

بررسی اثر سرباره ایران بر واکنش زای قلیایی-سیلیسی سنگدانه های بتن

محمد امین حامدی راد^۱، سید سجاد میروالد^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (hamedirad@chmail.ir)

چکیده

یکی از عوامل مهاجم علیه دوام بتن، واکنش های قلیایی-سیلیسی سنگدانه در بتن است که در طی این واکنش برخی سنگدانه های سیلیسی با عوامل قلیایی سیمان (هیدروکسید کلسیم یا آهک آزاد) در بتن واکنش انبساطی داده و منجر به ترک خوردگی و تخریب کامل بتن می گردد. از جمله راهکارهایی که در برابر این پدیده ارائه می شود، استفاده از پوزولان های طبیعی و مصنوعی به منظور کاهش قلیابیت بتن است. در پژوهش های مختلفی اثر مثبت پوزولان ها مورد بررسی قرار گرفته و در پژوهش حاضر نیز به بررسی اثر سرباره تولید شرکت ذوب آهن ایران بر کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه پرداخته شده است. برای این منظور انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه به صورت تسریع شده برای ۵ مخلوط ملات مختلف حاوی جایگزینی ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره بجای سیمان به همراه یک مخلوط شاهد فاقد سرباره جهت مقایسه بر اساس آزمایش ASTM C ۱۵۴۷ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد با جایگزینی ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره بجای سیمان به ترتیب ۳۸، ۴۷، ۶۷ و ۷۸ درصد کاهش در انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه بوجود آمد.

کلمات کلیدی: واکنش قلیایی، سیلیسی، بتن، سرباره، AAR، ASR

۱. مقدمه و تاریخچه تحقیقات

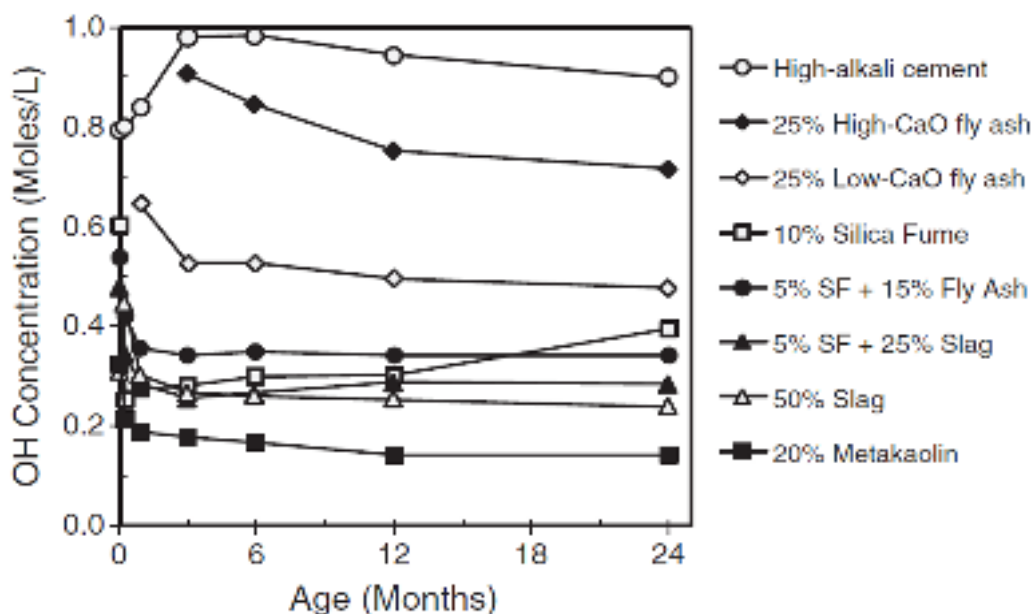
بتن پرمصرف ترین مصالح ساختمانی بوده و در صورتی که از طراحی مخلوط مناسبی برخوردار بوده و مصالح تشکیل دهنده آن نیز مناسب باشد، در حالت کلی مصالح با دوامی تلقی میگردند. از جمله مواردی که میتواند دوام و ساختار بتن را تهدید کند، واکنش های قلیایی سنگدانه در بتن است که به سرطان بتن نیز معروف است. این واکنش در صورت استفاده از برخی مصالح سنگی در مقاطع بتنی در مجاورت رطوبت نظیر سد و رویه های بتنی رخ می دهد و میتواند موجب انبساط سنگدانه درون بتن شود و در نتیجه بتن از درون ترک خورده و رفته رفته به طور کامل تخریب خواهد شد [۱].

سیمان موجود در بتن حاوی مقادیری قلیایی شامل سدیم و پتاسیم اکسید است. علت بروز واکنش های قلیایی سنگدانه (AAR) در بتن، به دلیل آن است که هیدراسیون سیمان در بتن موجب ایجاد یک محیط شدیداً قلیایی می شود و در صورتی که سنگدانه ها واکنش پذیر باشند میتوانند در این محیط واکنش دهند. این واکنش ها به دو دسته کلی قلیایی-سیلیسی (ASR) و قلیایی-کربناتی (ACR) تقسیم می شوند. واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه در اثر ترکیب سیلیس فعال سنگدانه

^۱ Alkali Aggregate Reaction
^۲ Alkali Silica Reaction
^۳ Alkali Carbonate Reaction

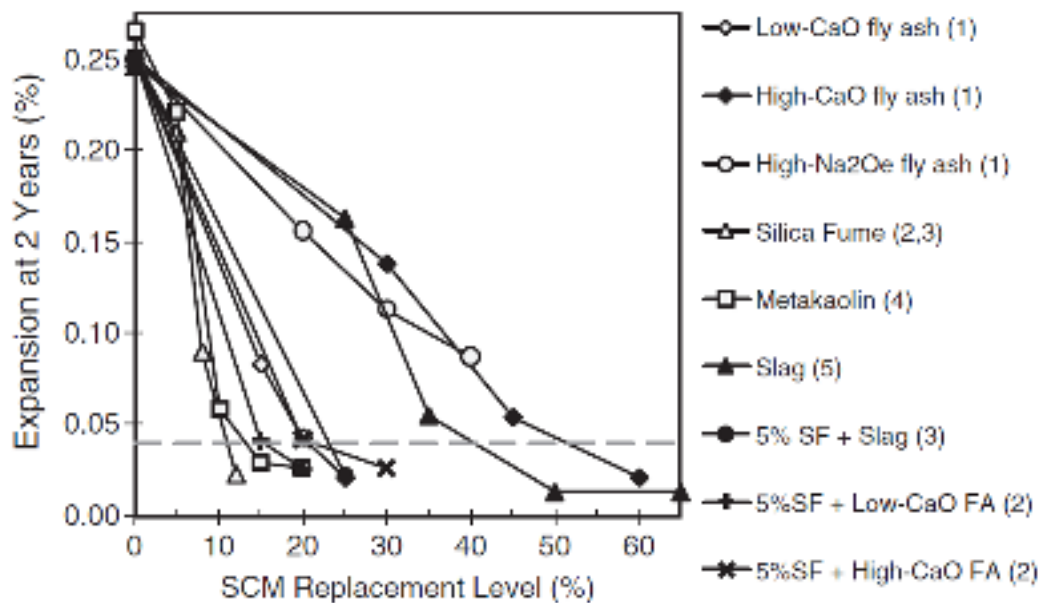
های بتن با مواد قلیایی و در حضور رطوبت با گذشت زمان رخ خواهد داد. این واکنش یک واکنش انبساطی است که در صورتی که میزان فشار درونی بتن از مقاومت کششی ملات سیمان آن بیشتر شود، موجب ترک خوردگی خواهد شد. واکنش قلیایی-کربناتی نیز در محیط قلیایی بتن و مصالح سنگی آهکی دولومیتی و در مجاورت رطوبت رخ خواهد داد که این واکنش نیز یک واکنش انبساطی بوده و موجب ترک خوردگی بتن از درون می شود [۱].

بتن ترکیبی است از مصالح سنگی، سیمان، آب و مواد افزودنی دیگری که میتواند منشا معدنی داشته باشد یا شیمیایی. این مواد افزودنی برای اصلاح برخی خواص بتن تازه و سخت شده بکار گرفته می شوند. از جمله مواد افزودنی معدنی میتوان به مواد جایگزین سیمان نظیر پوزولان سرباره اشاره نمود. سرباره یک محصول فرعی کوره ذوب آهن می باشد که دارای خواص پوزولانی است. پوزولان ها مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلمیناتی هستند که به خودی خود خواص گیرش نداشته و در کنار آهک آزاد شده ناشی از هیدراسیون سیمان خواص گیرش پیدا می کنند [۲]. در پژوهش های مختلفی به بررسی اثر این مواد جایگزین سیمان، بر واکنش زایی قلیایی سنگدانه ها در بتن پرداخته شده است و بسیاری از این پژوهش ها به اثر کاهنده واکنش زایی قلیایی-سیلیکاتی پوزولان هایی نظیر سرباره، خاکستر بادی اشاره کرده اند. علت این امر به دلیل مصرف قلیایی موجود در بتن توسط پوزولان ها برای انجام واکنش پوزولانی بوده است و بدین ترتیب با کاهش قلیایی موجود در حفرات بتن، واکنش های قلیایی سنگدانه ها نیز کاهش می یابد [۳]. پژوهش های مختلفی به منظور سنجش میزان کاهش قلیایی حفرات بتن در اثر استفاده از درصد های مختلف جایگزینی پوزولان های گوناگون انجام شده است. نمودار زیر بیانگر میزان قلیایی موجود در بتن (واحد مول بر لیتر) در بازه زمان و در مواد سیمانی مختلف شامل پوزولان های خاکستر بادی، میکروسیلیس، سرباره و متاکائولن است که بر مبنای پژوهش های پیشین ارائه شده است [۳]-[۶]:



شکل ۱- اثر پوزولان های مختلف بر میزان کاهش قلیایی حفرات بتن [۳]

کاهش میزان قلیایی بتن ارتباط مستقیمی با کاهش انبساط بتن ناشی از واکنش قلیایی دارد. در پژوهش های دیگری اثر پوزولان های مختلف بر کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه های موجود در بتن در درصد های مختلف جایگزینی بررسی شده است. نمودار زیر بیانگر میزان انبساط بتن های ساخته شده با مواد سیمانی مختلف پس از گذشت دو سال می باشد [۴]، [۵]، [۷]:



شکل ۲- اثر پوزولان های مختلف بر میزان کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در بتن [۳]

بر اساس این نمودار می توان دریافت که سرباره در درصد های جایگزینی بیش از ۵۰ درصد بهترین عملکرد را در بین پوزولان های مختلف داشته است. در ایران نیز پژوهش هایی به منظور بررسی اثر پوزولان های مختلف موجود در کشور بر واکنش قلیایی سنگدانه در بتن انجام شده است. در پژوهشی که به منظور بررسی اثر پوزولان های نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن توسط محمد دلنوازان و همکاران در سال ۱۳۸۹ انجام شده است، با استفاده از آزمایش واکنش زایی قلیایی سنگدانه ها مطابق استاندارد ASTM C ۱۲۶۰ میزان کاهش انبساط مخلوط های مختلف حاوی درصد های مختلف از این پوزولان ها بدست آورده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، ۰٫۱ درصد جایگزینی نانوسیلیس بجای سیمان در ملات مورد آزمایش منجر به کاهش ۶۷ درصدی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیکاتی سنگدانه شده است که بهترین عملکرد در مقایسه با دیگر پوزولان های مورد بررسی بوده است. همچنین جایگزینی میکروسیلیس در درصد های ۲ و بیشتر تفاوتی در انبساط کل نداشته و در نهایت منجر به کاهش ۴۰ درصدی انبساط ناشی از ASR شده است. بهترین عملکرد جایگزینی متاکائولن بجای سیمان در ملات نیز در ۱۰ درصد حاصل شده که منجر به کاهش ۵۳ درصدی انبساط منشور ملات در اثر ASR شده است [۸].

اگرچه اثر پوزولان سرباره بر کاهش انبساط ناشی از ASR در بسیاری از کشور ها بررسی شده است ولی تاکنون اثر سرباره تولید شده در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است. پژوهش فوق به منظور بررسی اثر پوزولان سرباره تولید شرکت ذوب آهن اصفهان بر کاهش انبساط ناشی از ASR انجام شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش جهت سنجش اثر درصد های مختلف جایگزینی سرباره بر کاهش میزان انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) از آزمایش تعیین پتانسیل واکنش زایی قلیایی-سیلیسی تسریع شده مطابق استاندارد ASTM C ۱۵۶۷ استفاده شده است [۹]. بر اساس این استاندارد میتوان پتانسیل واکنش زایی ASR سنگدانه ها (باحداکثر اندازه ۴٫۷۵ میلی متر) را در ترکیب با مواد سیمانی ترکیبی (شامل سیمان و پوزولانی مانند سرباره) در مدت کوتاه ۱۶ روز تعیین نمود. برای انجام این آزمایش، بایستی از سنگدانه با دانه بندی استاندارد استفاده نمود. جدول ۱ نشان دهنده نحوه توزیع دانه بندی سنگدانه برای ساخت مخلوط ملات آزمایشی می باشد.

جدول ۱- دانه بندی سنگدانه ها برای ملات استاندارد

درصد جرم (%)	اندازه الک	
	مانده	عبوری
۱۰	۲,۳۶ میلی متر (الک نمرة ۸)	۴,۷۵ میلی متر (الک نمرة ۴)
۲۵	۱,۱۸ میلی متر (الک نمرة ۱۶)	۲,۳۶ میلی متر (الک نمرة ۸)
۲۵	۰,۶ میلی متر (الک نمرة ۳۰)	۱,۱۸ میلی متر (الک نمرة ۱۶)
۲۵	۰,۳ میلی متر (الک نمرة ۵۰)	۰,۶ میلی متر (الک نمرة ۳۰)
۱۵	۰,۱۵ میلی متر (الک نمرة ۱۰۰)	۰,۳ میلی متر (الک نمرة ۵۰)

برای ساخت ملات استاندارد، نسبت وزنی مصالح سنگی خشک دانه بندی شده به سیمان بایستی به میزان ۲,۲۵ برابر باشد. این عدد برای مصالح سنگی با چگالی نسبی (D) معادل ۲,۴۵ و بیشتر می باشد و در صورتی که میزان آن کمتر از عدد فوق باشد، نسبت وزن خشک مصالح سنگی به سیمان مطابق رابطه ۱ بدست خواهد آمد:

$$\text{نسبت وزنی} = 2.25 \times \frac{D}{2.65} \quad (1)$$

بر اساس این نسبت و در صورتی که چگالی نسبی سنگدانه ها بیش از ۲,۴۵ باشد، برای ساخت ملات استاندارد بایستی میزان ۴۴۰ گرم مواد سیمانی (شامل سیمان و پوزولان جایگزین آن) و ۹۹۰ گرم مصالح سنگی توزین شوند. نسبت آب به سیمان بر اساس استاندارد معادل ۰,۴۷ تعیین می شود که بر مبنای مجموع مواد سیمانی ۴۴۰ گرم، وزن آب نیز معادل ۲۰۶,۸ گرم محاسبه می شود. در صورتی که چگالی نسبی سنگدانه ها کمتر از ۲,۴۵ باشد، بایستی بر اساس رابطه ۱ نسبت وزنی مصالح بدست آورده شده و وزن مصالح سنگی با ضرب این نسبت در ۴۴۰ گرم (وزن مواد سیمانی) بدست آورده شود. در صورتی که از پوزولان های میکروسیلیس یا متاکائولن استفاده شود، میتوان از فوق روان کننده نوع F مطابق استاندارد ASTM C۴۹۴ [۱۰] و با حفظ نسبت آب به سیمان ۰,۴۷ برای رسیدن به جریان مشابه ملات استاندارد تولید شده با سیمان بدون جایگزینی پوزولان با حداکثر رواداری ۷,۵ درصد استفاده نمود. جدول ۲ جزئیات طرح های مخلوط مختلف مورد انجام آزمایش با درصد های مختلف جایگزینی سرباره بجای سیمان را در این پژوهش ارائه می دهد:

جدول ۲- جزئیات طرح های مخلوط حاوی درصد های مختلف جایگزینی سرباره

سرباره (%)	مصالح سنگی (گرم)	مواد سیمانی (مجموعاً برابر ۴۴۰ گرم)		آب (گرم)
		سرباره	سیمان	
۰	۹۹۰	۰	۴۴۰	۲۰۶,۸
۲۵	۹۹۰	۱۱۰	۳۳۰	۲۰۶,۸
۳۵	۹۹۰	۱۵۴	۲۸۶	۲۰۶,۸
۴۵	۹۹۰	۱۹۸	۲۴۲	۲۰۶,۸
۵۵	۹۹۰	۲۴۲	۱۹۸	۲۰۶,۸

پس از توزین مصالح مطابق جدول ۲، آن ها را بایستی مطابق استاندارد ASTM C۳۰۵ مخلوط نمود که در این استاندارد مشخصات به خصوصی برای نوع میکسر، سرعت هم زدن و مدت زمان آن ارائه شده است [۱۱]. پس از تهیه مخلوط ملات تازه، بایستی قالب ها را در مدت زمانی کمتر از ۲ دقیقه و ۱۵ ثانیه از آن ها پر نمود. برای این منظور تعداد ۳ قالب منشوری با ابعاد

۲۵ میلی متر در ۲۵ میلی متر در ۲۵۰ میلی متر مطابق استاندارد ASTM C۴۹۰ [۱۲] آماده شده و در دولایه از ملات تازه پر و متراکم میگردد .

پس از انجام قالب گیری از ملات ها ، بایستی آن ها را مطابق استاندارد به مدت 24 ± 2 ساعت در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۷,۵) و با رطوبت نسبی حداقل ۵۰ درصد نگه داری نمود . سپس منشور های ملات از قالب خارج شده و در ظرف محتوی آب خالص با دمای 23 ± 2 درجه سانتی گراد غوطه ور خواهند شد. سپس این ظرف کاملاً آب بند شده (به گونه ای که امکان تبخیر آب از آن نباشد) و آن را به مدت 24 ± 2 ساعت در گرمچال با دمای 80 ± 2 درجه سانتی گراد قرار خواهیم داد. پس از قرارگیری حوضچه به همراه منشور های ملات به مدت مشخص در گرمچال ، آن ها را خارج کرده و قرائت اول هریک از منشور ها را به وسیله مقایسه کننده طولی^۴ با دقت ۰,۰۰۲ میلی متر انجام می دهیم. مطابق استاندارد کل روند قرائت برای هر منشور نباید بیش از 15 ± 5 ثانیه به طول بیانجامد.



شکل ۳- حوضچه محتوی منشور های ملات

حوضچه دیگری آماده شده و از محلول سدیم هیدروکسید استاندارد (NaOH ۱N) پر می شود. سپس، نمونه های منشوری که قرائت اولشان انجام شده در این حوضچه غوطه ور می شوند و در نهایت این حوضچه نیز همانند حوضچه آب معمولی در گرمچال با دمای 80 ± 2 درجه سانتی گراد قرار میگیرد. منشور ها بایستی در فواصل زمانی منظم و حداقل برای ۳ مرتبه دیگر تا سن ۱۴ روز از محلول خارج شده و قرائت شوند. در نهایت میانگین اختلاف ۳ منشور برای هر مخلوط در سن ۱۴ روز با قرائت اول، بیانگر میزان انبساط منشور ها در اثر واکنش قلیایی-سیلیسی خواهد بود.



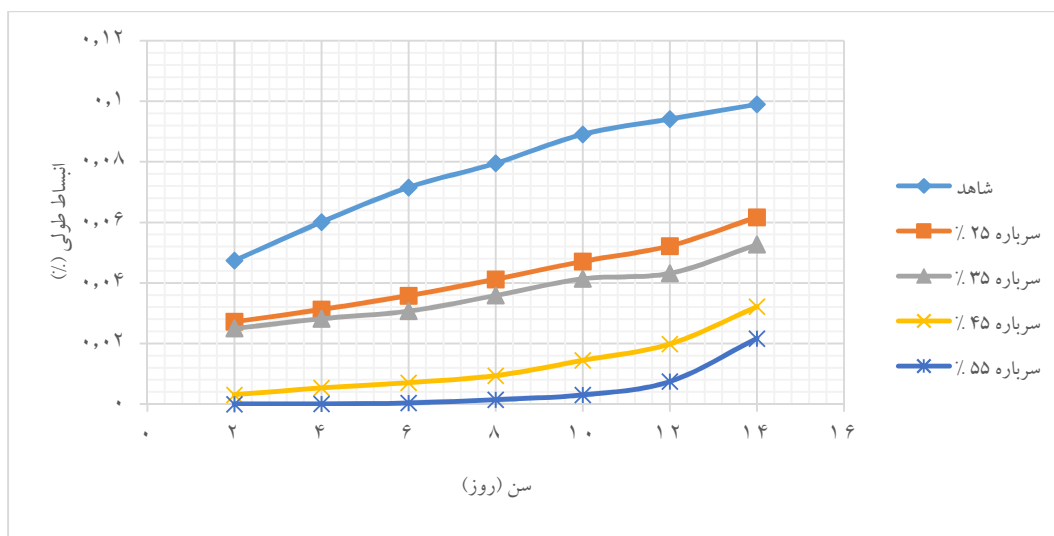
شکل ۳- قرائت طول منشور های ملات به وسیله دستگاه مقایسه کننده طولی

۳. تفسیر نتایج

مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد، ۴ ملات مختلف حاوی درصد های ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد جایگزینی سرپاره بجای سیمان ساخته شد و از هر یک ۳ منشور ملات تهیه شد. این منشور ها پس از طی روند آزمایش درون محلول هیدروکسید کلسیم قرار گرفته و در آن تا مدت ۱۴ روز نگه داری شدند. در طی مدت این ۱۴ روز به فاصله هر ۲ روز یکبار قرائت منشور ها در یک ساعت مشخص با استفاده از دستگاه مقایسه کننده طولی انجام گرفت و نتایج انبساط طولی در مدت این بازه زمانی به صورت میانگین حاصل از قرائت سه منشور بدست آمد. جدول ۳ و نمودار موجود در شکل ۴ نشان دهنده میانگین انبساط طولی منشور های مخلوط های مختلف می باشد:

جدول ۲- جزئیات انبساط طولی منشور های ملات حاوی درصد های مختلف سرپاره در سنین مختلف

درصد سرپاره	درصد انبساط طولی در سن منشور ملات (روز)						
	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴
۰	۰,۰۴۷۴۲۳	۰,۰۶۰۱۸۳	۰,۰۷۱۶۲۷	۰,۰۷۹۵۹۲	۰,۰۸۹۱۴۷	۰,۰۹۴۲۱۲	۰,۰۹۹۰۴۴
۲۵	۰,۰۲۷۲۵۵	۰,۰۳۱۲۷۵	۰,۰۳۵۸۷۴	۰,۰۴۱۲۵۴	۰,۰۴۷۱۶۶	۰,۰۵۲۲۵۵	۰,۰۶۱۷۵۴
۳۵	۰,۰۲۵۰۱۳	۰,۰۲۸۲۴۳	۰,۰۳۰۷۳۵	۰,۰۳۵۹۰۴	۰,۰۴۱۴۲۵	۰,۰۴۳۲۳۵	۰,۰۵۲۷۳
۴۵	۰,۰۰۳۱۱۲	۰,۰۰۵۳۴۹	۰,۰۰۷۱۰۲	۰,۰۰۹۴۱۱	۰,۰۱۴۴۶۶	۰,۰۱۹۸۹۲	۰,۰۳۲۲
۵۵	۰,۰۰۰۰۵۳	۰,۰۰۰۱۴۲	۰,۰۰۰۳۸۲	۰,۰۰۱۵۲۱	۰,۰۰۳۰۵۲	۰,۰۰۷۴۶۳	۰,۰۲۱۷

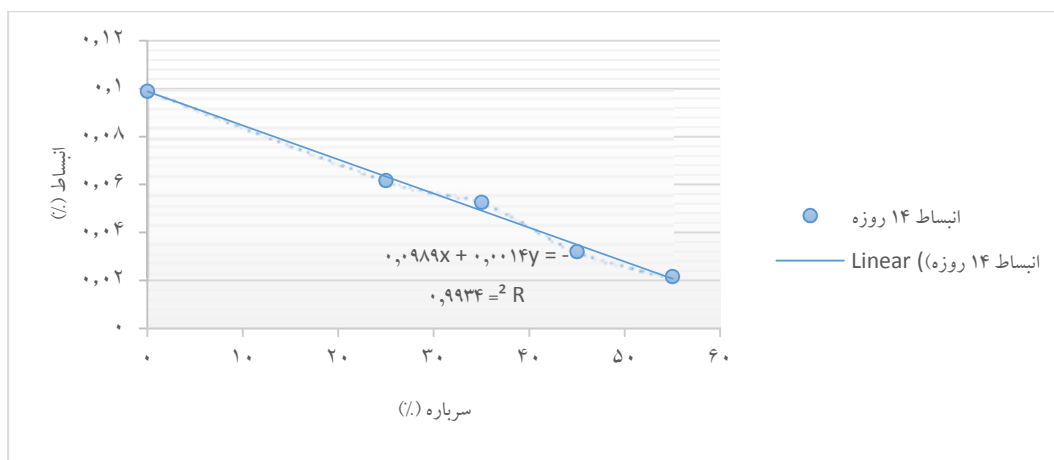


شکل ۴- نمودار انبساط طولی منشورهای ملات حاوی درصد های مختلف سرباره در سنین مختلف

مطابق انتظار قبلی، میتوان مشاهده نمود که با افزایش درصد جایگزینی سرباره بجای سیمان در ملات ها، انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه ها کاهش یافته است. سیمان محتوی مخلوط های ملات، بلافاصله پس از ترکیب با آب شروع به انجام واکنش هیدراسیون نموده و در نتیجه این عمل کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) و کلسیم هیدروکسید (CaOH_2) شکل میگیرد. عامل قلیایی بودن محیط بتن همان کلسیم هیدروکسید یا هک آزاد می باشد که در صورت وجود رطوبت در حفرات ملات یا بتن با سیلیس آزاد سنگدانه واکنش داده و منجر به انبساط می شود. حال با افزایش درصد جایگزینی سرباره علاوه بر کاهش کلسیم هیدروکسید تولید شده توسط سیمان (به دلیل کاهش مقدار سیمان) مصرف آن نیز توسط پوزولان سرباره بیشتر می شود و همان گونه که از نمودار شکل ۴ میتوان برداشت کرد، با افزایش سرباره جایگزین سیمان در ملات، از ۳۵ درصد به ۴۵ درصد، کاهش محسوسی در انبساط منشور ملات دیده شده است. بر اساس نتایج انبساط در سن ۱۴ روزه، برای میزان جایگزینی ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره بجای سیمان، نسبت به منشور طرح شاهد به ترتیب ۳۸، ۴۷، ۶۷ و ۷۸ درصد کاهش در انبساط ناشی از ASR مشاهده شده است.

باتوجه به نتایج پژوهشی که توسط محمد دلنوازان و همکاران در سال ۱۳۸۹ انجام شده و در بهترین حالت ۶۷ درصد کاهش انبساط برای جایگزینی ۰,۱ درصد نانوسیلیس بجای سیمان نتیجه گرفته شده است میتوان مشاهده نمود که جایگزینی ۴۵ درصد سرباره نتیجه ای معادل آن خواهد داشت و درصد های جایگزینی بیشتر از این مقدار، نتیجه بهتری را نسبت به نانوسیلیس ارائه خواهد داد [۸]. همچنین بر مبنای پژوهش های پیشین، بهترین پوزولان جایگزین در درصد های بالا برای کاهش انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی، سرباره بوده است که نتایج این پژوهش نیز در مقایسه با پژوهش های دیگر، این موضوع را تایید نموده است [۴]، [۵]، [۷].

بر اساس استاندارد ASTM C1567 در صورتی که میزان انبساط منشور پس از ۱۶ روز، کمتر از ۰,۱ درصد باشد، واکنش زایی سیلیسی-قلیایی بتن را تهدید نخواهد کرد و در صورتی که انبساط منشور از این میزان بیشتر باشد، میتوان با افزایش سهم سرباره در مواد سیمانی میزان آن را کاهش داد. به نظر میرسد میتوان رابطه ای بین میزان جایگزینی مواد سیمانی با سرباره ایران و میزان کاهش انبساط منشور ملات در سن ۱۴ روزه بدست آورد. برای این منظور، نمودار شکل زیر نشان دهنده میزان انبساط ۱۴ روزه ملات های حاوی درصد های مختلف سرباره و رابطه بین آن ها می باشد:



شکل ۵- رابطه خطی بین میزان سرباره جایگزین سیمان و درصد انبساط ۱۴ روزه در آزمایش ASTM C ۱۵۶۷

۴. نتیجه گیری

یکی از عوامل مهاجم علیه دوام بتن، واکنش های قلیایی-سیلیسی سنگدانه در بتن است که در طی این واکنش برخی سنگدانه های سیلیسی با عوامل قلیایی سیمان (هیدروکسید کلسیم یا آهک آزاد) در بتن واکنش انبساطی داده و منجر به ترک خوردگی و تخریب کامل بتن می گردد. از جمله راهکار هایی که در برابر واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) ارائه می شود، استفاده از پوزولان های طبیعی و مصنوعی به منظور کاهش قلیائیت بتن است. در پژوهش های مختلفی اثر مثبت پوزولان ها مورد بررسی قرار گرفته و در پژوهش حاضر نیز اثر سرباره تولید شرکت ذوب آهن ایران بر کاهش انبساط ناشی از واکنش ASR مورد پژوهش و آزمایش قرار گرفته است.

برای این منظور انبساط ناشی از ASR به صورت تسریع شده برای ۵ مخلوط ملات مختلف حاوی جایگزینی ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره بجای سیمان به همراه یک مخلوط شاهد فاقد سرباره جهت مقایسه بر اساس آزمایش ASTM C ۱۵۶۷ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش میزان جایگزینی سرباره بجای سیمان در ملات ها، کاهش چشمگیری در میزان انبساط ملات مشاهده شده است.
- بر اساس نتایج انبساط در سن ۱۴ روزه، برای میزان جایگزینی ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره بجای سیمان، نسبت به منشور طرح شاهد به ترتیب ۳۸، ۴۷، ۶۷ و ۷۸ درصد کاهش در انبساط مشاهده شده است.
- از مقایسه نتایج آزمایشهای سرباره با نتایج آزمایشهای دیگر پوزولان ها می توان دریافت که برای کاهش انبساط واکنش های قلیایی، بهترین پوزولان برای جایگزینی سیمان در بتن، سرباره بوده است.

بر اساس استاندارد ASTM C ۱۵۶۷ در صورتی که میزان انبساط منشور پس از ۱۶ روز، کمتر از ۰,۱ درصد باشد، واکنش زایی سیلیسی-قلیایی بتن را تهدید نخواهد کرد و در صورتی که انبساط منشور از این میزان بیشتر باشد، میتوان با افزایش سهم سرباره در مواد سیمانی میزان آن را کاهش داد که میزان سهم آن با آزمایش های متعدد و آزمون و خطا تعیین خواهد شد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، یک رابطه بین درصد جایگزینی سرباره و میزان انبساط ۱۴ روزه در این آزمایش برای سرباره ایران تعیین شده است که میتواند در پروژه ها مورد استفاده قرار گیرد و موجب کاهش اتلاف وقت و هزینه در انجام آزمایشها واکنش زایی سیلیسی-قلیایی سنگدانه ها گردد.

۵. مراجع

- [۱] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. ۲۰۰۶.
- [۲] A. A. Ramezani-pour, *Cement replacement materials : properties, durability, sustainability*. .
- [۳] M. Thomas, "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review," *Cement and Concrete Research*, vol. ۴۱, no. ۱۲, pp. ۱۲۲۴-۱۲۳۱, ۲۰۱۱.
- [۴] M. D. A. Thomas, M. H. Shehata, S. G. Shashiprakash, D. S. Hopkins, and K. Cail, "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete," *Cem. Concr. Res.*, ۱۹۹۹.
- [۵] M. H. Shehata, M. D. A. Thomas, and R. F. Bleszynski, "The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, ۱۹۹۹.
- [۶] R. F. Blanks, "The Use of Portland-Pozzolan Cement by the Bureau of Reclamation," *J. Proc.*, ۱۹۴۹.
- [۷] T. Ramlochan, M. Thomas, and K. A. Gruber, "Effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete," *Cem. Concr. Res.*, ۲۰۰۰.
- [۸] م. دلنوازان، ه. فامیلی، م. خاکساری، ب. علیپور، "بررسی تاثیر استفاده از نانو سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن در کاهش واکنشهای قلیایی - سیلیسی سنگدانه های بتن،" *دومین کنفرانس ملی بتن ایران*، ۱۳۸۹.
- [۹] ASTM C ۱۵۶۷-۱۳, "Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar - Bar Method)," *Annu. B. ASTM Stand.*, ۲۰۱۳.
- [۱۰] ASTM International, "ASTM C۴۹۴/C۴۹۴M-۰۴: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," *Am. Soc. Test. Mater.*, ۲۰۱۳.
- [۱۱] ASTM C۳۰۵, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars," *ASTM Stand. B.*, ۲۰۱۵.
- [۱۲] ASTM C۴۹۰/C۴۹۰M-۱۱, "Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste , mortar , and concrete," *ASTM Int.*, ۲۰۱۱.