

## تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی (ASR) بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی سرباره

ابراهیم قیاسوند

استادیار گروه عمران دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

زهرا رضایی

دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران (سازه)، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

محمد مهدی رستگار\*

استادیار گروه عمران دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

### چکیده

واکنش قلیایی - سیلیسی (ASR) به‌عنوان یک واکنش داخلی مخرب، منجر به ایجاد ترک‌هایی در بتن می‌شود. این ترک‌ها سبب تضعیف ساختار داخلی بتن می‌گردند که می‌توانند بر خواص مکانیکی بتن تأثیر گذارند. از سوی دیگر، وجود معیاری برای ارزیابی واکنش پذیری سنگ‌دانه‌ها و شدت وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی در بتن ضروری است. در حال حاضر، آزمایش‌های موجود نظیر ASTM C1260 به دلیل مدت زمان کوتاه آزمایش نتایج قابل اعتمادی به دست نمی‌دهد و آزمایش ASTM C1293 نیز به دلیل مدت زمان طولانی آزمایش کاربرد کمی دارد. لذا ضرورت دارد، با استفاده از روش‌هایی جدیدتر و در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به ارزیابی این پدیده اقدام نمود. در این تحقیق پنج مخلوط ملات و شش مخلوط بتن حاوی سطوح مختلف سرباره مطابق با ملزومات ASTM و ASTM C1293 تهیه و عمل‌آوری و خواص مکانیکی مخلوط‌ها مورد ارزیابی و سپس ارتباط بین کاهش خواص مکانیکی بتن به دلیل وقوع ASR و تغییرات طول در مخلوط‌های تهیه شده بررسی شده است. علاوه بر این، همین نحوه مقایسه بین تغییرات مقاومت الکتریکی به‌عنوان یک رویکرد ارزیابی دوام بتن با تغییرات طول در مخلوط‌های تهیه شده بررسی شده است. در خاتمه، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد وقوع این پدیده مخرب به میزان قابل‌ملاحظه‌ای منجر به کاهش خواص مکانیکی بتن‌های مورد بررسی، شده و می‌توان از طریق پایش تغییرات خواص مکانیکی و دوامی نیز به پیش‌بینی میزان واکنش پذیری سنگ‌دانه‌ها پی برد.

واژه‌های کلیدی: واکنش قلیایی - سیلیسی، سرباره، مقاومت الکتریکی، خواص مکانیکی، دوام.

\* نویسنده مسئول: m.rastegar@basu.ac.ir

## ۱- مقدمه

توسعه روش‌های کارآمدتر جهت ارزیابی وقوع ASR ضروری است. با این حال، به دلیل کاستی‌ها و محدودیت‌های روش‌های آزمایشی موجود، محققان در هنگام به کارگیری این تکنیک‌ها با مشکلاتی مواجه شده‌اند.

به طور مثال یک اشکال روش ASTM C1260 ماهیت تهاجمی بودن آن بوده که نتایج منفی یا بعضاً مثبت کاذب ارائه می‌دهد. [۹،۸]. طولانی بودن مدت زمان ASTM C1293 یکی از دو اشکال اصلی این روش است. ضمناً یکی دیگر از معایب این روش، شستشوی قلیایی است. بر اساس تحقیقات به عمل آمده، تقریباً ۳۵ درصد از قلیاهای موجود در منشور بتنی، طی یک سال در مخزن آب شسته می‌شوند [۱۱-۱۰]. این شستشوی قلیایی می‌تواند منجر به گزارش نتایج انبساط کمتر از مقدار واقعی بعد از یک سال شود. عدم وجود آزمون قابل اعتماد برای ارزیابی وقوع ASR و بررسی واکنش پذیری سنگ‌دانه‌ها یکی از مشکلات عمده است. از آنجایی که ASR می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر خواص مکانیکی بتن داشته باشد [۱۲]، (لازم است اشاره شود، خواص مکانیکی بیشترین حساسیت را به ASR دارند) می‌تواند به عنوان یک معیار مفید و قابل اعتماد برای ارزیابی وقوع ASR عمل کنند [۱۳]. با این حال، تحقیقات نسبتاً کمی وجود دارد که پارامترهای مکانیکی را برای بررسی وقوع ASR تجزیه و تحلیل می‌کنند. از سوی دیگر، تحقیقات اخیر نشان داده است که بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی نیز می‌تواند یک روش مفید برای تعیین سطح آسیب در بتن باشد [۱۳-۱۵]. اگر همبستگی بین تغییرات در مقاومت الکتریکی و وقوع ASR یافت شود، مقاومت الکتریکی می‌تواند معیار دقیق‌تری برای ارزیابی ASR باشد. مطالعات اندکی [۱۸-۱۶] چگونگی تأثیر ASR بر خواص الکتریکی بتن را بررسی کرده‌اند. تحقیقات اخیر [۱۸] کارایی استفاده از خواص الکتریکی با استفاده از قطبش القای طیفی (SIP) برای بررسی توسعه ASR در بتن را تأیید کرده است. در مطالعه دیگری، محققان مقاومت الکتریکی کمتر از حد انتظار در ملات‌های حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش پذیر را به توسعه ASR مرتبط دانستند [۱۷]. در تحقیقات قبلی [۱۶]، نویسندگان این مقاله توانستند رابطه بین مقاومت الکتریکی و انبساط ناشی از ASR را در بتن‌های حاوی سرباره فعال شده با قلیا پس از شش ماه تأیید کنند. اما برای اثبات وجود ارتباط میان توسعه ASR و کاهش مقاومت الکتریکی در انواع

انبساط، ترک‌های نقشه‌ای و ترشحات سطحی از اثرات مخربی است که در اثر واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) در سطوح بیرونی سازه‌های بتنی ظاهر می‌شوند. علیرغم رعایت تمامی اصول و استانداردهای ساخت مصالح بتنی، آثار مخرب مذکور ممکن است پس از چند سال بر سطح بتن ظاهر شوند [۱]. این مسأله نیاز به نوسازی سازه‌های بتنی را رو به افزایش می‌کند که منجر به پرننگ‌تر شدن نقش عملیات ساختمانی در افزایش آلودگی زیست‌محیطی می‌شود. از طرف دیگر، فرایند تولید سیمان سهم تقریباً ۱۰ درصدی از انتشار CO<sub>2</sub> در سراسر جهان را داراست [۲]. استفاده از سرباره به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، مزایای بسیار زیادی از قبیل کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیز کاهش استفاده از مواد خام را به همراه دارد. [۱]. یک واکنش شیمیایی مضر با فرایند چند مرحله‌ای و واکنش‌های متوالی است [۳]. در برخی از سنگ‌دانه‌ها، ترکیبات سیلیس فعال با قلیاهای موجود در مواد سیمانی واکنش داده و ژل قلیایی-سیلیسی تولید می‌کنند. محصول واکنش (ژل) توانایی زیادی در جذب رطوبت داشته و در حضور رطوبت، این ژل منبسط می‌شود. در صورتی که میزان فشارهای داخلی ایجاد شده ناشی از انبساط این ژل از مقاومت کششی بتن بیشتر باشد، انبساط ژل منجر به ایجاد ترک‌هایی در ساختار داخلی بتن می‌شود [۴].

به منظور جلوگیری از رخ دادن واکنش قلیایی-سیلیسی و آثار مخرب آن بر بتن، رویکردهای متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. به طور مثال، از مواد مکمل سیمانی به شکل کاملاً مؤثری به منظور کنترل آثار مخرب ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی استفاده می‌شود. استفاده از مواد افزودنی معدنی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی، دوده سیلیسی، متاکائولین و شیشه‌های آتشفشانی در بین سایر مواد با خواص پوزولانیک، در مهار ASR مؤثرتر هستند [۵]. به دلایلی از جمله کاهش قلیایی بتن، کاهش تحرک قلیاها، کاهش آهک آزاد و بهبود مقاومت نفوذپذیری بتن، سرباره ممکن است در کنترل انبساط بتن ناشی از واکنش سیلیس قلیایی بسیار تأثیرگذار باشد [۶،۷].

مطمئناً برای تعیین درجه وقوع ASR و سطح واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها، روش‌های آزمایشگاهی قابل اعتمادی مورد نیاز است. با توجه به شدت آسیب ناشی از ASR، تلاش‌های مداوم برای

## ۲-۲- طرح مخلوط و شرایط عمل آوری

### ۲-۲-۱- ملات

طرح مخلوط ملات‌های مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۳ نمایش داده شده است. نسبت آب آزاد به مواد سیمانی (سیمان و سرباره) در این مخلوط‌ها برابر با ۰/۴۷ در نظر گرفته شد. مخلوط ملات شاهد (حاوی ۱۰۰٪ سیمان پرتلند) دقیقاً طبق دستورالعمل ASTM C1260 تهیه شد. برای تهیه مخلوط‌های ملات حاوی سرباره نیز از دستورالعمل ASTM C1567 استفاده شد. در مخلوط‌های حاوی سرباره، میزان استفاده از سرباره به مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد بود.

جدول ۲- مشخصات و خصوصیات مواد سیمانی مصرفی طبق

### نتایج آزمون XRF

موادچسباننده		
سرباره	سیمان پرتلند	اکسیدهای اصلی
۳۷/۹	۶۳/۹۴	CaO(%)
۳۵/۹	۲۱/۴۴	SiO <sub>2</sub> (%)
۸/۹	۱/۴۸	MgO (%)
۸/۴	۴/۵۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
۰/۶	۳/۶۹	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
۰/۷	۲/۲۶	SO <sub>3</sub> (%)
۰/۷	۰/۳۱	K <sub>2</sub> O(%)
۰/۳	۰/۵	Na <sub>2</sub> O(%)
۱/۹	۰/۱۵	TiO <sub>2</sub> (%)
۰/۰۱<	۰/۰۵	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
۰/۹	۱/۴	LOI(%)
۲/۹	۳/۱۲	وزن مخصوص
۴۱۰۰	۳۳۵۰	نرمی (سانتی‌متر مربع بر گرم)

برای عمل آوری ملات‌ها، دو محیط آزمایشگاهی استاندارد و محیط با شرایط تسریع شده در نظر گرفته شد. محیط اول، عبارت بود از یک مخزن حاوی آب و آهک اشباع که دمای آن حدوداً برابر با ۲۳ درجه سلسیوس و محیط دوم نیز عبارت بود از یک مخزن حاوی محلول سود یک مولار که دمای آن برابر با ۸۰ درجه سلسیوس بود.

مختلف بتن، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است.

در این تحقیق پنج مخلوط ملات و شش مخلوط بتن حاوی سطوح مختلف سرباره مطابق با ملزومات ASTM C1260 و ASTM C1293 تهیه و عمل آوری شده است. خواص مکانیکی مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس ارتباط بین کاهش خواص مکانیکی بتن به دلیل وقوع ASR و تغییرات طول در مخلوط‌های تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، همین نحوه مقایسه بین تغییرات مقاومت الکتریکی به عنوان یک رویکرد ارزیابی دوام بتن با تغییرات طول در مخلوط‌های تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- برنامه آزمایش

### ۲-۱- مواد و مصالح

خواص سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این مطالعه از گروه سنگ‌دانه‌های واکنش پذیر انتخاب شدند. سنگ‌دانه‌ها برای ساخت نمونه‌های ملات بر اساس ASTM C1260 و برای ساخت نمونه‌های بتن، سنگ‌دانه‌ها بر اساس ASTM C1293 دانه بندی شدند.

### جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مصرفی

سنگ‌دانه	ماسه	شن
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۵۱	۲/۴۷
جذب آب (درصد)	۲/۱۵	۱/۶۰
حداکثر قطر سنگ‌دانه (mm)	۴/۷۵	۱۹

برای تهیه کلیه مخلوط‌های ساخته شده در این تحقیق، از سیمان پرتلند نوع دو شرکت سیمان حکمتان همدان و سرباره تهیه شده از کارخانه سیمان مدائن اصفهان استفاده شد. ضمناً شاخص فعالیت سرباره برابر با ۸۰ به دست آمد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مربوط به سیمان و سرباره مصرفی را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود. برای سرعت بخشیدن واکنش‌های قلیایی - سیلیسی در مخلوط‌های ملات، از محلول سود یک مولار (NaOH) مطابق با استاندارد ASTM C1260 استفاده شد. در مخلوط‌های بتنی نیز مطابق با استاندارد ASTM C1293، ۱/۲۵ درصد قلیایی معادل (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) سیمان پرتلند و سرباره برای تشدید توسعه ASR استفاده شد.

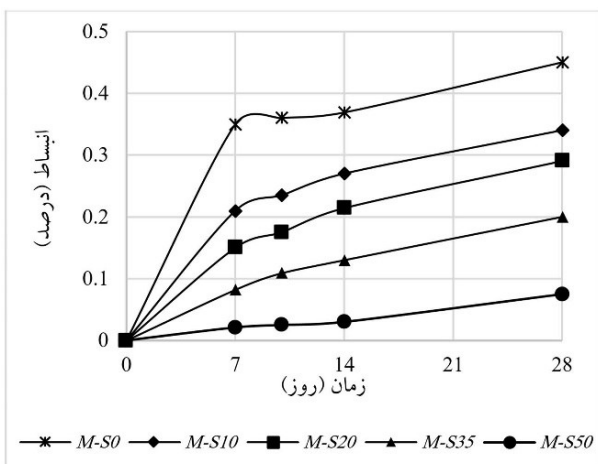


است، وقوع ASR را تشدید می‌کند. بنابراین، با کاهش هیدروکسید کلسیم در مخلوط‌های حاوی سرباره، شدت توسعه ASR، کاهش می‌یابد.

سایر محققان [۷ و ۱۹]، کاهش انبساط ناشی از ASR در ملات‌های حاوی سرباره را با قلیائیت کم محلول منافذ مرتبط دانسته‌اند. در واقع، با کاهش مقدار سیمان در چنین مخلوط‌هایی، مقدار هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد و با کاهش آن، قلیاها توسط محصولات هیدراسیون جذب می‌شوند. در نتیجه، غلظت یون‌های هیدروکسید در این گونه ملات‌ها کاهش یافته و اثرات مضر ناشی از، ASR کمتر می‌شود.

### ۳-۱-۲- مقاومت فشاری مخلوط ملات

شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری انجام شده بر روی ملات‌های نگهداری شده در محیط آزمایشگاهی و محیط تسریع شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نتایج انبساط مخلوط‌های ملات مطابق با استاندارد ASTM C126

شکل ۲- a نشان می‌دهد که با گذشت زمان، مقاومت فشاری ملات‌های نگهداری شده در محیط آزمایشگاه افزایش می‌یابد. در بین این نمونه‌ها، نمونه M-S0 حداکثر مقاومت فشاری را در روز هفتم داراست. علاوه بر این، نمونه MS-50 کمترین مقاومت فشاری را دارد. واکنش‌های هیدراسیون در بتن حاوی سرباره دو مرحله دارد: در مرحله اول هیدراسیون سیمان شروع می‌شود و با تولید هیدروکسید کلسیم هیدراسیون سرباره رخ می‌دهد که یک واکنش شبه پوزولانی است. البته این واکنش، کندتر از واکنش هیدراسیون سیمان پرتلند معمولی است. در نتیجه، روند توسعه

و در بخش دوم نیز نتایج آزمایش بر روی مخلوط‌های بتن مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳-۱-۱- مخلوط‌های ملات

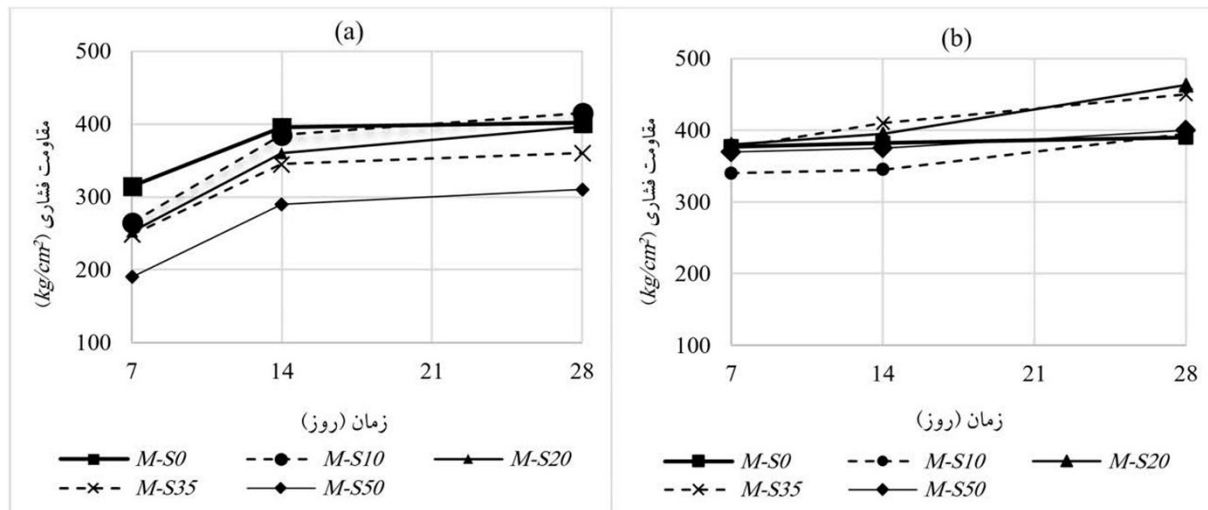
#### ۳-۱-۱-۱- آزمایش میله ملات تسریع شده (ASTM C1260)

شکل ۱ نتایج انبساط نمونه‌های ملات مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱ مشخص است، میزان انبساط نمونه شاهد (M-S0) واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این مخلوط را نشان می‌دهد، زیرا نمونه شاهد (M-S0) انبساط بسیار قابل توجهی را نشان داده است. پس از ۱۴ روز، انبساط این مخلوط به حدود ۰/۳۶ درصد رسید. بر اساس رده‌بندی تعریف شده در استاندارد ASTM C1260، اگر انبساط مخلوط پس از ۱۴ روز از ۰/۲٪ بیشتر شود، سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط واکنش‌پذیر محسوب می‌شوند. نتایج سایر نمونه‌ها به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سرباره مورد استفاده میزان انبساط ناشی از ASR کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های دیگر محققین نیز [۲۰] منطبق است. با این حال، استفاده از ۱۰٪ و ۲۰٪ سرباره قادر به جلوگیری از وقوع ASR نبود. انبساط مخلوط MS10 و MS20 پس از ۱۴ روز به ترتیب ۰/۲۷ و ۰/۲۱ بود که از حد انبساط مجاز تعیین شده توسط ASTM C1260 فراتر رفت. علاوه بر این، مخلوط حاوی ۳۵ درصد سرباره به میزان ۰/۱۳٪ انبساط بین ۰/۱٪ و ۰/۲٪ باشد، جهت ارزیابی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها آزمایش‌های طولانی مدت نیاز است. در پایان ۱۴ روز، انبساط در نمونه M-S50 (حاوی ۵۰ درصد سرباره) ۰/۰۳ درصد بود که این میزان کمتر از حد مجاز استاندارد است. این مساله نشان دهنده موفقیت‌آمیز بودن استفاده از این مقدار سرباره در کنترل ASR است.

با افزایش درصد سرباره، از میزان مصرف سیمان کاسته شده و در نتیجه، میزان هیدروکسید کلسیم تشکیل شده در بتن ناشی از هیدراسیون سیمان کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، سرباره نیز با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و آنرا کاهش می‌دهد. کاهش هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن به هیدرات‌های سیلیکات کلسیم که در مقایسه با هیدروکسید کلسیم، محصولی متراکم‌تر و مقاوم‌تر

افزایش می‌یابد، این نرخ افزایش در شرایط عمل‌آوری تسریع یافته کمتر است. به طور مثال، از ۷ تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری نمونه M-S0 در شرایط عمل‌آوری نرمال به میزان ۲۷ درصد افزایش یافت، اما این مقدار در شرایط تسریع‌یافته تنها ۳ درصد بود. این موضوع نشان می‌دهد که ASR در این مخلوط که تحت شرایط عمل‌آوری تسریع شده بوده، اتفاق افتاده است. در شرایط تسریع‌شده، به دلیل غلبه ASR بر هیدراسیون سیمان، سرعت توسعه مقاومت فشاری کندتر بوده است. به همین ترتیب، این الگو برای مخلوط M-S10 صادق بود و روند مشابهی را نشان داد. با این حال، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، در شرایط عمل‌آوری تسریع‌شده بیشتر از مقاومت فشاری آنها در شرایط عمل‌آوری عادی پس از ۲۸ روز است. با توجه به اینکه سرعت توسعه مقاومت در ملات حاوی سرباره، در شرایط مستعد وقوع واکنش قلیایی سیلیسی، همچنان در حال افزایش است و از دیگر با افزایش میزان سرباره از شدت افزایش طول نمونه‌های ملات کاسته شده، می‌توان نتیجه گرفت که تا سن ۲۸ روز، با افزایش میزان سرباره، همانطور که تغییرات مقاومت فشاری روندی رو به صعود دارد، نرخ افزایش طول نیز رو به کاهش است. لذا می‌توان بین این دو پارامتر ارتباطی معنادار برقرار نمود.

مقاومت فشاری در بتن حاوی سرباره کندتر است. لازم به ذکر است که از ۷ تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری مخلوط‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، به ترتیب به میزان ۲۷، ۵۶، ۵۷، ۴۵ و ۶۳ درصد افزایش یافت. مخلوط حاوی ۵۰ درصد سرباره بیشترین افزایش مقاومت فشاری را نشان داد. به طور کلی، با افزایش مقدار سرباره، مقاومت فشاری نمونه‌ها با سرعت بیشتری افزایش یافت. سرعت فرایندهای هیدراسیون و همچنین سرعت واکنش‌های مخرب، از جمله ASR، (به دلیل حساسیت این واکنش‌ها به دما) برای نمونه‌هایی که در شرایط عادی نگهداری شده‌اند، کندتر است. با وجود اینکه این مخلوط‌ها حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر بودند، وقوع ASR، انتظار نمی‌رفت. در نتیجه، مقاومت فشاری این نمونه‌ها در طول این مدت کوتاه (۲۸ روز) روند افزایشی را نشان داد، زیرا ASR هیچ تأثیری بر نمونه‌های نگهداری شده در محیط آزمایشگاه نداشت. شکل ۲-ب، نتایج مقاومت فشاری ملات‌های نگهداری شده در یک محیط تسریع‌شده را نشان می‌دهد. در تمام سنین (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) مقاومت فشاری همه نمونه‌ها، به استثنای نمونه‌های M-S0 و M-S10، در شرایط تسریع‌یافته بیشتر از شرایط عادی بود. با وجود این واقعیت که نرخ توسعه مقاومت فشاری در هر دو نمودار



شکل ۲- نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های ملات. (a) عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی (b) عمل‌آوری شده در محیط تسریع‌یافته

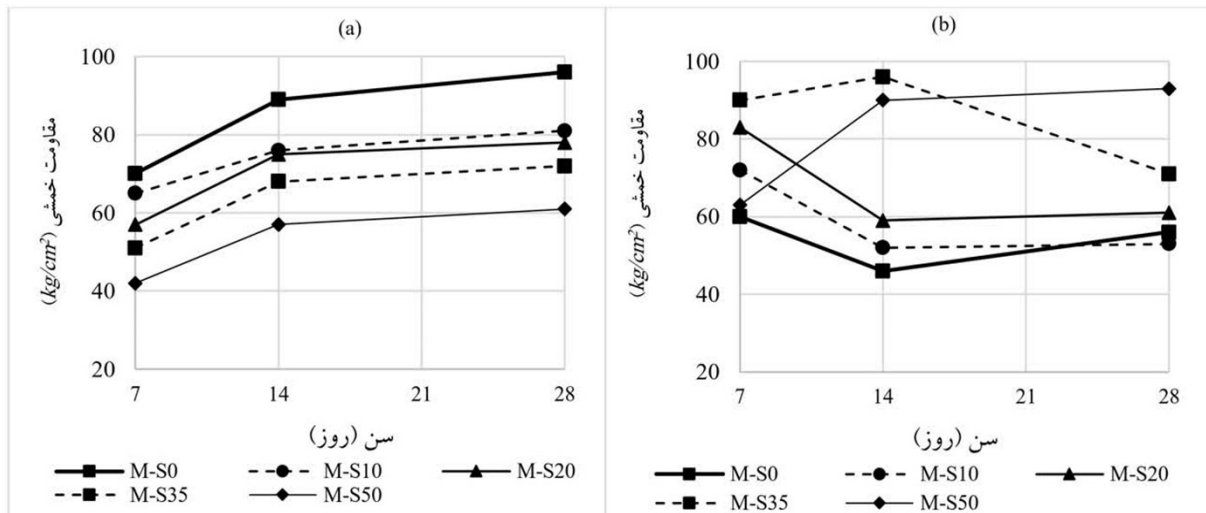
هیدراسیون، مقاومت خمشی ملات‌های نگهداری شده در محیط عادی، به مرور زمان افزایش یافت. نمونه M-S0 مقاومت خمشی بیشتری نسبت به ملات‌های حاوی سرباره داشت. علاوه بر این،

### ۳-۱-۳- مقاومت خمشی مخلوط ملات

در شکل ۳، مقاومت خمشی ملات‌های عمل‌آوری شده در دو محیط از پیش تشریح شده ارائه شده است. به دلیل تولید محصولات

نگهداری شده در محیط تسریع شده نشان داد که ملات‌های حاوی سرباره دارای مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد (M-S0) هستند. علاوه بر این، هنگامی که مقدار سرباره افزایش یافت، مقاومت خمشی بهبود یافت که می‌توان آن را به تأثیر دما در تسریع هیدراسیون و واکنش‌های سرباره نسبت داد.

نتایج نشان داد که مقاومت خمشی ملات‌های حاوی سرباره با افزایش مقادیر جایگزینی سرباره در تمام سنین کاهش می‌یابد. از این رو، نمونه M-S0 در محیط آزمایشگاه از نظر مقاومت خمشی بهتر از مخلوط‌های حاوی سرباره عمل نمود. بر خلاف نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاه، مقاومت خمشی ملات‌های



شکل ۳- نتایج مقاومت خمشی مخلوط‌های ملات: (a) عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی، (b) عمل‌آوری شده در محیط تسریع یافته

### ۲-۳- مخلوط‌های بتن

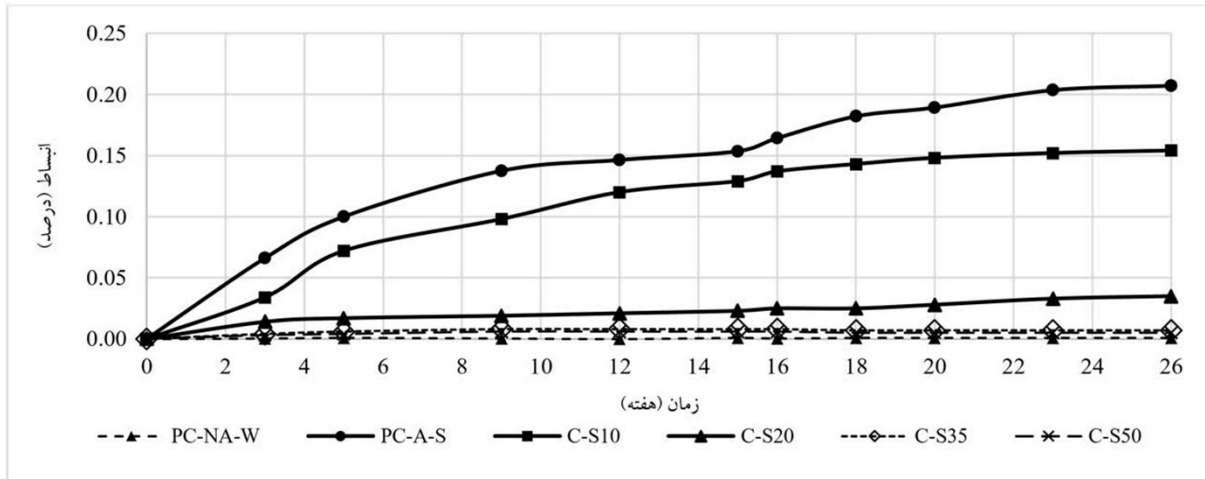
#### ۳-۲-۱- آزمایش منشور بتن ASTM C1293

در شکل ۴، نتایج آزمایش ASTM C1293 بر روی مخلوط‌های بتن ارائه شده است. با دقت در این نمودار روشن است که مخلوط PC-A-S بیشترین میزان انبساط را دارد. با توجه به نتایج و محدوده انبساط تعیین شده در استاندارد ASTM C1293، بدیهی است که واکنش قلیایی-سیلیسی در این مخلوط رخ داده است (مخلوط یاد شده، حاوی سیمان پرتلند معمولی و قلیایی افزوده بود که در شرایط تسریع شده عمل‌آوری شد). از طرف دیگر، مخلوط PC-NA-W دارای انبساط ناچیزی است، زیرا این مخلوط در شرایط محیطی معمولی نگهداری و فاقد قلیایی افزوده بود. از آنجایی که در شرایط معمولی، ASR به زمان بسیار زیادی برای توسعه نیاز دارد، می‌توان ادعا نمود که اثرات این واکنش هنوز در این مخلوط، آشکار نشده است.

همچنین واضح است که با افزایش سطح جایگزینی سرباره، میزان انبساط کاهش می‌یابد. انبساط در مخلوط حاوی ۱۰ درصد سرباره (C-S10) کمتر از انبساط در مخلوط کنترل PC-A-S بود، اما همانطور که مشاهده می‌شود، انبساط در این مخلوط همچنان شدید

نرخ تغییر در میزان مقاومت خمشی (در شرایط تسریع یافته) برای طرح‌های حاوی تا ۲۰ درصد سرباره تا سن ۱۴ روز، نزولی و از سن ۱۴ تا ۲۸ روز، با شیب اندکی صعودی است و این پارامتر در سن ۲۸ روزگی در مقایسه با ۷ روزگی برای نمونه‌های حاوی صفر و ۱۰ و ۲۰ درصد سرباره، به ترتیب ۷، ۲۶ و ۲۷ درصد کاهش یافته است. اما در نمونه حاوی ۳۵ درصد سرباره وضعیت مطلوب‌تر و در نمونه حاوی ۵۰ درصد سرباره حتی با کاهش مقاومت خمشی نیز در سن ۲۸ روز نسبت به ۷ روز، مواجهه نبوده‌ایم. به عبارتی استفاده از ۵۰ درصد سرباره به خوبی این واکنش را کنترل کرده است. در ضمن این نتایج با نتایج آزمایش انبساط نمونه‌ها سازگاری مناسبی دارد. به عنوان مثال، در بخش ۳-۱-۱، ملاحظه شد که با افزایش سطح جایگزینی سرباره، انبساط ناشی از ASR کاهش یافته، اما در بین نمونه‌ها، واکنش قلیایی-سیلیسی تنها در نمونه M-S50 به طور کامل مهار شد. علاوه بر این، نمونه M-S0 در شرایط عمل‌آوری تسریع یافته، بیشترین میزان انبساط را دارا بوده و از آن طرف نیز کمترین مقاومت خمشی را داشته است. همین موضوع نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت خمشی می‌تواند برای ارزیابی ASR در مخلوط ملات استفاده شود.

است. با افزایش سرباره به ۲۰ درصد، به نظر می‌رسید که انبساط وارد منطقه امن شود. با وجود این، در این مخلوط، روند منبسط شدن افزایشی است و خطر انبساط مخرب ناشی از ASR باقی مانده است. البته میزان انبساط در سن ۶ ماه، کمتر از ۰/۰۴ درصد است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، زمانی که سطح جایگزینی سرباره به ۳۵ و ۵۰ درصد رسید، انبساط بسیار کمی در این نمونه‌ها رخ داد و به نحوی واکنش قلیایی - سیلیسی کنترل شده است.



شکل ۴- میزان انبساط مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

سیلیسی بهتر کنترل شده است، به نحوی که در نمونه حاوی ۵۰ درصد سرباره حتی تا سن شش ماه با کاهش مقاومت مواجه نبوده‌ایم.

بیشترین میزان مقاومت فشاری در سن سه ماه در بین همه طرح‌ها در نمونه‌های حاوی ۳۵ درصد سرباره و در سن شش ماه نیز در همین نمونه‌ها رخ داده است. با این تفاوت میزان مقاومت شش ماهه از سه ماهه کمتر بدست آمده است. بعبارت دیگر، بعد از سه ماه با وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی و غلبه اثر منفی این واکنش بر واکنش‌های هیدراسیون در نمونه‌های حاوی ۳۵ درصد مواجه شده‌ایم.

در شکل ۶ نیز تغییرات مقاومت فشاری در مقابل تغییرات طول در مخلوط‌های بتن، تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در طرح‌های PC-A-S و Slag10-A-S و Slag20-A-S، بعد از گذشت بخشی از زمان آزمایش با کاهش مقاومت فشاری روبه‌رو بوده و در طرح‌های حاوی ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، کاهش مقاومتی در گذر زمان رخ نداده است. بدیهی است این موضوع حاکی از عملکرد مثبت مقادیر بالای سرباره در کنترل واکنش قلیایی سیلیسی سنگ‌دانه بوده است.

### ۲-۲-۳- مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی

نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن در شکل ۵ نشان داده شده است. در پایان ماه اول، مخلوط PC-NA-W دارای بالاترین مقاومت فشاری بود، در حالی که مخلوط PC-A-S کمترین میزان مقاومت فشاری را داشت. همانطور که می‌دانیم مخلوط PC-A-S، در شرایط تسریع شده عمل‌آوری شده بود و البته مقدار قلیایی در آن نیز افزایش یافته بود، لذا بر اساس انتظار با کاهش مقاومت ناشی از وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی روبه‌رو شده‌ایم. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری مخلوط PC-NA-W تا شش ماه همچنان افزایش می‌یابد (عملاً واکنشی مخرب تا این سن رخ نداده است)، در حالی که این مقدار برای مخلوط PC-A-S کاهش یافت. این موضوع را می‌توان ناشی از وجود تمام پیش‌شرط‌های وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی (شامل سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر، قلیایی و رطوبت)، دانست.

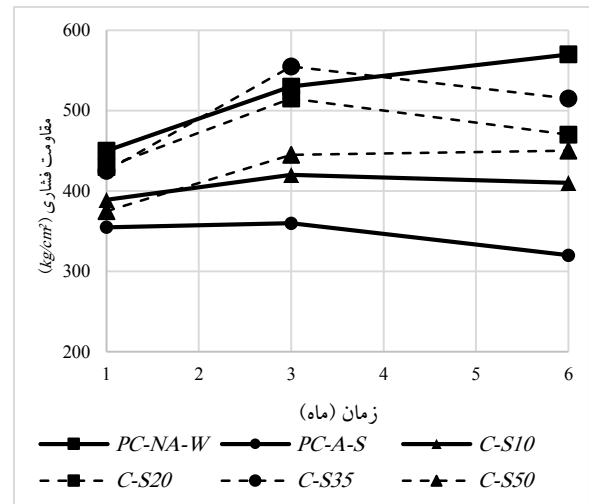
ضمناً در مورد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰ تا ۳۵ درصد سرباره، با افزایش مقاومت تا سن سه ماه و سپس با کاهش مقاومت تا سن شش ماه مواجه‌ایم. ضمناً با افزایش میزان سرباره تا ۳۵ درصد، نرخ افزایش مقاومت تا سن سه ماه افزایشی است. همچنین با افزایش مقدار سرباره، بوضوح روشن است که واکنش قلیایی -



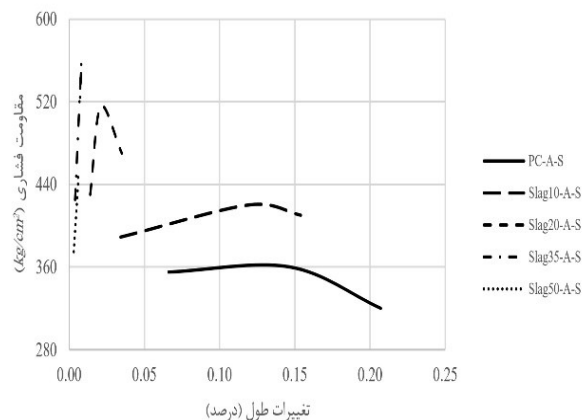
آوری بود، مشابه نتایج به دست آمده در بخش مقاومت فشاری، می‌توان نتیجه گرفت که ASR در مخلوط PC-NA-W رخ نداده است. بنابراین، تغییر مقاومت خمشی این مخلوط افزایشی است. میزان افزایش مقاومت خمشی مخلوط PC-NA-W از یک به سه و از سه به شش ماه به ترتیب ۳/۹۲ و ۱/۸۹ درصد بود و این مساله نشان می‌دهد که اگرچه مقاومت خمشی افزایش یافته است، اما سرعت تغییر آن کاهش یافته است. این تغییر می‌تواند به این دلیل باشد که ASR در مخلوط PC-NA-W رخ می‌دهد، هرچند تأثیرات آن تا حدودی ناچیز است. علاوه بر این، در PC-A-S، مقدار مقاومت خمشی تا سن شش ماه، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد، این نرخ کاهش از یک به سه و از سه به شش ماه به ترتیب ۱۳/۳۳- و ۷/۶۹- درصد بوده است. این نرخ کاهش نشان می‌دهد که اگرچه واکنش ASR بر واکنش هیدراسیون غالب است، اما نرخ کاهش مقاومت خمشی به دلیل تولید محصولات هیدراسیون کاهش یافته است.

ضمناً شکل ۷ نشان می‌دهد که افزودن سرباره به بتن تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت خمشی دارد. با توجه به حساسیت مقاومت خمشی به ریزترک‌ها، پیش‌بینی می‌شود که افزودن سرباره بر محصولات واکنش و ساختار منافذ بتن سخت‌شده تأثیر بگذارد و مقاومت خمشی را به‌ویژه در سنین بعدی افزایش دهد. علیرغم استفاده از سرباره، مقاومت خمشی در نمونه M-S10 در مدت شش ماه کاهش یافت (به میزان ۱۲/۵۵- درصد). با این حال، این میزان کمتر از کاهش مقاومت خمشی در مخلوط PC-A-S بود. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن این مقدار سرباره در بهبود مقاومت خمشی موثر بوده، اما برای غلبه بر ASR کافی نبوده است. در مخلوط حاوی ۲۰ درصد سرباره، افزایش مقاومت فشاری در مدت سه تا شش ماه (۱/۵۵ درصد) و در مدت یک تا سه ماه (۱/۷۸ درصد) بود. این کاهش نرخ نشان می‌دهد که با گذشت زمان ASR در این مخلوط در حال تشدید بوده و تأثیرات منفی بیشتری بر خواص مکانیکی بتن دارد. هم‌چنین، مقاومت خمشی در مخلوط‌های حاوی ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، تا سن شش ماه با افزایش مواجه بوده و به نحوی بهترین عملکرد در کنترل واکنش قلیایی سیلیسی را می‌توان به طرح حاوی ۵۰ درصد سرباره، نسبت داد. در همین پژوهش نتایج انبساط طرح‌های بتنی نیز عملکرد خوب این مخلوط را نشان داد.

در یک مطالعه متفاوت [۱۳]، قیاسوند و همکارانش دریافتند، از آنجایی که کاهش مقاومت فشاری ناشی از وقوع ASR در مخلوط‌های بتن حاوی ۱۰۰ درصد سیمان پرتلند معمولی، بسیار قابل توجه است، لذا می‌توان از آن به عنوان معیاری برای ارزیابی احتمال وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی استفاده کرد.



شکل ۵- مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری در مقابل تغییرات طول در مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

### ۳-۲-۳- مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی

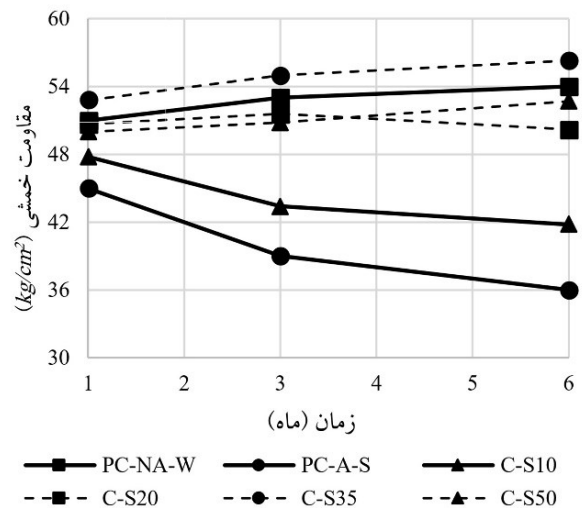
نتایج آزمایش مقاومت خمشی بر روی مخلوط‌های بتن در شکل ۷ نشان داده شده است. مقاومت خمشی مخلوط‌های PC-NA-W و PC-A-S به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تنها تفاوت بین این دو مخلوط در میزان قلیایی و شرایط عمل

سیمان پرتلند) با گذشت زمان افزایش یافت، در حالی که مقاومت خمشی آنها کاهش یافت. این نتایج نشان‌دهنده رابطه معکوس بین مقاومت خمشی و نرخ انبساط مخلوط بتن بود. لذا، با مقایسه نرخ‌های کاهشی تغییر در مقاومت خمشی می‌توان نشان داد که مقاومت خمشی پارامتر مناسبی جهت ارزیابی توسعه واکنش ASR است.

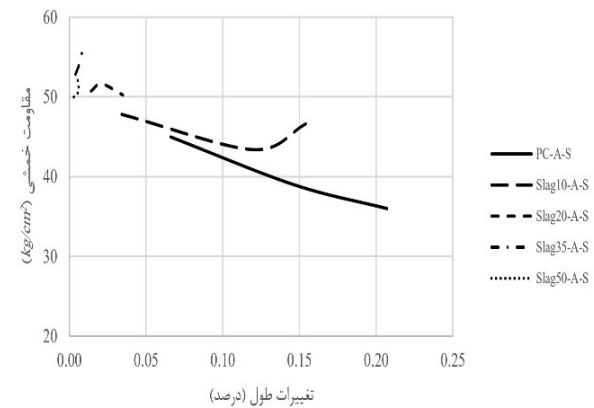
### ۳-۲-۴- مقاومت کششی مخلوط‌های بتن

نتایج مقاومت کششی برای هر مخلوط در شکل ۹ نشان داده شده است. میزان تغییر مقاومت کششی برای مخلوط‌های PC-NA-W و PC-A-S از یک به سه ماه و از سه تا شش ماه به ترتیب ۵/۱۹ و ۵/۶۳ درصد) و (۱۳/۱۵- و ۸/۱۱- درصد) بود. در مخلوط PC-NA-W واکنش ASR هنوز آنقدر شدید نبود که بر خواص مکانیکی بتن تأثیر بگذارد. با مقایسه نرخ کاهش مقاومت خمشی برای نمونه PC-A-S ذکر شده در بخش قبل با نرخ کاهش مقاومت کششی در این بخش، می‌توان دریافت که مقاومت خمشی نسبت به وقوع ASR در سه ماه اول حساس‌تر بوده است. در مخلوط حاوی ۲۰ درصد سرباره، نرخ تغییر مقاومت کششی از یک به سه ماه و سه تا شش ماه به ترتیب ۲/۸ و ۳/۲۷ درصد بود. اگرچه میزان تغییر از سه تا شش‌ماه هنوز کاهش است، اما میزان افت آن در مقایسه با مقاومت کششی نمونه‌های PC-A-S و C-10 کمتر است که می‌تواند به کاهش شدت ASR در این مخلوط نسبت داده شود. در ضمن در مخلوط حاوی ۵۰ درصد سرباره، علاوه بر اینکه میزان تغییر مقاومت کششی در هر دو دوره زمانی مثبت بود، این میزان در ماه سوم تا ششم بیشتر از ماه اول تا سوم بود. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار درصد بهینه سرباره (از بین مقادیر بررسی شده در این تحقیق) برای کنترل ASR، ۵۰ درصد است. البته طرح حاوی ۳۵ درصد سرباره نیز در کنترل این واکنش مخرب، بسیار خوب عمل کرده است. به عنوان مثال، برای طرح‌های C-S35 و C-S50، میزان تغییر مقاومت کششی از یک به سه‌ماه و سه تا شش‌ماه به ترتیب ۴/۴۰ و ۱/۹۲ درصد) و (۲/۱۲ و ۳/۳۲ درصد) بود. با مقایسه این تغییرات در سه ماه اول با تغییرات در مقاومت خمشی، به نظر می‌رسد که مقاومت خمشی نسبت به توسعه ASR حساس‌تر بوده است.

در شکل ۱۰ نیز تغییرات مقاومت کششی در مقابل تغییرات طول



شکل ۷- مقاومت خمشی مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش



شکل ۸- تغییرات مقاومت خمشی در مقابل تغییرات طول در مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

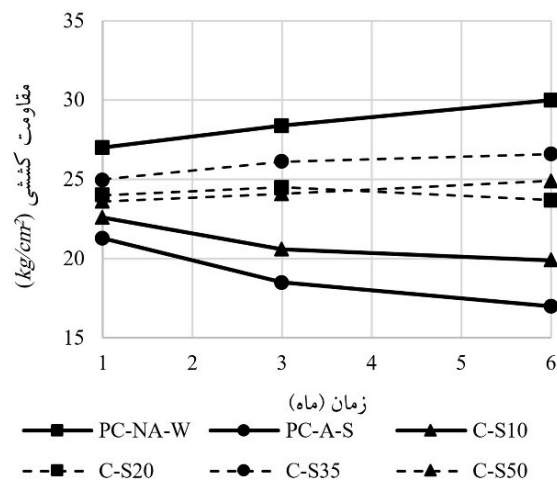
در شکل ۸ نیز تغییرات مقاومت خمشی در مقابل تغییرات طول در مخلوط‌های بتن، تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در طرح PC-A-S بوضوح و بصورت مستمر با کاهش مقاومت خمشی در برابر افزایش تغییرات طول مواجه بوده و برعکس، در مورد طرح‌های حاوی ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره نیز، در طول زمان قرارگیری در محیط مستعد واکنش، با افزایش مقاومت خمشی روبه‌رو بوده که این موضوع بیانگر قابلیت این مقادیر از سرباره در کنترل واکنش قلیایی سیلیسی سنگ‌دانه است. ضمناً در این طرح‌ها مقادیر انبساط نیز بسیار ناچیز بوده است.

در مطالعه قیاسوند و همکاران نیز [۱۳]، انبساط همه مخلوط‌های مورد مطالعه (از قبیل بتن‌های حاوی سرباره قلیا فعال و ۱۰۰ درصد

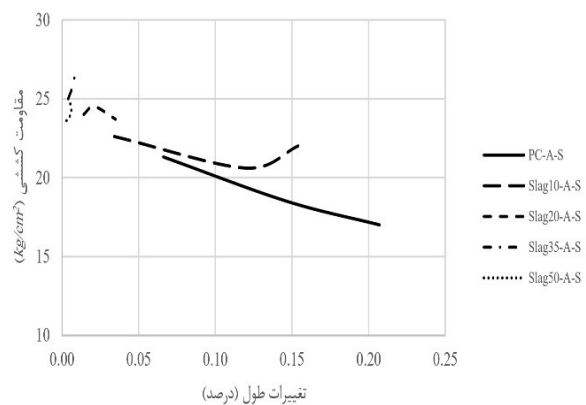
الکتریکی نشان می‌دهد که فرایند هیدراسیون سیمان همچنان ادامه دارد و تولید محصولات هیدراسیون به متراکم شدن ساختار بتن و افزایش مقاومت الکتریکی کمک می‌کند. از طرف دیگر، در نمونه PC-A-S، اگرچه فرایند هیدراسیون سیمان ادامه داشت، اما مقاومت الکتریکی این نمونه بعد از گذشت ۱۲ هفته از آغاز آزمایش، با شیب پیوسته و تیز به دلیل شدت بالای واکنش ASR و ایجاد ترک‌ها و ترک‌های ریز، کاهش یافت. درجه انبساط بیش از حد در نمونه PC-A-S ممکن است دلیل این کاهش شدید مقاومت الکتریکی باشد. می‌توان ادعا نمود که با افزایش درجه اثرات مخرب ASR بر مخلوط بتن حاوی سیمان پرتلند، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی مخلوط PC-NA-W بدون توجه به سن، به طور مداوم کمتر از مقاومت الکتریکی مخلوط PC-A-S است. این تفاوت ممکن است به اثر دمای عمل‌آوری بر فرایند هیدراسیون در مخلوط PC-A-S نسبت داده شود که منجر به ساختار متراکم‌تر می‌شود.

شیب نمودار مقاومت الکتریکی با افزایش مقدار سرباره برای تمام نمونه‌های حاوی سرباره بین یک تا سه ماه افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به واکنش سرباره با هیدروکسید کلسیم و مواد قلیایی تولیدشده در طول هیدراسیون سیمان پرتلند و متعاقب آن کاهش اندازه منافذ و نیز کاهش نفوذپذیری بتن نسبت داد. در بازه زمانی یک تا سه ماه، میزان افزایش مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، به ترتیب برابر با ۳۳، ۵۶، ۵۹ و ۶۰ درصد بود. اما از طرف دیگر، میزان افزایش مقاومت الکتریکی برای این طرح‌ها در بازه زمانی سه تا شش ماه، در مقایسه با بازه زمانی قبل، کاهش یافته و حتی در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد سرباره نیز با کاهش مقاومت الکتریکی در مقایسه با میزان سه‌ماهه بوده‌ایم. بسیار جالب است که این دو طرح در مقایسه با سایر طرح‌های حاوی سرباره با میزان انبساط بیشتری برخوردار بودند. به عبارت دیگر می‌توان عنوان نمود تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح‌های مورد بررسی با توسعه واکنش‌های قلیایی - سیلیسی مرتبط است و با توسعه این واکنش‌ها با کاهش میزان مقاومت الکتریکی و یا کاهش نرخ افزایش مقاومت الکتریکی مواجه هستیم.

در مخلوط‌های بتن، تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش ارائه شده است. در این بخش نتایج از حیث ارتباط با نتایج تغییر طول، بسیار مشابه نتایج ذکر شده در بخش ۳-۲-۳، بوده است.



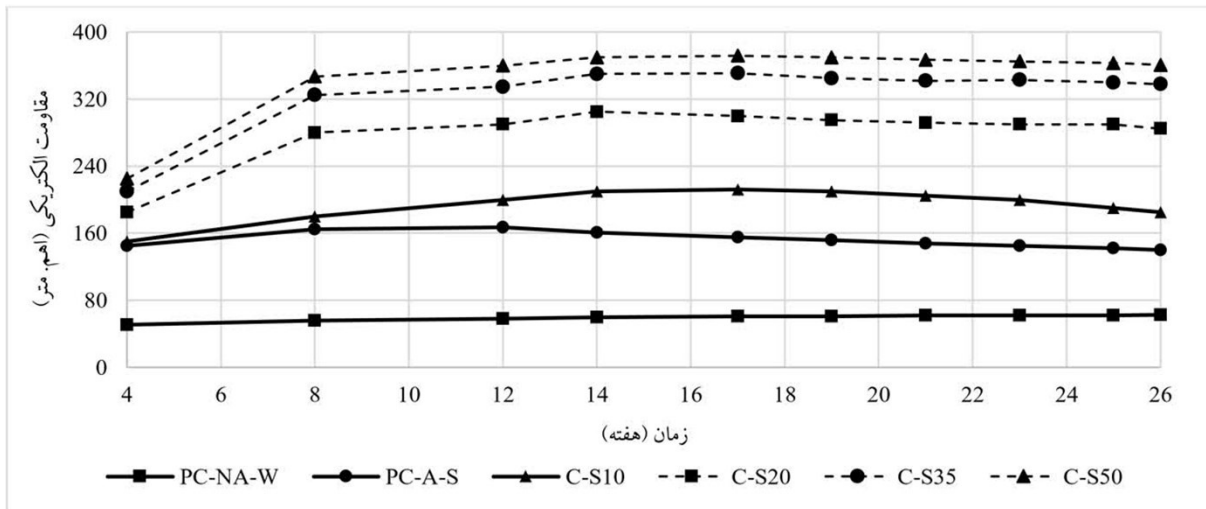
شکل ۹- نمودار مقاومت کششی مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت کششی در مقابل تغییرات طول در مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

### ۳-۲-۵- مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتنی

شکل ۱۱، نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی انجام شده بر روی مخلوط‌های بتن را نشان می‌دهد. از آنجایی که مقاومت الکتریکی یک مخلوط بتن با کاهش چگالی و حفرات آن افزایش می‌یابد، در این پژوهش این ویژگی برای ارزیابی دوام مخلوط‌های بتن مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱۱، نمودار نشان‌دهنده وجود شیب مثبت در طرح PC-NA-W است و این روند مقاومت الکتریکی تا شش ماه افزایش می‌یابد. این افزایش در مقاومت



شکل ۱۱- نمودار مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

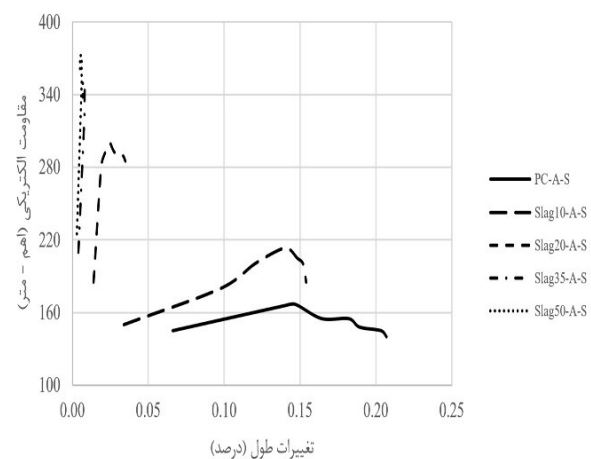
در هر دو آزمایش بررسی انبساط ناشی از پدیده مخرب ASR در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و بلند مدت، جایگزینی سیمان با سرباره باعث کاهش انبساط شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح جایگزینی سیمان با سرباره، خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌ها بهبود یافت. ضمناً می‌توان مدعی بود که با جایگزینی ۵۰ درصد سرباره، انبساط ناشی از ASR کاملاً مهار شده است.

در ملات‌های حاوی سرباره، ارتباط معناداری بین توسعه مقاومت فشاری و انبساط ناشی از ASR وجود نداشت، زیرا افزایش مقاومت فشاری هم‌زمان با انبساط این مخلوط‌ها اتفاق افتاد. البته این موضوع را می‌توان به کوتاه بودن مدت آزمایش نیز نسبت داد. در مقابل، کاهش نرخ توسعه مقاومت خمشی در ملات‌هایی که به شدت از ASR آسیب دیده بودند نشان داد که مقاومت خمشی معیار خوبی برای ارزیابی ASR است.

وقوع ASR، باعث تضعیف خواص مکانیکی بتن (شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی) شد. روند افزایشی مقاومت خمشی در بتن حاوی ۵۰ درصد سرباره، که بهترین مقاومت را در برابر پدیده مخرب واکنش قلیایی - سیلیسی نیز دارا بود، نشان داد بررسی تغییرات مقاومت خمشی، می‌تواند یک معیار مناسب جهت بررسی وقوع ASR است. به عبارت دیگر، کاهش مقاومت خمشی ممکن است نشان‌دهنده توسعه ASR در مخلوط بتن حاوی سنگ‌دانه‌های واکنش پذیر باشد.

در مخلوط فاقد سرباره که تحت تأثیر وقوع پدیده ASR بود، مقاومت الکتریکی بتن به طور مداوم در طول آزمایش کاهش

در شکل ۱۲، نمودار تغییرات طول در مقابل تغییرات مقاومت الکتریکی در مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش، ارائه شده است. با دقت در نتایج مشهود است در طرح‌های فاقد سرباره و نیز حاوی تا ۲۰ درصد سرباره، بعد از گذشت بخشی از زمان آزمایش، با کاهش مقاومت الکتریکی روبه‌رو بوده‌ایم و این موضوع را می‌توان به تضعیف خواص بتن به علت وقوع پدیده ASR نسبت داد. البته کاهش مقاومت الکتریکی در طرح فاقد سرباره زودتر از سایر طرح‌ها رخ داده است و بهترین عملکرد نیز مربوط به طرح‌های حاوی ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره بوده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات طول در مقابل مقاومت الکتریکی در مخلوط‌های بتن تا سن ۶ ماه از آغاز آزمایش

#### ۴- نتیجه گیری

در ادامه به تشریح مختصر یافته‌های این مطالعه پرداخته شده است:

FHWA/TX-06/0-4085-5).

[9] Hooton, R. D. (1991). New aggregate alkali-reactivity test methods.

[10] Thomas, M. D. A., Fournier, B., & Folliard, K. J. (2012). Selecting measures to prevent deleterious alkali-silica reaction in concrete: rationale for the AASHTO PP65 prescriptive approach (No. FHWA-HIF-13-002). United States. Federal Highway Administration.

[11] Rivard, P., Bérubé, M. A., Ollivier, J. P., & Ballivy, G. (2003). Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity. *Cement and Concrete Research*, 33(8), 1147-1153.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00020-6)

[12] Esposito, R., & Hendriks, M. A. N. (2012). Degradation of the mechanical properties in ASR-affected concrete: Overview and modeling. *SSCS 2012: Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures*, Aix en Provence, France, 29 May-1 June 2012.

[13] Ghiasvand, E., Rezaei, Z., Mohammadi, H., Ayyoubi, M., & Dehghani, S. (2023). Evaluation of long-term properties of products containing alkali-activated slag exposed to alkali-silica reaction by mechanical parameters. *Materials in Civil Engineering*.

[14] Zhou, C., Li, K., & Han, J. (2012). Characterizing the effect of compressive damage on transport properties of cracked concretes. *Materials and structures*, 45(3), 381-392.

[15] Chung, D. D. (2003). Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 42(1), 1-40.

[https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(03\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(03)00037-8)

[16] Ghiasvand, E., Mohammadi, H., Rezaei, Z., Ayyoubi, M., & Dehghani, S. (2023). Evaluation of the durability of concretes containing alkali-activated slag exposed to the alkali-silica reaction by measuring electrical resistivity. *Construction and Building Materials*, 367, 130094.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130094>

یافت. با این حال، در طرح‌های حاوی سرباره (از ۱۰ تا ۵۰ درصد به‌عنوان جایگزین سیمان) که در شرایط مستعد وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی بودند، در طول سه‌ماه اول، مقاومت الکتریکی کاهش پیدا نکرد. اما، در بازه زمانی سه تا شش‌ماه، از میزان افزایش این پارامتر، برای برخی طرح‌ها کاسته و در طرح‌های حاوی تا ۲۰ درصد سرباره نیز، حتی با کاهش مقاومت الکتریکی مواجه شدیم. بنابراین، بررسی تغییرات مقاومت الکتریکی در سنین اولیه نمی‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی ASR در مخلوط‌های حاوی سرباره استفاده شود. اما در طرح‌های فاقد سرباره، بررسی تغییرات این پارامتر، می‌تواند در ارزیابی واکنش قلیایی - سیلیسی مؤثر واقع شود.

## ۵- مراجع

[1] Garcia-Diaz, E., Riche, J., Bulteel, D., & Vernet, C. (2006). Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and concrete research*, 36(2), 395-400.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.003>

[2] Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>

[3] Islam, M. S., & Akhtar, S. (2013). A critical assessment to the performance of alkali-silica reaction (ASR) in concrete. *Canadian Chemical Transactions*, 1(4), 253-266.

[4] Kagimoto, H., & Kawamura, M. (2011). Measurements of strain and humidity within massive concrete cylinders related to the formation of ASR surface cracks. *Cement and concrete research*, 41(8), 808-816.

[5] Sims, I., & Poole, A. B. (Eds.). (2017). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review*. CRC Press.

[6] Bouikni, A., Swamy, R. N., & Bali, A. (2009). Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2836-2845.

[7] Siddique, R. (2014). Utilization (recycling) of iron and steel industry by-product (GGBS) in concrete: strength and durability properties. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, 460-467.

[8] Folliard, K. J., Barborak, R., Drimalas, T., Du, L., Garber, S., Ideker, J. & Thomas, M. D. (2006). Preventing ASR/DEF in new concrete (No.

## The effect of alkali-silica reaction (ASR) on the mechanical properties and durability of concretes containing GGBFS

Ebrahim Ghiasvand

Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Zahra Rezaei

Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Mohammad Mahdi Rastegar \*

Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

### Abstract

The damaging internal process known as the alkali silica reaction (ASR) can cause cracks in concrete. Using supplementary cementitious materials (SCM) has been suggested as a way of reducing and eliminating ASR's harmful effects. On the other hand, researchers have examined a wide range of alternatives in an attempt to find a means of reducing cement usage and, as a result, the environmental harm that it causes. Ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), an industrial waste, has demonstrated good performance as a cement substitute and a means of reducing ASR. It is crucial to conduct studies on how slag affects concrete's destructive elements, such as ASR, as well as the concrete's mechanical properties. Moreover, there are numerous conventional tests that may be used to assess the degree of ASR in concrete, but they often produce unreliable and inaccurate results or are so time-consuming that they are essentially useless in projects that must be completed quickly. It may be feasible to determine ASR development by looking at changes in the mechanical properties of concrete. The new approach put forward in this study is based on analyzing changes in the electrical resistivity, compressive strength, tensile strength, and flexural strength of mortar and concrete samples.

**Keywords:** Alkali-Silica reaction; GGBFS; Electrical resistivity; Mechanical properties; Durability.

---

\* Corresponding Author: m.rastegar@basu.ac.ir