

## بررسی تاثیر استفاده از نانو سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن در کاهش واکنش‌های قلیایی - سیلیسی سنگدانه‌های بتن

محمد دلنواز<sup>۱</sup>، هرمز فامیلی<sup>۲</sup>، محمود خاکساری<sup>۳</sup>، بابک علیپور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، و بخش

تکنولوژی بتن مهندسی مشاور کوبان کاو،

E-mail: mdelnavaz@modares.ac.ir

۲- سرپرست موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی، گرمسار

E-mail: hormoz.famili@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران،

سرپرست آزمایشگاه مرکزی مهندسی مشاور کوبان کاو

E-mail: mahmoud\_kh\_25@yahoo.com

۴- سرپرست بخش تکنولوژی بتن، مهندسی مشاور کوبان کاو

E-mail: bs.alipour@gmail.com

### چکیده

واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) میان سیلیس آمورف فعال در سنگدانه‌ها و قلیائیت محلول موجود در منافذ بتن رخ می‌دهد. در اثر این واکنش ژل سیلیسی تشکیل می‌شود که می‌تواند رطوبت جذب نموده و منبسط شود. هنگامی که تنش داخلی ایجاد شده به بیش از مقاومت کششی بتن برسد ترک خوردگی ایجاد می‌شود. این ترکها خود می‌توانند محل نفوذ عوامل مخرب دیگر بدخل بتن شوند و خسارت تشدید می‌گردد. کاربرد برخی از پوزولانها و یا سرباره‌ها می‌توانند واکنش ASR را کنترل نماید. در این تحقیق از نانو ذرات سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن در درصدهای مختلف در آزمایش واکنش‌زایی سنگدانه‌ها به روش ASTM C1260 استفاده گردید تا تاثیر این ذرات بر کاهش واکنش بررسی گردد. نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیلیس در مقایسه با دیگر پوزولان‌ها قابلیت بیشتری برای کنترل ASR دارد.

**کلمات کلیدی:** واکنش قلیایی سیلیسی، نانوسیلیس، دوده سیلیسی، پوزولان، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها

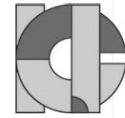
### Abstract:

Alkali-Silica Reaction (ASR) occurs between active amorphous silica of aggregate and soluble alkalinity of concrete. Network of cracks, closed joints, relative displacements of different parts of structure or fragments breaking out of the surface of the concrete are some examples of ASR effect. Supplementary cementitious materials include fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, and natural pozzolans can use to control ASR. In this research the application of different percentages of silica fume, nano silica and metakaolin was studied in ASR reduction according ASTM C1260. Results showed that nano silica has the most effect in control of ASR.

**Keywords:** Alkali-Silica Reaction, Silica fume, Nano silica, Pozzolans

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول مکاتبات

آدرس: تهران، خیابان کارگر شمالی، خیابان هفتم، بن بست هشتم، پلاک ۱



## مقدمه

بتن پر مصرف‌ترین ماده ساختمانی در جهان است. استفاده از مزایای منحصر به فرد این ماده باعث کاربرد فراوان آن در اکثر پروژه‌های عمرانی در ایران شده است. علی‌رغم ویژگی‌های مفید این ماده کامپوزیت، در بسیاری از پروژه‌ها عدم رعایت الزامات آیین‌نامه‌ای سبب تولید محصول بی‌کیفیت و بی‌دوام شده که هزینه‌های اضافی را تحمیل می‌نماید. یکی از دلایل کاهش پایایی بتن، استفاده از موادی است که در فعل و انفعالات شیمیایی تولید محصولات مضر می‌کنند. در این میان سنگدانه‌ها به دلیل دارا بودن بیشترین درصد در بین سایر مواد اولیه تشکیل دهنده بتن از اهمیت بسزایی برخوردارند، از این رو ارزیابی سنگدانه‌ها در پروژه‌هایی که امکان واکنش‌زایی سنگدانه‌ها وجود دارد الزامی است.

واکنش‌های قلیایی (سرطان بتن) یکی از عوامل خرابی بتن در محیط‌های مختلف به حساب می‌آید. تاریخچه شناخت واکنش قلیایی سنگدانه‌ها به دهه ۱۹۳۰ و مشاهده انبساط‌های غیر قابل توجیه در سازه‌های ایالت کالیفرنیا بر می‌گردد. مطالعات بیشتر بر روی این سازه‌ها نشان داد که علت ایجاد ترک‌ها در بتن واکنش قلیایی سنگدانه‌ها بوده است. زیرا بتن در اثر فعل و انفعالات شیمیایی دارای محیط قلیایی بوده که برخی فازهای کانی-ها که معمولاً در شرایط عادی پایدار می‌باشند، در این محیط قلیائی واکنش شیمیایی نشان می‌دهند که به این نوع واکنش‌ها، واکنش قلیایی سنگدانه ( $^2AAR$ ) گفته می‌شود. واکنش قلیایی سنگدانه‌ها به دو دسته قلیایی-سیلیسی ( $^3ASR$ ) و قلیایی-کربناتی ( $^4ACR$ ) تقسیم می‌گردد [۱].

ترکیب سیلیس فعال سنگدانه‌های بتن با مواد قلیایی با گذشت زمان موجب آسیب دیدن سازه‌های بتنی اجرا شده می‌شود [۲]. در اجرای پروژه‌های عمرانی، برای ارائه طرح اختلاط بتن، بیشتر به خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها مانند دانه‌بندی، وزن مخصوص انبوهی، ارزش ماسه‌ای، ضریب نرمی ماسه، سختی دانه‌ها و درصد شکستگی توجه می‌شود و به خواص شیمیایی مصالح توجه کمتری معطوف می‌گردد در حالیکه بسیاری از عوامل مخرب در بتن مانند  $ASR$  به ویژگی‌های شیمیایی مصالح مربوط می‌شود [۳]. چنانچه این ویژگی‌ها به دقت مورد توجه قرار نگیرند باعث ایجاد واکنش‌هایی می‌گردند که هزینه تخریب آن‌ها در سازه بسیار بیشتر از هزینه آزمایش‌ها و یا جایگزین کردن مصالح خواهد بود. در بعضی از پروژه‌ها با توجه به شرایط دسترسی به منابع قرضه و جهت کم نمودن هزینه حمل مصالح، ممکن است از سنگدانه‌های محلی که ممکن است واکنش‌زا باشند استفاده گردد، در این صورت استفاده از برخی مواد افزودنی جهت کنترل  $ASR$  الزامی می‌باشد. استفاده از انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی و سایر ترکیبات توسط محققان برای کاهش  $ASR$  بررسی شده است. به عنوان نمونه  $Feng$  و همکاران با استفاده از نیترات لیتیوم میزان  $ASR$  را در سنگدانه‌های واکنش‌زا کاهش دادند [۴].  $Ichikawa$  نیز روند تغییرات  $ASR$  را با استفاده از پوزولان مورد ارزیابی قرار داد [۵].  $Gudmundsson$  و همکاران نیز در تحقیقی عملکرد بیست ساله استفاده از پوزولان‌ها در کاهش  $ASR$  را در کشور ایسلند گزارش کردند [۶]. استفاده از درصد‌های مختلف دوده سیلیسی در کاهش  $ASR$  نیز توسط  $Boddy$  و همکاران صورت گرفت [۷].

در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از میکروسیلیس، نانو سیلیس و متاکائولن در درصد‌های مختلف بر کاهش  $ASR$  را تحت شرایط کاملاً آزمایشگاهی بررسی شده است.

## واکنش قلیایی - سیلیسی سنگدانه‌ها

در بتن‌هایی که در شرایط محیطی مرطوب قرار داشته (مانند سدها، کانال‌های آبرسانی، پایه پل‌ها و ...) و حاوی سنگدانه با کانی-های اپال، کریستو بالیت، ریولیت، آندزیت، کلسدونی یا داسیتها باشند و با سیمان حاوی قلیایی معادل ( $Na_2O + 0.658 K_2O$ ) بیش از ۰/۶ درصد ساخته شده باشند، احتمال وقوع  $ASR$  زیاد می‌شود که منجر به تولید انبساط‌های شدیدی در سطح بتن می‌-

<sup>2</sup> Alkali Aggregate Reaction

<sup>3</sup> Alkali Silica Reaction

<sup>4</sup> Alkali Carbonate Redction

گردد (شکل ۱). واکنش قلیایی-سیلیسی اغلب پس از مدت طولانی حدود ۵ الی ۱۵ سال ظاهر می‌شود. این واکنش از داخل بتن شروع شده و بدین لحاظ کنترل و یا جلوگیری از وقوع آن مشکل و حتی در بسیاری از موارد غیر ممکن است. در اکثر موارد، این پدیده پس از شروع تا تخریب کامل سازه، به طور مستمر ادامه پیدا می‌کند به همین دلیل به آن سرطان بتن نیز گفته می‌شود. خرابی سازه‌ها در این حالت ناشی از انبساط تورم اسمزی ژل‌های قلیایی-سیلیسی بوده که در اثر واکنش شیمیایی بین مواد سیلیسی فعال سنگدانه و قلیائیت حاصله از هیدراتاسیون سیمان و منابع دیگر حادث می‌شود. این واکنش علاوه بر انبساط زیاد باعث افت مقاومت فشاری و فروپاشی بتن نیز می‌شود. سرعت این واکنش را می‌توان توسط اندازه ذرات سیلیسی سنگدانه‌ها کنترل نمود. به نحوی که ذرات بسیار ریز ظرف یک تا دو ماه ایجاد انبساط می‌کنند در حالی که ذرات درشت‌تر در طی سالها موجب انبساط می‌شوند. به منظور کاهش واکنش قلیایی-سیلیسی آئین‌نامه‌ها و سازمان‌های متعددی از جمله، AASHTO، ASTM، انجمن سیمان پرتلند، انجمن بتن آمریکا (ACI)، مرکز تحقیقات بین‌المللی سنگدانه و ... روش‌هایی را شناسایی و ارائه نموده‌اند. راه‌کارهای پیشگیری از ASR عبارتند از:

- بکار بردن سیمانی با قلیائیت کم<sup>۵</sup> (قلیائیت معادل کمتر از ۰/۶ درصد)
- جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی یا سربراه کوره آهنگدازی و یا ترکیبی از هر دو و یا سایر پوزولان‌های طبیعی مصنوعی نظیر دوده سیلیسی
- استفاده از نمک‌های لیتیوم<sup>۶</sup>
- جایگزین کردن سنگدانه‌های غیر فعال به جای سنگدانه‌های فعال، از نظر واکنش قلیایی
- استفاده از مواد افزودنی حباب‌زا با ایجاد و یا افزایش منافذ در بتن [۸]



شکل ۱- نمونه‌ای از واکنش قلیایی-سیلیسی در بدنه سد [۸]

## مواد و روش‌ها

### ۱- مواد و تجهیزات

در این تحقیق جهت بررسی ASR از اوپال خالص با فرمول شیمیایی  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  و چگالی  $2/47 \text{ gr/cm}^3$  که از معدن تورود شاهرود تهیه شده بود استفاده گردید. دلیل استفاده از اوپال خالص یکسان کردن شرایط در تمامی آزمایشات بود تا ترکیبات دیگر باعث اختلال در نتایج آزمایش‌ها نگردد. جهت انجام این آزمایش سنگ خالص اوپال توسط سنگ شکن خرد شد و با استفاده از الک‌های استاندارد دانه‌بندی گردید (شکل ۲).

<sup>5</sup> - Low Alkali

<sup>6</sup> - گزارش‌های ضد و نقیضی درباره عملکرد املاح لیتیوم ارائه شده که نیاز به بررسی بیشتر دارد.

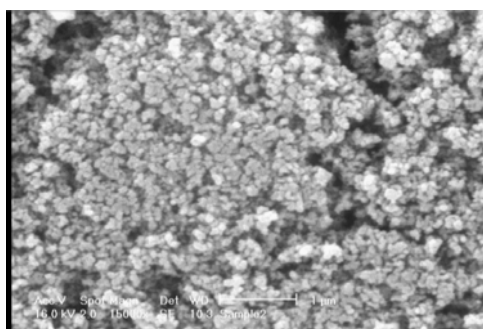


شکل ۲- اوپال دانه‌بندی شده جهت ساخت نمونه‌های ملات منشوری

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ ۲ با قلیائیت معادل بیش از ۰/۶ درصد انتخاب شد (در حدود ۰/۷۸) تا شرایط انجام ASR فراهم شود. در تمامی آزمایش‌ها از آب مقطر دو بار تقطیر استفاده گردید. نانو سیلیس مصرفی به صورت پودر از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن با اندازه متوسط ذرات ۵۰ نانومتر و ویژه تقریبی  $65000 \text{ m}^2/\text{kg}$ ، و دوده سیلیسی از کارخانه فروآلیاژ ایران با اندازه ذرات ۰/۳-۰/۲ میکرومتر و سطح ویژه  $65000 \text{ m}^2/\text{kg}$  تهیه شد. متاکائولن نیز که یک سیلیکات آلومینیم آمورف سفید رنگ و دارای خواص پوزولانی است می‌باشد از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تهیه گردید. آنالیز شیمیایی نمونه سیمان، متاکائولن و مشخصات میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. تصویر SEM نانو سیلیس برای تعیین اندازه ذرات نیز در آزمایشگاه SEM دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی نمونه سیمان مورد استفاده در آزمایش

پارامتر (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	قلیائیت معادل	SO <sub>3</sub>
سیمان	۶۳/۷۸	۲۱/۷۴	۴/۰۴	۴/۶۵	۱/۰۳	۰/۷۸	۱/۶
میکروسیلیس	۰/۴۹	۹۳/۸۶	۱/۳۲	۰/۱	۰/۹۷	۱/۳۲	۰/۱
متاکائولن	۲/۴	۵۶	۳۷	۲/۴	۰/۳	۰/۶	-



شکل ۳- تصویر SEM از نانو سیلیس پودری

در این تحقیق برای بررسی ASR از آزمایش ملات منشوری تسریع شده مطابق با استاندارد ASTM C1260 استفاده گردید [۹]. برای این منظور سنگدانه‌های حاصل شده از سنگ اوپال مادر مطابق با جدول ۲ دانه‌بندی شدند. نسبت آب به سیمان در تمامی



نمونه‌های ساخته شده مطابق با استاندارد مذکور به میزان ثابت ۰/۴۷ و نسبت سنگدانه به مصالح سیمانی نیز برابر ۲/۲۵ در نظر گرفته شد. جهت ایجاد محیط قلیایی برای ملات‌های ساخته شده از محلول NaOH یک نرمال محصول شرکت مرک آلمان با درجه خلوص ۹۹٪ استفاده گردید. تمامی نمونه‌ها در دمای ثابت ۸۰ درجه سلسیوس در آون قرار گرفته و پس از خروج نیز در شرایط آزمایشگاهی با دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت کمتر از ۵۰٪ قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت قرائت اولیه خوانده شد و سپس نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در محلول NaOH یک نرمال قرار گرفت و پس از دو هفته قرائت نهایی آن صورت گرفت. جهت تعیین نرخ افزایش انبساط، میزان تغییر طول نمونه‌ها هر دو روز یکبار اندازه‌گیری شد. تصویری از قرائت نهایی یکی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- دانه‌بندی سنگدانه اوپال مادر جهت استفاده در آزمایش ملات منشوری تسریع شده

درصد وزنی	اندازه الک	
	مانده روی الک	عبوری از الک
۱۰	# ۸	# ۴
۲۵	# ۱۶	# ۸
۲۵	# ۳۰	# ۱۶
۲۵	# ۵۰	# ۳۰
۱۵	# ۱۰۰	# ۵۰



شکل ۴- تصویر یکی از نمونه‌های ساخته شده در دستگاه سنجش تغییر طول

## ۲- طراحی آزمایش‌ها

همانطور که عنوان شد هدف اصلی از این تحقیق مقایسه تاثیر استفاده از نانو سیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن بر کاهش ASR در سنگدانه‌های با واکنش‌زایی بالا بود. برای این منظور پس از تهیه مواد اولیه، اقدام به طراحی آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌های

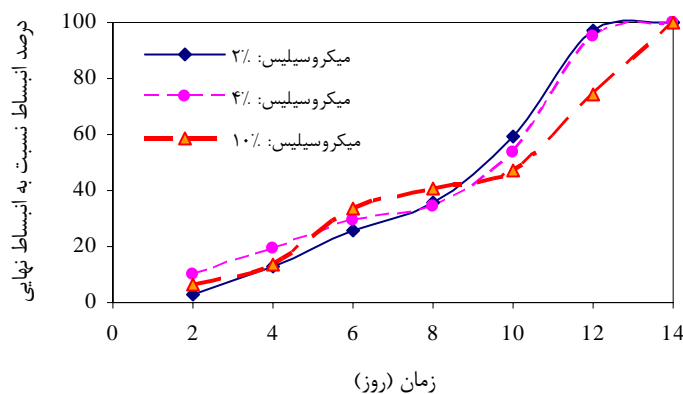
ملات منشوری گردید. جهت ساخت نمونه‌های ملات منشوری پس از وزن کردن هر یک از مصالح مطابق جدول ۳، ابتدا آب و مواد افزودنی معدنی و سیس سنگدانه‌ها و سیمان به داخل ظرف اختلاط ریخته شدند. اختلاط مواد نیز به مدت ۱ دقیقه با دور آرام rpm ۷۵ و ۳۰ ثانیه با دور rpm ۱۵۰ مخلوط گردید. پس از ۹۰ ثانیه توقف مجدداً مصالح با دور rpm ۱۵۰ مخلوط شدند. سپس مخلوط حاصل در داخل قالب مخصوص آزمایش قرار گرفت. طرح‌های ارائه شده در جدول ۳ با توجه به محدوده کاربرد هر یک از مواد افزودنی معدنی در بتن و در نظر گرفتن حد پایین و بالای استفاده از این مواد در نظر گرفته شده است. هر یک از این طرح‌ها ۲ بار ساخته شده و در صورت اختلاف ناچیز بین قرائت طول‌ها از میانگین نتایج استفاده گردید.

جدول ۳- طراحی آزمایش‌ها برای ساخت نمونه‌های ملات منشوری

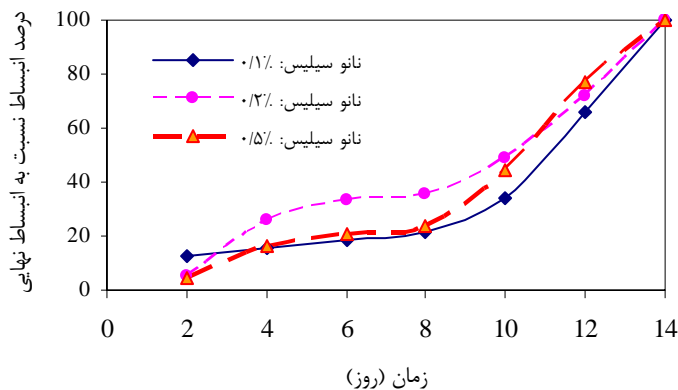
شماره طرح	سیمان (gr)	آب (CC)	سنگدانه (gr)	مواد افزودنی معدنی (gr)	ملاحظات
۱	۲۹۳/۳	۱۳۷/۹	۶۶۰	۰	نمونه شاهد
۲	۲۸۷/۴	۱۳۷/۹	۶۶۰	۵/۹	۲٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
۳	۲۸۱/۶	۱۳۷/۹	۶۶۰	۱۱/۷	۴٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
۴	۲۶۴	۱۳۷/۹	۶۶۰	۲۹/۳	۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
۵	۲۹۳	۱۳۷/۹	۶۶۰	۰/۳	۰/۱٪ نانو سیلیس جایگزین سیمان
۶	۲۹۲/۷	۱۳۷/۹	۶۶۰	۰/۶	۰/۲٪ نانو سیلیس جایگزین سیمان
۷	۲۹۱/۸	۱۳۷/۹	۶۶۰	۱/۵	۰/۵٪ نانو سیلیس جایگزین سیمان
۸	۲۸۷/۴	۱۳۷/۹	۶۶۰	۵/۹	۲٪ متاکائولن جایگزین سیمان
۹	۲۸۱/۶	۱۳۷/۹	۶۶۰	۱۱/۷	۴٪ متاکائولن جایگزین سیمان
۱۰	۲۶۴	۱۳۷/۹	۶۶۰	۲۹/۳	۱۰٪ متاکائولن جایگزین سیمان

## نتایج و بحث

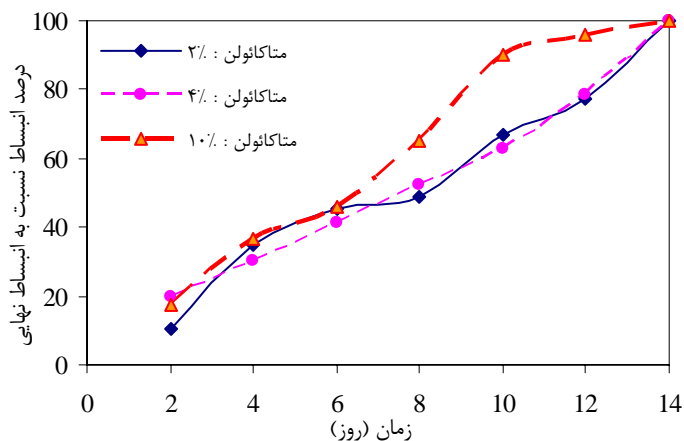
در مرحله اول تحقیق، میزان افزایش انبساط هر یک از نمونه‌ها در بازه زمانی ۱۴ روزه اندازه‌گیری شد. برای این منظور هر ۴۸ ساعت یکبار نمونه‌ها از آون بیرون آورده شد و میزان افزایش طول نمونه‌ها قرائت گردید. نتایج مربوط به میزان افزایش طول نمونه‌ها در این بازه زمانی در اشکال ۵ الی ۷ آورده شده است. با توجه به اینکه ASR یک واکنش شیمیایی با سرعت پایین است، ملاحظه می‌گردد که در تمامی موارد میزان انبساط در ۷ روز اول به کندی افزایش می‌یابد و پس از این مدت روند افزایش طول با سرعت بیشتری روی می‌دهد. به عبارت دیگر سرعت انجام ASR در بازه زمانی ۱۴ روزه متفاوت می‌باشد.



شکل ۵- روند افزایش انبساط ASR نمونه حاوی دوده سیلیسی

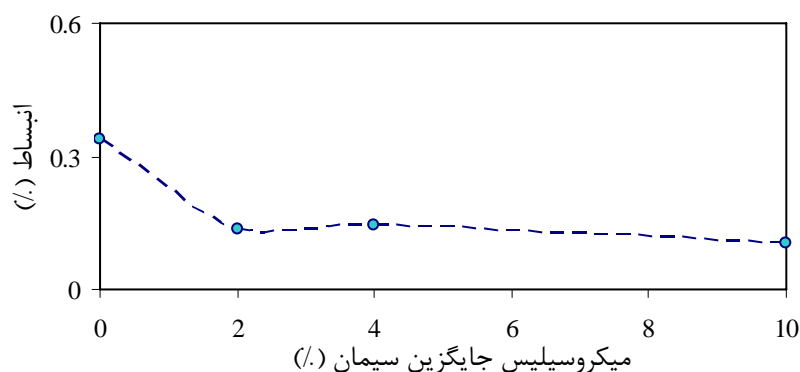


شکل ۶- روند افزایش انبساط ASR نمونه حاوی نانو سیلیس

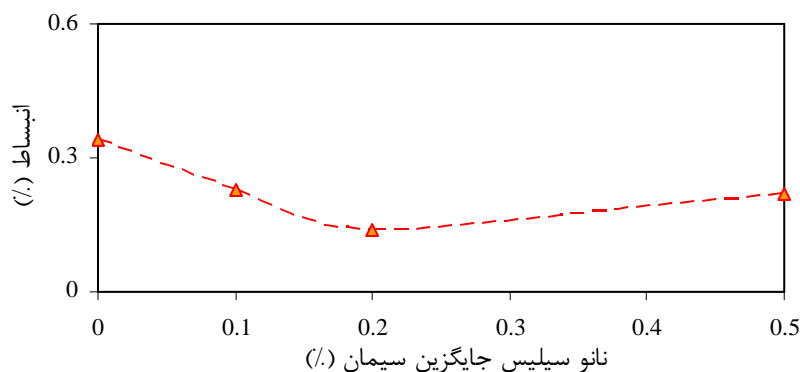


شکل ۷- روند افزایش انبساط ASR نمونه حاوی متاکائولن

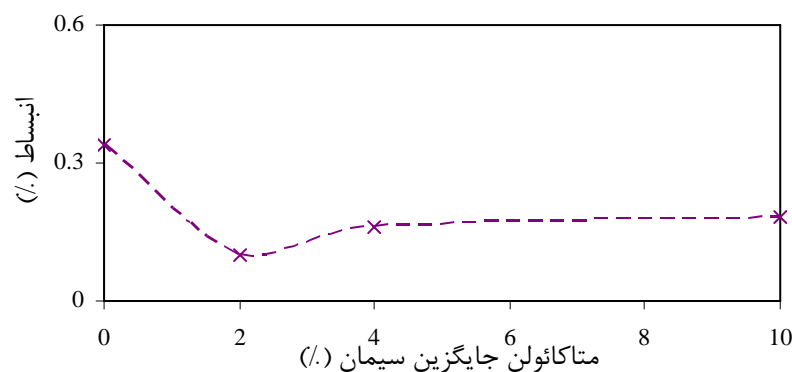
نتایج مربوط به کاهش ASR با جایگزین کردن مواد پوزولانی به جای سیمان در اشکال ۸ الی ۱۰ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد با اضافه کردن میکروسیلیس، مقدار ASR کاهش می‌یابد. تاثیر درصد استفاده از ۲٪ میکروسیلیس بسیار بیشتر از درصدهای بالاتر است و با اضافه کردن میکروسیلیس میزان تغییرات در کاهش ASR کم می‌شود. به عبارت دیگر تاثیر بین استفاده از ۲ و ۱۰ درصد از میکروسیلیس به جای سیمان در کاهش ASR قابل ملاحظه نمی‌باشد. روند تغییرات ASR با استفاده از نانو سیلیس و متاکائولن متفاوت با میکروسیلیس است. همانطور که در اشکال ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌گردد میزان استفاده از این دو ماده به جای سیمان یک حد بهینه دارد. به عبارت دیگر با افزایش میزان این مواد از یک حد مشخص، نه تنها میزان ASR نسبت به درصدهای کمتر کاهش نیافته است، بلکه روند صعودی نیز پیدا کرده است. دلیل این امر نیز خاصیت چسبندگی این ذرات (آگلومره شدن) و در نتیجه کاهش میزان سطح ویژه برای کاهش ASR می‌باشد.



شکل ۸- تاثیر درصد دوده سیلیسی در کاهش انقباض ناشی از ASR



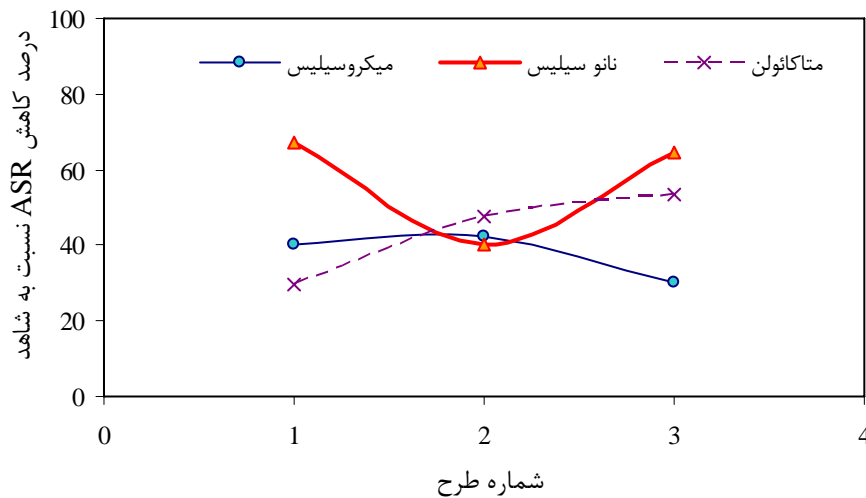
شکل ۹- تاثیر درصد نانو سیلیس در کاهش انقباض ناشی از ASR



شکل ۱۰- تاثیر درصد متاکائولن در کاهش تغییر طول ناشی از ASR

مقایسه میان کاهش ASR با جایگزین کردن سیمان توسط میکرو و نانو سیلیس و متاکائولن در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، تاثیر استفاده از نانو سیلیس در کاهش ASR نسبت به دو ترکیب دیگر بیشتر است به نحوی که با استفاده از ۰/۱ درصد از نانو سیلیس ۶۷٪ از ASR کاهش یافته است که بهترین نتیجه در بین کلیه طرح‌های ساخته شده می‌باشد.





شکل ۱۱- مقایسه میزان کاهش ASR با جایگزین کردن سیمان با میکرو و نانو سیلیس و متاکائولن

با توجه به نمودارهای فوق ملاحظه می‌گردد که نحوه عملکرد نانو سیلیس در مقایسه با دوده سیلیسی در کاهش ASR بهتر بوده است. دلیل این امر نیز تفاوت بین ریز عملکرد و کلان عملکرد نانو ذرات و میکرو ذرات سیلیسی است. وقتی مقادیر کمی از نانو ذرات سیلیس بصورت همگن در ملات یا خمیر سیمان پخش شوند، این نانو ذرات با توجه به سطح ویژه بسیار بالایشان و در نتیجه انرژی سطحی بسیار زیاد، یک چسبندگی قوی با سیمان هیدراته ایجاد می‌کنند. واکنش نانو سیلیس با کلسیم هیدروکسید که محصول واکنش سیمان با آب است تولید ژل متراکم کلسیم - سیلیکات هیدرات می‌کند، که اگر چه مشابه تولید محصول میکروسیلیس می‌باشد اما به دلیل سطح ویژه بیشتر از شدت بیشتری برخوردار است.

## نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت استفاده از مواد پوزولانی جایگزین سیمان میزان ASR تا حد زیادی کاهش می‌یابد. بهترین نتیجه در کاهش ASR مربوط به استفاده از ۰/۱ درصد نانو ذرات سیلیس بود که تا ۶۷٪ ASR را کاهش داد. درصد تاثیر دوده سیلیسی نیز در کاهش ASR در حدود ۴۰٪ بود ولی تغییر در درصد میکروسیلیس تاثیر زیادی در کاهش ASR نداشت. متاکائولن نیز در درصدهای مشابه با میکروسیلیس مورد استفاده قرار گرفت که با جایگزین کردن ۱۰٪ سیمان با آن ۵۳٪ درصد کاهش ASR را داشت که نسبت به میزان مشابه برای میکروسیلیس ۲۰٪ بیشتر بود. قابل ذکر است که معمولاً دقیق‌ترین اطلاعات در زمینه پتانسیل فعالیت سنگدانه‌های بتن، از عملکرد واقعی سنگدانه‌ها در سازه‌های موجود حاصل می‌گردد. از این رو با توجه به اینکه نتایج این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی حاصل شده است، استناد به نتایج آن در شرایط دیگر منوط به انجام آزمایشات تکمیلی و در نظر گرفتن شرایط محیطی آن منطقه خواهد بود.

## تقدیر

بدینوسیله از زحمات تکنسین‌های آزمایشگاه مرکزی مهندسی مشاور کوبان‌کاو تشکر می‌شود.



## منابع و مراجع

- [۱] بررسی روش‌های ارزیابی واکنش قلیائی سنگدانه‌ها در بتن، نشریه شماره ۲۲ کمیته ملی سدهای بزرگ، کمیته فنی مواد و مصالح برای سدهای بتنی، ۱۳۷۸
- [2] Kawamura M., Iwahori K., "ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint", *Cement & Concrete Composites* 26: 47–56, 2004
- [۳] ارجمند محمد علی، رضانیانپور علی اکبر، ارزیابی سنگدانه‌های مستعد واکنش قلیایی در چند منطقه کشور، نشریه فنی و مهندسی مدرس، شماره ۲۱، پاییز ۸۴
- [4] Feng X., Thomas M.D.A., Bremner T.W., Balcom B.J., Folliard K.J., "Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review", *Cement and Concrete Research* 35: 1789–1796, 2005
- [5] Ichikawa T., "Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect", *Cement and Concrete Research* 39: 716–726, 2009
- [6] Gudmundsson G., Olafsson H., "Alkali-silica reactions and silica fume 20 years of experience in Iceland", *Cement and Concrete Research* 29: 1289–1297, 1999
- [7] Boddy A.M., Hooton R.D., Thomas M.D.A., "The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research* 33: 1263–1268, 2003
- [8] Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C., "Design and Control of Concrete Mixtures", FOURTEENTH EDITION, Portland Cement Association, 2003
- [9] American Society for testing of Materials (ASTM C 1260) "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", Volume: 04.02