# تأثیر واکنش قلیایی – سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی بتن

**افشین محمدی بلبان آباد*[1]، ابراهیم قیاسوند[2]،محمود نیلی[3] ، صادق خزائی**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- استادیار دانشکده کبودرآهنگ دانشگاه بوعلی سینا همدان

۳- دانشیار دانشگاه بوعلی سینا همدان

۴- دانشجوی کارشناسی عمران دانشگاه بوعلی سینا

*afshiciv@gmail.com

**چکیده**

واکنش قلیایی - سیلیسی یک واکنش داخلی مضر است که در بتن رخ می‌دهد. این واکنش، نتیجه‌ی واکنش بین سیلیس فعال و واکنش‌پذیر در برخی سنگدانه‌ها و قلیایی‌های موجود در خمیر سیمان است که منجر به تولید یک ژل آب‌دوست می‌شود. ژل در فضاهای خالی حرکت و آن‌ها را پر می‌کند. به دلیل داشتن گروه‌های آب‌دوست در ساختار خود، آب‌های موجود اطراف را جذب کرده که موجب انبساط و افزایش حجم آن می‌شود. این افزایش حجم تا زمانی‌که حفرات خالی بتن را به صورت کامل اشغال نکرده باشد و به دیواره های اطرافش فشار وارد نکند مضر نیست. در صورتی که شرایط فراهم و ژل انبساط تخریب کننده داشته باشد ترک‌های جدیدی تولید و گسترش می‌یابد که می‌توانند تأثیرات مخربی داشته باشند.

وجود این ترک‌ها سبب تضعیف داخلی بتن می‌گردد که نهایتاً می‌تواند بر خواص مکانیکی بتن تأثیر بگذارد. تحقیقات متعددی در مورد تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر روی خواص مکانیکی بتن (مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و....) انجام شده است. در این مقاله سعی شده‌است که خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته‌شده در مورد رابطه‌ی واکنش قلیایی - سیلیسی و مشخصه‌های مکانیکی ارائه گردد.

**کلمات کلیدی: واکنش قلیایی - سیلیسی، مشخصه‌های مکانیکی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی**

# Effect of Alkali Silica Reaction (ASR) on the mechanical properties of concrete

**Afshin Mohammadi Bolban Abad[1], Ebrahim Ghiasvand[2], Mahmood Nili[3]**

[1]MS.c student of Construction and Management Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina university
[2]Assistant Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Kaboodrahang, Hamedan, Iran
[3]Associate Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

**Abstract**

Alkali Silica Reaction (ASR) is an internal harmful reaction, which occurs in concrete. This reaction is the result of, the reaction between reactive silica in some aggregates and alkalis of pore solution that cause to produce a hydrophilic gel. Gel moves into the cavities and fills them. Due to having hydrophilic groups in its structure, imbibes available water around, which leads to expanding and increasing its volume. This expansion isn't deleterious until it doesn't fill the cavities fully and exert pressure to its surroundings. If the gel be deleterious, new cracks generate and expand which can be harmful.

Existence of these cracks lead to weak the concrete and finally affect the mechanical properties of it. Various researches have been done about the effect of ASR on the mechanical properties of concrete (compressive strength, modulus of elasticity, flexural strength, tensile strength). In this study has been tried to review the summary of the research which has been done about the relationship between ASR and the mechanical properties of concrete.

**Keywords: Alkali Silica Reaction (ASR), compressive strength, modulus of elasticity, flexural strength, tensile strength**

## ۱. مقدمه

وجود برخی از سنگدانه‌ها در بتن که حاوی سیلیس فعال (واکنش‌پذیر) هستند، می‌تواند مسئله‌ای نگران‌کننده و مضر باشد. سیلیس واکنش‌پذیر موجود در این گونه سنگدانه‌ها با قلیایی‌های سیمان واکنش داده و ژل مخربی را تولید می‌کند. به دلیل کنش میان سیلیس و قلیایی به این واکنش، واکنش قلیایی سیلیسی[1]می گویند. درسرتاسر دنیا، این واکنش یکی از عمده‌ترین مشکلات دوامی بتن محسوب می‌شود که به طرز قابل‌توجهی باعث کاهش عمر سرویس‌دهی و افزایش هزینه‌های نگهداری و بازسازی می‌شود [۲و۱].

ژل تولید شده در واکنش قلیایی - سیلیسی به دلایلی از جمله دارا بودن گروه‌های آب‌دوست ($O^-Na^+$ و $O^-$) در ساختار خود و ایجاد نیروی وان‌درووالسی توسط آن‌ها، دافعه‌ی الکترواستاتیکی بین لایه‌های مختلف ژل[2]، فشار اسمزی و اثر گیبس-دونان[3] تمایل زیادی به جذب آب دارد [۵-۳]. این ویژگی از جمله شاخص‌ترین ویژگی‌های این ژل بوده که باعث می‌شود آب‌های موجود در اطراف خود را جذب کرده و انبساط پیدا کند[۶]. ژل در حفره‌های خالی موجود در بتن حرکت کرده و پس از پرکردن همه فضاهای خالی، به دیواره‌های داخلی حفره فشار وارد می‌کند [۷]. مخرب بودن ژل تولیدشده تابع عوامل مختلفی است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تنش تسلیم و خواص ریزساختار ژل اشاره کرد. تنش تسلیم یا بطور کلی خواص رئولوژیکی ژل، تعیین کننده‌ترین ویژگی برای تشخیص مخرب بودن یا نبودن ژل است. در صورتی‌که تنش تسلیم ژل از مقاومت کششی بتن بیشتر باشد، مانند یک جسم جامد سخت عمل کرده و باعث ایجاد ترک در بتن می‌شود، در غیر اینصورت ژل بدون ایجاد فشار داخلی، مانند یک سیال آزادانه در حفرات خالی حرکت می‌کند. بنابراین، صرف تشکیل ژل دلیلی بر مخرب بودن واکنش نیست و عوامل مختلفی تأثیرگذار هستند [۸].

---

[1]Alkali Silica Reaction (ASR)

[2]Double Layer Theory

[3]Gibbs-Donnan effect

اگر تنش تسلیم ژل بیشتر از مقاومت کششی بتن باشد ترک‌هایی ایجاد می‌شود. وجود ترک در داخل بتن باعث ضعیف شدن بتن می‌شود [۹]. درصورتی‌که واکنش پیشرفت کند تعداد ترک‌ها و همچنین ضخامت آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. افزایش تعداد و ضخامت ترک‌ها سبب می‌شود آن‌ها به هم متصل شوند و شبکه‌ای یکپارچه از ترک‌ها را تشکیل دهند. هرچه ارتباط ترک‌ها بیشتر باشد اثرات مخرب‌تری دارد و بتن را ضعیف‌تر می‌کند.

این واکنش برای شروع و پیشرفت نیازمند سه عامل: سیلیس فعال، قلیایی و رطوبت می‌باشد. بنابراین، بیشتر در سازه‌هایی مانند پل‌ها، سدها، روسازی‌ها ونیروگاه‌هایی که مداوم در معرض رطوبت هستند، رایج می‌باشد [۱۳-۱۰]. واکنش قلیایی - سیلیسی یک واکنش دراز مدت بوده که حداقل ۲۰-۵ سال زمان نیاز دارد تا نمایان گردد. این واکنش به‌دلیل عدم شناخت کافی و همچنین نیاز به زمان زیاد برای ظاهرسازی از آن با نام سرطان بتن یاد می‌شود.

ترک‌های سطحی، جابجایی نسبی و پاشیدگی ژل سفیدرنگ از جمله علائم ظاهری ایجاد شده در بتن توسط واکنش قلیایی - سیلیسی است. عمده‌ترین شیوه‌ی ظاهرسازی واکنش، ترک‌های سطحی نقشه مانند[۴]است که دارای جهات تصادفی می‌باشد. اگرچه مشکلات دوامی دیگری نیز مانند چرخه ذوب و انجماد و حمله سولفاتی نیز چنین ترک‌هایی را ایجاد می‌کنند .

**شکل ۱- ترک خوردگی سطحی و پاشیدگی ژل سفید رنگ براثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر روی سطح بتن**

## ۲. مکانیسم و شیمی واکنش

همواره بهترین روش برای بررسی و پیشگیری از یک پدیده، شناخت ریزساختار و مکانیسم آن است. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز از این قاعده مستثنی نیست و بهترین راه برای جلوگیری و متوقف‌کردن واکنش، شناخت مکانیسم و ریز ساختار آن است. به‌عنوان مثال، با دانستن ساختار و مکانیسم ژل تولید شده توسط واکنش، می‌توان از ماده مکمل سیمانی یا افزودنی استفاده کرد که بیشترین تأثیرگذاری را دارد. فرضیه‌های متعددی در مورد مکانیسم و ریز ساختار واکنش ارائه شده‌است، اما هیچ‌کدام کامل نبوده و نتوانسته تمامی حالات را پوشش دهد.

همان‌گونه که از نام واکنش مشهود است، واکنش میان سیلیس فعال و قلیایی سیمان است. اما این تعریف تنها برای ساده‌سازی معرفی واکنش می‌باشد و در حقیقت واکنش‌های دیگری رخ داده و نهایتا بعد از چند مرحله قلیایی‌ها با سیلیس واکنش می‌دهند. ساختار سیلیس متشکل از گروه‌های تکرار شونده‌ی (≡Si-O-Si≡) است. در این ساختار اتم‌های اکسیژنی در انتهای شبکه قرار دارند که تمامی ظرفیت آن‌ها پرنشده یا به عبارت دیگر هنوز توانایی واکنش با دیگر اتم‌ها را دارند.

در ابتدای واکنش یون‌های هیدروکسید($OH^-$) موجود در محلول منافذ[۵]به سطح سنگدانه‌ها حمله کرده و با سیلیس موجود در سطح سنگدانه ترکیب می‌شوند. یعنی سیلیس مستقیما توسط قلیایی‌ها مورد حمله قرار نمی‌گیرند. در واقع، یون هیدروکسید با اتم اکسیژن انتهایی واکنش می‌دهد. این واکنش باعث می‌شود که اتصالات بین اتم‌های مختلف در ساختار

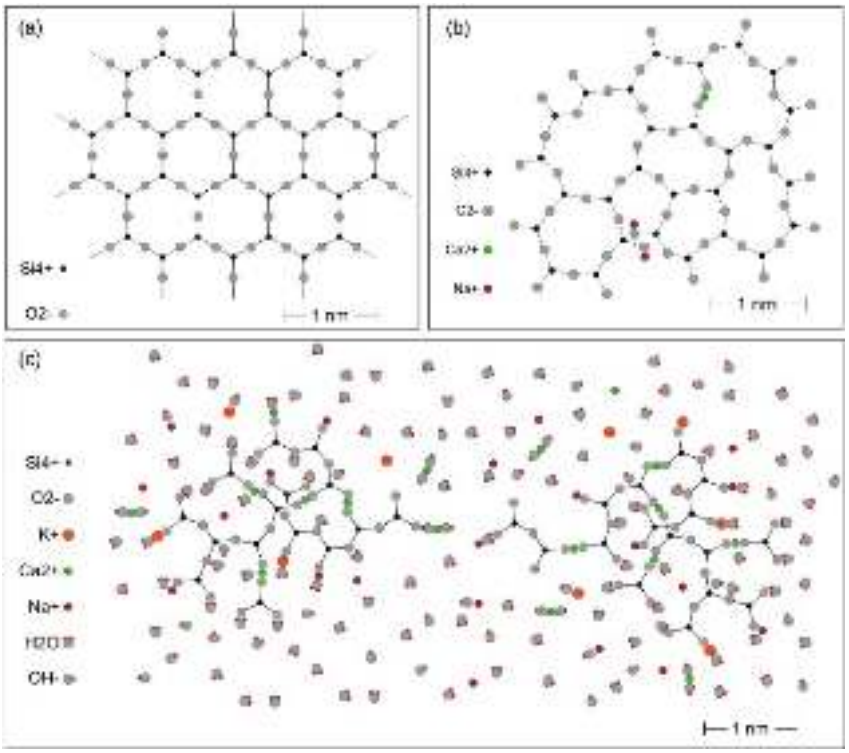
---

[۴] Map Cracking

[۵] Pore Solution

سیلیس از هم بپاشد و به‌راحتی یون هیدروکسید به داخل ساختار نفوذ کند که باعث پیشرفت واکنش و ترکیب هرچه بیشتر یون هیدروکسید با اتم‌های اکسیژن می‌شود.

عموما در سیلیسی که دارای ساختار منظم و کریستالی است پس از واکنش یون هیدروکسید با اتم‌های اکسیژن انتهایی، شبکه‌ی سیلیس از هم نمی‌پاشد و پس از مدتی که اکثر اتم‌های اکسیژن انتهایی مصرف شدند واکنش متوقف می‌شود. برخلاف این، همان‌گونه که توضیح داده‌شد در سیلیس فعال (آمورف) پس از واکنش یون هیدروکسید با اتم اکسیژن، ساختار سیلیس ازهم فرو می‌پاشد [۱۴].




**شکل ۲- تصویر دو بعدی از ساختار اتمی: (a) سیلیس با ساختار منظم، (b) سیلیس با ساختار نامنظم، (c) ژل واکنش قلیایی - سیلیسی که باعث از هم پاشیده شدن ساختار سیلیس شده‌است [۱۵].**

وجود گروه‌های (≡Si-OH) در سطح مواد واکنش‌پذیر باعث ایجاد یک چگالی بار منفی می‌شود. این بار منفی با افزایش pH و قدرت یونی محلول محیط افزایش می‌یابد که به دلیل نفوذ یون هیدروکسید و جذب سطحی است [۱۶]. بار ایجاد شده می‌تواند با نفوذ کاتیون‌های قلیایی ($Na^+$, $K^+$) به داخل ساختار سیلیس خنثی شود. این نفوذ سبب می‌شود که واکنشی رخ دهد که به‌واسطه‌ی آن قلیایی‌ها با هیدروژن جابجا می‌شوند. به این واکنش اصطلاحا تبادل یونی[۶] گفته می‌شود.

ساختار ژل تابع زمان بوده و با گذشت زمان ساختار آن تغییر می‌کند. در سنین اولیه، ژل غنی از سدیم است و مقدار کمی کلسیم در آن وجود دارد. با گذشت زمان $Ca(OH)_2$ موجود در بتن، حل می‌شود که منجر به آزاد شدن یون کلسیم می‌شود. هم‌چنین ژل تمایل به جذب کلسیم دارد. جذب کلسیم توسط ژل باعث می‌شود که کلسیم جایگزین سدیم در ترکیب ژل شود که به این واکنش، بازیابی قلیایی[۷] می‌گویند. با این تبادل ژل حاصل از واکنش قلیایی - سیلیسی تشکیل می‌شود که فرمول

[۶] Ion Exchange

[۷] Alkali Recycling

شیمیایی آن را می‌توان به صورت $(SiO_2)\cdot(Na_2O)_n\cdot(K_2O)_k\cdot(CaO)_c\cdot(H_2O)_x$ یا با استفاده از نمادهای شیمی سیمان به‌صورت N–C–S–H نمایش داد [۱۷].

مطالعات متعددی در مورد نقش کلسیم در رفتار ژل انجام شده‌است، اما هم‌چنان اثر آن بصورت دقیق و روشن مشخص نیست. تعدادی از آن‌ها بیان کرده‌اند که وجود کلسیم برای مخرب بودن ژل لازم و ضروری است [۲۰-۱۸]، در حالی‌که عده‌ی دیگری بر این باور هستند که وجود کلسیم باعث کاهش ظرفیت انبساط ژل و در نتیجه کاهش پتانسیل تخریب کنندگی آن می‌شود [۲۲و۲۱].

## ۳. روش‌های کاهش اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی

همانطور که قبلا اشاره شد برای شروع واکنش وجود سه عامل اصلی سیلیس فعال، قلیایی و رطوبت کافی لازم است تا واکنش رخ دهد. حذف هرکدام از آن‌ها باعث می‌شود که واکنش رخ ندهد [۲۳]. غالباً نمی‌توان عامل رطوبت را حذف کرد و سازه را به دور از رطوبت قرارداد، بنابراین تنها می‌توان دو عامل سیلیس و قلیایی را تغییر داد. بهترین و مطمئن‌ترین راه برای جلوگیری از واکنش قلیایی - سیلیسی استفاده از سنگدانه‌های واکنش‌ناپذیر است. اما این کار به دلایلی از قبیل عدم دسترسی به سنگدانه‌ی غیر واکنش‌زا و هزینه‌های زیاد حمل و نقل آن و عدم وجود آزمایش قابل اعتماد برای اثبات واکنش‌زا نبودن سنگدانه، تقریبا غیرممکن است.

راه‌حل بعدی کنترل مقدار قلیایی سیمان است. استانداردها مقدار مجاز قلیایی $(Na_2O_{eq} = Na_2O + ۰٫۶۵۸\ K_2O)$ سیمان را برای جلوگیری از انجام واکنش به ۰/۶٪ محدودکرده‌اند که به آن‌ها سیمان‌های کم قلیا می‌گویند. اگرچه تحقیقاتی صورت گرفته و اشاره کرده‌اند که حتی چنین سیمان‌هایی هم منجر به تولید ژل واکنش قلیایی - سیلیسی شده اند و آثار مخربی برجای گذاشته‌اند. یکی از روش‌های کاهش مقدار قلیایی سیمان استفاده از مواد مکمل سیمانی[۸]است. اگرچه در بسیاری از موارد گزارش شده‌است که مواد مکمل سیمانی خود به‌مراتب دارای قلیایی بیشتری از سیمان بوده و مقدار قلیایی کل را افزایش می‌دهند، اما مقدار قلیایی اضافه شده به بتن توسط مواد مکمل سیمانی دخالتی در واکنش قلیایی - سیلیسی ندارد [۲۴].

مواد مکمل سیمانی گوناگون با مقادیر جایگزینی متفاوتی مورد مطالعه قرارگرفته و نتایج مطلوبی را ارئه کرده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که هر ماده‌ی مکمل سیمانی با مقدار جایگزینی مناسب می‌تواند در سرکوب واکنش قلیایی - سیلیسی مؤثر باشد [۲۸-۲۵]. تاکنون پاسخ دقیق و کاملی برای این سوال ارائه نشده‌است که چرا و چگونه مواد مکمل سیمانی در کنترل و سرکوب واکنش قلیایی - سیلیسی مؤثر هستند. اما کارهای گذشته اثبات کرده‌اند، اصلی‌ترین دلیل مؤثر بودن مواد مکمل سیمانی این است که آن‌ها به دلیل مصرف و استفاده یون هیدروکسید برای تولید ژل ثانویه باعث افت مقدار آن در بتن می‌شوند. بنابراین، مقدار یون هیدروکسید لازم برای انجام واکنش قلیایی - سیلیسی در دسترس نبوده و واکنش نمی‌تواند پیشرفت کند. درنتیجه، واکنش متوقف شده و اثرات مخرب آن کاهش پیدا می‌کند [۳۰و۲۹].

یکی دیگر از راه‌های کنترل واکنش، استفاده از افزودنی‌هایی مانند نمک‌های لیتیم است. محققین زیادی در مورد اثربخشی نمک‌های لیتیم بر واکنش مطالعه و اثبات کرده‌اند که استفاده از ترکیبات لیتیمی در کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی بسیار مؤثر و مفید هستند [۳۲و۳۱]. نمک‌های پایه لیتیم مختلفی مورد مطالعه قرارگرفته‌اند و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها تایید کرده‌اند که اکثر ترکیبات لیتیمی در سرکوب واکنش به‌خوبی عمل می‌کنند، اما در میان آن‌ها لیتیم نیترات بیشترین اثربخشی را از خود نشان داده است [۳۳].

---

[۸] Supplementary Cementitious Materials (SCM)

باوجود تمامی فواید ترکیبات لیتیمی، متاسفانه در سنین اولیه (دو روز اول) نصفی از مقدار لیتیم افزوده شده به بتن بدون توجه به نوع ترکیب لیتیم مصرف می‌شود. این مقدار لیتیم مصرف شده در سنین اولیه هیچ دخالتی در واکنش قلیایی - سیلیسی نداشته و توسط ژل CSH مصرف می‌شود [۳۴].

## ۴. تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصات مکانیکی بتن

تأثیر مشکلات دوامی بر مشخصه‌های مکانیکی امری انکارناپذیر است. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز به‌دلیل تأثیراتی که بر بتن می‌گذارد قطعاً خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. براثر اعمال فشار توسط ژل واکنش قلیایی - سیلیسی به فضاهای خالی بتن، تنش کششی داخلی در بتن شده که باعث می‌شود ترک‌هایی در داخل بتن ایجاد شود. تنش کششی و ترک‌های ایجاد شده باعث تضعیف داخلی بتن می‌شوند. قاعدتاً ایجاد ترک بعد از سخت شدن بتن و گسترش آن باعث می‌شود بتن یکپارچگی خود را از دست دهد، بنابراین خواص مکانیکی آن دستخوش تغییراتی می‌شود. در ادامه سعی برآن شده خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در مورد تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی بتن ارائه شود.

## ۵. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

انتظار می‌رود باتوجه به تولید ترک و تنش کششی در بتن توسط واکنش قلیایی - سیلیسی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته تغییر کنند. تحقیقات متعددی برای یافتن اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر آن‌ها انجام شده است [۳۶و۳۵] . مونیر و همکاران [۳۷] اثر واکنش بر مقاومت فشاری را بررسی کردند. آن‌ها از نمونه‌های مکعبی ۲۵ میلی‌متری در شرایط مورد نیاز برای واکنش قلیایی - سیلیسی طبق استانداردهای ASTM C۲۲۷ ، ASTM C۱۲۶۰ و شرایط عادی در ۱ و ۶ ماه استفاده و اثبات کردند که رخ دادن واکنش موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود، اگرچه مقدار کاهش وابسته به درجه واکنش‌پذیری سنگدانه است. به عبارت دیگر، هرچه سنگدانه واکنش‌پذیرتر، مقدار کاهش نیز بیشتر است. به‌عنوان مثال، سنگدانه‌های واکنش‌پذیر پس از ۶ ماه حدود ۲۲ و ۲۵٪ به ترتیب در شرایط ASTM C۱۲۶۰ و ASTM C۲۲۷ کاهش داشتند، در حالی‌که مقدار کاهش در سنگدانه‌های غیرواکنش‌زا در مقایسه با آن‌ها بسیار ناچیز بود. یکی از معایب کار آن‌ها استفاده از نمونه‌های ملاتی و روش آزمایش بود زیرا در استانداردهای مورد استفاده، نمونه‌ها در شرایط بسیار شدیدی (دما و قلیایی بالا) قرارمی‌گیرند که باعث می‌شود نتایج چندان قابل اعتماد نباشد.

تحقیق مشابهی توسط Giaccio و همکاران [۳۸] که از نمونه‌های بتنی در شرایط ASTM C۱۲۹۳ انجام شد. قاعدتاً استفاده از نمونه‌های بتنی و شرایط ASTM C۱۲۹۳ (که معتبرترین روش موجود برای ارزیابی واکنش است) کمک می‌کند نتایج معتبرتر باشند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مقدار مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های با سنگدانه‌ی غیر واکنش‌زا همواره در حال افزایش است. درحالی‌که مقاومت فشاری در نمونه‌های با سنگدانه‌ی واکنش‌پذیر نوسان زیادی دارند، به‌طوری که در سنین میانه افزایش و در پایان آزمایش کاهش دارند. این نتیجه توسط محققین دیگری نیز مشاهده شده‌است [۳۹] . به‌نظر می‌رسد رفتار نوسانی مقاومت فشاری در اثر واکنش قلیایی - سیلیسی به این علت است، زمانی‌که انبساط نمونه‌ها متوقف می‌شود یا نرخ رشد واکنش کاهش می‌یابد، اثر هیدراسیون سیمان بر اثر ترک خوردگی و انبساط ژل غالب شده و باعث بازیابی قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود به همین دلیل مقاومت فشاری آن‌ها افزایش مییابد[۳۹] . اما در طرف مقابل، مشاهده شد که مدول الاستیسیته‌ی نمونههای واکنش‌پذیر همواره کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، مدول الاستیسیته با انبساط قرائت شده نمونه‌ها بیشترین هم‌خوانی را دارد. یعنی با افزایش انبساط، مدول الاستیسیته نیز کاهش پیدا می‌کند.

هم‌چنین، آن‌ها نشان دادند نمونه‌هایی که انبساط آن‌ها حدودا برابر بوده، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته متفاوتی نشان داده‌اند، که از آن می‌توان نتیجه گرفت تغییر طول نمونه‌ها نمی‌تواند شاخص دقیقی برای نشان دادن تأثیر واکنش بر مشخصات مکانیکی باشد و برای نمونه‌هایی با مقدار انبساط برابر، تأثیر واکنش بر مشخصه‌های مکانیکی متفاوت است.

در سال ۲۰۱۵، اسلام و غفوری [۴۰] رابطه‌ی میان انبساط تولید شده توسط واکنش قلیایی - سیلیسی و مقاومت فشاری بتن را مورد مطالعه قرار دادند. عمده‌ترین تفاوت کار آن‌ها با کار سایرین استفاده از مقاومت فشاری به عنوان یک روش جدید برای ارزیابی واکنش قلیایی - سیلیسی بود که معیارها و مرزهایی را برای این کار معرفی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها دقیقا نتایج تحقیق مونیر و همکارانش [۳۷] را تایید کرد و نشان داد که درجه‌ی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیرگذار است. هم‌چنین آن‌ها بیان کردند که از مقدار افت مقاومت فشاری در دو سن ۴ و ۲۶ هفته می‌توان به عنوان ملاکی برای ارزیابی واکنش قلیایی - سیلیسی استفاده کرد.

جهت ترک‌های ایجاد شده توسط واکنش بر مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته تأثیرگذار است. در واقع، نیروی فشاری اعمال شده برای آزمایش‌ها در دو حالت موازی و عمود بر ترک‌های ایجاد شده، نتایج متفاوتی را ارائه می‌کند. برای نمونه، مقاومت فشاری در حالتی که نیرو موازی با ترک‌ها اعمال می‌شود به‌طرز قابل ملاحظه‌ای از حالتی که نیرو عمود بر ترک وارد می‌شود بیشتر است[۴۱] .

در میان مطالعات صورت گرفته نتایج متغیری در مورد مقاومت فشاری ذکر شده‌است. در بعضی از تحقیقات اشاره شده‌است که مقاومت فشاری در نمونه‌های گرفته شده از سازه‌هایی که دچار واکنش قلیایی - سیلیسی شده‌اند در سن ۲۸ روز مداوم در حال افزایش بوده و تفاوت چندانی با نمونه‌های شاهدی که از سنگدانه‌ی غیر واکنش‌زا ساخته شده‌اند ندارد و تأثیر واکنش بر مقاومت فشاری چندان قابل ملاحظه نیست، بخصوص در مواردی که واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها آهسته یا متوسط است[۴۳و۴۲ ]. درحالی‌که، بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه بیانگر آن است که مقاومت فشاری با وجود رفتار نوسانی، تحت تأثیر واکنش قرار می‌گیرد (بخصوص در درازمدت).

اما در طرف دیگر، انبساط ایجاد شده توسط واکنش قلیایی - سیلیسی مدول الاستیسیته را حتی در سنین اولیه به‌سرعت تحت تأثیر قرار می‌دهد و با پیشرفت واکنش و سنین دراز مدت اثر خود را بسیار مشهودتر نشان می‌دهد[۴۶-۴۴] . به همین دلیل، مدول الاستیسیته به خوبی می‌تواند بیانگر سختی داخلی بتن و تأثیر ترک‌های داخلی ایجاد شده باشد. بر همین اساس، اسلام و غفوری [۴۷] از مدول الاستیسیته که در مطالعه خود از آن به عنوان سختی یاد کرده‌اند، برای ارزیابی واکنش قلیایی - سیلیسی استفاده و نشان دادند که افت مقدار سختی بتن در سنین مختلف باتوجه به حساسیت بالای مدول الاستیسیته به واکنش، می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی واکنش قلیایی - سیلیسی باشد.

از نتایج تحقیقات صورت گرفته چنین برداشت می‌شود که مدول الاستیسیته بسیار حساس به واکنش قلیایی - سیلیسی بوده و با کوچیکترین تغییر در انبساط نمونه تغییر می‌کند[۴۸] . اما برخلاف مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری هرچند که کاهش پیدا می‌کند اما حساسیت زیادی به تغییرات آن ندارد.

### ۶. مقاومت خمشی و کششی

همانند دو ویژگی قبلی، مقاومت خمشی و کششی جزو مهم‌ترین مشخصات مکانیکی بتن محسوب می‌شوند. بنابراین، ارزیابی تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر آن‌ها و تشخیص مقدار کاهش این ویژگی‌ها به دلیل رخ دادن واکنش امری ضروری و مهم است.

مطالعات فراوانی در این زمینه انجام شده‌است. در سال ۲۰۱۶، لی و همکارانش [۴۹] مقاله‌ای را منتشر کردند که در آن افت مقاومت خمشی در نمونه‌های ملاتی با عملکرد بالا را در شرایط لازم برای وقوع واکنش و تغییر مقدار قلیایی سیمان

ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش مقدار قلیایی سیمان که منجر به تشدید واکنش قلیایی - سیلیسی می شود، مقدار مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار قلیایی سیمان، قلیایی بیشتری برای انجام واکنش در دسترس است پس واکنش پیشرفت بیشتری دارد، ژل بیشتری تولید می‌شود و نهایتا اثر مخرب‌تری خواهد داشت.

در تحقیق جامعی که به منظور بررسی ارتباط واکنش قلیایی - سیلیسی و مشخصات مکانیکی انجام شد، مشخص شد که وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی به دلیل متخلخل‌تر ساختن بتن باعث افت مشخصات مکانیکی می‌شود و در بین آن‌ها مقاومت کششی بتن بیشترین حساسیت و کاهش را داشته‌است، به‌طوری بیش‌ترین کاهش در ۳ روز اول رخ داده‌است [۵۰].

تحقیقات متعددی نشان داده‌است که مقاومت خمشی تحت اثر واکنش قلیایی کاهش می‌یابد و این کاهش به نسبت مقاومت فشاری بسیار محسوس‌تر است. این تفاوت ممکن است به دلیل تفاوت بین روش آزمایش باشد که در آزمایش مقاومت فشاری ترک‌های ایجاد شده بسته می‌شوند، در حالی‌که آزمایش مقاومت خمشی باعث جداشدن ترک‌ها می‌شود و در حقیقت ترک‌های ایجاد شده توسط ژل نیازمند تحریکی هستند که از هم جدا شوند که توسط آزمایش مقاومت خمشی فراهم می‌شود و ترک‌ها به سادگی گشترش می‌یابند[۵۱و۳۸].

در تحقیقی که اخیرا انجام شد، بیان شده‌است که بیشترین کاهش در مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) در سنین اولیه (۹۱ روز) رخ می‌دهد، در حالی‌که، انبساط نمونه‌های ملاتی در این سن کمتر از نصف انبساط یک ساله آن است. آن‌ها ادعا کردند که این اتفاق می‌تواند به این دلیل باشد که ترک‌ها قبل از انبساط ایجاد شده‌اند. این نتایج با نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ای که توسط فان و هانسون انجام شد مغایرت دارد. فان و هانسون [۵۲] در مقاله‌ی خود بیان کرده‌اند که اولین ترک‌های ایجاد شده در سن ۱۲۵ روز ظاهر می‌شوند و تغییرات در مشخصات مکانیکی قبل از ظهور ترک بسیار ناچیز می‌باشد.

تاکنون مطالعات متعددی بر روی واکنش قلیایی - سیلیسی در اعضای سازه‌ای هم‌چون تیرها و دال‌های مسلح بتنی انجام گرفته‌است[۵۴و۵۳]. مشاهده شده‌است که تیرهای شامل سنگدانه‌ی واکنش‌زا که در معرض شرایط واکنش قرار گرفته‌اند بعد از ۶ ماه ترک خورده‌اند. اما مقاومت خمشی آن‌ها در پایان یک سال با تیرهایی که با سنگدانه‌ی غیر واکنش‌زا ساخته شده تفاوت چندانی نداشته‌اند. اگرچه، در همان تیرها سایر مسخصات مکانیکی کاهش پیدا کرده‌است[۵۵و۴۱].

به دلیل درازمدت بودن واکنش قلیایی - سیلیسی تأثیر آن در سنین طولانی مدت موضوع بسیار مهم و حیاتی است که تاکنون نتایج چندان مشخصی دردسترس نیست. قاعدتاً بررسی درازمدت آن نتایج معتبرتر و دقیق‌تری را ارائه می‌کند. در سال۲۰۱۶، هیروی و همکاران [۵۶] تیرهای بتنی پیش تنیده را تا ۷/۵ سال در معرض شرایط واکنش قلیایی - سیلیسی قرار دادند تا اثر درازمدت آن را بررسی کنند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که در پایان ۷/۵ سال تمامی مشخصات مکانیکی بتن کاهش پیدا کردند، اگرچه این کاهش در مدول الاستیسیته استاتیکی و مقاومت کششی بسیار قابل ملاحظه‌تر بود.

اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مقاومت کششی نیز مشابه مقاومت خمشی می‌باشد، بدین صورت که با پیشرفت واکنش مقدار مقاومت کششی به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مقدار افت در مقاومت کششی به نسبت مقاومت خمشی بسیار چشم‌گیر است [۵۰و۳۹].

عموما، مقاومت کششی و مقاومت خمشی اجزای بتنی تحت تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی کاهش پیدا می‌کنند. این کاهش عمدتا به این دلیل است که در حین انجام آزمایش نیروی وارد شده در هر دو آزمایش هم‌جهت با نیروی وارد شده توسط ژل ایجاد شده است بنابراین، سعی در تشدید اثر آن دارد و طبیعتاً بتن از ناحیه‌ی کششی بشدت آسیب پذیر نشان می‌دهد.

مدول الاستیسیته غالبا تحت فشار اندازه‌گیری می‌شود و در قسمت قبلی هم منظور از مدول الاستیسیته، مدول الاستیسیته فشاری است. آزمایش مدول الاستیسیته‌ی نمونه‌هایی که در شرایط واکنش قلیایی - سیلیسی قرار داده شده بودند، نشان داد که مدول الاستیسیته تحت کشش رفتار منظم‌تری به نسبت حالت فشاری دارد.

این چهار ویژگی بررسی شده جزو اصلی‌ترین مشخصه‌های بتن هستند و قاعدتاً بیشترین مطالعات در این زمینه بر روی آن‌ها صورت گرفته‌است. تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر خواص دیگری نیز بررسی شده‌است اما به دلیل اهمیت کم‌تر در اینجا ذکر نگردیده‌است.

قاعدتاً قرائت تغییر طول نمی‌تواند شاخص مناسب و قابل اعتمادی برای نشان دادن تضعیف داخلی بتن در اثر واکنش باشد. بررسی مشخصه‌های مکانیکی در اثر واکنش قلیایی - سیلیسی می‌تواند دید مناسبی از تأثیر واکنش بر ساختار داخلی و هم‌چنین تضعیف داخلی بتن ارائه دهد.

یکی از مشکلات عمده در حوزه‌ی واکنش قلیایی - سیلیسی عدم وجود آزمایش قابل اعتماد برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه است. آزمایش‌های کنونی هرکدام معایب و نواقصی دارند. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که به‌دلیل حساسیت و تأثیرپذیری زیاد مشخصات مکانیکی به واکنش، برخی از آن‌ها می‌توانند معیار مناسب و قابل اعتمادی برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها باشند.

در خصوص ارزیابی پتانسیل استفاده از مشخصه‌های مکانیکی به‌عنوان روشی برای بررسی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها مطالعات زیادی منتشر شده‌است [۴۷و۴۰] . مشخصه‌هایی هم‌چون مدول الاستیسیته و مقاومت کششی که بیشترین حساسیت را به واکنش قلیایی - سیلیسی دارند می‌توانند معیارهای مناسبی باشند.

تحقیقات دیگری نیز نشان داده‌اند که روش‌های غیر مستقیم همانند آزمایش آسیب سختی[۹] شاخص نرخ آسیب[۱۰]و شاخص تغییر شکل پلاستیک[۱۱]پتانسیل بسیار خوبی دارند که به‌عنوان یک روش برای ارزیابی واکنش مورد استفاده قرار بگیرند [۶۰-۵۷] .

## ۷. نتیجه‌گیری

همواره مشکلات دوامی و مشخصه‌های مکانیکی بتن رابطه‌ی انکار ناپذیری داشته و قطعاً این مشکلات می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار دهد. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز به دلیل ایجاد ژل منبسط شونده و تولید ترک می‌تواند باعث تضعیف داخلی بتن شود و مشخصه‌های مکانیکی آن را تغییر دهد.

انبساط ژل در حفرات خالی به دیواره‌ی داخلی حفرات نیروی فشاری وارد می‌کند و باعث بوجود آمدن نیروی کششی در داخل بتن می‌شود. این نیروی کششی سبب ایجاد ترک می‌شود. با پیشرفت واکنش ترک‌ها افزایش یافته و اتصال آن‌ها به هم باعث بوجود آمدن شبکه‌ی یکپارچه‌ای از ترک‌ها می‌شود. قاعدتاً اتصال ترک‌ها باعث می‌شود بتن تحت بارهای وارده ضعیف‌تر شود.

از مرور نتایج تحقیقات صورت گرفته روی تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی می‌توان به نتایج کلی زیر پی برد:

- در مورد تأثیر واکنش بر مقاومت فشاری نتایج ضد و نقیض فراوانی بیان شده‌است، اما اکثر تحقیقات نشان داده‌اند که مقاومت فشاری در شرایط واکنش قلیایی - سیلیسی کاهش می‌یابد. اگرچه در بین تمامی مشخصه‌های یاد شده کم‌ترین افت را دارد.

[۹] Stiffness Damage test (SDT)

[۱۰] Damage Rating Index (DRI)

[۱۱] Plastic Deformation Index (PDI)

- در بین مشخصه‌های مکانیکی بیش‌ترین تأثیرپذیری را مدول الاستیسیته و مقاومت کششی داشتند. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهند که این دو مشخصه می‌توانند به عنوان روشی برای ارزیابی واکنش مورد استفاده قرار بگیرند.
- مقاومت خمشی نیز به دلیل درگیر ساختن مقاومت کششی بتن تأثیرپذیری زیادی از واکنش قلیایی - سیلیسی دارد. میزان افت مقاومت خمشی به دلیل واکنش به نسبت مقاومت فشاری بسیار چشم‌گیرتر است.
- به‌طور کلی آزمایش‌هایی که مقاومت کششی بتن را تحت تأثیر قرار بدهند بسیار به واکنش حساس‌تر هستند. همانطور که اشاره شد ایجاد ترک داخلی در بتن باعث بوجود آمدن نیروی کششی در بتن می‌شود، پس قطعاً بتن در کشش بسیار حساس‌تر و شکننده‌تر می‌شود.

با توجه به تأثیرپذیری مشخصه‌های مکانیکی بتن از واکنش قلیایی - سیلیسی قطعاً می‌توان با بررسی دقیق و ارزیابی اندرکنش میان آن‌ها از مشخصه‌های مکانیکی و یا سایر خصوصیات دیگر بتن به عنوان روشی برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها استفاده نمود.

## ۸. مراجع


[۱] Wang, X. et al. (۲۰۱۰) ‘Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete Infrastructure-Synthesis Report’, Csiro.

[۲] Hayes, N. W. et al. (۲۰۱۸) ‘Monitoring Alkali-Silica Reaction Significance in Nuclear Concrete Structural Members’, Journal of Advanced Concrete Technology, ۱۶(۴), pp. ۱۷۹–190.

[۳] Alnaggar, M., Cusatis, G. and Di Luzio, G. (۲۰۱۳) ‘Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures’, Cement and Concrete Composites, ۴۱, pp. ۴۵–۵۹.

[۴] Visser, J. H. M. (۲۰۱۸) ‘Fundamentals of alkali-silica gel formation and swelling: Condensation under influence of dissolved salts’, Cement and Concrete Research, ۱۰۵(February ۲۰۱۷), pp. ۱۸–30.

[۵] Prezzi, M., Monteiro, P. J. M. and Sposito, G. (۱۹۹۷) ‘The alkali-silica reaction, part I: Use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels’, ACI Materials Journal, 94(1), pp. 10–17.

[۶] Cai, Y., Xuan, D. and Poon, C. S. (۲۰۱۹) ‘Effects of nano-SiO۲ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 201, pp. 295–302.

[۷] Ponce, J. M. and Batic, O. R. (۲۰۰۶) ‘Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate’, Cement and Concrete Research. Elsevier, ۳۶(۶), pp. ۱۱۴۸–۱۱۵۶.

[۸] Kawamura, M. and Iwahori, K. (۲۰۰۴) ‘ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint’, Cement and Concrete Composites, ۲۶(۱), pp. ۴۷–56.

[۹] Leger, P., Cote, P. and Tinawi, R. (۱۹۹۶) ‘Finite element analysis of concrete due to alkali-aggregate reactions in dams’, Computers and Structures, ۶۰(۴), pp. ۶۰۱–611.

[۱۰] Ichikawa, T. and Kimura, T. (۲۰۱۲) ‘Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete’, ۳۱۳۱(October ۲۰۱۳), pp. ۳۷–۴۱.

[۱۱] Giebson, C., Seyfarth, K. and Stark, J. (۲۰۱۰) ‘Influence of acetate and formate-based deicers on ASR in airfield concrete pavements’, Cement and Concrete Research, ۴۰(۴), pp. ۵۳۷–۵۴۵.

[۱۲] Munir, M. J. et al. (۲۰۱۶) ‘a Literature Review on Alkali Silica Reactivity of Concrete in Pakistan’, Pakistan Journal of Science, ۶۸(۱), pp. ۵۳–۶۲.

[۱۳] Lukschová, Š., Přikryl, R. and Pertold, Z. (۲۰۰۹) ‘Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from ۲۰th century bridges’, Construction and Building Materials, 23(2), pp. 734–741. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.020.

[۱۴] Dent Glasser, L. S. and Kataoka, N. (۱۹۸۱) ‘The chemistry of “alkali-aggregate” reaction’, Cement and Concrete Research, ۱۱(۱), pp. ۱–۹.

[۱۵] Rajabipour, F. et al. (۲۰۱۵) ‘Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۷۶, pp. ۱۳۰–146.

[۱۶] Chatterji, S. (۲۰۰۵) ‘Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates’, Cement and Concrete Composites, ۲۷(۷–۸), pp. ۷۸۸–795.

[۱۷] Gholizadeh Vayghan, A., Rajabipour, F. and Rosenberger, J. L. (۲۰۱۶) ‘Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the Gel’s deleterious behavior’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۸۳, pp. ۴۵–۵6.

[۱۸] Bleszynski, R. F. and Thomas, M. D. a (۱۹۹۸) ‘Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions’, Advanced Cement Based Materials, ۷(۲), pp. ۶۶–۷۸.

[۱۹] Leemann, A. et al. (۲۰۱۱) ‘Alkali-Silica reaction: The Influence of calcium on silica dissolution and the formation of reaction products’, Journal of the American Ceramic Society, ۹۴(۴), pp. 1243–1249.

[۲۰] Shafaatian, S. M. H. et al. (۲۰۱۳) ‘How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASTM C۱۵۶۷)?’, Cement and Concrete Composites, ۳۷(۱), pp. ۱۴۳–153.

[۲۱] Utton, C. A. et al. (۲۰۱۳) ‘Dissolution of vitrified wastes in a high-pH calcium-rich solution’, Journal of Nuclear Materials, ۴۳۵(۱–۳), pp. ۱۱۲–۱۲۲.

[۲۲] Maraghechi, H. et al. (۲۰۱۶) ‘Effect of calcium on dissolution and precipitation reactions of amorphous silica at high alkalinity’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۸۷, pp. ۱–۱3.

[۲۳] Folliard, K. J. et al. (۲۰۱۶) ‘Mitigation of alkali--silica reaction in US highway concrete’, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials. Thomas Telford Ltd, 169(4), pp. 215–222.

[۲۴] Drolet, C., Duchesne, J. and Fournier, B. (۲۰۱۷) ‘Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۵۷, pp. ۲۶۳–۲76.

[۲۵] Thomas, M. (۲۰۱۱) ‘The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۴۱(۱۲), pp. ۱۲۲۴–۱231.

[۲۶] Yazıcı, H. *et al.* (۲۰۱۹) ‘Comparing the alkali-silica reaction mitigation potential of admixtures by using different accelerated test methods’, *Construction and Building Materials*, ۱۹۷, pp. ۵۹۷–۶14.

[۲۷] Rashidian-Dezfouli, H., Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. (۲۰۱۸) ‘Efficiency of Ground Glass Fiber as a cementitious material, in mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete’, *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, ۱۵(July ۲۰۱۷), pp. ۱۷۱–۱80.

[۲۸] Ibrahim, S. and Meawad, A. (۲۰۱۸) ‘Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, ۱۸۲, pp. ۴۵۱–۴۵۸.

[۲۹] Kazmi, S. M. S. *et al.* (۲۰۱۷) 'Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, ۱۴۸, pp. ۲۳۱–240.

[۳۰] Saha, A. K. *et al.* (۲۰۱۸) 'The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, ۱۷۱, pp. ۷۴۳–۷۵۸.

[۳۱] Guo, S., Dai, Q. and Si, R. (۲۰۱۹) 'Effect of calcium and lithium on alkali-silica reaction kinetics and phase development', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, ۱۱۵(October ۲۰۱۸), pp. ۲۲۰–229.

[۳۲] Hargis, C. W., Juenger, M. C. G. and Monteiro, P. J. M. (۲۰۱۳) 'Aggregate passivation: Lithium hydroxide aggregate treatment to suppress alkali-silica reaction', ACI Materials Journal, ۱۱۰(۵), pp. ۵۶۷–۵۷۵.

[۳۳] Demir, İ. and Sevim, Ö. (۲۰۱۷) 'Effect of sulfate on cement mortars containing Li۲SO۴, LiNO۳, Li۲CO۳ and LiBr', Construction and Building Materials, ۱۵۶, pp. ۴۶–۵5.

[۳۴] Kim, T. and Olek, J. (۲۰۱۵) 'Modeling of early age loss of lithium ions from pore solution of cementitious systems treated with lithium nitrate', Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, 67, pp. 204–214.

[۳۵] Nixon, P. J. and Bollinghaus, R. (۱۹۸۵) 'The effect of alkali aggregate reaction on tensile and compressive strength of concrete', *Durability of building materials*, ۲(۳), pp. ۲۴۳–۲48.

[۳۶] Jones, A. E. K. and Clark, L. A. (۱۹۹۸) 'The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment', *Engineering Structures*, ۲۰(۹), pp. ۷۸۵–۷۹۱.

[۳۷] Munir, M. J. et al. (۲۰۱۷) 'Role of test method in detection of alkali–silica reactivity of concrete aggregates', Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, ۱۷۱(۵), pp. 203–221.

[۳۸] Giaccio, G. *et al.* (۲۰۰۸) 'Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction', *Cement and Concrete Research*, ۳۸(۷), pp. ۹۹۳–۱۰۰۴.

[۳۹] Ahmed, T. *et al.* (۲۰۰۳) 'The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete', *Construction and Building Materials*, ۱۷(۲), pp. ۱۲۳–۱۴۴.

[۴۰] Islam, M. S. and Ghafoori, N. (۲۰۱۵) 'Relation of ASR-induced expansion and compressive strength of concrete', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, ۴۸(۱۲), pp. ۴۰۵۵–4066.

[۴۱] Barbosa, R. A. *et al.* (۲۰۱۸) 'Influence of alkali-silica reaction and crack orientation on the uniaxial compressive strength of concrete cores from slab bridges', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, ۱۷۶, pp. ۴۴۰–۴۵۱.

[۴۲] Yurtdas, I. et al. (۲۰۱۳) 'Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar', Construction and Building Materials, ۴۷, pp. ۱۶۵–174.

[۴۳] Bektas, F. and Wang, K. (۲۰۱۲) 'Performance of ground clay brick in ASR-affected concrete: Effects on expansion, mechanical properties and ASR gel chemistry', Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd, ۳۴(۲), pp. ۲۷۳–۲۷۸.

[۴۴] Fournier, B. *et al.* (۲۰۰۴) 'Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali--Silica Reaction—A Review. MTL ۲۰۰۴-۱۱ (OP)', *Natural Resources Canada, Ottawa*.

[۴۵] Michael, D. A. T. et al. (۲۰۱۳) 'Methods for Evaluating and Treating ASR-Affected Structures: Results of Field Application and Demonstration Projects Volume II: Details of Field Applications and Analysis Final Report', II.

[۴۶] Thomas, M. D. a. et al. (۲۰۱۳) ‘Methods for Evaluating and Treating ASR-Affected Structures: Results of Field Application and Demonstration Projects; Volume I: Summary of Findings and Recommendations’, I, pp. ۱–۷۰.

[۴۷] Islam, M. S. and Ghafoori, N. (۲۰۱۸) ‘A new approach to evaluate alkali-silica reactivity using loss in concrete stiffness’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۶۷, pp. ۵۷۸–۵86.

[۴۸] Gautam, B. P. and Panesar, D. K. (۲۰۱۷) ‘The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۴۰, pp. ۳۱۰–۳20.

[۴۹] Li, Z., Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. (۲۰۱۶) ‘Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, ۱۰۲, pp. ۶۳۱–۶۳۹.

[۵۰] Smaoui, N. et al. (۲۰۰۵) ‘Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete’, Cement and Concrete Research, ۳۵(۲), pp. ۲۰۳–۲12.

[۵۱] Marzouk, H. and Langdon, S. (۲۰۰۳) ‘The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete’, Cement and Concrete Composites, ۲۵(۴–5), pp. 549–556.

[۵۲] Gautam, B. P. et al. (۲۰۱۷) ‘Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۹۵, pp. ۷۵–۸3.

[۵۳] Allard, A. et al. (۲۰۱۸) ‘Expansive behavior of thick concrete slabs affected by alkali-silica reaction (ASR)’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۷۱, pp. ۴۲۱–۴36.

[۵۴] Multon, S., Seignol, J. F. and Toutlemonde, F. (۲۰۰۵) ‘Structural behavior of concrete beams affected by alkali-silica reaction’, ACI Materials Journal, ۱۰۲(۲), pp. ۶۷–۷6.

[۵۵] Fan, S. and Hanson, J. M. (۱۹۹۸) ‘Effect of alkali silica reaction expansion and cracking on structural behavior of reinforced concrete beams’, ACI Structural Journal, ۹۵(۵), pp. ۴۹۸–۵05.

[۵۶] Hiroi, Y. et al. (۲۰۱۶) ‘Experimental and analytical studies on flexural behavior of post-tensioned concrete beam specimen deteriorated by alkali-silica reaction (ASR)’, ۱۵th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, (۲).

[۵۷] Giannini, E. R. et al. (۲۰۱۸) ‘Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۶۲, pp. ۲۵۳–264.

[۵۸] Sanchez, L. F. M. et al. (۲۰۱۵) ‘Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI)’, Cement and Concrete Research. Elsevier Ltd, ۶۷, pp. ۷۴–۹2.

[۵۹] Sanchez, L. F. M. et al. (۲۰۱۶) ‘Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, ۱۲۵, pp. ۱۱۷۸–۱۱۸۸.

[۶۰] Sanchez, L., Fournier, B. and Jolin, M. (no date) ‘Critical Parameters of the Stiffness Damage Test for Assessing Concrete Damage due to Alkali-Silica Reaction’, in Edited by T. Drimalas, JH Ideker and B. Fournier. Proceedings of the ۱۴th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Austin, Texas, USA, ۲۰۱۲a.