

طرح مخلوط بتن فوق‌توانمند به روش مدل اندریاسن اصلاح‌شده



فاضل آذرمایون

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه
مهندسی عمران، دانشکده فنی
دانشگاه تهران



علیرضا رفاعی

کتری سازه با تخصص بتن فوق‌توانمند
(UHPC) و همکار انستیتو مصالح
ساختمانی دانشگاه تهران



محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده مهندسی عمران و
سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی
دانشگاه تهران
عضو هیات مدیره انجمن بتن ایران



پیمان خداینده

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه
مهندسی عمران دانشکده فنی
دانشگاه تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

ظهور بتن فوق‌توانمند یک پیشرفت جدید در عرصه تکنولوژی بتن می‌باشد. بتن فوق‌توانمند بتنی است با مقاومت و دوام فوق‌العاده زیاد به همراه خاصیت شکل‌پذیری برگرفته از الیاف موجود در آن، بهترین گزینه برای ساخت‌وساز المان‌هایی است که تحت شرایط بارگذاری شدید مکانیکی یا محیطی مهاجم قرار دارند، می‌باشد. اما نبود آیین‌نامه مدون طرح اختلاط و هزینه تمام‌شده زیاد آن به دلیل الیاف، عیار سیمان زیاد و همچنین استفاده از سنگدانه‌هایی باکیفیت بالا، مانع از فراگیر شدن این بتن شده است. در این مقاله قصد بر ارائه کم‌هزینه‌ترین، کم‌آلاینده‌ترین و سریع‌ترین روش طرح مخلوط بتن فوق‌توانمند (در عین حال بهینه)، بر اساس مفهوم چگالی تراکمی (که اساس ساخت بتن فوق‌توانمند است) می‌باشد. یکی از مدل‌هایی که بر اساس چگالی تراکمی بیشینه پایه‌ریزی شده است، مدل اندریاسن اصلاح‌شده می‌باشد. بر اساس این مدل، طرح مخلوط بتن فوق‌توانمند، به‌گونه‌ای به دست می‌آید که فضای خالی بین ذرات تا حد امکان با ذرات کوچک‌تر (نه صرفاً خمیر سیمان) پر بشود. در این پژوهش با استفاده از این مدل چگالی تراکمی ۳۶۰ طرح مخلوط موردبررسی قرار گرفت و از بین آن‌ها، متراکم‌ترین طرح مخلوط برگزیده شد. طرح مخلوط بتن فوق‌توانمند به دست آمده بر اساس مدل اندریاسن اصلاح‌شده، شامل ۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان با ۲۵ درصد میکروسیلیس جایگذاری شده، به همراه نسبت حجمی ۲ برابر سنگدانه به سیمان، پودر سیلیس برابر با ۲۰ درصد مواد سیمانی، همچنین نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۱۷، امکان دستیابی به مقاومت فشاری ۱۶۳ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۹٫۲۶ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۱۵٫۴ مگاپاسکال را فراهم نمود. کلمات کلیدی: طرح مخلوط، بتن فوق‌توانمند، بهینه، اندریاسن اصلاح‌شده، چگالی تراکمی.

۱- مقدمه

فوق‌توانمند، ماده‌ای است با بدنه سیمانی با مقاومت فشاری ۱۵۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال، همچنین برای دارا بودن رفتار شکل‌پذیر باید حاوی مقدار کافی الیاف باشد، می‌تواند همراه با یا بدون آرماتور به کار رود. از تفاوت این نوع بتن با بتن‌های رایج می‌توان به مقاومت و دوام فوق‌العاده بالای

ازنقطه‌نظر پیشرفت علم بتن، می‌توان بتن فوق‌توانمند یا UHPC^۱ را جز آخرین ابتکارات این عرصه محسوب کرد. بر اساس توصیه انجمن مهندسين عمران فرانسه، بتن

^۱ Ultra High Performance Concrete

آن به دلیل نفوذناپذیری یا نفوذپذیری بسیار پایین آن در مقایسه با بتن‌های عادی، اشاره کرد، همین عامل این نوع بتن را برای مصارفی که نیاز به مقاومت یا دوام بالا در شرایط شدید محیطی دارد را، ایده‌آل می‌کند. از تفاوت‌های طرح مخلوط این نوع بتن با بتن‌های قبلی می‌توان به افزایش یکنواختی ساختار بتن (اغلب) با حذف درشت‌دانه‌ها، عیار بالای سیمان، دارا بودن میکروسیلیس و ریزدانه‌های سخت، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تا محدوده ۰,۱۵، افزودن فوق‌روان‌کننده برای تأمین کارایی لازم و همچنین اضافه نمودن الیاف فولادی برای جذب انرژی بالا و تأمین رفتار شکل‌پذیر لازم، اشاره کرد.

مقاومت فشاری بالا و دوام فوق‌العاده بالای بتن فوق‌توانمند، مرهون ۴ اصل زیر می‌باشد:

۱- نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین آن، در محدوده ۰,۱۵ تا ۰,۲ وزن سیمان، منجر به تشکیل ماتریس بسیار متراکم و محکم همراه با حداقل فضای مویینه و به دنبال آن، حداقل توانایی نفوذ گازها و مایعات مضر به داخل بتن می‌شود.

۲- چگالی تراکمی بیشینه، به‌خصوص کاربرد دانه‌های ریز در ماتریس خمیر، منجر به کاهش نیاز به آب برای تأمین روانی بتن تازه و به دنبال آن، منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود.

۳- استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده در مقادیر بالا برای تأمین کارایی بتن فوق‌توانمند.

۴- استفاده از الیاف فولادی یا ... برای افزایش مقاومت کششی، خمشی، برشی و تأمین شکل‌پذیری لازم.

ازنقطه‌نظر علم مواد، خصوصیات کلی بتن، توسط مشخصه‌های ریزساختار آن تعیین می‌شود. از همین رو مقاومت مکانیکی بالا و دوام فوق‌العاده آن مرهون ریزساختار فوق‌العاده متراکم آن می‌باشد. شاخص‌ترین اختلاف بین بتن فوق‌توانمند در مقایسه با سایر بتن‌ها، عدم وجود فضای مویینه و تخلخل فوق‌العاده پایین آن می‌باشد. همین عامل، دلیلی بر مقاومت فوق‌العاده بالای بتن فوق‌توانمند در مقابل نفوذ یون کلر، کربناسیون و حملات

انجماد و ذوب می‌باشد. با توجه پژوهش‌های انجام‌گرفته، روش‌های متعددی برای ارائه طرح مخلوط بتن فوق‌توانمند وجود دارد که ساختار کلی آن‌ها همگی بر اساس دستیابی به چگالی تراکمی بیشینه می‌باشد. چگالی تراکمی در یک ماده تشکیل‌شده از ذرات کوچک‌تر، به نسبت حجم ذرات جامد به حجم کل، اطلاق می‌گردد. چگالی تراکمی در بتن از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است و با بررسی و بهینه کردن آن می‌توان خصوصیات بتن از قبیل روانی، مقاومت و دوام را بهبود بخشید [۱]. همچنین مطالعات نشان داده است که مقاومت بالا، روانی مناسب و جداشدگی حداقل، مرهون دستیابی به چگالی تراکمی بیشینه (یا تخلخل کمینه) می‌باشد [۲]. به‌علاوه از دیگر مزیت‌های اصل چگالی تراکمی بیشینه می‌توان به کاهش مصرف سیمان، کاهش جمع‌شدگی خود خشک‌شدگی و خزش به میزان قابل‌توجهی اشاره کرد (به دلیل کاهش خمیر سیمان) [۳].

البته شایان‌ذکر است که با کاهش نسبت آب به سیمان، مادامی که چگالی تراکمی بهبود نیافته، نمی‌توان انتظار آن‌چنانی از افزایش مقاومت آن داشت [۴]. دلیل آن، این است که با کاهش نسبت آب به سیمان، روانی و کارایی مخلوط هم پایین می‌آید، همین عامل منجر به افزایش هوای به دام افتاده در داخل بتن شده، و درنتیجه مانع از افزایش مقاومت بتن می‌شود. [۵]

با توجه به پژوهش‌های وایل^۲، مسئله‌ای که در تأمین مقاومت و دوام بتن تأثیر غالب دارد، دستیابی به چینی‌شی است که کمترین فضای خالی را شامل بشود، ایشان حتی نشان دادند که با رعایت این اصل، حتی با سنگدانه‌های ۱۶ میلی‌متری هم می‌توان بتن فوق‌توانمند ساخت. ازاین‌رو، بر اساس مصالح محلی و با داشتن فقط دانه‌بندی آن، می‌توان با انواع پوزولان‌ها و مواد پودری، بتن‌های با مقاومت بسیار بالا ساخت [۵].

² Wille

چگالی تراکمی بیشینه طرح مخلوط، با بهینه‌سازی^۳ دانه‌بندی سنگدانه‌ها، یا روش‌های تحلیلی^۴ و یا مدل‌های المان مجزا^۵ به دست می‌آید [۶].

ایده بهبود خواص بتن به وسیله بهینه‌سازی دانه‌بندی سنگدانه‌ها، برای اولین بار توسط فرت^۶ [۷] ارائه گردید. برای بهینه‌سازی دانه‌بندی، مخلوط سنگدانه‌ها در مقابل منحنی دانه‌بندی مشخصی (معیار) مقایسه می‌شود. اولین منحنی دانه‌بندی معیار، توسط فولر و تامسون ارائه گردید [۸] و کماکان از آن برای پیشبرد برخی طرح اختلاط ها استفاده می‌شود. این منحنی از رابطه ۱ پیروی می‌شود:

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^q \quad (۱)$$

P عبارت است از درصد رد شده از الک با بازشدگی D و Dmax عبارت است از بزرگ‌ترین ذره مخلوط همچنین q عبارت است از مدول توزیع که عددی بین ۰ و ۱ بوده (فولر و تامسون q را برابر با ۰,۵ گرفتند) و معرف نسبت بین ریزدانه‌ها و درشت‌دانه ترها می‌باشد.

اندریاسن و اندرسن^۷ [A&A] [۹] مطالعات گسترده‌ای بر روی مدل فولر و تامسون انجام دادند و مدل‌های چگالی تراکمی نیمه تجربی از دانه‌بندی پیوسته ارائه کردند. PSDs^۸ که طبق همان رابطه فولر و تامسون تعریف می‌شود، اما مقدار q را عددی بین ۰,۳۳ و ۰,۵ گرفتند. همچنین آن‌ها دریافتند که بهینه‌ترین تراکم به ازای q برابر با ۰,۳۷ به دست می‌آید. ازاین‌رو منحنی PSD با q=0.37 به منحنی A&A معروف می‌باشد. البته گفتنی است که، اگر درشت‌دانه‌ها به صورت گوشه‌دار باشد، برای دستیابی به ایده‌آل ترین منحنی، از q کوچک‌تری استفاده می‌کنند،

به عبارت دیگر، q کوچک‌تر منجر به افزایش ریزدانه‌ها برای پر کردن فضای درشت‌دانه‌ها در طرح مخلوط می‌شود. با این وجود، مقدار بهینه q در آزمایشگاه و بر اساس مشخصه‌های ذرات، به دست می‌آید.

اما با این وجود، این مدل از ارائه بهترین چگالی تراکمی برای دانه‌های ریزتر از ۲۵۰ میکرومتر که در بتن‌های SCC^۹، HPC^{۱۰} و UHPC به وفور به کار می‌رود، عاجز است [۱۰].

فانک و دینگر [۱۱] اعلام کردند که هر طرح مخلوطی، دارای کوچک‌ترین اندازه ذرات می‌باشد، بدین ترتیب اقدام به اصلاح مدل A&A نمودند. بدین ترتیب مدل جدیدی به نام مدل اصلاح‌شده A&A^{۱۱} که شامل کوچک‌ترین اندازه دانه طرح مخلوط می‌باشد، وارد ادبیات فنی شد و از رابطه ۲ پیروی می‌کند:

$$p(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (۲)$$

Dmin عبارت است از اندازه کوچک‌ترین دانه به کاررفته در طرح مخلوط و سایر پارامترها همان پارامترهای مربوط به رابطه قبلی می‌باشد.

برای انتخاب طرح مخلوط بهینه که معرف پرچگالی ترین حالت تراکمی نیز باشد، باید به یک توازی بین طرح مخلوط میکس و طرح مخلوط معیار رسید، ازاین‌رو از الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس روش حداقل مربعات^{۱۲} LSM که در رابطه 3 آورده شده، بهره برده می‌شود. اختلاف بین منحنی معیار و منحنی طرح میکس که با مجموع مربعات تفاضل به ازای هراندازه مشخص دانه برای طرح معیار و طرح میکس یا به اصطلاح RSS بیان می‌شود، باید کمینه شود. بدین صورت طرح میکسی که کمترین RSS را داشته باشد به عنوان طرح مخلوط بهینه برگزیده می‌شود.

³ Optimization

⁴ Analytical methods

⁵ DCMs or Discrete Element Models

⁶ Feret

⁷ Andreasen and Andersen

⁸ Particle Size Distributions

⁹ Self consolidating concrete

¹⁰ High performance concrete

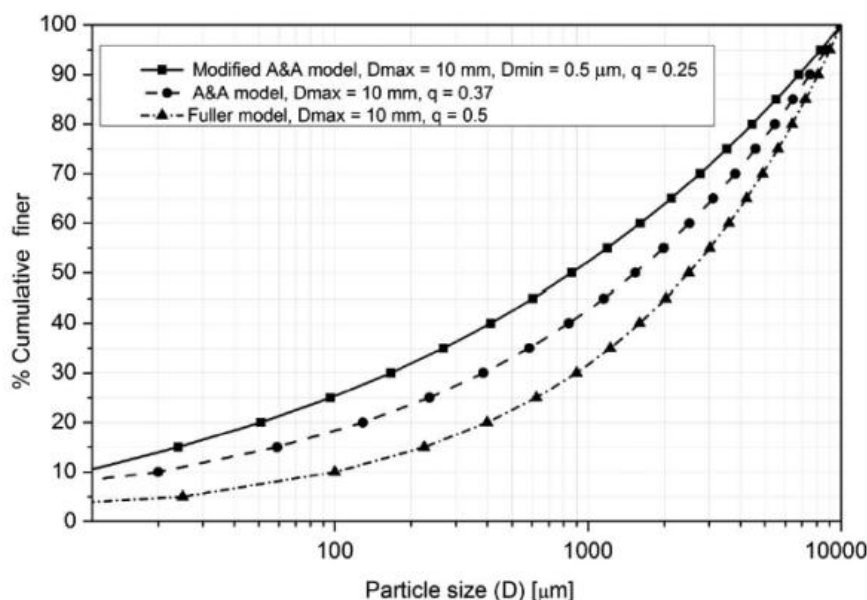
¹¹ Modified Andreasen and Andersen model

¹² the Least Squares Method

$$RSS = \sum_{i=1}^n [P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1})]^2 \quad (3)$$

محققان برای دستیابی به بهینه‌ترین چگالی تراکمی برای هم‌بتن‌های خودتراکم SCC و هم‌بتن‌های فوق توانمند (و

یا هر نوع بتنی که نسبت ریزدانه‌ای بالایی داشته باشد) از منحنی A&A اصلاح‌شده، استفاده می‌کنند [۱۰، ۱۲-۱۵]. شکل ۱ مقایسه‌ای برای منحنی مدل فولر و تامسون، A&A و A&A اصلاح‌شده در یک نمودار، می‌باشد. گفتنی است از $q=0.25$ برای A&A اصلاح‌شده استفاده شده است.



شکل ۱ مدل فولر، A&A و A&A اصلاح‌شده

۲-۱-۲ سنگدانه

در این پژوهش از دو نوع ماسه سلیسی تهیه شده از شرکت آریناپلیمر، با سیلیس بالای ۹۰ درصد با وزن مخصوص ۲٫۴ کیلوگرم و درصد جذب آب به ترتیب ۱٫۶۸ و ۱٫۸۷ درصد استفاده شده است.

۲-۱-۳ میکروسیلیس

مطابق نتایج مطالعات انجام رفته در گذشته میکروسیلیس تولید صنایع فرو آلیاژ ایران (ازنا) به سبب خلوص بیشتر، خواص بهتری در بتن فوق توانمند ایجاد می‌کند. درصد سیلیس برابر با ۹۱٪ و وزن مخصوص ۲٫۲ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است: (لازم به ذکر این مسئله می‌باشد که دانه‌بندی میکروسیلیس در یکی از کارخانه‌های تولیدکننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

۲-۱-۴ پودر سیلیس

۲- برنامه آزمایشگاهی

در ابتدا لازم به ذکر این نکته می‌باشد که برنامه آزمایشگاهی به همراه تمام عملیات طرح مخلوط، میکس، عمل‌آوری، آزمایشات مکانیکی و... در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران صورت گرفته است.

ابتدا مشخصات و دانه‌بندی مصالح ذکر می‌شود سپس مدل به کاررفته به طور تفصیل بیان می‌گردد.

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱ سیمان

سیمان از نوع ۵۲۵-۱ تولید کارخانه سیمان شهرکرد، با مقاومت فشاری ملات استاندارد ۵۰٫۴ مگاپاسکال بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است: (لازم به ذکر این مسئله می‌باشد که دانه‌بندی سیمان دریکی از کارخانه‌های تولیدکننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

مواد سیمانی، حد مجاز افزودنی در این طرح مخلوط به شمار آمد.

۲-۲ طرح اختلاط بر اساس مدل اندریاسن اصلاح شده

مدل A&A اصلاح شده قصد دارد به گونه ای مقدار هر یک از مصالح را تعیین کند که طرح نهایی در متراکم ترین حالت خود بر اساس مصالح موجود، تشکیل شود. برای این کار ۳۶۰ طرح مخلوط بر اساس عیار سیمان، درصد میکروسیلیس، درصد پودر سیلیس، ماسه ۱ و ماسه ۲ را تشکیل داده و RSS هریک از آن ها را محاسبه کرده و در نهایت طرحی که کمترین RSS یا به عبارت دیگر، طرحی که شبیه ترین منحنی را به منحنی A&A اصلاح شده دارد را انتخاب و بعد از یکسری اصلاحات جزئی مثل تنظیم مقدار روان کننده، آزمایش مقاومت فشاری و خمشی و کششی بر روی آن انجام شد.

قبل از توضیح مفصل روش، ذکر چند نکته در اینجا ضروری می باشد:

- طرح مخلوط به روش حجمی محاسبه شده است.

- در مورد مدول توزیع (q) گفتنی است که برای مدل فولر برابر با ۰,۵، برای مدل A&A برابر با ۰,۳۷ و برای A&A اصلاح شده کمتر از این مقادیر می باشد. بروروز^{۱۳} در سال ۲۰۰۸ نشان داد که برای رسیدن به طرح بهینه باید q بین ۰ و ۰,۲۸ باشد [۱۶, ۱۷].

از همین رو پژوهش حاضر با تمرکز بر روی $q=0.22$ و $q=0.25$ انجام گرفته است. محاسبات و آزمایشات نشان داده شده در ادامه، بر پایه $q=0.22$ می باشد.

ابتدا با توجه به رابطه ۲، P(D) محاسبه و دانه بندی معیار یا هدف به دست آورده شد. نحوه توزیع اندازه ذرات یا به تعبیری، دانه بندی طرح معیار در کنار منحنی دانه بندی سایر مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است.

پودر سیلیس به عنوان فیلر در تولید بتن فوق توانمند نقش مهمی دارد. پودر سیلیس حاضر تهیه شده از شرکت آریناپلیمر با درصد سیلیس بالای ۹۰ درصد بوده و منحنی دانه بندی آن در شکل ۲ آمده است: (لازم به ذکر این مسئله می باشد که دانه بندی پودر سیلیس در یکی از کارخانه های تولید کننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

۲-۱-۵ الیاف

الیاف مورد استفاده در بتن فوق توانمند کوتاه و مستقیم و نرم از فولاد پرمقاومت ساخته می شوند. در این پژوهش از الیاف فولادی وارداتی از شرکت STRATEC آلمان استفاده شده است. مشخصات این نوع الیاف در جداول ۱ و ۲ آمده است:

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی الیاف

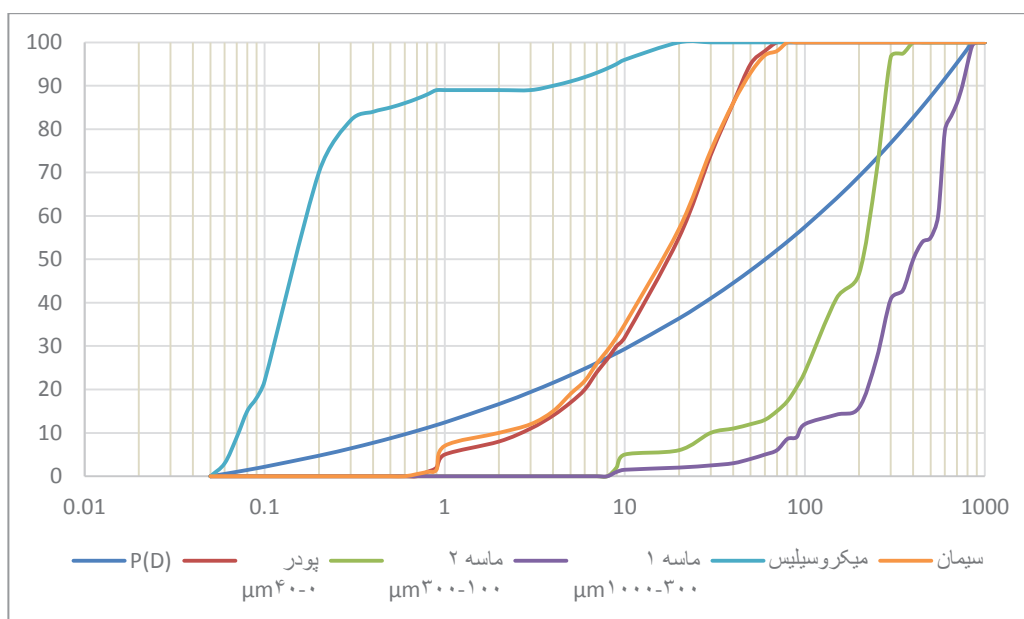
مشخصات	طول (mm)	عرض (mm)	نسبت طول به قطر
فیزیکی الیاف	۱۳	0.17	74

جدول ۲ - مشخصات مکانیکی الیاف

مشخصات مکانیکی الیاف	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (gr/cm^3)
	۲۰۰	۲۰۰۰	۷,۸۵

۲-۱-۶ افزودنی روان کننده

با توجه به نسبت آب به سیمان بسیار پایین بتن فوق توانمند، استفاده از فوق روان کننده ضروری می باشد. در این پژوهش از فوق روان کننده ساخت شرکت شیمی ساختمان بانام تجاری P10N بر پایه پلی کربکسیلاتر با وزن مخصوص ۱,۱ گرم بر سانتی مترمکعب که حدود ۶۰ درصد آن را آب تشکیل می دهد، استفاده شده است. با توجه به تماسی که بعدها با کارشناس شرکت مربوطه گرفته شد، اذعان کردند که بیشتر از ۲ درصد افزودنی، بر مخلوط اثر سوء خواهد گذاشت. از همین رو بعدها مقدار ۲ درصد



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه ۱، ماسه ۲، پودر سیلیس، سیمان و میکروسیلیس در کنار منحنی P(D)

در جدول ۳ و ۴، طرح مخلوط هرکدام بر اساس متغیرهای نشان داده شده است. برای تسهیل در دسته‌بندی ۳۶۰ طرح، مواد پودری شامل سیمان و میکروسیلیس و پودر سیلیس در جدول ۳ با ترکیب‌های ۲۴ گانه و ماسه‌ها در جدول ۴ با نسبت‌های ۱۵ گانه آورده شده است.

جدول ۳- ترکیب سیمان، میکروسیلیس، پودر سیلیس و افزودنی

ترکیب	وزن سیمان	درصد میکروسیلیس نسبت به مواد سیمانی	وزن میکروسیلیس	مواد سیمانی	درصد پودر سیلیس نسبت به مواد سیمانی	وزن پودر سیلیس	w/b	آب کل	افزودنی
1	850	20	213	1063	20	213	0.17	180.71	32
2	850	20	213	1063	25	266	0.17	180.71	32
3	850	25	283	1133	20	227	0.17	192.61	32
4	850	25	283	1133	25	283	0.17	192.61	32
5	780	20	195	975	20	195	0.17	165.75	32
6	780	20	195	975	25	244	0.17	165.75	32
7	780	25	260	1040	20	208	0.17	176.8	32
8	780	25	260	1040	25	260	0.17	176.8	32
9	700	20	175	875	20	175	0.17	148.75	32
10	700	20	175	875	25	219	0.17	148.75	32
11	700	25	233	933	20	187	0.17	158.61	32
12	700	25	233	933	25	233	0.17	158.61	32
13	630	20	158	788	20	158	0.17	133.96	32
14	630	20	158	788	25	197	0.17	133.96	32
15	630	25	210	840	20	168	0.17	142.8	32
16	630	25	210	840	25	210	0.17	142.8	32
17	560	20	140	700	20	140	0.17	119	32
18	560	20	140	700	25	175	0.17	119	32
19	560	25	187	747	20	149	0.17	126.99	32
20	560	25	187	747	25	187	0.17	126.99	32
21	500	20	125	625	20	125	0.17	106.25	32
22	500	20	125	625	25	156	0.17	106.25	32
23	500	25	167	667	20	133	0.17	113.39	32
24	500	25	167	667	25	167	0.17	113.39	32

جدول ۵- نتایج بهینه ۱۰ طرح برتر، بر اساس RSS آن‌ها از میان ۳۶۰

طرح مخلوط

نسبت	ترکیب	RSS	ردیف
6	15	353	1
7	15	358	2
5	15	372	3
8	15	387	4
5	16	396	5
4	16	401	6
6	16	413	7
4	15	417	8
3	16	427	9
9	15	442	10

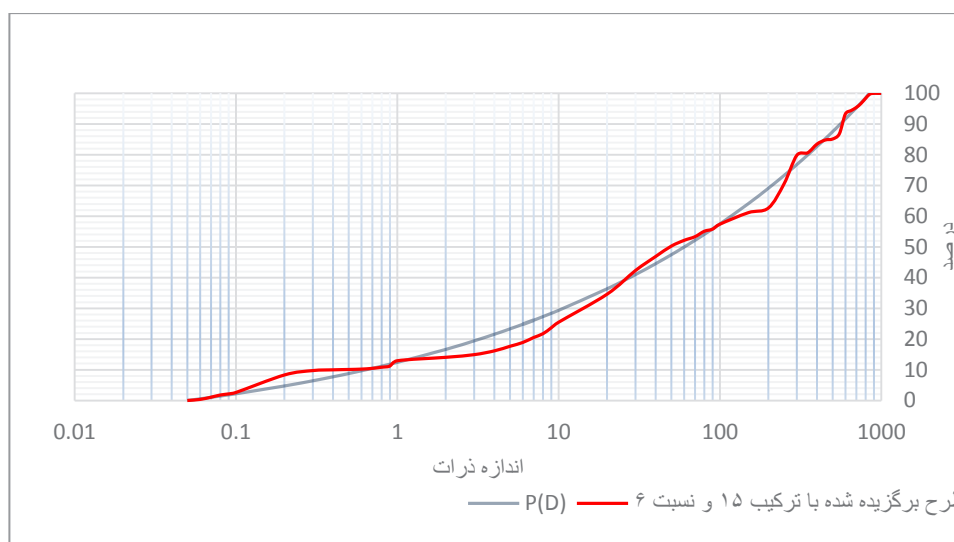
ملاحظه می‌شود که ترکیب ۱۵ که طرح مخلوط سیمان و میکروسیلیس و پودر سیلیس یکسانی دارند، بهینه‌ترین ترکیب را از میان ۲۴ ترکیب و نسبت ۶ که معرف نسبت بین دو نوع ماسه می‌باشد، بهترین تراکم ماسه‌ای را از میان ۱۵ نسبت، در کنار یکدیگر تشکیل داده‌اند. بنابراین ترکیب ۱۵ و نسبت ۶ به‌عنوان طرح بهینه اولیه طبق مدل A&A اصلاح‌شده، انتخاب می‌شود.

اگر مقایسه‌ای بین منحنی دانه‌بندی معیار (A&A اصلاح‌شده) و منحنی طرح انتخاب‌شده انجام شود، به‌صورت شکل ۲ خواهد بود، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شبیه‌ترین طرح اختلاط از بین ۳۶۰ طرح به طرح معیار یا $P(D)$ ، طرح ترکیب ۱۵ با نسبت ۶ می‌باشد.

جدول ۴- نسبت ماسه نوع ۱ و ۲

شماره	نسبت های ماسه	
	ماسه ۱	ماسه ۲
1	0.9	0.1
2	0.85	0.15
3	0.8	0.2
4	0.75	0.25
5	0.7	0.3
6	0.65	0.35
7	0.6	0.4
8	0.55	0.45
9	0.5	0.5
10	0.45	0.55
11	0.4	0.6
12	0.35	0.65
13	0.3	0.7
14	0.25	0.75
15	0.2	0.8

RSS برای همه ۳۶۰ طرح محاسبه و ۱۰ طرحی که کمترین RSS را نتیجه داده بودند، در جدول ۵ نشان داده شده است:



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی معیار و طرح برگزیده شامل ترکیب ۱۵ و نسبت ۶

۳-۲ طرح مخلوط نهایی

طرح مخلوط بهینه اولیه با ترکیب ۱۵ و نسبت ۶، در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- طرح مخلوط بهینه اولیه با ترکیب ۱۵ و نسبت

سیمان ($\frac{Kg}{m^3}$)	درصد میکروسیلیس نسبت به مواد سیمانی %	میکروسیلیس ($\frac{Kg}{m^3}$)	درصد پودرسیلیس نسبت به مواد سیمانی %	پودرسیلیس ($\frac{Kg}{m^3}$)	مواد سیمانی ($\frac{Kg}{m^3}$)	ماسه ۱ ($\frac{Kg}{m^3}$)	ماسه ۲ ($\frac{Kg}{m^3}$)	$\frac{W}{b}$	افزودنی روان کننده ($\frac{Kg}{m^3}$)	الیاف %
۶۳۰	۲۵	۲۱۰	۲۰	۱۶۸	۸۴۰	۶۳۷,۱	۳۴۳,۰۵	۰,۱۷	۳۲	۱

ارزیابی طرح اولیه بر اساس مقاومت فشاری صورت گرفت، بدین صورت که ۳ عدد قالب مکعبی ۱۰ سانتی متری با طرح اولیه، پر و به مدت ۵۰ ثانیه بر روی میز ویبره تحت ارتعاش قرار گرفت، پس از ۲ روز از قالب جدا و ۳ روز در حوضچه آب داغ ۸۷ درجه قرار گرفت، سپس از حوضچه درآورده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. مقاومت فشاری میانگین برابر با ۱۳۶,۴ مگاپاسکال به دست آمد. بار دیگر همین عملیات بر روی همین طرح اما این بار با میزان افزودنی ۲,۵ و ۲ درصد مواد سیمانی تکرار شد، مقاومت فشاری میانگین به دست آمده به ترتیب برابر با ۱۴۱ و ۱۵۱ مگاپاسکال شد. یعنی کاهش درصد روان کننده از ۳,۸ به ۲ درصد مواد سیمانی، منجر به افزایش ۱۴ مگاپاسکالی مقاومت فشاری بتن گردید. جهت اطمینان از نتایج مدل اندریاسن اصلاح شده، آزمایش مقاومت فشاری بر روی همان طرح ها اما هرکدام به طور مجزا با ۲۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس و سیمان با عیار ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انجام گرفت و همگی مقاومت پایین تری را نتیجه دادند. همچنین بر اساس مدل A&A اصلاح شده برای $q=0.25$ دوباره تراکم ۳۶۰ طرح تحت بررسی صورت گرفت و طرح برگزیده شده آن، تحت آزمایش فشاری قرار گرفت و مقاومت ۱۱۵ مگاپاسکال را نتیجه داد. (نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط اولیه

در زیر مراحل میکس بتن فوق توانمند با توجه به پژوهش های صورت گرفته توسط وایل آورده شده است [۵]

۱. میکس خشک سنگدانه و میکروسیلیس به مدت ۵ دقیقه

۲. اضافه کردن سیمان و سایر مواد سیمانی و میکس به مدت ۵ دقیقه دیگر

۳. اضافه کردن مخلوط کل آب و یک سوم روان کننده، در طول مدت ۱ دقیقه

۴. اضافه کردن دوسوم روان کننده به مخلوط در طول مدت ۱ دقیقه

۵. افزایش سرعت میکس

۶. اضافه کردن الیاف (در صورت لازم)

۷. ادامه میکس تا رسیدن به روانی بهینه

روانی بتن فوق توانمند طبق روش C1437ASTM اندازه گیری شد، بدین صورت که با استفاده از میز روانی، جام و میله کوبنده، ملات اختلاط شده در ۲ مرحله داخل جام ریخته می شود و در هر مرحله با استفاده از میله کوبنده ۲۰ ضربه جهت تراکم به ملات زده می شود. بعد از گذشت ۱ دقیقه، جام را بالا کشیده و با دسته ی میز روانی طی ۱۵ ثانیه ۲۵ ضربه زده می شود. قطر دایره پخش ملات را در ۴ قسمت با استفاده از کولیس اندازه گیری کرده و میانگین این اعداد به عنوان روانی ملات معرفی می شود.

به دست آمده بر اساس مدل A&A اصلاح شده و تغییرات صورت گرفته هر کدام در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس تغییری که داشته‌اند

شماره طرح	مدول توزیع	نوع تغییر	مقاومت فشاری میانگین MPa	وزن مخصوص $(\frac{kg}{m^3})$	روانی mm
۱	۰,۲۲	بدون تغییر	۱۳۶	2387	۱۶۴
۲	۰,۲۲	کاهش افزودنی به ۲,۵ درصد	۱۴۱	2401	۱۵۳
۳	۰,۲۲	کاهش افزودنی به ۲ درصد	۱۵۱	2417	135
۴	۰,۲۲	کاهش میکروسیلیس به ۲۰ درصد	۱۲۶	2409	۱۶۰
۵	۰,۲۲	کاهش میکروسیلیس به ۱۵ درصد	۱۱۲	2404	۱۵۴
۶	۰,۲۲	عیار سیمان ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۱۳۲	2450	۱۶۲
۷	۰,۲۵	بدون تغییر	۱۱۵	2396	۱۵۵

عمل‌آوری آن‌ها، همه آزمون‌ها جهت آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی از آب خارج شدند.

۳- نتایج آزمایش

۱-۳ خواص بتن تازه

روانی بتن فوق‌توانمند طبق استاندارد ASTM C1437 برابر با ۱۳۵ میلی‌متر به دست آمد. این میزان روانی نشان از کارایی تقریباً متوسط طرح مخلوط دارد.

۲-۳ خواص بتن سخت

۱-۲-۳ مقاومت فشاری

مهم‌ترین آزمایش برای تعیین کیفیت بتن مثل مشخصات مکانیکی و دوامی، مقاومت فشاری می‌باشد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای کنترل کیفیت بتن، نسبت‌های اختلاط، روش مخلوط کردن، ریختن بتن و اثرات افزودنی باشد. با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته تأثیر ابعاد نمونه در مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند، ناچیز می‌باشد. گریبیل نشان داده است که می‌توان از قالب مکعبی ۱۰ سانتی‌متری به جای قالب استوانه‌ای استاندارد (قطر ۱۰ سانتی‌متری) استفاده کرد [۱۹].

طبق استاندارد ASTM C39 بر روی ۱۲ آزمون مکعبی ۱۰ سانتی‌متری، آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گرفت. نتایج بر روی جدول ۸ قابل مشاهده است:

جهت اطمینان، دوباره آزمایش مقاومت فشاری بر روی طرح اصلاح شده با ۲ درصد افزودنی روان کننده تکرار شد و مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال به دست آمد. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، همین طرح را به‌عنوان طرح بتن فوق‌توانمند انتخاب و آزمایشات بیشتر بر روی آن انجام گرفت.

۲-۴ ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری

هدف انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت کششی ۱۴ و ۲۸ روزه و مقاومت خمشی ۲۸ روزه می‌باشد. باید از قبل قالب‌های مربوطه آماده شده باشد، آزمون‌ها شامل ۹ عدد مکعبی مربعی ۱۰ سانتی، ۶ آزمون بریکت کششی ملات استاندارد و ۳ آزمون خمشی. پس از اتمام میکس، قالب‌های مکعبی مربعی و مستطیلی روغن کاری شده، جهت پر شدن بر روی میز ویبره قرار داده می‌شوند و به مدت ۵۰ ثانیه ویبره زده می‌شود. همچنین برای قالب بریکتی طبق استاندارد ASTM C190 بتن داخل قالب ریخته و با استفاده از انگشت شست ۱۲ ضربه جهت ایجاد تراکم کافی به آن زده می‌شود. پس از اتمام بتن‌ریزی همه آن‌ها به مدت دو روز در قالب ماندند. پس از قالب برداری به مدت ۲۶ روز در حوضچه عمل‌آوری آب با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. با اتمام دوره

جدول ۸- مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس سن بتن

سن نمونه	وزن مخصوص (kg/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری میانگین (MPa)
۷ روزه	۲۴۳۴	۱۱۲,۹	۱۱۳,۳
	۲۴۴۹	۱۱۵,۱	
	۲۴۵۰	۱۱۱,۹	
۱۴ روزه	۲۴۵۴	۱۲۲,۹	۱۲۳,۹
	۲۴۶۰	۱۲۹,۵	
	۲۴۳۲	۱۱۹,۴	
۲۸ روزه	۲۴۲۵	۱۵۶,۲	۱۶۳
	۲۴۳۰	۱۶۴	
	۲۴۰۹	۱۶۹	

خود نشان داد و تنش کششی بیشتر و بیشتر شد تا اینکه در مقاومت کششی به گسیختگی رسید. به‌طور متوسط می‌توان گفت که مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند در حدود ۷ تا ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. برای طرح حاضر این عدد برابر با ۹,۲۶ مگاپاسکال می‌باشد، این در حالی است که ۸۳ درصد مقاومت کششی خود را ظرف ۱۴ روز اول بدست آورده است.

۳-۲-۳ مقاومت خمشی

با توجه به استاندارد ASTM C293 نمونه‌های منشوری با مقطع $۵۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد. در این روش نمونه منشوری به طور افقی زیر جک روی دو تکیه گاه قرار می‌گیرد و بار در یک نقطه به وسط دهانه اعمال می‌شود تا نمونه گسیخته شود. مقاومت خمشی از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (۴)$$

R بیانگر مدول گسیختگی برحسب MPa، P حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه برحسب N، L طول دهانه، b میانگین عرض، d میانگین ارتفاع نمونه که همگی برحسب mm می‌باشد.

نمونه های بتنی فوق توانمند پس از گسیختگی (اولین ترک) نیز توانایی تحمل بار تا گسیختگی نهایی را دارا می‌باشد. برای طرح مخلوط موردنظر مقاومت خمشی میانگین ۳ آزمونه برابر با ۱۶,۴ مگاپاسکال آمد. این در حالی است که برای بتن های فوق توانمند به طور متوسط بین ۱۴ تا ۱۹ مگاپاسکال می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای طرح مخلوط بتن فوق توانمند از مدل A&A اصلاح‌شده استفاده شد:

۱- ساخت بتن فوق توانمند فقط ترکیب سنگدانه و سیمان و میکروسیلیس کنار همدیگر نمی‌باشد، بلکه باید اصل چگالی تراکمی براساس چینش صحیح ذرات کنار یکدیگر و

شایان ذکر است که شکست نمونه‌های بتنی با صدای انفجار همراه بوده اما به دلیل وجود الیاف هیچ‌گونه پرتاب تکه‌های شکسته شده دیده نشد.

ملاحظه می‌شود که طرح بتن فوق توانمند ۷۰ درصد مقاومتش را طی ۷ روز و ۷۶ درصد آن را طی ۱۴ روز کسب می‌کند.

۳-۲-۲ مقاومت کششی

طبق استاندارد ASTM C190 آزمایش کششی باید با سرعت ۱۱۰ ± ۲۶۴۰ نیوتون بر دقیقه انجام گیرد. نتایج مقاومت کششی برای نمونه‌های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه در جدول ۱۴ نشان داده شده است:

جدول ۱- مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس سن بتن

شماره آزمون	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت کششی میانگین (MPa)
۱۴ روزه	۶,۵	۷,۷
	۹,۱	
	۷,۵	
۲۸ روزه	۸,۴۸	۹,۲۶
	۹,۸۳	
	۹,۴۸	

نحوه شکست نمونه کششی به گونه ای بود که بعد از رخداد اولین ترک، باز هم توانایی تحمل تنش کششی از

دانه‌بندی اصولی از بزرگترین تا ریزترین، در صدر الویت‌ها قرار بگیرد.

۲- صحت مدل A&A اصلاح‌شده برای طرح مخلوط بتن فوق توانمند با مصالح داخلی، در محدوده آزمایشات انجام گرفته مورد تأیید قرار گرفت. از این رو با رعایت اصل چگالی تراکمی بیشینه، با داشتن دانه‌بندی مصالح محلی و انواع پوزولان‌ها و مواد پودری و عدم الزام به بعضی محدودیت‌های خاص از قبیل اندازه ذرات مصالح، می‌توان بتن‌هایی با مقاومت بسیار بالا ساخت. این امر که منجر به طرح اصولی و راحت بتن فوق توانمند می‌شود، مطلوب کارفرمایان و پیمانکاران بوده و به فراگیری بتن فوق توانمند کمک شایانی می‌کند.

۳- مقدار بهینه مدول توزیع در مدل A&A اصلاح‌شده برابر با ۰,۲۲ به دست آمد که مورد تأیید پژوهش‌های قبلی می‌باشد [۱۸].

۴- استفاده از مدل A&A اصلاح‌شده برای طراحی بتن فوق توانمند منجر به صرفه‌جویی در زمان و هزینه شده و با کمترین نیاز به تست و خطای آزمایشگاهی انجام می‌گیرد.

۵- از نظر مقاومت مکانیکی، بتن فوق توانمند موردنظر، در رده متوسط به بالای بتن‌های فوق توانمند حال حاضر قرار

می‌گیرد و از نظر طرح مخلوط، با توجه به مزایای زیر جزء بتن‌های ایده‌آل حساب می‌شود:

- عیار سیمان بسیار پایین طرح مخلوط هم از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است و هم از نظر آلودگی محیط زیستی و انتشار گاز کربن دی‌اکسید، آسیب کمتری نسبت به طرح‌های دیگر بتن فوق توانمند می‌رساند. ثانیاً موجب استفاده کمتر خمیر سیمان در بتن شده، بنابراین منجر به کاهش حرارت هیدراسیون و ریزترک‌ها، کاهش جمع‌شدگی خودبه‌خودی و خزش به میزان قابل توجهی می‌شود.

- مقدار بهینه افزودنی روان‌کننده، شامل ۲ درصد افزودنی روان‌کننده به دست آمد، که طبق پژوهش‌های وایل [۵] در محدوده بهینه قرار گرفته است.

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت آرینا پلیمر، شیمی ساختمان و صنایع سیمان شهرکرد جهت همکاری در تأمین مصالح موردنیاز، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- مراجع

- [1] Kwan A, Li L, Fung W. (2012). "Wet packing of blended fine and coarse aggregate". *Materials and structures*.;45(6):817-28.
- [2] RILEM T. CPC 11.3 (1984). "Absorption of water by concrete by immersion under vacuum",. *RILEM Recommendation for the Testing and Use of Constructions Materials*, E & FN SPON: London. 1994:36-7.
- [3] Schmidt M, Fehling E. (2005). "Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe". *ACI Special publication*.;228:51-78.
- [4] Sohail MG, Wang B, Jain A, Kahraman R, Ozerkan NG, Gencturk B, et al. (2018). "Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016". *Journal of Materials in Civil Engineering*.;30(3).
- [5] Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. (2011). "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way". *ACI materials journal*.;108(1)
- [6] Fennis SA, Walraven JC. (2012). "Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design". *Heron*, 57 2. 2012.
- [7] Feret R. (1897). "Etude sur la constitution intime des mortiers hydrauliques". *Bulletin de la Societe d'Encouragement pour l'Indutrie Nationale*.;96:1591-625.

- [8] Fuller WB, Thompson SE. (1907). "The laws of proportioning concrete"..
- [9] Andreasen A. (1930). "Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)". *Kolloid-Zeitschrift*.;50(3):217-28.
- [10] Brouwers H, Radix H, editors. (2005). "Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution". *First International Symposium on Design, Performance and Use of SCC, Hunan, China*;
- [11] Funk JE, Dinger DR. (2013). "Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing": Springer Science & Business Media;
- [12] Hunger M. (2010). "An integral design concept for ecological self-compacting concrete"..
- [13] Yu R, Spiesz P, Brouwers H. (2014). "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". *Cement and concrete research*.;56:29-39.
- [14] Van Tuan N, Ye G, Van Breugel K, Fraaij AL, Dai Bui D. (2011). "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete". *Construction and Building Materials*.;25(4):2030-5.
- [15] Yu R, Spiesz P, Brouwers H. (2015). "Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres". *Construction and building materials*.;79:273-82.
- [16] Brouwers HJH, Radix HJ. (2005). "Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study". *Cement and Concrete Research*. ۳۶-۲۱۱۶:(۱۱)۳۵;
- [17] Brouwers H. (2006). "Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. *Physical review*" E.;74(3):031309.
- [18] Silva AP, Pinto DG, Segadães AM, Devezas TC. (2010). "Designing particle sizing and packing for flowability and sintered mechanical strength". *Journal of the European Ceramic Society*.;30(14):2955-62.
- [19] Graybeal B, Davis M. (2008). "Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete". *ACI Materials Journal*.;105(6):603.
- [20] Rafiee, Alireza. (2012). "Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete". *kassel university press GmbH* ;
- [۲۱] جعفری نژاد، س. (۱۳۹۶). "بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی بین بتن معمولی و بتن فوق توانمند". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.
- [۲۲] موسوی، م. (۱۳۸۸). "تاثیر مشخصات سنگدانه بر ویژگی‌های رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم مورد کاربرد در سرریز سدهای بتنی". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه تهران.
- [۲۳] حاجی اسمعیلی، ا. (۱۳۹۴). "بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن فوق توانمند". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.
- [۲۴] حسین پناهی، آ. (۱۳۹۶). "مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی طرح مخلوط بهینه بتن از طریق بهینه سازی ساختار جامد". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.

بررسی موردی تأثیر نگهداری سیمان طی ۲ ماه بر روند افت مقاومت فشاری بتن و ملات استاندارد



مهدی چینی
استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عضو هیات مدیره انجمن علمی بتن ایران



علی اکبر کفاش بازاری
رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و
توسعه کارخانه سیمان تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

زمان نگهداری سیمان در سیلو موضوعی است که همواره کمتر مورد توجه بوده است. در این مطالعه برای تبیین این موضوع یک فرآیند طراحی گردید. لذا حدود ۱۰۰ کیلوگرم نمونه سیمان تهیه شد و در ظرفی مشابه سیلو سیمان (از نظر دما و رطوبت) به مدت ۵۶ روز نگهداری گردید. در ادامه پس از ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز نگهداری در این ظروف، از این سیمان ملات استاندارد و مخلوط بتنی (۶ بهر مجزا) تهیه گردید. مقاومت فشاری آزمونه‌های ۲، ۷ و ۲۸ روزه ملات استاندارد و ۷ و ۲۸ روزه بتن برای هر شش سری ملات و بتن اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که ماندن سیمان به تدریج افت مقاومتی ایجاد می‌کنند. این افت مقاومت برای سیمان با عمر ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز در آزمونه‌های ۲۸ روزه به ترتیب ۰.۲٪، ۰.۴٪، ۰.۶٪ و ۰.۹٪ و ۱.۳٪ بود. همچنین برای آزمونه‌های ۷ روزه به ترتیب ۰.۸٪، ۰.۴٪، ۰.۸٪ و ۰.۹٪ می‌باشد. بنابراین در صورتیکه سیمان در سیلو بماند، طی ۲ ماه به تدریج دچار افت مقاومت به ویژه در سن ۲۸ روزه نسبت به نمونه سیمان تازه می‌شود. کلمات کلیدی: سیمان، بتن، نگهداری، مقاومت فشاری.

۱- مقدمه (تاریخچه و هدف پژوهش):

رامگ و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر ذخیره‌سازی سیمان بر خواص اولیه سیستم‌های سیمانی را بررسی نمودند. آنها به منظور تأیید اهمیت پیش‌هیدراتاسیون برای کاربردهای عملی، یک سری آزمایش‌هایی در موسسه تحقیقات و آزمایش مواد فدرال آلمان (BAM) انجام دادند. بررسی

آنها بر روی انواع مختلف ملات و بتن نشان داد که تأثیر شرایط ذخیره‌سازی برای بتن‌های خاص آمیخته (مخلوط بهینه شده و حاوی مواد افزودنی) بسیار واضح‌تر است. با این وجود، این اثرات برای بتن معمولی نیز رخ می‌دهد و نباید از آنها چشم‌پوشی کرد [۲].

سوریکانتا (۲۰۱۷) تأثیر ذخیره‌سازی بر مقاومت سیمان را مطالعه نمود. به زعم او علیرغم بهترین اقدامات احتیاطی

صورت گرفته برای ذخیره سیمان، مشخص می شود که طی ذخیره طولانی مدت، مقاومت سیمان کاهش می یابد. بنابراین باید تلاش شود تا حد امکان ذخیره سازی سیمان برای زمان کمتری صورت گیرد. از این رو باید قبل از آنکه سیمانی که مدت زیادی ذخیره شده است در کارهای مهم مصرف شود، مقاومت آن بررسی گردد. کاهش مورد انتظار مقاومت بتن با سیمان ذخیره شده در جدول ۱ آورده شده است. [۳].

جدول ۱- میزان کاهش مقاومت سیمان طی ذخیره سازی و مرور زمان [۳]

مدت ذخیره سازی	تازه	۳ ماه	۶ ماه	۱ سال	۵ سال
نسبت به مقاومت ۲۸ روزه (%)	۱۰۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰

متلکاه و سروشیان (۲۰۱۹) مقاله ای با عنوان "ماندگاری سیمان فعال شده قلیایی: تأثیر شرایط نگهداری و مدت زمان آن" را ارائه نمودند. به زعم آنها سیمان های هیدرولیکی آلومینوسیلیکات قلیایی نسبت به سیمان پرتلند نوع I واکنش بیشتری نشان می دهند. ایشان به منظور ارزیابی اثرات نگهداری در هوا و در حالت فضای بسته، بر خصوصیات و عملکرد سیمان های آلومینوسیلیکات قلیایی، یک مطالعه تجربی انجام دادند. در این مطالعه تجربی مدت زمان نگهداری مختلف تا ۲۸ روز در نظر گرفته شد. سیمان های هیدرولیکی بر اساس مورفولوژی، شیمی و کانی شناسی، واکنش هیدراتاسیون، ویژگی های توسعه مقاومت و ساختار محصولات هیدراتاسیون حاصل

مورد بررسی قرار گرفتند. طی ذخیره سازی سیمان آلومینوسیلیکات قلیایی، واکنش هیدراتاسیون در سنین اولیه و ویژگی های توسعه مقاومت تغییر می یابد، به ویژه هنگامیکه سیمان در معرض هوا قرار دارد. سیمان های قدیمی نیز محصولاتی را طی هیدراتاسیون تولید می کردند که در هنگام خشک شدن در خلا، مستعد ترک خوردگی هستند. تاثیر ذخیره سازی سیمان در شرایط بسته شده یا در معرض هوا بر ویژگی های توسعه مقاومت بلندمدت سیمان کمتر از ویژگی های توسعه مقاومت کوتاه مدت آنها بود [۴].

منابع مختلف علمی و کاربردی توصیه هایی برای انبارش سیمان در سیلو برای تولیدکنندگان برای جلوگیری از مشکلات ارائه نموده اند [۵-۹].

موارد متعددی وجود دارد که ماندن سیمان در سیلو (تولیدکننده یا مصرف کننده) طی یک دوره کوتاه مدت و به علل مختلف از جمله توقف در تولید، باعث کاهش افت کیفیت سیمان می شود. لیکن شناخت دقیقی از میزان افت کیفیت وجود ندارد. لذا هدف از این مطالعه شناخت افت تدریجی مقاومت سیمان طی ۲ ماه می باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی و مواد تحقیق:

در اولین مرحله حدود ۱۰۰ کیلوگرم سیمان پرتلند نوع ۲ از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. جداول ۲ و ۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی در این عملیات آزمایشگاهی را نمایش می دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی نمونه سیمان مصرفی در این مطالعه

مقاومت ملات استاندارد (kg/cm2)											
زمان گیرش (دقیقه)		غلظت		مانده روی الک (%)				مقاومت ملات استاندارد (kg/cm2)		بلین	سلامت
نهایی	اولیه	نرمال (%)	32μ	45μ	75μ	90μ	۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	Cm2/gr	(اتوکلاو %)
290	200	24	16.9	7.5	2.0	1.6	555	397	237	3085	0.07

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در این مطالعه

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	LOI	F.L.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20.76	4.50	3.78	63.58	3.44	2.39	0.61	1.29	1.26	58.5	15.54	5.5	11.5

بوده است که مخازن آزمایشگاهی نیز دارای همین مشخصات رطوبت و دمایی بوده‌اند (شکل ۱).

در گام سوم نمونه سیمان نگهداری گردید و در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز ملات استاندارد و مخلوط بتنی (۶ بهر مجزا) تهیه گردید. سپس برای تهیه طرح مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با استفاده از سیمان‌های مذکور، از یک ترکیب نسبتاً ثابت بهره گرفته شد.

سپس ظروفی (مخازن آزمایشگاهی) تهیه شدند که دما و رطوبت داخل آن مشابه دما و رطوبت داخل سیلوهای سیمان می‌باشد. بر اساس مشاهدات تجربی دما و رطوبت داخل سیلوهای سیمان تابع شرایط محیطی است. از این‌رو در بازه زمانی مطالعه انجام شده (اسفند ۹۷ الی اردیبهشت ۹۸) هوای محیط دارای دمای حدود ۲۸-۸ درجه سانتی‌گراد و میزان رطوبت نسبی حدود ۴۶-۱۸ درصد



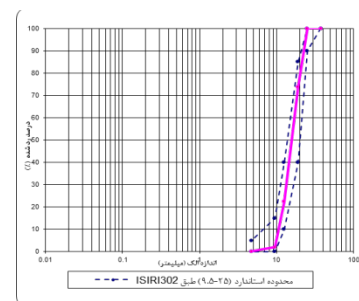
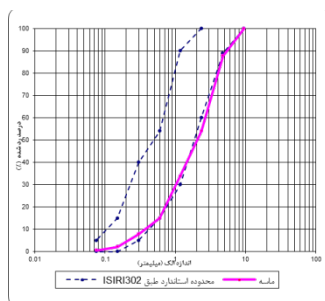
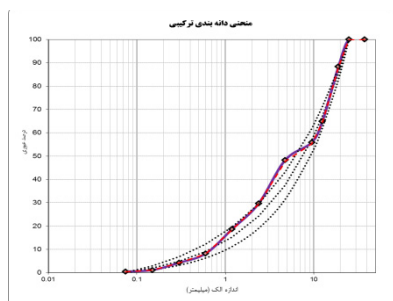
شکل ۱- محل تهیه نمونه، مخازن آزمایشگاهی نگهداری سیمان و انجام پروژه مجتمع صنعتی سیمان تهران

می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد.

در ساخت مخلوط بتن آزمایشگاهی حداکثر اندازه سنگدانه‌ها MSA:25mm بود. شکل ۲ و جدول ۴ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان

جدول ۳- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	وزن مخصوص (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن متوسط نیمه شکسته (بادامی)	۷/۲	۱/۵۰	۲/۵۷	۴۵	۰/۵
ماسه نیمه شکسته	۴/۰	۳/۳۹	۲/۵۳	*	۴/۴



شکل ۲- نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

استفاده، آزمون‌گرها، شرایط عمل‌آوری و ... تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان

در کلیه مخلوط‌ها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد

[۱]. برای تهیه این مخلوط ۶۰٪ ماسه با ۴۰٪ شن درشت استفاده شد (شکل ۲). در این پروژه مبنای تهیه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارایی مناسب (اسلامپ ۵/۸±۰/۵ سانتی‌متر) بود که $w/c = ۰/۵۵ \pm ۰/۰۱$ به دست آمد. در نهایت مقاومت آزمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند (شکل ۳).

مصرفی باشد. عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز ۳۵۰ kg/m^3 بود. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود $n:0.35$ (میانگین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد



شکل ۳- نمائنی از انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی در این تحقیق

اشکال ۴ و ۵ نمودار کلیه آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در ۷ مخلوط بتن آزمایشگاهی (۴۲ آزمونه) و ۷ بهر ملات استاندارد را نشان می‌دهد.

۳- نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل:

جدول ۵ خلاصه نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی. ملات‌های استاندارد در این مطالعه را نشان می‌دهد.

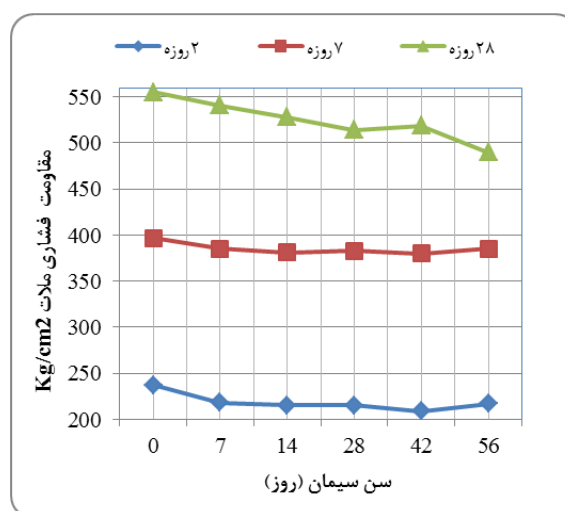
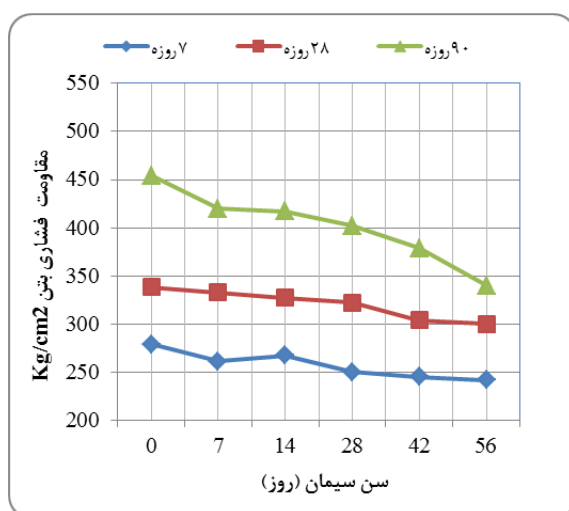
جدول ۴- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی عملیات آزمایشگاهی

سن نمونه سیمان (روز)	w/c	بتن تازه اسلامپ (cm)	مقاومت بتن (kg/cm ²)			مقاومت ملات استاندارد (kg/cm ²)		
			۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
0	0.54	8.0	279	338	454	237	397	555
7	0.54	8.0	261	333	420	218	385	541
14	0.54	8.0	267	327	417	215	381	528
28	0.54	8.0	250	322	402	215	383	514
42	0.55	8.0	245	304	379	209	380	519
56	0.55	8.0	242	300	340	217	385	490

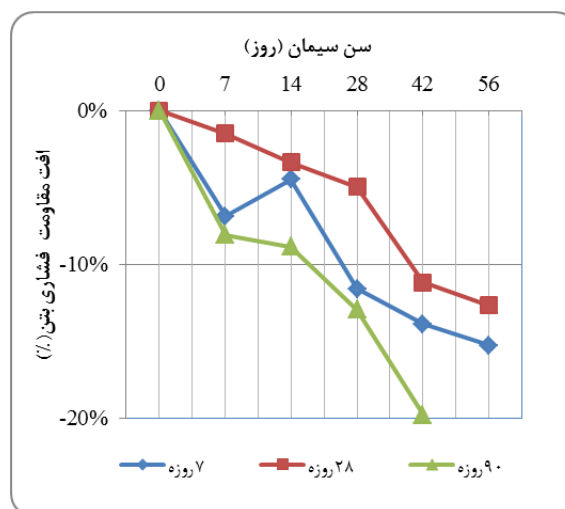
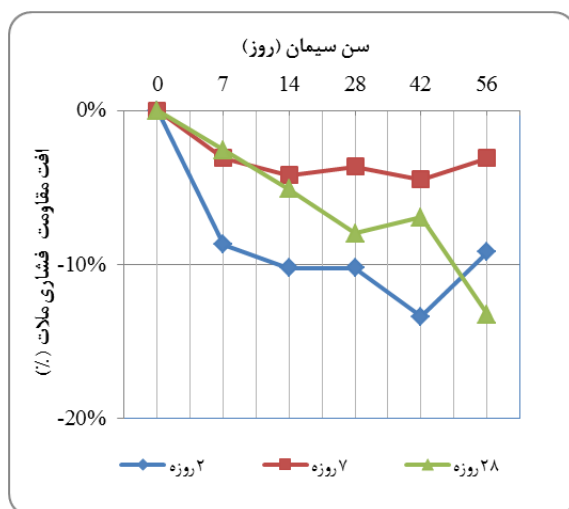
بر اساس منابع قبلی دور از ذهن نبود که با افزایش سن سیمان یا ماندن آن در مخزن، مقاومت فشاری کوتاه، میان و بلند مدت (۲، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) ملات و بتن کاهش یابد. این کاهش به صورت جدول ۶ جمع‌بندی می‌گردد.

جدول ۵- مقادیر افت مقاومت ملات و بتن طی سنین مختلف در این مطالعه

سن نمونه سیمان (روز)	افت مقاومت بتن (%)			افت مقاومت ملات استاندارد (%)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
7	7%	2%	8%	9%	3%	3%
14	4%	3%	9%	10%	4%	5%
28	12%	5%	13%	10%	4%	8%
42	14%	11%	20%	13%	4%	7%
56	15%	13%	34%	9%	3%	13%



شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات استاندارد (سمت راست) و بتن (سمت چپ)



شکل ۵- نتایج افت مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات استاندارد (سمت راست) و بتن (سمت چپ)

۴- نتیجه گیری

۱. در این مطالعه تاثیر نگهداری سیمان طی ۲ ماه بر روند افت مقاومت فشاری بتن و ملات استاندارد به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج آزمایشها نشان دادند که ماندن سیمان به تدریج افت مقاومتی ایجاد می کند. این افت مقاومت برای سیمان با عمر ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز در آزمونهای ۲۸ روزه به ترتیب ۰/۲٪، ۰/۴٪، ۰/۶٪، ۰/۹٪ و ۱/۳٪ بود.

۲. افت مقاومت برای سیمان با عمر ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز برای آزمونهای ۷ روزه به ترتیب ۰/۸٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪، ۰/۹٪ و ۰/۹٪ می باشد.

۳. در صورتیکه سیمان در سیلو بماند، طی ۲ ماه به تدریج دچار افت مقاومت به ویژه در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه سیمان تازه می شود و حداقل ۱۰٪ از مقاومت ملات و بتن ۷ یا ۲۸ روزه آن کاسته می شود.

۵- قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه ای از مدیران، کارشناسان، و تکنسین های آزمایشگاه و سایر پرسنل زحماتش مجتمع صنعتی سیمان تهران و نیز آقای مهندس اسلامی جهت کمک در طراحی این مطالعه داریم.

۶- مراجع

- [۱] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.
- [2] Peter Ramge. & Wolfram Schmidt & HansCarsten Kühne (January 2013) "Effect of the storage of cement on early properties of cementitious systems " .
- [3] Suryakanta (April 9, 2014) "EFFECT OF STORAGE ON STRENGTH OF CEMENT". www.civilblog.org.
- [4] Faris Matakaha & Parviz Soroushianb (2019). "Shelf life of alkali activated cement: Effects of storage condition and duration". *Construction and Building Materials*, Volume 222, 20 October 2019, Pages 664672.
- [5] Loh Han Sen Territory Sales Manager (2015). "Blockages in Cement Storage Silos". CLAUDIUS PETERS. AFCM 2015 Hanoi, April 21st to 24th, 2015.
- [6] IBAU HAMBURG. "Silo conversions and modifications for the Cement Industry."
- [7] GLEB GENNADIEVICH MEJEUMOV (December 2007). "IMPROVED CEMENT QUALITY AND GRINDING EFFICIENCY BY MEANS OF CLOSED MILL CIRCUIT MODELING". Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
- [8] www.cemax.com.
- [9] Loh Han Sen (2015). "Blockages in Cement Storage Silos". AFCM 2015 Hanoi, April 21st to 24th, 2015. Claudius Peters Projects GmbH.

بررسی تأثیر سنگدانه‌های درشت بازیافتی بر دوام بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس



امیر مسعود سلیمی

مدیر آزمایشگاه مرکزی شرکت مهندسين
مشاور سیناب غرب



محسن تدین

مدیر بخش ژئوتکنیک و مقاومت مصالح
شرکت مهندسين مشاور سیناب غرب
رئيس هیات مدیره انجمن بتن ایران



مصطفی حق طلب جורقانی

عضو هیئت علمی دانشگاه ملایر -
گروه عمران



حسین ساسانی‌پور

مدیر فنی آزمایشگاه مرکزی شرکت
مهندسين مشاور سیناب غرب

چکیده

استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بعنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی می‌تواند روی کاهش مصرف منابع طبیعی تأثیر بگذارد. از این رو در سال‌های اخیر بررسی اثرات مثبت و منفی استفاده از این نوع سنگدانه‌ها روی بتن مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است. بواسطه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی، برخی از خواص بتن ساخته شده با این نوع از سنگدانه‌ها مانند جذب آب، تخلخل، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر ممکن است تحت تأثیر قرار بگیرد. در این مطالعه میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی درشت بترتیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ انتخاب گردید و تأثیر آنها روی دوام بتن‌های خودتراکم مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی کارایی بتن، آزمایش‌های جریان اسلامپ و حلقه جی برای بتن تازه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، سرعت پالس، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر برای مخلوط‌های سخت شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری بطور محسوس کاهش داشت. همچنین نتایج نشان داد که جایگزینی ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت پالس، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر در بتن سخت شده نداشت. با این حال، با افزایش در میزان جایگزینی سنگدانه بازیافتی، دوام بتن‌های خودتراکم تحت تأثیر قرار گرفت و باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش دوام در برابر نفوذ یون کلر گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، سنگدانه‌های بازیافتی، سرعت پالس، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلر، میکروسیلیس.

قالب جای می‌گیرد تولید کنند [1]. مزیت این نوع بتن باتوجه به اینکه نیازی به تراکم ندارد، اجرای آن بدون ایجاد صدای خشن در حین بتن ریزی می‌باشد [2]. از طرفی امروزه مقدار مصالح ضایعاتی و مصالح حاصل از تخریب سازه‌ها روبه افزایش است و همچنین منابع طبیعی که در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد

۱- مقدمه:

بدون شک بتن یکی از مواد ساختمانی پرمصرف در سال‌های اخیر شناخته شده است. با پیشرفت تکنولوژی در طراحی‌های بتن‌های خاص، پژوهشگران موفق شدند نوعی از بتن را که براحتی و تحت اثر وزن خود، در محل‌های با تراکم زیادی از میلگردها، در

روبه کاهش است. در این میان استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافت شده جهت توسعه پایدار و تولید بتن دوستدار محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [3,4]. مطالعات اخیر پژوهشگران نشان می‌دهد که علاقه به استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی در بتن‌های خودتراکم رو به افزایش است [5-7]. ملات چسبیده به سنگدانه بازیافتی باعث کاهش کیفیت سنگدانه بازیافتی، شامل افزایش جذب آب، افزایش تخلخل و کاهش مقاومت می‌گردد. و از طرفی روی خواص بتن ساخته شده که شامل بتن تازه و بتن سخت شده می‌باشد، نیز تاثیر می‌گذارد [8-10]. مطالعات بسیاری وجود دارد که نشان می‌دهد امکان ساخت بتن خودتراکم با سنگدانه‌های بازیافتی وجود دارد. این امر با کنترل نسبت آب به سیمان، استفاده مناسب از افزودنی‌های شیمیایی و معدنی و همچنین روش‌های مناسب آماده سازی قبل از مصرف سنگدانه‌های بازیافتی امکانپذیر است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از هوازا و میکروسیلیس و همچنین آماده سازی سنگدانه‌های بازیافتی به روش pre-soaking می‌توان تا حدود زیادی مانع از آب انداختگی و جدا شدگی در بتن‌های خودتراکم حاوی سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی شد [3,11-13]. میکروسیلیس بواسطه ذرات بسیار ریز خود می‌تواند در کنترل آب انداختگی و جدا شدگی بسیار موثر باشد [14]. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های خودتراکم امکان کاهش مقاومت فشاری را فراهم می‌کند. دلیل کاهش، جذب آب بالا در نتیجه افزایش نسبت آب به سیمان، تخلخل سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش لایه‌های مرزی ضعیف گزارش شده است. با این حال نتایج برخی از پژوهشگران نشان می‌دهد جایگزینی تا ۴۰٪ از سنگدانه‌های درشت بازیافتی تاثیر چشمگیری در کاهش مقاومت فشاری نداشته

است که می‌تواند بدلیل اتصال مناسب سنگدانه‌های بازیافتی با خمیر سیمان، مشارکت آب داخل حفرات سنگدانه‌های بازیافتی در بهبود لایه مرزی (self-healing)، کیفیت مناسب ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی باشد [15-18]. در مواقعی نیز به این موضوع اشاره شده است که بدلیل وجود سیمان هیدراته نشده ملات روی سنگدانه‌های ریز بازیافتی امکان افزایش مقاومت فشاری، بدلیل واکنش سیمان هیدراته نشده، وجود دارد [19]. با این حال جهت بهبود کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی مطالعات وسیعی صورت گرفته است و روش‌هایی نیز پیشنهاد شده است. این روش‌ها بصورت عملیات فیزیکی و یا شیمیایی روی سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشند. با این نوع روش‌ها ملات چسبیده به سنگدانه حذف و یا مقاوم می‌شود [20-22]. با توجه به اینکه تخلخل بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از بتن فاقد سنگدانه‌های بازیافتی است، این موضوع باعث می‌شود دوام بتن بازیافتی تحت تاثیر قرار بگیرد [23]. با این حال با بهره‌گیری از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌توان خواص دوامی بتن‌های بازیافتی شامل مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر را بهبود بخشید [24-26]. این مواد بدلیل ساختار بسیار ریز بعنوان پرکننده عمل میکنند و در بهبود دوام بتن بسیار موثر هستند [27]. با اشاره به این موضوع که بکارگیری مواد جایگزین سیمان می‌تواند در جهت کمک به بهبود دوام بتن‌های خودتراکم ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی قرار بگیرد، نگرش مثبتی در بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی بوجود آمده است.

ضرورت پژوهش

از آنجاکه استقبال از مصرف بتن خودتراکم در دهه اخیر بسیار زیاد بود است و همچنین کارهای تحقیقاتی فراوانی روی بررسی خواص دوامی این نوع از

بتن صورت گرفته است، با این حال بنظر میرسد علی رغم بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی روی دوام بتن معمولی، همچنان بدلیل نبود مطالعات کافی بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی روی خواص بتن خودتراکم محسوس میگردد. از طرفی هم میکروسیلیس و هم سنگدانه‌های بازیافتی محصولاتی هستند که مصرف آنها به کاهش آلودگی محیط زیست کمک قابل ملاحظه‌ای می‌نماید. از آنجا که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی به تنهایی، اثرات منفی روی خصوصیات بتن دارد، بهره‌گیری از میکروسیلیس در جهت بهبود کیفیت در نظر گرفته شد. مقدار جایگزینی میکروسیلیس، ۸٪ درصد وزن سیمان و بنابر توصیه‌های موجود در منابع انتخاب گردید. همچنین از درشت دانه بازیافتی با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ استفاد شد. در تهیه سنگدانه‌های بازیافتی از منابعی مشخص مانند بتن ساختمان‌های مسکونی و بهداشتی که در آینده تخریب خواهند شد، استفاده گردید. هدف اصلی از این مطالعه، ارزیابی استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و کاهش اثرات منفی زیست محیطی ناشی از رها شدن ضایعات حاصل از تخریب سازه‌های بتنی مختلف می‌باشد. این مطالعه در

جست‌جوی معرفی بتن خودتراکم بازیافتی که نیازهای یک بتن خودتراکم ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی را فراهم می‌کند، می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان هگمتان و میکروسیلیس (SF) محصول شرکت فروسیلیس ایران که مشخصات آن در جدول شماره ۱ نشان داده شده است، استفاده گردید. از پودر سنگ (LP) با وزن مخصوص ۲/۵۸ به عنوان مصالح پودری استفاده شد. مشخصات دانه‌بندی و خصوصیات سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در جدول ۲ نشان داده شده است. سنگدانه‌ها در آزمایشگاه بازیافت شدند و دانه‌های با قطر بیشتر از ۱۹ میلی‌متر بوسیله الک کردن، حذف شدند. از افزودنی فوق‌روان‌کننده (SP) بر پایه پلی‌کربوسیلات جهت دستیابی به روانی مناسب براساس توصیه‌نامه EFNARC [14] استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان و میکروسیلیس.

مشخصات مکانیکی	میکروسیلیس (%)	سیمان (%)	مشخصات شیمیایی
مقاومت فشاری ملات (MPa)	۸۵-۹۵	۲۱/۲۷	SiO ₂
۲۰/۱ روزه	-	۶۲/۹۵	CaO
۲۸/۲ روزه	۰/۴-۲	۴/۰۳	Fe ₂ O ₃
۴۰/۳ روزه	۰/۵-۱/۷	۴/۹۵	Al ₂ O ₃
	۰/۱-۰/۹	۱/۵۵	MgO
	۰/۱۵-۰/۲	۰/۴۹	Na ₂ O
	۰/۱۵-۱/۰۲	۰/۶۵	K ₂ O
	-	۲/۲۶	SO ₃
	-	۶/۳	C ₃ A
	۳/۵	۲/۱۱	LOI
مشخصات فیزیکی			
	۲/۲۱	۳-۳/۱	وزن مخصوص
	۱۴۰۰	۲۹۱۰	سطح ویژه (cm ² /gr)
	-	۱۵۴ - اولیه	زمان گیرش (min)
	-	۱۹۵ - نهایی	

جدول شماره ۲: مشخصات دانه بندی و خصوصیات سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی.

اندازه الک (mm)	درصد عبوری (%)					
	CNA.	CRA.	FNA.	CNA.	CRA.	FNA.
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	وزن مخصوص		
۱۲/۵	۳۵/۴	۷۳/۹	۱۰۰	۲/۶۳	۲/۳۹	۲/۵۸
۹/۵	۱/۴۳	۴۷/۹	۱۰۰	مدول نرمی		
۶/۳۵	۰/۵۳	۲۱/۳	۱۰۰	-	-	۳/۷
۴/۷۵	۰/۴۸	۶/۶	۹۹			
۲/۳۶	۰/۴۶	۰/۸۴	۶۴	جذب آب		
۱/۱۸	۰/۴۵	۰/۳۹	۳۳/۹	۱/۷	۵/۴	۲/۱
۰/۶	۰/۴۴	۰/۲۲	۱۷/۶			
۰/۳	۰/۴۳	۰/۱۵	۹/۹			
۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۱۰	۵/۷			
۰/۰۷۵	۰/۱۵	۰/۰۷	۴/۷			

ماسه طبیعی: FNA, شن بازیافتی: CRA, شن طبیعی: CNA

۲-۲ نسبت‌های اختلاط

اختلاط و مقاومت فشاری نشان داده شده است. نتایج نشان داد که همه طرح‌های ساخته شده بر اساس توصیه نامه EFNARC شرایط مناسبی داشتند و فاقد هرگونه جداسازی و یا آب انداختگی بودند. نتایج خصوصیات تازه بتن خودتراکم در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

در طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم از نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و عیار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب استفاده شده است. ضمناً با توجه به توصیه‌نامه EFNARC از میکروسیلیس جهت دستیابی به بتن خودتراکم بدون آب انداختگی و جداسازی استفاده شده است. در جدول ۳ مقادیر اجزای طرح

جدول شماره ۳: مقادیر اجزای طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم.

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	فوق روان - کننده (%)	میکروسیلیس	پودر سنگ	شن بازیافتی	ماسه	شن	سیمان	آب نسبت آب به سیمان	کد طرح	گروه طرح‌ها
۵۶/۷	۱/۰۰	-	-	۱۰۳۲/۵	۵۲۶/۲	SS	طرح مرجع			
۳۹/۲	۱/۰۰	۱۱۹/۵	۴۰۱/۴	۱۰۳۲/۴	۲۶۳/۱	SS25C	طرح‌های بازیافتی			
۳۶/۸	۱/۰۹	۳۳/۶	۱۷۲	۲۳۹/۱	۱۰۳۲/۴	۱۶۸	۰/۴	۳۸۶/۴	SS50C	
۳۵/۲	۱/۰۰	۳۵۸/۷	۱۳۱/۶	۱۰۳۲/۴	-	SS75C				
۳۳/۴	۱/۰۰	۴۷۸/۲	۱۰۳۲/۴	-	SS100C					

جدول شماره ۴: خصوصیات بتن‌های تازه خودتراکم.

مطابقت با EFNARC [14]	فوق روان کننده (%)	J-ring (میلی متر)	J-ring (میلی متر)	T final (ثانیه)	T50 (ثانیه)	جریان اسلامپ (میلی متر)	کد طرح	گروه طرح‌ها
Yes	۱/۰۰	۲	۵۸۰	۲۹	۴/۹	۶۰۰	SS	طرح مرجع
Yes	۱/۰۰	۲	۵۸۵	۲۸	۵/۰	۶۲۵	SS25C	طرح‌های بازیافتی
Yes	۱/۰۹	۳	۵۹۵	۲۹	۴/۱	۶۱۰	SS50C	
Yes	۱/۰۰	۴	۵۹۰	۲۷	۳/۲	۶۰۰	SS75C	
Yes	۱/۰۰	۲	۵۹۰	۲۲	۴/۹	۶۱۰	SS100C	

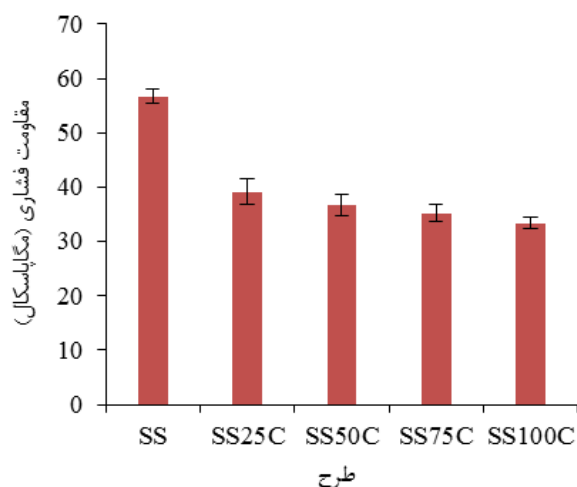
۳-۲ برنامه آزمایشگاهی

آزمایش مقاومت فشاری روی آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد. آزمایش اندازه‌گیری سرعت پالس براساس استاندارد [28] ASTM C597 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سنین ۳، ۷، ۱۱، ۱۴، ۲۱، ۲۵ و ۲۸ روز انجام شد. آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در سنین ۳، ۷، ۱۱، ۱۴، ۲۱، ۲۵ و ۲۸ روز انجام شد. جهت بررسی مقاومت طرح‌ها در برابر نفوذ یون کلر آزمایش Rapid chloride penetration test براساس ASTM C 1202 [29] روی آزمون‌های استوانه‌ای ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر اخذ شده از نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ انجام شد.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ مقاومت فشاری

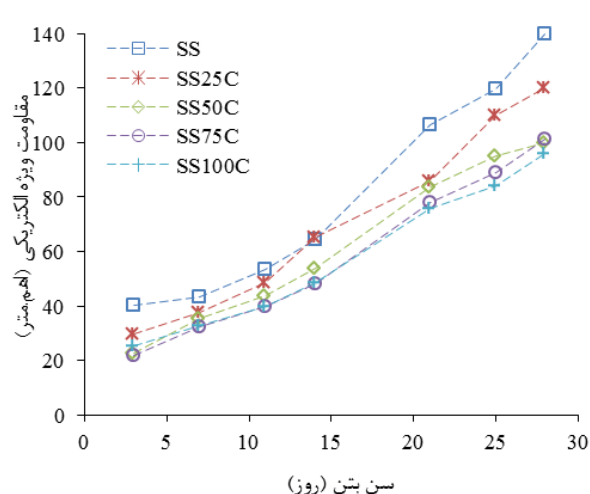
نتایج نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری نسبت به طرح مرجع کاهش داشت (شکل ۱). در بسیاری از مراجع ذکر شده است که بدلیل تشکیل لایه انتقالی ضعیف، تشکیل ترک در فرآیند تهیه سنگدانه‌های بازیافتی و از طرفی تخلخل موجود بواسطه ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی، امکان کاهش مقاومت وجود دارد [5,17,30,31]. ریز ساختار بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی متفاوت‌تر از ساختار بتن ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی است. در واقع با ورود سنگدانه‌های بازیافتی تعداد لایه‌های مرزی افزایش می‌یابد. در بتن بازیافتی سه لایه انتقالی تعریف می‌شود: (۱) لایه انتقالی بین ملات قدیم و ملات جدید (۲) لایه انتقالی بین سنگدانه و ملات قدیم و احتمالاً (۳) لایه انتقالی بین سنگدانه و ملات جدید. از آنجا که محل لایه انتقالی ضعیف ترین بخش ساختاری بتن است و همچنین ساختار متخلخل سنگدانه‌های بازیافتی امری انکارناشدنی است، انتظار کاهش مقاومت در این نوع بتن‌ها وجود دارد. با این حال بسته به نوع سنگدانه‌های بازیافتی و خصوصیات بتن مرجع که سنگدانه از آن بازیافت شده است امکان کاهش یا افزایش مقاومت مشاهده شده است [13,32].



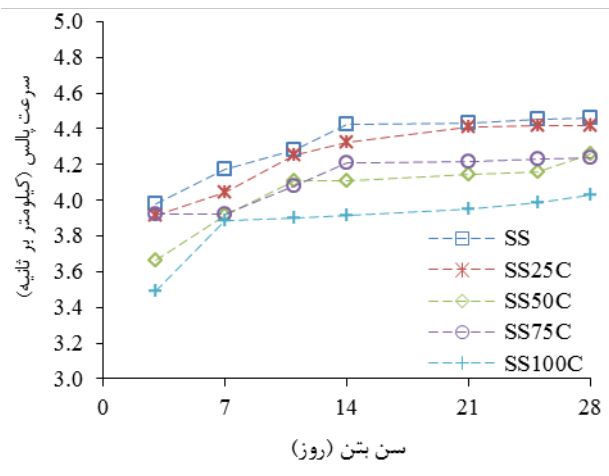
شکل ۱: مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن‌های خودتراکم.

۳-۲ سرعت پالس

نتایج آزمایش سرعت پالس در شکل ۲ نشان داد که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی سرعت پالس در بتن سخت شده کاهش یافت. کاهش سرعت پالس برای جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی نسبت به طرح مرجع SS به ترتیب ۹، ۴/۶، ۵ و ۱۰ ثبت شد. بطور کلی با افزایش در تخلخل سرعت پالس کاهش می‌یابد. همچنین سرعت پالس تابع خصوصیات لایه مرزی و دانسیته بتن می‌باشد [16,33]. بنظر می‌رسد عامل کاهش سرعت پالس در بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی نیز تخلخل موجود در این نوع از سنگدانه‌ها و همچنین لایه مرزی ضعیف در محل اتصال سنگدانه به خمیر سیمان باشد. نتایج مشابهی در سایر تحقیقات مشاهده شده است که با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی سرعت پالس کاهش نشان داده است [16,18]. با این حال نتایج نشان داد که همه طرح‌ها دارای کیفیت قابل قبول (fair quality) بودند [34].



شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در سنین مختلف.



شکل ۴: نتایج آزمایش سرعت پالس در سنین مختلف.

۳-۴ مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

خلاصه نتایج آزمایش نفوذ یون کلر بر اساس ASTM C1202 در سن ۲۸ روز در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. با جایگزینی سنگدانه‌های درشت بازیافتی بیش از ۲۵٪ سطح زیر منحنی جریان عبوری نسبت به زمان که نشان دهنده شار عبوری می‌باشد، افزایش یافته است (شکل ۴). براساس استاندارد ASTM 1202 هرچه میزان شار عبوری افزایش یابد مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد. علت افزایش شار عبوری در بتن‌های بازیافتی معطوف می‌شود به ساختار متخلخل ملاتی که سنگدانه را احاطه کرده است. تخلخل ملات باعث تسهیل در افزایش نفوذ یون کلر می‌گردد [26]. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه بازیافتی رده نفوذپذیری تغییر نکرده است و تنها حدود ۲٪ در مقدار شار عبوری افزایش مشاهده می‌گردد. با جایگزینی سنگدانه بازیافتی به مقدار ۵۰٪ و بیشتر تغییر در رده نفوذپذیری مشاهده می‌گردد. بترتیب با جایگزینی سنگدانه بازیافتی به میزان ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ شار عبوری ۵۱، ۶۳ و ۱۰۹٪ افزایش داشت.

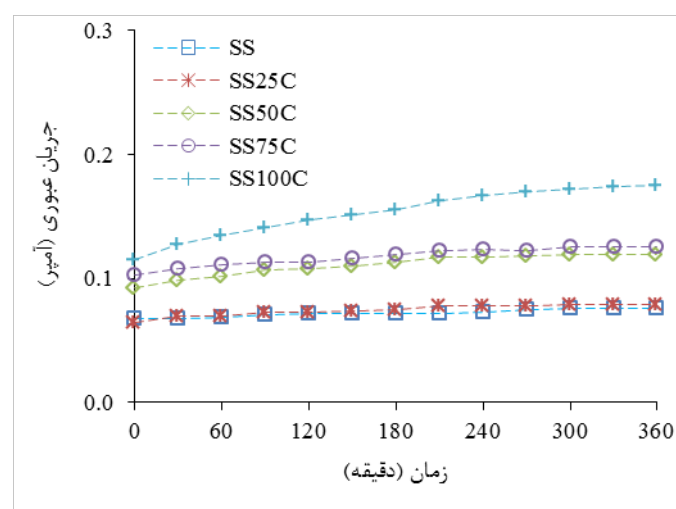
البته نمی‌توان تاثیر مثبت میکرو سیلیس را در این مطالعه نادیده گرفت. میکرو سیلیس میتواند تا حد زیادی در کاهش و کنترل نفوذ یون کلر موثر باشد. دلیل این می‌تواند بهبود تخلخل موجود در سطح سنگدانه‌ها بواسطه تشکیل مقادیر بیشتری از هیدرات‌های سیلیکات کلسیم بواسطه حضور میکروسلیس باشد [26].

۳-۳ مقاومت الکتریکی به روش حجمی

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل ۳ نشان داد که با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ درشت دانه بازیافتی مقاومت الکتریکی به ترتیب نسبت به طرح مرجع SS، ۱۴، ۲۹، ۲۷ و ۳۱٪ کاهش داشت. جریان الکتریکی از محیط‌های متخلخل براحتی عبور می‌کند [35] و بدلیل این که تخلخل در سنگدانه بازیافتی بیشتر از سنگدانه طبیعی می‌باشد انتظار می‌رود مقاومت الکتریکی بتن‌های بازیافتی کاهش یابد. نتایج مشابهی نیز در این زمینه مشاهده شده است [24]. از آنجا که مقاومت الکتریکی یکی از روش‌های تخمین مقاومت بتن در برابر خوردگی است [36]، با افزایش مقاومت الکتریکی بتن بنظر میرسد دوام در برابر خوردگی نیز افزایش یابد. در برخی مراجع مقاومت الکتریکی کمتر از $\Omega\cdot m$ و در برخی مراجع دیگر مقاومت الکتریکی کمتر از $\Omega\cdot m$ ۱۰۰ مرز خطرناک جهت بروز خوردگی سازه‌های بتنی معرفی شده است. با این حال می‌توان مشاهده کرد که در این مطالعه با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌های حاوی سنگدانه بازیافتی در موقعیت مناسبی قرار دارند.

جدول شماره ۵: نتایج آزمایش نفوذ یون کلر (RCPT) در بتن‌های سخت شده.

گروه طرح‌ها	کد طرح	شار عبوری (کلوامپ)	رده بندی نفوذ یون کلر براساس ASTM C1202
طرح مرجع	SS	۱۴۲۹	کم
طرح‌های بازیافتی	SS25C	۱۴۵۵	کم
	SS50C	۲۱۵۲	متوسط
	SS75C	۲۳۳۰	متوسط
	SS100C	۲۹۸۹	متوسط



شکل ۴: افزایش سطح زیر منحنی بواسطه استفاده از سنگدانه بازیافتی.

نتیجه گیری:

براساس تحقیقات بعمل آمده در این مطالعه، موارد زیر بعنوان نتایج ارائه می‌گردد:

۱- بواسطه وجود تخلخل و افزایش تعداد لایه‌های انتقالی ضعیف در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با این سنگدانه‌ها کاهش یافت. بهر حال مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها قابل قبول است و در موارد سازه‌ای قابل مصرف می‌باشند.

۲- بدلیل تخلخل در سنگدانه‌های بازیافتی امکان کاهش سرعت پالس وجود دارد. با این حال کاهش سرعت پالس

بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است و همه طرح‌ها دارای کیفیت مناسبی بودند.
۳- جایگزینی ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر چشمگیری بر کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش شار عبوری طرح‌ها نداشت. بواسطه تخلخل موجود در سنگدانه‌های بازیافتی با افزایش جایگزینی، مقاومت الکتریکی کاهش و شار عبوری افزایش داشت. بهر حال همه طرح‌ها دارای مقاومت الکتریکی مناسبی بودند.

- [1] Loukili A. *Self-compacting concrete*. John Wiley & Sons, Inc. www.wiley.com; 2011.
- [2] Kebaïli O, Mouret M, Arabi N, Cassagnabere F. Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete : evidence and analysis through an example. *J Clean Prod* 2015;87:752–61. doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.077.
- [3] González-Taboada I, González-Fontebao B, Eiras-López J, Rojo-López G. Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. *J Clean Prod* 2017;156:1–18. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.045.
- [4] Guo Z, Tu A, Chen C, Lehman DE. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *J Clean Prod* 2018;199:136–49. doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.069.
- [5] Aslani F, Ma G, Yim Wan DL, Muselin G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *J Clean Prod* 2018;182:553–66. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.074.
- [6] Omrane M, Kenai S, Kadri EH, Ait-Mokhtar A. Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *J Clean Prod* 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.139.
- [7] Uygunoglu T, Topçu B, Gürhan A. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *J Clean Prod* 2014;xxx:1–10. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.019.
- [8] Pin K, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resour Conserv Recycl* 2018;133:30–49. doi:10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- [9] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem Concr Res* 2001. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2.
- [10] Eng RSR, Loo YH. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Mag Concr Res* 1987;39:214–20.
- [11] Güneş E, Gesoglu M, Algin Z, Yazıcı H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater J* 2016;113:622–30. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.073.
- [12] Kou SC, Poon CS. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* 2009;31:622–7. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- [13] Nili M, Sasanipour H, Aslani F. The Effect of Fine and Coarse Recycled Aggregates on Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials (Basel)* 2019;12:1–14. doi:10.3390/ma12071120.
- [14] EFNARC. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, Website WwwwEfnarcOrg, ISBN 2002. doi:0 9539733 4 4.
- [15] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* 2007. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [16] Tuyan M, Mardani-aghagholou A, Ramyar K. Freeze – thaw resistance , mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Mater Des* 2014;53:983–91. doi:10.1016/j.matdes.2013.07.100.
- [17] Grdic ZJ, Toplicic-Curcic GA, Despotovic IM, Ristic NS. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater* 2010. doi:10.2298/hel0339141d.
- [18] Kwan WH, Ramli M, Kam KJ, Sulieman MZ. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in

concrete design and durability properties. *Constr Build Mater* 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.

[19] Evangelista L, De Brito J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* 2007;29:397–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.

[20] Tam VWY, Tam CM. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}. *Constr Build Mater* 2008;22:2068–77. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024.

[21] Shi C, Li Y, Zhang J, Li W, Chong L, Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *J Clean Prod* 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.057.

[22] Spaeth V, Djerbi Teggguer A. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *Int J Sustain Built Environ* 2013. doi:10.1016/j.ijbsbe.2014.03.003.

[23] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cem Concr Compos* 2010;32:421–6. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004.

[24] Santos SA, Brito J De, Raposeiro P. Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. *Mag Concr Res* 2018:1–18.

[25] Kou SC, Poon CS. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Constr Build Mater* 2012;35:69–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032.

[26] Kapoor K, Singh SP, D B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Constr Build Mater* 2016;128:67–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026.

[27] Yazıcı H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 2007;22:456–62. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002.

[28] ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete 1989:4–7.

[29] ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2016. doi:10.1520/C1202-12.2.

[30] Silva YF, Robayo RA, Matthey PE, Delvasto S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Constr Build Mater* 2016;124:639–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057.

[31] MD.Safiuddin, Salam MA, Jumaat MZ. Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Arch Civ Mech Eng* 2011;11:1023–41. doi:10.1016/S1644-9665(12)60093-4.

[32] Poon CS, Shui ZH, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater* 2004. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005.

[33] Jain A, Kathuria A, Kumar A, Verma Y, Murari K. Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in structure. *Procedia Eng* 2013;54:241–51. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.022.

[34] Malhotra VM, Carino NJ. Nondestructive testing of concrete. CRC PRESS; 2003.

[35] Sengul O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Constr Build Mater* 2014;73:434–41. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077.

[36] Lübeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cem Concr Compos* 2012;34:392–9. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017.

مروری بر خواص سیمان‌های آمیخته میکروسیلیسی



آرش ذوالفقارنسب
دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و
محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
عضو انجمن بتن ایران



علی اکبر رمضانپور
استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

امروزه بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی جز جدایی ناپذیر صنعت ساخت و ساز شهری و زیر بنایی می‌باشد. از این رو بهبود خواص مکانیکی و دوام آن در محیط‌های آسیب‌رسان در کنار کاهش اثرات زیست محیطی تولید سیمان و مصالح پایه سیمانی از اهمیت زیادی برخوردار است. استفاده از دوده سیلیس در مصالح پایه سیمانی و بتن به عنوان یک ماده افزودنی معدنی و جایگزین سیمان سبب بهبود خواص مکانیکی و ارتقای پایداری این مصالح در برابر اکثر پدیده‌های مخرب بتن شده و امکان دستیابی به سازه‌هایی با عمر مفید بالا را فراهم می‌سازد. در این مقاله به بررسی خواص دوده سیلیس و بتن‌های ساخته شده با این ماده پوزولانی پرداخته شده است. بهبود خواص مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و ارتقای سطح دوام بتن‌ها در اکثر محیط‌های آسیب‌رسان از مزایای بکارگیری دوده سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان پرتلند می‌باشد. کلمات کلیدی: سیمان آمیخته، دوده سیلیس، خواص بتن تازه، مشخصات مکانیکی، دوام بتن.

۱. مقدمه

فرآیند تولید سیمان پرتلند بعنوان یکی از صنایع آلاینده محیط زیست شناخته می‌شود. منشا آلاینده‌گی در تولید سیمان پرتلند به استفاده از سوخت‌های فسیلی و تجزیه کلسیم کربنات (یکی از اجزای اصلی در تولید کلینکر) باز می‌گردد. استفاده از مواد افزودنی معدنی بعنوان یکی از راهکارهای کاهش آلاینده‌گی‌های صنعت سیمان علاوه بر کاهش میزان آزاد شدن گاز کربن دی‌اکسید، موجب بهبود

دوام سازه‌های بتنی در بیشتر شرایط محیطی آسیب‌رسان می‌گردد. طی سالیان گذشته تحقیقات متعددی در جهت شناسایی و بکارگیری مواد افزودنی معدنی در سیمان‌های آمیخته انجام شده که در این میان دوده سیلیس بعنوان یکی از فعال‌ترین انواع مواد جایگزین سیمان معرفی شده است. در این مقاله به مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌های اثرات زیست محیطی و اقتصادی استفاده از سیمان‌های آمیخته و خواص بتن‌های حاوی دوده سیلیس پرداخته شده است.

۲. سیمان‌های آمیخته

فرآیند تولید یک تن سیمان پرتلند در حدود ۱/۵۵ تن مواد اولیه نیاز داشته که در این میان حدود ۰/۵۱ تن گاز کربن دی‌اکسید (ناشی از تجزیه کربنات کلسیم) آزاد خواهد شد. با در نظر گرفتن فرآیند پخت سیمان و استفاده از سوخت‌های فسیلی مقدار گاز کربن دی‌اکسید ناشی از تولید سیمان در حدود ۰/۸ تا ۱ تن به ازای هر تن سیمان پرتلند خواهد بود. این فرآیند نزدیک به ۵٪ میزان کل گاز کربن دی‌اکسید تولیدی در جهان را شامل می‌شود [۱]. بر اساس تحقیقات انجام شده، نقش سیمان در تولید گاز کربن دی‌اکسید در میان مصالح مورد نیاز برای ساخت ۱ متر مربع ساختمان شهری، حدود ۳۰٪ بوده که در مقایسه با سایر مصالح بیشترین مقدار است [۲].

پوزولان‌ها (یا مواد جایگزین سیمان) مواد معدنی سیلیسی یا سیلیسی - آلومینی خوب تفکیک‌شده‌ای هستند که خود یا خاصیت سیمانی نداشته و یا خاصیت سیمانی کمی نشان می‌دهند. این مواد در حضور رطوبت با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و مواد سیمانی پدید می‌آورند. لازم به ذکر است هر ماده سیلیسی مناسب دسته‌بندی در دسته مواد پوزولانی نیست؛ زیرا سیلیس مورد نیاز فعالیت‌های پوزولانی باید از نوع غیر کریستاله (آمورف) باشد. بطور معمول پوزولان‌ها در دو دسته طبیعی و صنعتی دسته بندی می‌گردند. پوزولان‌های طبیعی نظیر توف‌های آتشفشانی، زئولیت‌های طبیعی، رس‌های کلسینه شده از جمله موادی هستند که به خاطر تولید پوزولان، فرآوری شده‌اند. این فرآوری معمولاً شامل خردکردن، آسیاب کردن و جداسازی اندازه‌ها می‌گردد که در بعضی از موارد ممکن است شامل فعال‌سازی حرارتی نیز شود. مواد جایگزین سیمان صنعتی موادی هستند که محصولات اصلی صنعت تولیدشان نمی‌باشند. این محصولات ممکن است به فرآوری (مثل خشک و پودرکردن)، قبل از استفاده آنها به‌عنوان

مواد افزودنی معدنی، نیاز داشته باشند. مانند: خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی، دوده سیلیس و غیره [۳]. استفاده از مواد افزودنی معدنی در تولید سیمان‌های آمیخته علاوه بر کاهش میزان کلینکر مورد نیاز برای تولید سیمان و میزان گاز کربن دی‌اکسید ناشی از تجزیه کلسیم کربنات، به دلیل عدم نیاز به فرآوری‌هایی نظیر پخت سیمان پرتلند، موجب کمتر شدن آلاینده‌گی ناشی از سوخت‌های فسیلی نیز می‌گردند. همچنین استفاده از دوده سیلیسبه میزان ۱۰٪ در سیمان آمیخته میزان اثرات گرمایش زمین، اسیدی شدن اتمسفر و استفاده از سوخت‌های فسیلی را تا میزان ۱۰ درصد کاهش خواهد داد [۴].

مطالعه اقتصادی استفاده از مصالح جایگزین سیمان نیازمند در نظر گرفتن مواردی همچون هزینه‌های تولید کلینکر، ماهیت ماده افزودنی معدنی (مواد زائد یا محصول اولیه تولیدی)، هزینه‌های حمل، بکارگیری و نگهداری و نیز هزینه‌های عمر مفید سازه بتن مسلح می‌باشد. استفاده از مصالح جایگزین سیمان علاوه بر کاهش نیاز به مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با فرآیند تولید سیمان پرتلند اثر مهمی بر عملکرد سازه‌های بتن مسلح می‌گذارند. سازه‌های بتنی در محیط‌های مختلف دچار خرابی‌هایی با منشا فیزیکی و یا شیمیایی می‌گردند. از این رو در نظر گرفتن مشخصات مناسب برای بتن با توجه به شرایط قرارگیری محیطی در راستای ارتقای میزان کارایی سازه، کاهش میزان تعمیرات و افزایش عمر مفید سازه امری الزامی به شمار می‌رود. با در نظر گرفتن دوام سازه‌ها، علاوه بر کاهش هزینه‌های دوره بهره برداری، عمر مفید نیز افزایش قابل توجهی خواهد یافت.

دوده سیلیس (میکروسیلیس) محصول جانبی کارخانه‌های تولید سیلیسیم و آلیاژهای این عنصر بوده و عموماً از سیلیس غیربلوری تشکیل شده است. این ماده با داشتن ذرات با اندازه عمومی کوچکتر از ۱ میکرون دارای سطح مخصوص بسیار بالایی در حدود ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ مترمربع بر کیلوگرم بوده که این خاصیت در کنار مقدار بالای سیلیس غیربلوری بیانگر فعالیت پوزولانی بالای آن می‌باشد [۳].

واکنش پوزولانی دوده سیلیس باعث مصرف سریع آهک آزاد شده (ناشی از فعالیت‌های هیدراتاسیون سیمان) در سنین اولیه بتن گشته و سبب بهبود تخلخل و نفوذپذیری خمیر سیمان می‌گردد [۵]. از این رو افزایش سریع مقاومت فشاری در سنین اولیه و کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس از جمله مشخصات مثبتی بوده که این ماده جایگزین سیمان را تحت عنوان "آبر پوزولان" در جامعه مهندسی شناسانده است.

علاوه بر مشخصات فنی و مهندسی مطلوب بتن‌های حاوی دوده سیلیس، بطور کل، استفاده از مواد پوزولانی سبب کاهش مقدار استفاده از سیمان پرتلند در ساخت بتن شده و اثرات زیست محیطی ناشی از تولید فرآیند تولید سیمان پرتلند را کاسته و با افزایش عمر مفید سازه‌ها باعث استفاده بهینه از ابنیه بتنی و در نتیجه عدم نیاز به ساخت و سازهای مجدد و تعمیرات گسترده در آن‌ها می‌گردد. بدین سبب می‌توان بکارگیری دوده سیلیس به‌عنوان یک ماده جایگزین سیمان را اقدامی در راستای توسعه پایدار صنعت ساخت و ساز شهری و زیربنایی برشمرد [۶].

در ادامه این مقاله به بررسی اثر استفاده از دوده سیلیس در بتن بر روی خواص بتن تازه، مشخصات مکانیکی و دوام در محیط‌های مختلف آسیب‌رسان پرداخته می‌گردد.

۴. اثر دوده سیلیس بر خواص بتن

خاصیت پوزولانی قابل توجه و واکنش‌پذیری سریع دوده سیلیس خواص بتن در زمینه‌های کارایی بتن تازه، مشخصات مکانیکی و مهندسی و نیز دوام بتن را دستخوش تغییرات محسوسی می‌نماید. از این رو در این بخش به بررسی تحقیقات انجام شده در راستای بررسی این خواص پرداخته شده است.

۴.۱. خواص بتن تازه

با افزودن مقادیر کم دوده سیلیس به بتن (حدود ۳ الی ۴ درصد وزن مواد سیمانی) به دلیل شکل کروی ذرات این ماده پوزولانی و نیز بهبود تراکم ذرات با توجه به اندازه ریز ذرات دوده سیلیس، مقدار آب مورد نیاز جهت دستیابی به کارایی مورد نظر بتن تازه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش مقدار بکارگیری دوده سیلیس اثر ریزی این ماده و افزایش سطح مخصوص مواد پودری بر کارایی بتن تعیین کننده شده و سبب افزایش نیاز به آب در بتن تازه می‌شود. این افزایش نیاز به آب عموماً با بکارگیری مواد افزودنی کاهنده آب قابل جبران است [۷].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از دوده سیلیس در مقادیر کمتر از ۱۰ درصد وزن کل مواد سیمانی اثر کمی بر زمان گیرش بتن داشته و یا بی‌اثر می‌باشد. از سوی دیگر کاهش میزان آب انداختگی نیاز به عمل‌آوری مرطوب سریع در بتن‌های حاوی دوده سیلیس را الزامی کرده و جداسازی کمتر در این بتن‌ها قابلیت پمپ‌پذیری و استفاده در بتن‌پاشی را فراهم آورده است ([۶] و [۸]).

۱.۴. مشخصات مکانیکی

استفاده از دوده سیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی با کاهش تخلخل خمیر سیمان و بهبود خواص ناحیه انتقال سنگدانه و خمیر، افزایش مقاومت فشاری را به همراه دارد. با توجه به ریزی بالا و فعالیت سریع این ماده جایگزین سیمان، روند افزایش مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس در مقایسه با بتن معمولی و بتن‌های حاوی سایر مواد پوزولانی (نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی و...) سریع‌تر می‌باشد. این پدیده سبب افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه شده که تا سن ۹۰ روز این افزایش مشهود است. مقاومت بلند مدت بتن‌های حاوی دوده سیلیس به بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی نزدیک بوده و کاهش روند افزایش مقاومت در این نوع بتن‌ها از سن ۹۰ روز مشاهده شده است ([۹-۶]).

در اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی بتن‌های حاوی دوده سیلیس در مقادیر متعارف (تا حدود ۱۵٪)، افزایش مدول الاستیسیته سکانت گزارش شده است [۶]. همچنین در صورت استفاده از مقادیر زیاد دوده سیلیس در ساخت بتن، مقدار مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد (جدول ۱) [۹].

جدول ۱- مدول الاستیسیته بتن‌های حاوی دوده سیلیس [۷].

مشخصات بتن	سن آزمایش	مدول الاستیسیته (GPa)
OPC	۷ روز	۲۸/۸۱
	۲۸ روز	۳۴/۳۵
SF6	۷ روز	۳۱
	۲۸ روز	۳۵/۵
SF8	۷ روز	۳۱/۲۴
	۲۸ روز	۳۷/۲۵
SF10	۷ روز	۳۱/۱
	۲۸ روز	۳۷
SF15	۷ روز	۳۱/۵
	۲۸ روز	۳۸/۱۱

۲.۴. پایداری ابعادی

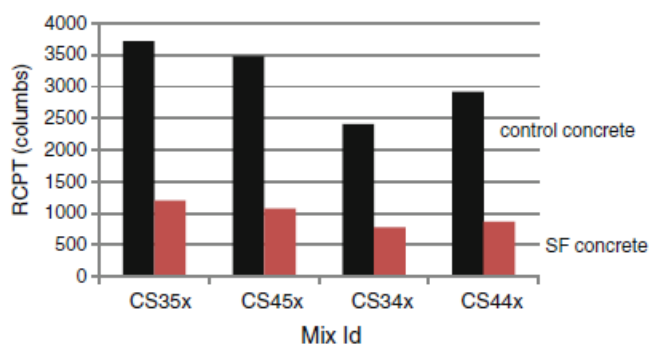
کاهش آب در اثر تبخیر، واکنش‌های هیدراتاسیون، کربناسیون و یا سایر عوامل سبب جمع‌شدگی بتن می‌گردند. پس از گیرش بتن و عمل آوری آن، به طور معمول، جمع‌شدگی بتن به دو بخش جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن تقسیم می‌شود. جمع‌شدگی خودزا ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن به دلیل قرارگیری بتن در محیطی غیر اشباع رخ می‌دهند. خزش به صورت افزایش در کرنش تحت تنش ثابت و ماندگار، بعد از به حساب آوردن دیگر تغییر شکل‌های وابسته به زمان قابل تعریف می‌باشد [۱۰].

رضانیانپور و همکاران [۹] در تحقیقی میزان جمع‌شدگی و خزش در بتن‌های حاوی دوده سیلیس را با بتن معمولی و مدل‌های ارائه شده توسط انجمن بتن آمریکا و انجمن بتن اروپا مورد مقایسه قرار داده‌اند. در نتیجه این تحقیق با افزایش میزان بکارگیری دوده سیلیس در بتن، میزان جمع‌شدگی خودزا افزایش و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن کاهش یافته است. لازم به ذکر است در میزان کل جمع‌شدگی بتن‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به بتن معمولی کاهش اندکی گزارش شده است. خزش نمونه‌های حاوی دوده سیلیس نیز کمتر از نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند معمولی مشاهده شده‌اند.

همچنین در این تحقیق با توجه به تفاوت معنادار نتایج بدست‌آمده از میزان جمع‌شدگی و خزش بتن‌های حاوی دوده سیلیس با نتایج مدل‌های ارائه شده توسط موسسه‌های مذکور، روابطی پیشنهادی جهت تخمین میزان جمع‌شدگی و خزش این نوع بتن‌ها ارائه شده‌اند [۹].

۳.۴. دوام

نفوذپذیری به عنوان یک شاخص بسیار تاثیرگذار در اکثر پدیده‌های مخرب بتن شناخته می‌شود. در بتن‌های حاوی



شکل ۱- نتایج نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید [۱۲].

در تحقیقی دیگر رضانیانپور و همکاران به بررسی اثر بکارگیری و شیوه بکاربردن دوده سیلیس در بتن بر میزان ضریب مهاجرت یون‌های کلراید، بر اساس آزمایش مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید^۲ مطابق آزمایش NT Build 492 [۱۳] و نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید پرداخته‌اند [۸]. نتایج هر دو آزمایش بیانگر افزایش مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر ورود یون‌های کلراید از طریق پدیده‌های نفوذ و انتشار می‌باشد (شکل‌های ۲ و ۳). در این تحقیق نام گذاری طرح‌های بررسی شده بر اساس ماده بکار برده شده، نسبت آب به مواد سیمانی و عیار مواد سیمانی است.

دوده سیلیس به دلیل واکنش‌های پوزولانی و اثر پرکنندگی ذرات این ماده، خمیر سیمان نفوذپذیری کمتری در مقایسه با خمیر سیمان پرتلند معمولی دارد [۸-۶]. نفوذپذیری کم بتن سبب ورود کمتر عوامل مخرب به داخل آن شده و در نتیجه در بیشتر موارد دوام بالاتر بتن‌های نفوذناپذیر در محیط‌های آسیب رسان گزارش شده‌اند. نتایج دوام بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس در محیط‌های مختلف در ادامه این مقاله مورد بحث قرار گرفته‌اند.

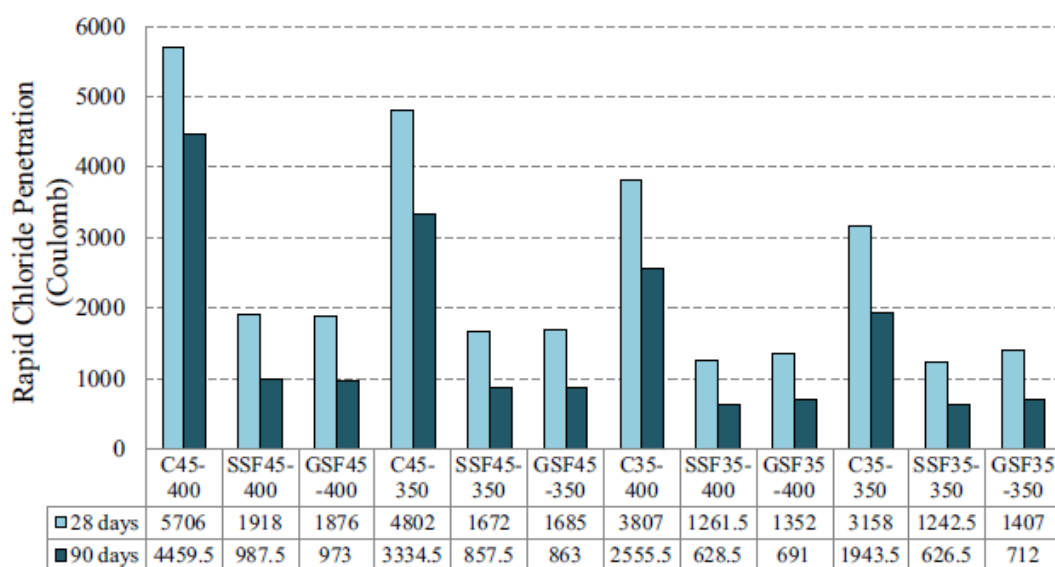
۱.۳.۴. نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی آرماتور

پدیده خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در مقوله دوام و عمر مفید سازه‌ها به شمار می‌رود. این نوع خرابی عمدتاً در سازه‌های دریایی و سازه‌های بتن مسلح در معرض نمک‌های یخ‌زدا بر اثر نفوذ یون‌های کلراید به داخل بتن و از بین رفتن ناحیه انفعالی و محافظ آرماتور رخ می‌دهد. در این میان نفوذپذیری بتن به عنوان مولفه اصلی در پدیده‌های انتقال یون‌های کلراید در بتن شناخته می‌شود.

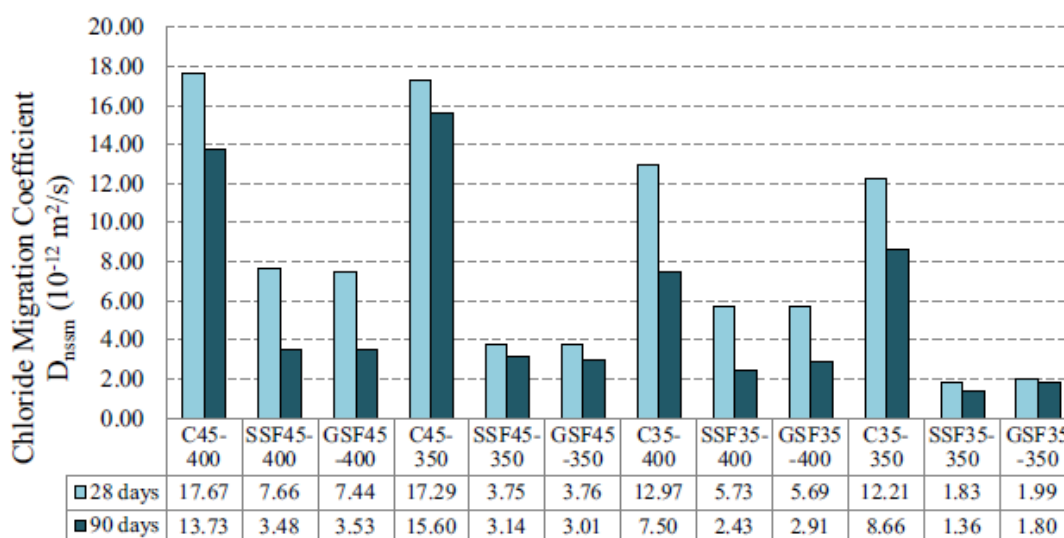
رضانیانپور و همکاران در تحقیقی به بررسی اثر استفاده از دوده سیلیس بر نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید^۱ مطابق آزمایش ASTM C1202 [۱۱] پرداخته‌اند. در این تحقیق مطابق نتایج مندرج در شکل ۱، اثر مثبت استفاده از دوده سیلیس در کاهش میزان نفوذ یون‌های کلراید گزارش شده‌است [۱۲].

^۲ - Rapid Chloride Migration Test (RCMT)

^۱ - Rapid Chloride Penetration Test (RCPT)



شکل ۲- نتایج نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید؛ بکارگیری دوده سیلیس بصورت لجن (SSF) و گرانول (GSF) [۸].

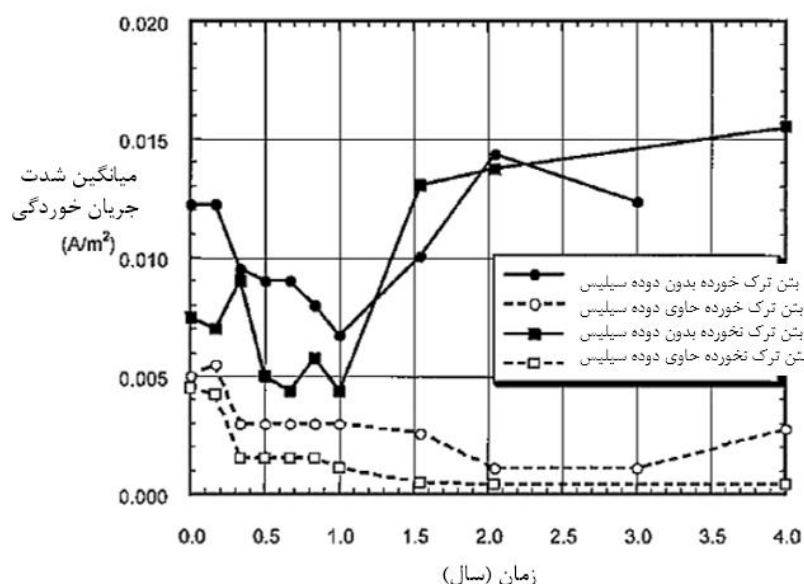


شکل ۳- نتایج ضریب مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید؛ بکارگیری دوده سیلیس بصورت لجن (SSF) و گرانول (GSF) [۸].

ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی نشان دهنده کاهش نرخ خوردگی در بتن‌های ترک نخورده حاوی دوده سیلیس در مقایسه با بتن معمولی است (شکل ۴) [۱۴].

استفاده از دوده سیلیس اثر مثبت بر کاهش میزان و به تعویق انداختن زمان آغاز خوردگی داشته و مقاومت بتن در برابر نفوذ خارجی یون‌های کلراید را افزایش می‌دهد [۶]. در این رابطه، تحقیقات مارکوت و هانسون^۱ بر روی بتن توانمند حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس و مقایسه آن با بتن

^۱ - Marcotte and Hansson



شکل ۴- نتایج شدت جریان خوردگی در بتن‌های حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس و بتن‌های سیمان پر تلند معمولی [۱۴].

مقادیر بالا (بیش از ۱۰ درصد وزن سیمان) دوده سیلیس، حمله سولفاتی مستقیماً وارد مرحله تجزیه سیلیکات‌های کلسیم هیدراته شده (خمیر سیمان) شده و واکنش با تخریب خمیر سخت شده ادامه می‌یابد ([۱۹] و [۲۰]). در صورت استفاده از مقادیر کم دوده سیلیس (کمتر از ۱۰ درصد)، مقدار آهک مصرفی در واکنش‌های پوزولانی کمتر بوده و کاهش نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با این ماده جایگزین سیمان، سبب بهبود دوام در برابر حمله منیزیم سولفات می‌گردد ([۲۱] و [۲۲]).

۳.۳.۴. واکنش قلیایی سنگدانه‌ها

استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر دوده سیلیس از یک سو سبب کاهش نفوذپذیری آب مورد نیاز واکنش قلیایی سنگدانه‌ها شده و از سوی دیگر ذرات آلومینا سیلیسی مواد پوزولانی طی واکنش با ذرات قلیایی سیمان (Na_2O و K_2O) سبب کاهش قلیابیت خمیر سیمان و در نتیجه کاهش شدت واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها می‌گردند (شکل ۵) [۲۳]. در تحقیقات مختلف دوام در برابر اثر مخرب واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها طی آزمایش‌های تسریع شده، اثر دوده سیلیس بر کاهش میزان انبساط

از سوی دیگر به دلیل کاهش قلیابیت خمیر سیمان و تضعیف ناحیه انفعالی محافظ آرماتور، حد آستانه غلظت یون‌های کلراید برای شروع خوردگی در بتن مسلح حاوی دوده سیلیس کاهش یافته و در صورت استفاده از مصالح بتنی حاوی کلراید درونی، میزان خوردگی در بتن مسلح حاوی دوده سیلیس بیش از بتن معمولی گزارش شده است [۱۵].

۲.۳.۴. حمله سولفات‌ها

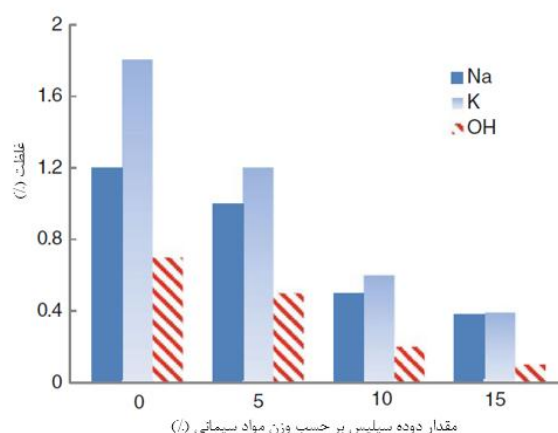
حمله سولفات‌ها به بتن به عوامل زیادی از جمله نفوذپذیری بتن، نوع و میزان بکارگیری مواد جایگزین سیمان، نوع کاتیون نمک سولفاتی و غلظت یون‌های سولفات در آب مهاجم بستگی دارد. در رابطه با حمله سدیم سولفات به بتن استفاده از دوده سیلیس موجب بهبود عملکرد شده است [۱۶-۱۸]. دلیل اصلی بهبود دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر حمله سدیم سولفات به آن، کاهش نفوذپذیری بتن قلمداد می‌گردد [۶].

از سوی دیگر، در صورت وجود نمک منیزیم سولفات در محلول مهاجم، به دلیل مصرف مقدار زیاد آهک خمیر هیدراته شده طی واکنش‌های پوزولانی در بتن‌های حاوی

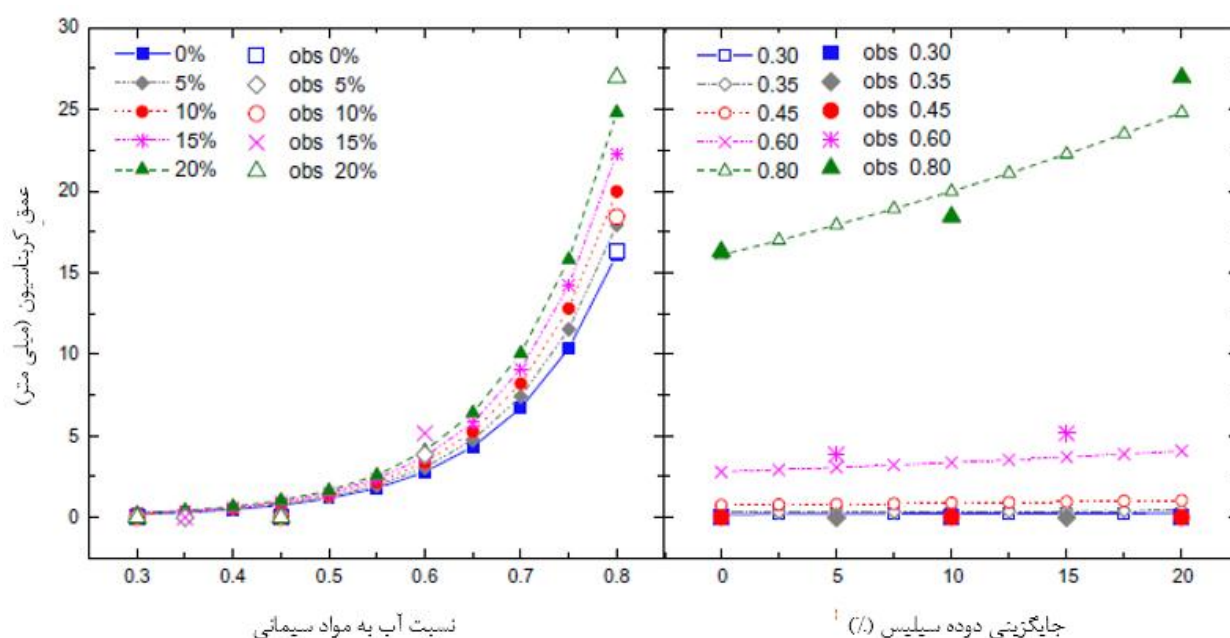
۴,۳,۴. کربناسیون

همانند سایر پوزولان‌ها، واکنش پوزولانی دوده سیلیس در بتن با مصرف مقدار زیادی از آهک خمیر سیمان هیدراته شده همراه است. بدین سبب استفاده از دوده سیلیس می‌تواند موجب افزایش احتمال و شدت واکنش کربناسیون در بتن گردد [۲۷]. شکل ۶ نشان دهنده افزایش عمق کربناسیون در صورت استفاده از دوده سیلیس بوده و جایگزینی بیشتر این پوزولان با سیمان پرتلند، شدت این واکنش را افزایش می‌دهد [۲۸].

ناشی از این واکنش مثبت گزارش شده و با افزایش بکارگیری این پوزولان کنترل واکنش قلیایی بیشتر می‌گردد ([۶] و [۲۶-۲۴]).



شکل ۵- غلظت یون‌های قلیایی در محلول حفره‌ای پس از ۶ ماه [۲۳].

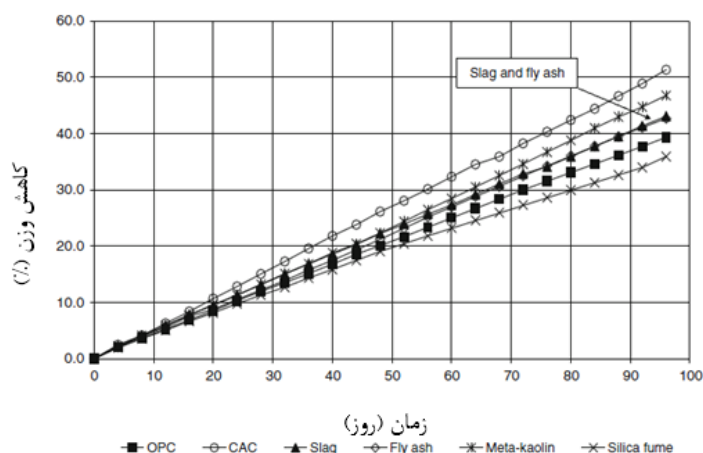


شکل ۶- عمق کربناسیون پس از ۹۸ روز قرارگیری در معرض گاز کربن دی اکسید [۲۸].

عمق کربناسیون بتن‌های حاوی دوده سیلیس بیش از بتن‌های معمولی بوده و در بتن‌های با نسبت آب به سیمان کم و مقاومت فشاری بیش از ۴۰ مگاپاسکال، نتایج بیانگر دوام بهتر بتن‌های ساخته‌شده با دوده سیلیس می‌باشند ([۱۴] و [۲۹]).

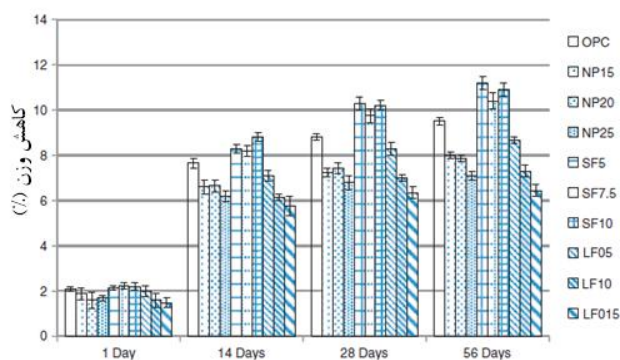
از سوی دیگر در صورت استفاده از دوده سیلیس در بتن، کاهش نفوذپذیری آب و گاز کربن دی اکسید از شدت پدیده کربناسیون می‌کاهد [۶]. لذا عملکرد نهایی بتن در برابر کربناسیون بر اساس نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار بکارگیری دوده سیلیس و نحوه عمل‌آوری تعیین می‌گردد. بر اساس برخی تحقیقات انجام گرفته، در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالا و مقاومت فشاری کمتر از ۴۰ مگاپاسکال

۵.۳.۴. حمله اسیدها



شکل ۷- کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاوی مواد جایگزین سیمان در برابر حمله سولفوریک اسید [۳۲].

برخلاف نتایج فوق، تحقیقات سنهاجی و همکاران^۴ نشان‌دهنده عدم بهبود عملکرد بتن با استفاده از دوده سیلیس در بتن است. شکل ۸ کاهش وزن نمونه‌های حاوی مواد جایگزین سیمان مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده و نتایج آن بیانگر اثر نامطلوب دوده سیلیس بر مقاومت بتن در برابر حمله سولفوریک اسید می‌باشد [۳۳].



شکل ۸- کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاوی مواد جایگزین سیمان در برابر حمله سولفوریک اسید [۳۳].

۶.۳.۴. چرخه‌های ذوب و یخبندان

دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان وابسته به عواملی چون نفوذپذیری بتن و استفاده از مواد افزودنی حباب‌هواساز می‌باشد. لذا نتایج گزارش شده بعضاً ضد و نقیض می‌باشند [۶]. برخی

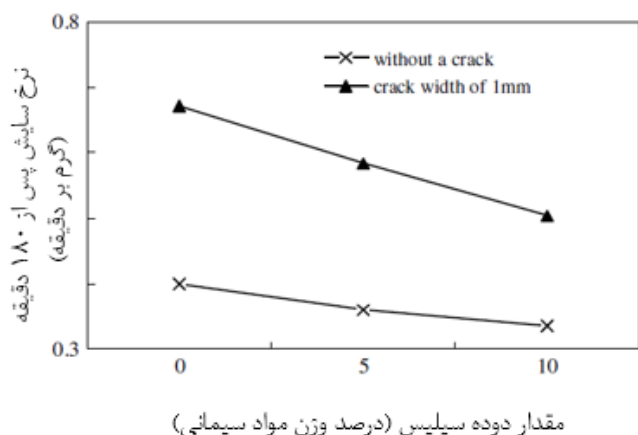
اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان در دوام برابر حمله اسیدها همانند واکنش کربناسیون تحت تاثیر مصرف آهک طی واکنش پوزولانی و کاهش نفوذپذیری ناشی از بکارگیری پوزولان می‌باشد. بدین سبب بررسی عملکرد انواع مختلف مواد جایگزین سیمان در برابر حمله اسیدهای گوناگون الزامی بوده و بعضاً نظر جامعی در مورد دوام بتن‌های حاوی مواد افزودنی معدنی وجود ندارد. برای نمونه، محققین در مورد استفاده از دوده سیلیس جهت بهبود عملکرد بتن در برابر حمله سولفوریک اسید نظر واحدی ندارند. درنینگ و همکاران^۱ با بررسی عملکرد بتن حاوی دوده سیلیس در محلول ۱٪ سولفوریک اسید، اثر این ماده بر مقاومت در برابر حمله این اسید را مثبت ارزیابی کرده‌اند [۳۰]. همچنین مهتا^۲ با جایگزینی ۱۵٪ سیمان توسط دوده سیلیس و قرار دادن نمونه‌ها در برابر سولفوریک اسید با غلظت ۱٪، بهبود رفتار بتن حاوی دوده سیلیس را گزارش کرده‌است [۳۱]. تحقیقات الکساندر^۳ نیز نشان‌دهنده کاهش وزن کمتر نمونه‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سایر پوزولان‌ها، بتن سیمان پرتلند معمولی و بتن ساخته‌شده با سیمان پرآلومین درمحلول با pH برابر یک از سولفوریک اسید می‌باشد (شکل ۷) [۳۲].

^۱ - Durning et al.

^۲ - Mehta

^۳ - Alexander

^۴ - Senhadji et al.



شکل ۱۰- نرخ سایش در بتن‌های حاوی دوده سیلیس [۳۶].

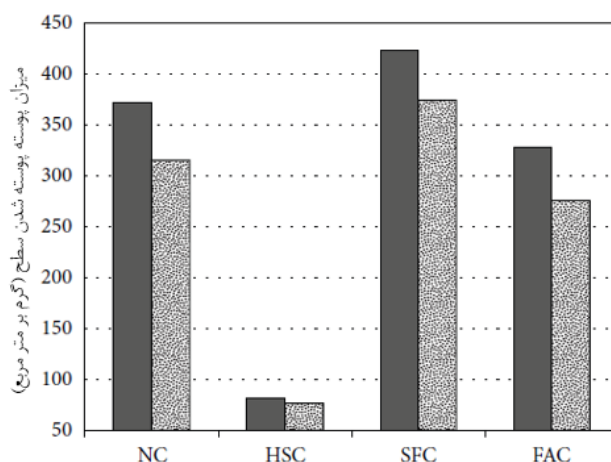
۵. نتیجه‌گیری

استفاده از دوده سیلیس به عنوان یک ماده افزودنی معدنی و جایگزین سیمان علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی و بکارگیری سیمان پرتلند، موجب بهبود خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن می‌گردد. عملکرد بتن در محیط‌های آسیب رسان با توجه به کاهش نفوذپذیری و تغییرات در میزان آهک ناشی از هیدراتاسیون سیمان پرتلند تعیین می‌شود. در اکثر موارد نظیر مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی آرماتور، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و حمله سدیم سولفات به بتن اثر کاهش نفوذپذیری باعث بهبود دوام گشته و در سایر پدیده‌ها نظیر کرناسیون، چرخه‌های ذوب و یخ و مقاومت در برابر حمله منیزیم سولفات موجب دوام نامناسب بتن‌های حاوی دوده سیلیس گزارش شده‌است. بدین دلیل، مطالعه و تحقیق رفتار بتن‌های حاوی دوده سیلیس در محیط‌های آسیب رسان با توجه به ماهیت مواد مورد استفاده در ساخت بتن و شرایط محیطی امری اجتناب ناپذیر به شمار می‌رود.

۶. تشکر و قدردانی

این مقاله به اهتمام شرکت صنایع فروآلیاژ ایران تهیه و نگارش شده است. بدین وسیله از این شرکت در راستای حمایت از نگارش این مقاله قدردانی به عمل می‌آید.

محققین عملکرد بتن‌های حاوی دوده سیلیس ساخته شده با مواد افزودنی حباب هواساز در برابر چرخه‌های ذوب و یخ را مثبت گزارش کرده اند [۳۴]. بعضی دیگر از مطالعات، همانند تحقیق کاراکورت و بایزیت^۱، نشان دهنده عملکرد ضعیف‌تر بتن‌های حاوی دوده سیلیس بدون مواد حباب هواساز و عملکرد مشابه بتن معمولی در صورت استفاده از مواد حباب هواساز است (شکل ۹). در این تحقیق عملکرد بتن پرمقاومت ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۳ و ۲۰ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان بسیار مناسب ارزیابی شده است [۳۵].



شکل ۹- پوسته پوسته شدن سطح بر اثر ۲۸ چرخه یخ زدن و آب شدن [۳۵].

۷.۳.۴. سایش و فرسایش سطح

تحقیقات نشان‌دهنده بهبود عملکرد بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس در برابر سایش سطحی بر اثر عبور وسایل نقلیه و یا جریان سیال‌های ساینده می‌باشند ([۲] و [۴]). برای نمونه لیو^۲ در تحقیقی اثر مثبت افزودن دوده سیلیس بر روی میزان سایش بر اثر جریان عبوری از سطح ترک خورده و سالم بتن را گزارش داده است (شکل ۱۰) [۳۶].

^۱ - Karakurt and Bayazit

^۲ - Liu

- [1] Deolalkar, S.P., Shah, A. and Davergave, N. (2015). "Designing green cement plants.", Butterworth-Heinmann.
- [2] Bribián, I.Z., Capilla, A.V. & Usón, A.A., (2011). "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.", *Building and environment*, 46(5), pp.1133-1140.
- [۳] مهتا، ك.، مونته ئیرو، پ.، ترجمه رمضانیانپور، ع.ا.، قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، (۱۳۹۴). "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". چاپ ششم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [4] Khodabakhshian, A., De Brito, J., Ghalehnovi, M., & Shamsabadi, E. A. (2018). "Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.", *Construction and Building Materials*, 169, 237-251.
- [۵] هلند، ت.سی.، ترجمه رمضانیانپور، ع.ا.، اعرابی، ن.، "راهنمای مصرف میکروسیلیس در بتن"، انتشارات نگارنده دانش، تهران، ایران.
- [۶] رمضانیانپور، ع.ا. (۱۳۹۵)، "مواد جایگزین سیمان (پوزولانها)، خواص، دوام و توسعه پایدار"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- [7] Thomas, M. (2013) "Supplementary cementing materials in concrete." CRC press.
- [8] Ramezaniapour, A.A., Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S. & Moodi, F., (2014). "Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete.", *Construction and Building Materials*, 66, pp.222-228.
- [9] Mazloom, M., Ramezaniapour, A.A. & Brooks, J.J., (2004). "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete.", *Cement and Concrete Composites*, 26(4), pp.347-357.
- [۱۰] رمضانیانپور، ع.ا.، پیدایش، م.، (۱۳۸۹) "شناخت بتن (مصالح، خواص، تکنولوژی)"، انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، تهران، ایران.
- [11] ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [12] Ramezaniapour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M. & Moodi, F., (2011). "Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength.", *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2472-2479.
- [13] NT Build 492, "chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", Nordic Council of Ministers.
- [14] Marcotte, T.D. & Hansson, C.M., (2003), "The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water.", *Journal of Materials Science*, 38(23), pp.4765-4776.
- [15] Manera, M., Vennesland, Ø. & Bertolini, L., (2008), "Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume.", *Corrosion Science*, 50(2), pp.554-560.
- [16] Hooton, R.D., (1993), "Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity.", *Materials Journal*, 90(2), pp.143-151.
- [17] Brown, P.W., (1981), "An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment.", *Cement and Concrete Research*, 11(5-6), pp.719-727.
- [18] Nasser, K.W. & Ghosh, S., (1994), "Durability properties of high strength concrete containing silica fume and lignite fly ash.", *Special Publication*, 145, pp.191-214.
- [19] Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M. & Saadi, M.M., (1995), "Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements", *ACI Materials Journal*, 92(1), pp.15-24.

[20] Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., De Brito, J., & Shamsabadi, E. A. (2018). "Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.", *Journal of cleaner production*, 170, 42-60.

[21] Roy, D.M., Arjunan, P. & Silsbee, M.R., (2001). "Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete.", *Cement and Concrete Research*, 31(12), pp.1809-1813.

[22] Alexander, M., Bertron, A. & De Belie, N., (2013). "Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments", New York, Springer.

[23] Durand, B., Bérand, J., Roux, R. & Soles, J.A., (1990). "Alkali-silica reaction: the relation between pore solution characteristics and expansion test results.", *Cement and Concrete Research*, 20(3), pp.419-428.

[24] Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (2002). "Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete.", *Cement and Concrete Research*, 32(3), 341-349.

[25] Bleszynski, R. F. (2003). "The performance and durability of concrete with ternary blends of silica fume and blast-furnace slag.", Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada.

[26] Fournier, B., Nkinamubanzi, P. C., & Chevrier, R. (2004). "Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete." In *Proceedings of the Twelfth International Conference Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (Vol. 1, pp. 528-537).

[27] Khan, M.I. & Siddique, R., (2011). "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties.", *Resources, Conservation and Recycling*, 57, pp.30-35.

[28] Kulakowski, M.P., Pereira, F.M. & Dal Molin, D.C., (2009). "Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete.", *Construction and Building Materials*, 23(3), pp.1189-1195.

[29] Gjorv, O.E., (1983) "Silica concrete-protection against corrosion of embedded steel.", *Special Publication*, 79, pp.719-730.

[30] Durning, T.A. & Hicks, M.C., (1991). "Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals.", *Concrete international*, 13(3), pp.42-48.

[31] Mehta, P.K., (1985). "Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes.", *Cement and Concrete Research*, 15(6), pp.969-978.

[32] Alexander, M.G. & Fourie, C., (2011), "Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack.", *Materials and structures*, 44(1), pp.313-330.

[33] Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M. & Khelafi, H., (2014). "Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar.", *Powder technology*, 254, pp.314-323.

[34] Maage, M., Vennesland, Ø. & Gautefall, O., (1985). "Modifisert Portlandsement." In *Delrapport 3. Fasthetsutvikling og E-modul. FCB/SINTEF*. Norwegian Institute of Technology Trondheim.

[35] Karakurt, C. & Bayazit, Y., (2015). "Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume.", *Advances in Materials Science and Engineering*.

[36] Liu, Y.W., (2007). "Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume.", *Construction and Building Materials*, 21(5), pp.972-977.

تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی بتن



صادق خزایی
دانشجوی کارشناسی ارشد
گرایش مدیریت ساخت
دانشگاه بوعلی سینا همدان



محمود نیلی
دانشیار دانشگاه بوعلی سینا همدان
عضو انجمن بتن ایران



ابراهیم قیاسوند
استادیار دانشکده کبودرآهنگ
دانشگاه بوعلی سینا همدان
عضو انجمن بتن ایران



افشین محمدی بلبان آباد
دانشجوی کارشناسی ارشد
گرایش مدیریت ساخت
دانشگاه بوعلی سینا همدان

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 زمانی که حفرات خالی بتن را به صورت کامل اشغال نکرده باشد و به دیواره‌های اطرافش فشار وارد نکند مضر نیست. در صورتی که شرایط فراهم و ژل انبساط تخریب‌کننده 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 شده است 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

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 و یا هر منبع دیگر واکنش داده و ژل مخربی را تولید می‌کند. به دلیل کنش میان

سیلیس و قلیایی به این واکنش، واکنش قلیایی سیلیسی^۱ می گویند. در سرتاسر دنیا، این واکنش یکی از عمده ترین مشکلات دوامی بتن محسوب می شود که به طرز قابل توجهی باعث کاهش عمر سرویس دهی و افزایش هزینه های نگهداری و بازسازی می شود [۱ و ۲].

ژل تولید شده در واکنش قلیایی - سیلیسی به دلایلی از جمله دارا بودن گروه های آب دوست (O^- و O^-Na^+) در ساختار خود و ایجاد نیروی وان دروالسی توسط آن ها، دافعه ای الکترواستاتیکی بین لایه های مختلف ژل^۲، فشار اسمزی و اثر گیبس-دونان^۳ تمایل زیادی به جذب آب دارد [۳-۵]. این ویژگی از جمله شاخص ترین ویژگی های این ژل بوده که باعث می شود آب های موجود در اطراف خود را جذب کرده و انبساط پیدا کند [۶]. ژل در حفره های خالی موجود در بتن حرکت کرده و پس از پر کردن همه فضاهای خالی، به دیواره های داخلی حفره فشار وارد می کند [۷]. مخرب بودن ژل تولید شده تابع عوامل مختلفی است که از جمله مهم ترین آن ها می توان به تنش تسلیم و خواص ریزساختار ژل اشاره کرد. تنش تسلیم یا بطور کلی خواص رئولوژیکی ژل، تعیین کننده ترین ویژگی برای تشخیص مخرب بودن یا نبودن ژل است. در صورتی که تنش تسلیم ژل از مقاومت کششی بتن بیشتر باشد، مانند یک جسم جامد سخت عمل کرده و باعث ایجاد ترک در بتن می شود، در غیر این صورت ژل بدون ایجاد فشار داخلی، مانند یک سیال آزادانه در حفرات خالی حرکت می کند. بنابراین، صرف تشکیل ژل دلیلی بر مخرب بودن واکنش نیست و عوامل مختلفی تأثیرگذار هستند [۸].

اگر تنش تسلیم ژل بیشتر از مقاومت کششی بتن باشد ترک هایی ایجاد می شود. وجود ترک در داخل بتن باعث ضعیف شدن بتن می شود [۹]. در صورتی که واکنش

پیشرفت کند تعداد ترک ها و همچنین ضخامت آن ها افزایش پیدا می کند. افزایش تعداد و ضخامت ترک ها سبب می شود آن ها به هم متصل شوند و شبکه ای یکپارچه از ترک ها را تشکیل دهند. هرچه ارتباط ترک ها بیشتر باشد اثرات مخرب تری دارد و بتن را ضعیف تر می کند.

این واکنش برای شروع و پیشرفت نیازمند سه عامل: سیلیس فعال، قلیایی و رطوبت می باشد. بنابراین، بیشتر در سازه هایی مانند پل ها، سدها، روسازی ها و نیروگاه هایی که مداوم در معرض رطوبت هستند، رایج می باشد [۱۰-۱۳]. واکنش قلیایی - سیلیسی یک واکنش دراز مدت بوده که حداقل ۲۰-۵ سال زمان نیاز دارد تا نمایان گردد. این واکنش به دلیل عدم شناخت کافی و همچنین نیاز به زمان زیاد برای ظاهر سازی از آن با نام سرطان بتن یاد می شود.

ترک های سطحی، جابجایی نسبی و پاشیدگی ژل سفید رنگ از جمله علائم ظاهری ایجاد شده در بتن توسط واکنش قلیایی - سیلیسی است. عمده ترین شیوه ی ظاهر سازی واکنش، ترک های سطحی نقشه مانند^۴ است که دارای جهات تصادفی می باشد. اگرچه مشکلات دوامی دیگری نیز مانند چرخه ذوب و انجماد و حمله سولفاتی نیز چنین ترک هایی را ایجاد می کنند.

¹ Alkali Silica Reaction (ASR)

² Double Layer Theory

³ Gibbs-Donnan effect

⁴ Map Cracking



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

مکانیسم و شیمی واکنش

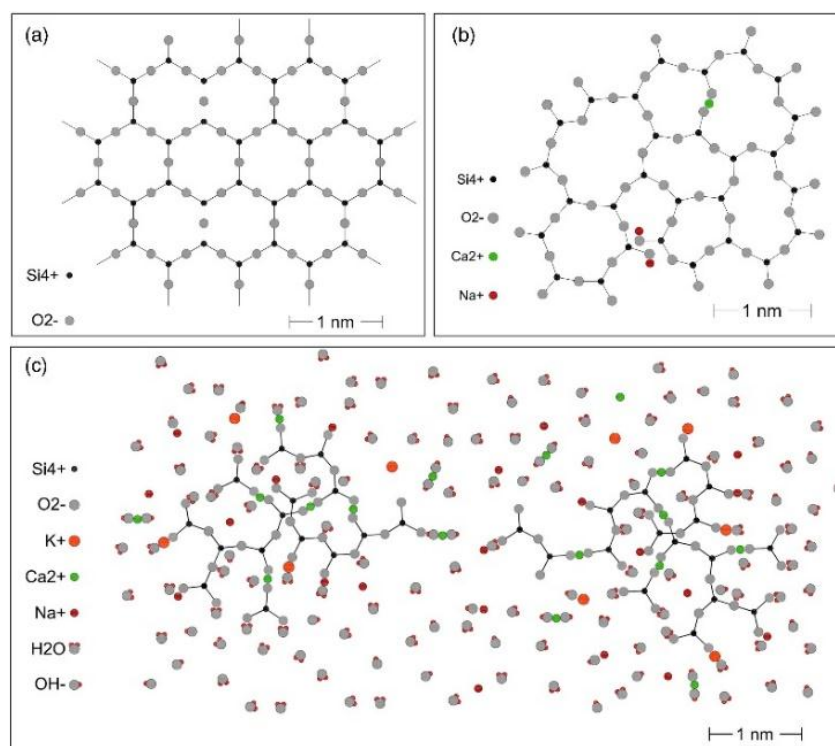
همواره بهترین روش برای بررسی و پیشگیری از یک پدیده، شناخت ریزساختار و مکانیسم آن است. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز از این قاعده مستثنی نیست و بهترین راه برای جلوگیری و متوقف کردن واکنش، شناخت مکانیسم و ریز ساختار آن است. به عنوان مثال، با دانستن ساختار و مکانیسم ژل تولید شده توسط واکنش، می توان از ماده مکمل سیمانی یا افزودنی استفاده کرد که بیشترین تأثیرگذاری را دارد. فرضیه های متعددی در مورد مکانیسم و ریز ساختار واکنش ارائه شده است، اما هیچ کدام کامل نبوده و نتوانسته تمامی حالات را پوشش دهد.

همان گونه که از نام واکنش مشهود است، واکنش میان سیلیس فعال و قلیایی سیمان است. اما این تعریف تنها برای ساده سازی معرفی واکنش می باشد و در حقیقت واکنش های دیگری رخ داده و نهایتاً بعد از چند مرحله قلیایی ها با سیلیس واکنش می دهند. ساختار سیلیس متشکل از گروه های تکرار شونده ی $(\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv)$ است. در این ساختار اتم های اکسیژنی در انتهای شبکه قرار دارند که تمامی ظرفیت آن ها پر نشده یا به عبارت دیگر هنوز توانایی واکنش با دیگر اتم ها را دارند.

در ابتدای واکنش یون های هیدروکسید (OH^-) موجود در محلول منافذ^۵ به سطح سنگدانه ها حمله کرده و با سیلیس موجود در سطح سنگدانه ترکیب می شوند. یعنی سیلیس مستقیماً توسط قلیایی ها مورد حمله قرار نمی گیرند. در واقع، یون هیدروکسید با اتم اکسیژن انتهایی واکنش می دهد. این واکنش باعث می شود که اتصالات بین اتم های مختلف در ساختار سیلیس از هم بپاشد و به راحتی یون هیدروکسید به داخل ساختار نفوذ کند که باعث پیشرفت واکنش و ترکیب هرچه بیشتر یون هیدروکسید با اتم های اکسیژن می شود.

عموماً در سیلیسی که دارای ساختار منظم و کریستالی است پس از واکنش یون هیدروکسید با اتم های اکسیژن انتهایی، شبکه ی سیلیس از هم نمی پاشد و پس از مدتی که اکثر اتم های اکسیژن انتهایی مصرف شدند واکنش متوقف می شود. برخلاف این، همان گونه که توضیح داده شد در سیلیس فعال (آمورف) پس از واکنش یون هیدروکسید با اتم اکسیژن، ساختار سیلیس از هم فرو می پاشد [۱۴].

⁵ Pore Solution



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 شده است [۱۵].

کلسیم توسط ژل باعث می‌شود که کلسیم جایگزین سدیم در ترکیب ژل شود که به این واکنش، بازیایی قلیایی^۷ می‌گویند. با این تبادل ژل حاصل از واکنش قلیایی - سیلیسی تشکیل می‌شود که فرمول شیمیایی آن را می‌توان به صورت $(\text{SiO}_2) \cdot (\text{Na}_2\text{O})_n \cdot (\text{K}_2\text{O})_k \cdot (\text{CaO})_c \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$ یا با استفاده از نمادهای شیمی سیمان به صورت N-C-S-H نمایش داد [۱۷].

مطالعات متعددی در مورد نقش کلسیم در رفتار ژل انجام شده است، 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 [۱۸-۲۰]، در حالی که عده‌ی دیگری بر این باور هستند که وجود کلسیم باعث کاهش ظرفیت انبساط ژل و در نتیجه کاهش پتانسیل تخریب کنندگی آن می‌شود [۲۱ و ۲۲].

وجود گروه‌های $(\equiv\text{Si}-\text{OH})$ 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 به واسطه‌ی آن قلیایی‌ها با هیدروژن جابجا می‌شوند. به این واکنش اصطلاحاً 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ موجود در بتن، حل می‌شود که منجر به آزاد شدن یون کلسیم می‌شود. هم‌چنین ژل تمایل به جذب کلسیم دارد. جذب

⁷ Alkali Recycling

⁶ Ion Exchange

روش‌های کاهش اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی

همانطور که قبلاً اشاره شد برای شروع واکنش وجود سه عامل اصلی سیلیس فعال، قلیایی و رطوبت کافی لازم است تا واکنش رخ دهد. حذف هر کدام 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 واکنش‌نابودن سنگدانه، تقریباً غیرممکن است.

راه حل بعدی کنترل مقدار قلیایی سیمان است. استانداردها مقدار مجاز قلیایی ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$) سیمان را برای جلوگیری از انجام واکنش به ۰/۶٪ محدود کرده‌اند 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 شده‌اند 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 قرار گرفته و نتایج مطلوبی را ارائه کرده‌اند.

مطالعات نشان داده‌اند که هر ماده‌ی مکمل سیمانی با مقدار جایگزینی مناسب می‌تواند در سرکوب واکنش قلیایی - سیلیسی مؤثر باشد [۲۵-۲۸]. 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. در نتیجه، واکنش متوقف شده و اثرات مخرب آن کاهش پیدا می‌کند [۲۹ و ۳۰].

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 [۳۱ و ۳۲]. نمک‌های پایه لیتیم مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند 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].

باوجود تمامی فواید ترکیبات لیتیمی، متأسفانه 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].

^۸ Supplementary Cementitious Materials (SCM)

تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصات مکانیکی بتن

تأثیر مشکلات دوامی بر مشخصه‌های مکانیکی امری انکارناپذیر است. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز به دلیل تأثیراتی که بر بتن می‌گذارد قطعاً خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر اثر 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 بر آن شده خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در مورد تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصه‌های مکانیکی بتن ارائه شود.

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 [۳۵ و ۳۶]. 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 C227، ASTM C1260 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. به عنوان مثال، سنگدانه‌های واکنش‌پذیر پس از ۶ ماه حدود ۲۲ و ۲۵٪ به ترتیب در شرایط ASTM C1260 و ASTM C227 کاهش داشتند، در حالی که 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) قرار می‌گیرند که باعث می‌شود نتایج چندان قابل اعتماد نباشد.

تحقیق مشابهی توسط Giaccio و همکاران [۳۸] که از نمونه‌های بتنی در شرایط ASTM C1293 انجام شد. قاعدتاً استفاده از نمونه‌های بتنی و شرایط ASTM C1293 (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 شده است [۳۹]. به نظر می‌رسد رفتار نوسانی مقاومت فشاری در اثر واکنش قلیایی - سیلیسی به این علت است، زمانی که 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 حدوداً 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 دقیقاً 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 به طرز 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 شده است. در بعضی از تحقیقات اشاره شده است 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 [۴۲ و ۴۳]. در حالی که، 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

به سرعت تحت تأثیر قرار می‌دهد و با پیشرفت واکنش و سنین دراز مدت اثر خود را بسیار مشهودتر نشان می‌دهد [۴۴-۴۶]. 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 کوچکترین 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.

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 شده است. 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 می‌شود، 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 نهایتاً 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 متخلخل تر ساختن بتن باعث افت مشخصات مکانیکی می شود و در بین آن ها مقاومت کششی بتن بیشترین حساسیت و کاهش را داشته است، به طوری بیشترین کاهش در ۳ روز اول رخ داده است [۵۰].

تحقیقات متعددی نشان داده است که مقاومت خمشی تحت اثر واکنش قلیایی کاهش می یابد و این کاهش به نسبت مقاومت فشاری بسیار محسوس تر است. این تفاوت ممکن است به دلیل تفاوت بین روش آزمایش باشد که در آزمایش مقاومت فشاری ترک های ایجاد شده بسته می شوند، در حالی که آزمایش مقاومت خمشی باعث جدا شدن ترک ها می شود و در حقیقت ترک های ایجاد شده توسط ژل نیازمند تحریکی هستند که از هم جدا شوند که توسط آزمایش مقاومت خمشی فراهم می شود و ترک ها به سادگی گسترش می یابند [۳۸ و ۵۱].

در تحقیقی که اخیراً انجام شد، بیان شده است که بیشترین کاهش در مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) در سنین اولیه (۹۱ روز) رخ می دهد، در حالی که، انبساط نمونه های ملاتی در این سن کمتر از نصف انبساط یک ساله آن است. آن ها ادعا کردند که این اتفاق می تواند به این دلیل باشد که ترک ها قبل از انبساط ایجاد شده اند. این نتایج با نتایج به دست آمده از مطالعه ای که توسط فان و هانسون انجام شد مغایرت دارد. فان و هانسون [۵۲] در مقاله ی خود بیان کرده اند که اولین ترک های ایجاد شده در سن ۱۲۵ روز ظاهر می شوند و تغییرات در مشخصات مکانیکی قبل از ظهور ترک بسیار ناچیز می باشد.

تاکنون مطالعات متعددی بر روی واکنش قلیایی - سیلیسی در اعضای سازه ای هم چون تیرها و دال های مسلح بتنی انجام گرفته است [۵۳ و ۵۴]. مشاهده شده است که تیرهای شامل سنگدانه ی واکنش زا که در معرض شرایط واکنش قرار گرفته اند بعد از ۶ ماه ترک خورده اند. اما مقاومت خمشی آن ها در پایان یک سال با تیرهایی که با سنگدانه ی غیر واکنش زا ساخته شده تفاوت چندانی

نداشته اند. اگرچه، در همان تیرها سایر مشخصات مکانیکی کاهش پیدا کرده است [۴۱ و ۵۵].

به دلیل درازمدت بودن واکنش قلیایی - سیلیسی تأثیر آن در سنین طولانی مدت موضوع بسیار مهم و حیاتی است که تاکنون نتایج چندان مشخصی در دسترس نیست. قاعداً بررسی درازمدت آن نتایج معتبرتر و دقیق تری را ارائه می کند. در سال ۲۰۱۶، 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 آن ها 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 ملاحظه تر بود.

اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مقاومت کششی نیز مشابه مقاومت خمشی می باشد، بدین صورت که با پیشرفت واکنش مقدار مقاومت کششی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. مقدار افت در مقاومت کششی به نسبت مقاومت خمشی بسیار چشم گیر است [۳۹ و ۵۰].

عموماً، مقاومت کششی و مقاومت خمشی اجزای بتنی تحت تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی کاهش پیدا می کنند. این کاهش عمدتاً به این دلیل است که در حین انجام آزمایش نیروی وارد شده در هر دو آزمایش هم جهت با نیروی وارد شده توسط ژل ایجاد شده است بنابراین، سعی در تشدید اثر آن دارد و طبیعتاً بتن از ناحیه ی کششی بشدت آسیب پذیر نشان می دهد.

مدول الاستیسیته غالباً تحت فشار اندازه گیری می شود و در قسمت قبلی هم منظور از مدول الاستیسیته، مدول الاستیسیته فشاری است. آزمایش مدول الاستیسیته ی نمونه هایی که در شرایط واکنش قلیایی - سیلیسی قرار داده شده بودند، نشان داد که مدول الاستیسیته تحت کشش رفتار منظم تری به نسبت حالت فشاری دارد.

این چهار ویژگی بررسی شده جزو اصلی ترین مشخصه های بتن هستند و قاعداً بیشترین مطالعات در این زمینه بر روی آن ها صورت گرفته است. تأثیر واکنش قلیایی -

سیلیسی بر خواص دیگری نیز بررسی شده است اما به دلیل اهمیت کم تر در اینجا ذکر نگردیده است.

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

یکی از مشکلات عمده در حوزه ی واکنش قلیایی - سیلیسی عدم وجود آزمایش قابل اعتماد برای ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه است. آزمایش های کنونی هر کدام معایب و نواقصی دارند. با توجه به مطالب ذکر شده می توان به این نتیجه رسید که به دلیل حساسیت و تأثیر پذیری زیاد مشخصات مکانیکی به واکنش، برخی از آن ها می توانند معیار مناسب و قابل اعتمادی برای ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه ها باشند.

در خصوص ارزیابی پتانسیل استفاده از مشخصه های مکانیکی به عنوان روشی برای بررسی واکنش پذیری سنگدانه ها مطالعات زیادی منتشر شده است [۴۷ و ۴۰]. مشخصه هایی هم چون مدول الاستیسیته و مقاومت کششی که بیشترین حساسیت را به واکنش قلیایی - سیلیسی دارند می توانند معیارهای مناسبی باشند.

تحقیقات دیگری نیز نشان داده اند که روش های غیر مستقیم همانند آزمایش آسیب سختی^۹، شاخص نرخ آسیب^{۱۰} و شاخص تغییر شکل پلاستیک^{۱۱} پتانسیل بسیار خوبی دارند که به عنوان یک روش برای ارزیابی واکنش مورد استفاده قرار بگیرند [۵۷-۶۰].

نتیجه گیری

همواره مشکلات دوامی و مشخصه های مکانیکی بتن رابطه ی انکار ناپذیری داشته و قطعاً این مشکلات می تواند ویژگی های مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار دهد. واکنش قلیایی - سیلیسی نیز به دلیل ایجاد ژل منبسط شونده و

تولید ترک می تواند باعث تضعیف داخلی بتن شود و مشخصه های مکانیکی آن را تغییر دهد.

انبساط ژل در حفرات خالی به دیواره ی داخلی حفرات نیروی فشاری وارد می کند و باعث بوجود آمدن نیروی کششی در داخل بتن می شود. این نیروی کششی سبب ایجاد ترک می شود. با پیشرفت واکنش ترک ها افزایش یافته و اتصال آن ها به هم باعث بوجود آمدن شبکه ی یکپارچه ای از ترک ها می شود. قاعدتاً اتصال ترک ها باعث می شود بتن تحت بارهای وارده ضعیف تر شود.

از مرور نتایج تحقیقات صورت گرفته روی تأثیر واکنش قلیایی - سیلیسی بر مشخصه های مکانیکی می توان به نتایج کلی زیر پی برد:

- در مورد تأثیر واکنش بر مقاومت فشاری نتایج ضد و نقیض فراوانی بیان شده است، اما اکثر تحقیقات نشان داده اند که مقاومت فشاری در شرایط واکنش قلیایی - سیلیسی کاهش می یابد. اگرچه در بین تمامی مشخصه های یاد شده کم ترین افت را دارد.

- در بین مشخصه های مکانیکی بیشترین تأثیر پذیری را مدول الاستیسیته و مقاومت کششی داشتند. نتایج حاصل از مطالعات نشان می دهند که این دو مشخصه می توانند به عنوان روشی برای ارزیابی واکنش مورد استفاده قرار بگیرند.

- مقاومت خمشی نیز به دلیل درگیر ساختن مقاومت کششی بتن تأثیر پذیری زیادی از واکنش قلیایی - سیلیسی دارد. میزان افت مقاومت خمشی به دلیل واکنش به نسبت مقاومت فشاری بسیار چشم گیر تر است.

- به طور کلی آزمایش هایی که مقاومت کششی بتن را تحت تأثیر قرار بدهند بسیار به واکنش حساس تر هستند. همانطور که اشاره شد ایجاد ترک داخلی در بتن باعث بوجود آمدن نیروی کششی در بتن می شود، پس قطعاً بتن در کشش بسیار حساس تر و شکننده تر می شود.

با توجه به تأثیر پذیری مشخصه های مکانیکی بتن از واکنش قلیایی - سیلیسی قطعاً می توان با بررسی دقیق و ارزیابی اندرکنش میان آن ها از مشخصه های مکانیکی و یا سایر خصوصیات دیگر بتن به عنوان روشی برای ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه ها استفاده نمود.

⁹ Stiffness Damage test (SDT)

¹⁰ Damage Rating Index (DRI)

¹¹ Plastic Deformation Index (PDI)

- [1] Wang, X. et al. (2010) 'Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete Infrastructure-Synthesis Report', Csiro.
- [2] Hayes, N. W. et al. (2018) 'Monitoring Alkali-Silica Reaction Significance in Nuclear Concrete Structural Members', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(4), pp. 179–190.
- [3] Alnaggar, M., Cusatis, G. and Di Luzio, G. (2013) 'Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures', *Cement and Concrete Composites*, 41, pp. 45–59.
- [4] Visser, J. H. M. (2018) 'Fundamentals of alkali-silica gel formation and swelling: Condensation under influence of dissolved salts', *Cement and Concrete Research*, 105(February 2017), pp. 18–30.
- [5] Prezzi, M., Monteiro, P. J. M. and Sposito, G. (1997) '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.
- [6] Cai, Y., Xuan, D. and Poon, C. S. (2019) 'Effects of nano-SiO₂ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 201, pp. 295–302.
- [7] Ponce, J. M. and Batic, O. R. (2006) 'Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 36(6), pp. 1148–1156.
- [8] Kawamura, M. and Iwahori, K. (2004) 'ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint', *Cement and Concrete Composites*, 26(1), pp. 47–56.
- [9] Leger, P., Cote, P. and Tinawi, R. (1996) 'Finite element analysis of concrete due to alkali-aggregate reactions in dams', *Computers and Structures*, 60(4), pp. 601–611.
- [10] Ichikawa, T. and Kimura, T. (2012) 'Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete', 3131(October 2013), pp. 37–41.
- [11] Giebson, C., Seyfarth, K. and Stark, J. (2010) 'Influence of acetate and formate-based deicers on ASR in airfield concrete pavements', *Cement and Concrete Research*, 40(4), pp. 537–545.
- [12] Munir, M. J. et al. (2016) 'a Literature Review on Alkali Silica Reactivity of Concrete in Pakistan', *Pakistan Journal of Science*, 68(1), pp. 53–62.
- [13] Lukschová, Š., Příkryl, R. and Pertold, Z. (2009) 'Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges', *Construction and Building Materials*, 23(2), pp. 734–741. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.020.
- [14] Dent Glasser, L. S. and Kataoka, N. (1981) 'The chemistry of "alkali-aggregate" reaction', *Cement and Concrete Research*, 11(1), pp. 1–9.
- [15] Rajabipour, F. et al. (2015) 'Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 76, pp. 130–146.
- [16] Chatterji, S. (2005) 'Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates', *Cement and Concrete Composites*, 27(7–8), pp. 788–795.
- [17] Gholizadeh Vayghan, A., Rajabipour, F. and Rosenberger, J. L. (2016) 'Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the Gel's deleterious behavior', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 83, pp. 45–56.
- [18] Bleszynski, R. F. and Thomas, M. D. a (1998) 'Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions', *Advanced Cement Based Materials*, 7(2), pp. 66–78.
- [19] Leemann, A. et al. (2011) 'Alkali-Silica reaction: The Influence of calcium on silica dissolution and the formation of reaction products', *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), pp. 1243–1249.
- [20] Shafaatian, S. M. H. et al. (2013) 'How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?', *Cement and Concrete Composites*, 37(1), pp. 143–153.
- [21] Utton, C. A. et al. (2013) 'Dissolution of vitrified wastes in a high-pH calcium-rich solution', *Journal of Nuclear Materials*, 435(1–3), pp. 112–122.

- [22]Maraghechi, H. et al. (2016) 'Effect of calcium on dissolution and precipitation reactions of amorphous silica at high alkalinity', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 87, pp. 1–13.
- [23]Folliard, K. J. et al. (2016) '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.
- [24]Drolet, C., Duchesne, J. and Fournier, B. (2017) 'Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 157, pp. 263–276.
- [25]Thomas, M. (2011) 'The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41(12), pp. 1224–1231.
- [26]Yazıcı, H. et al. (2019) 'Comparing the alkali-silica reaction mitigation potential of admixtures by using different accelerated test methods', *Construction and Building Materials*, 197, pp. 597–614.
- [27]Rashidian-Dezfouli, H., Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. (2018) '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, 15(July 2017), pp. 171–180.
- [28]Ibrahim, S. and Meawad, A. (2018) 'Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 182, pp. 451–458.
- [29]Kazmi, S. M. S. et al. (2017) 'Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 148, pp. 231–240.
- [30]Saha, A. K. et al. (2018) 'The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 171, pp. 743–758.
- [31]Guo, S., Dai, Q. and Si, R. (2019) 'Effect of calcium and lithium on alkali-silica reaction kinetics and phase development', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 115(October 2018), pp. 220–229.
- [32]Hargis, C. W., Juenger, M. C. G. and Monteiro, P. J. M. (2013) 'Aggregate passivation: Lithium hydroxide aggregate treatment to suppress alkali-silica reaction', *ACI Materials Journal*, 110(5), pp. 567–575.
- [33]Demir, İ. and Sevim, Ö. (2017) 'Effect of sulfate on cement mortars containing Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr', *Construction and Building Materials*, 156, pp. 46–55.
- [34]Kim, T. and Olek, J. (2015) '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.
- [35]Nixon, P. J. and Bollinghaus, R. (1985) 'The effect of alkali aggregate reaction on tensile and compressive strength of concrete', *Durability of building materials*, 2(3), pp. 243–248.
- [36]Jones, A. E. K. and Clark, L. A. (1998) 'The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment', *Engineering Structures*, 20(9), pp. 785–791.
- [37]Munir, M. J. et al. (2017) 'Role of test method in detection of alkali-silica reactivity of concrete aggregates', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 171(5), pp. 203–221.
- [38]Giaccio, G. et al. (2008) 'Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction', *Cement and Concrete Research*, 38(7), pp. 993–1004.
- [39]Ahmed, T. et al. (2003) 'The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete', *Construction and Building Materials*, 17(2), pp. 123–144.
- [40]Islam, M. S. and Ghafoori, N. (2015) 'Relation of ASR-induced expansion and compressive strength of concrete', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(12), pp. 4055–4066.
- [41]Barbosa, R. A. et al. (2018) '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, 176, pp. 440–451.
- [42]Yurtdas, I. et al. (2013) 'Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar', *Construction and Building Materials*, 47, pp. 165–174.
- [43]Bektas, F. and Wang, K. (2012) 'Performance of ground clay brick in ASR-affected concrete: Effects on expansion, mechanical properties and ASR gel chemistry', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 34(2), pp. 273–278.

- [44]Fournier, B. et al. (2004) 'Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali--Silica Reaction—A Review. MTL 2004-11 (OP)', Natural Resources Canada, Ottawa.
- [45]Michael, D. A. T. et al. (2013) '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.
- [46]Thomas, M. D. a. et al. (2013) 'Methods for Evaluating and Treating ASR-Affected Structures: Results of Field Application and Demonstration Projects; Volume I: Summary of Findings and Recommendations', I, pp. 1–70.
- [47]Islam, M. S. and Ghafoori, N. (2018) 'A new approach to evaluate alkali-silica reactivity using loss in concrete stiffness', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 167, pp. 578–586.
- [48]Gautam, B. P. and Panesar, D. K. (2017) 'The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 140, pp. 310–320.
- [49]Li, Z., Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. (2016) 'Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 102, pp. 631–639.
- [50]Smaoui, N. et al. (2005) 'Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete', *Cement and Concrete Research*, 35(2), pp. 203–212.
- [51]Marzouk, H. and Langdon, S. (2003) 'The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete', *Cement and Concrete Composites*, 25(4–5), pp. 549–556.
- [52]Gautam, B. P. et al. (2017) 'Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 95, pp. 75–83.
- [53]Allard, A. et al. (2018) 'Expansive behavior of thick concrete slabs affected by alkali-silica reaction (ASR)', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 171, pp. 421–436.
- [54]Multon, S., Seignol, J. F. and Toutlemonde, F. (2005) 'Structural behavior of concrete beams affected by alkali-silica reaction', *ACI Materials Journal*, 102(2), pp. 67–76.
- [55]Fan, S. and Hanson, J. M. (1998) 'Effect of alkali silica reaction expansion and cracking on structural behavior of reinforced concrete beams', *ACI Structural Journal*, 95(5), pp. 498–505.
- [56]Hiroi, Y. et al. (2016) 'Experimental and analytical studies on flexural behavior of post-tensioned concrete beam specimen deteriorated by alkali-silica reaction (ASR)', *15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, (2).
- [57]Giannini, E. R. et al. (2018) 'Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 162, pp. 253–264.
- [58]Sanchez, L. F. M. et al. (2015) 'Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI)', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 67, pp. 74–92.
- [59]Sanchez, L. F. M. et al. (2016) '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, 125, pp. 1178–1188.
- [60]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 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*. Austin, Texas, USA, 2012a.