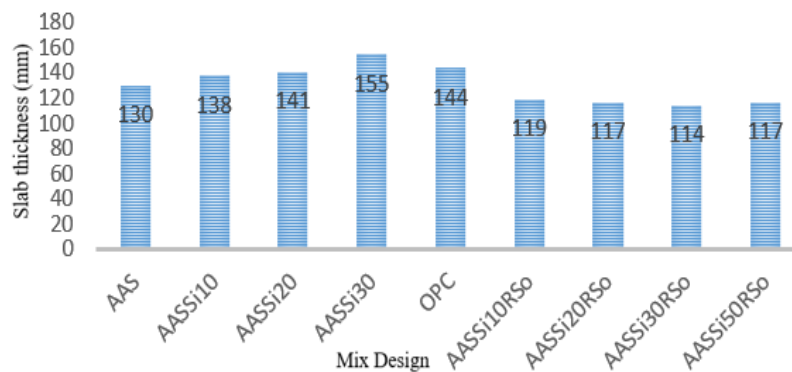


Fig. 7. The thickness of samples of cement and alkaline concrete diagram

مطرح بوده است. با جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم و جایگزینی به جای سرباره علاوه بر مصرف مصالح ضایعاتی، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان مقاومت و دوام روکش‌های بتنی افزایش یابد. در این پژوهش به نتایج زیر رسیده شد.

۱. در نسبت مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سرباره شد، با افزایش دوده سیلیسی مقاومت و دوام کاهش و در نسبت مخلوط‌هایی که دوده سیلیسی جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم شد، مقاومت و دوام افزایش یافت.

۲. بهترین طرح اختلاط مربوط به جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم است.

۳. با جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری و خمشی به مقدار ۴۳/۸٪ و ۵۸/۹٪ افزایش یافت.

۴. با جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم، دوام در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن به میزان ۷۸/۲٪ افزایش یافت.

۵. با جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس موجود در سیلیکات سدیم، دوام در برابر سولفات سدیم به میزان ۵۷/۱٪ و دوام در برابر سولفات منیزیم به میزان ۵۴/۱٪ افزایش یافت.

$$P_u = 2\pi \left[\frac{f_{ctk, fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h^2}{6} \right) + \frac{f_{ctk, fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h^2}{6} \right) \right] \quad (3)$$

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P_u \cdot \gamma_c}{2\pi \cdot f_{ctk, fl}}} \quad (4)$$

در روش تئوری خطوط تسلیم با فرض در نظر گرفتن بار متمرکز نهایی ۱۴۴ KN، مقدار ضخامت دال بتنی از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P_u \cdot \gamma_c}{2\pi \cdot f_{ctk, fl}}} = \sqrt{\frac{3 \times 144000 \times 1.5}{2\pi \cdot f_{ctk, fl}}} = \sqrt{\frac{103132.4}{f_{ctk, fl}}} \quad (5)$$

میزان ضخامت دال برای نمونه‌های بتن قلیایی و سیمانی با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، استفاده از دوده سیلیسی جایگزین سرباره نیز باعث افزایش ضخامت روسازی دال بتنی می‌شود و با استفاده از دوده سیلیسی جایگزین سیلیس موجود در سیلیکات سدیم باعث کاهش ضخامت دال بتنی می‌شود. کمترین ضخامت دال بتنی مربوط به AASSi30RSo (۱۱۴ میلی‌متر) است. ضخامت دال بتنی AASSi30RSo نسبت به OPC، ۲۰/۸٪ کاهش یافته است.

۷- نتیجه‌گیری

استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی در صنایع مختلف از جمله روسازی راه به عنوان یک راه‌حل

concrete. *Journal of Construction and Building Material*, vol. 134, 262–268.

[10] Deb, P. S., Nath, P., & Sarker P. K. 2014 The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Journal of Materials & Design*, vol. 62, 32–39.

[11] Behfarnia, K., & Farshadfar O. 2013 The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack. *Journal of Construction and Building Material*, vol. 38, 64–71.

[12] Yang, T., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, X., Zhang Ch. & Wu Q. 2018 Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Journal of Cement and Concrete Research*, vol. 109, 198–207.

[13] Ramezani pour, A. A., Moeini M A. & Pratt P. L. 2018 Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume. *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 163, 611–621.

[14] Okoye, F. N., Prakash S. & Singh B. N. 2018 Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of Cleaner Production*, vol. 163, 611–621.

[15] Elyamany, H. E., Elmoaty A. & Elshaboury A. 2018 Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 184, 111–127.

[16] Li, Q., Cai, L., Fu, Y., Wang H. & Zou Y. 2015 Fracture properties and response surface methodology model of alkaliS concrete under freeze-thaw cycles. *Journal of Construction and Building Material*, vol. 93, 620–626.

[17] Circular, F. A. 2005 Standarda for specifying construction of airports. AC 150/5370-10B Federal Aviation Administration.

۶. با جایگزینی ۳۰٪ دوده سیلیسی به جای سیلیس

موجود در سیلیکات سدیم، ضخامت دال روسازی به میزان

۲۰/۸٪ نسبت به بتن شاهد کاهش یافت.

References

۸- مراجع

[1] Huang, Y.H. 1993 Pavement analysis and design.

[2] Neville, A. M. 1995 Properties of concrete. fourth edition, harlow, england: Pearson Education.

[3] Davidovits, J. 1979 Synthesis of new high-temperature geopolymers for reinforced plastics. *Journal of Composites ,Proc PACTEC*, vol. 4, 151-15

[4] Schneider, M., Romer, M., Tschudin M. & Bolio H. 2011 Sustainable cement production-present and future. *Journal of Cement and Concrete Research*, vol. 41(7), 642–650.

[5] Arent, W.L., Kohn, S., Piggott, R.W., Berry, J.R., Larsen, R.L., Ragan, S.A., Cole, L., Lopez, R.W., Rice, J.L., Colucci B. & McComb R.A. 1994 State of the art report on roller compacted concrete pavements. *ACI Materials Journal*, vol. 91(5), 509-516.

[6] Wang, S. D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. 1994 Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Journal of Cement and Concrete Research*, vol. 24, 1033–1043.

[7] Fu, Y., Cai, L., & Wu Y. 2011 Freeze-thaw cycle test & damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Journal of Construction and Building Material*, vol. 25, 3144–3148.

[8] Shahrajabian, F., & Behfarnia K. 2018 The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 176, 172–178.

[9] Rostami, M., & Behfarnia K. 2017 The effect of silica fume on durability of alkali activated slag

Durability of alkali-activated slag/silica fume(AASS) concrete pavement

A. Mohammadi Janaki, A. Hassani^{2*}

1- M.Sc of Civil Engineering., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran

2- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

hassani@modares.ac.ir

Abstract:

Roads are one of the most important and valuable assets of countries, and remarkable amounts are spent annually to repair and restructure them. The pavements are divided into two main groups of flexible pavements (asphalt pavements) and rigid pavements (concrete pavements). In Iran, mainly used asphalt pavements, which were formerly about 90 years old. Therefore, there are many reasons why the most important of them, according to most experts, is the use of the country from abundant oil resources and low initial costs in the construction of this type of pavement. In recent years, with the entry of bitumen as one of the main components of the asphalt composition of the commodity exchange and consequently the increase in the cost of manufacturing and manufacturing asphalt, as well as the development of cement production plants in the country and the creation of carbon dioxide (CO₂), a suitable platform for the development of geo-polymeric concrete pavements in competition with asphalt pavements and concrete cement has been provided.

In addition to ability of bearing and reducing the pressure caused by the vehicle wheels, the pavement layers should be durable against atmospheric and physical factors, including the natural elements of the freeze-thaw cycles, acids and sulfates. The pavement must be able to withstand the durability and durability of the pavement and maintain its service over the lifetime specified.

These destructive effects led to more attention to the optimal use of resources, pozzolanic materials, and waste. In this regard, the use of ground granulated blast furnace slag and Silica fume in various industries such as road construction and building have been considered as a solution, however, practical, accurate and effective steps have not been taken yet. This research tried to present the materials and experiments carried out and to summarize them in order to eliminate the obstacles and obtain the necessary results for the use of alkaline concrete (geo-polymeric) in the manufacture of durable concrete veneers in the pavement.

The use of alkali-activated slag concrete with the replacement of Silica fume instead of silica in sodium silicate, in addition to the use of waste materials, enables the strength and durability of concrete pavement to be increased under freezing and thawing cycles, acid attacks and being sulfate.

In this study, alkali-activated slag concrete with different percentages of Silica fume was studied using The experiments of compressive and bending strength, durability under freeze-thaw cycles, sulfuric acid, and magnesium sulfate attacks. The results showed that the replacement of 30% silica fume instead of silica in sodium silicate, increasing the compressive strength to 43.8%, increasing the bending strength by 58.9%, increased the durability under freezing and thawing cycles by 78.2%, increasing durability against sodium sulfate to The rate of 57.1%, increase the durability against magnesium sulfate by 54.1%, and the reduction of pavement slab thickness by 20.8% compared with concrete cement.

Keywords: Concrete pavement, alkali-activated slag/silica fume concrete, Freeze-Thaw Durability, sulfate attacks