

The impact of the size of reactive aggregate on the mechanical properties of concrete and the extent of ASR damage over the time

Maryam Abbasian Taeb¹, Freydoon Rezaie^{2*}, Ebrahim Ghiasvand³

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

Alkali-Silica Reaction (ASR) is identified as one of the reasons for destruction of the concrete structures and poses a threat to its durability. ASR causes the cement paste to expand, crack, and consequently weakens the strength of the concrete. The simplest solution to prevent ASR is to test aggregates' reactivity potential, identify the reactive ones, and then exclude them from the concrete mix. This research aims to examine the impact of fine and coarse reactive aggregate on (1) the mechanical properties of damaged concrete including compressive strength, tensile strength, and modulus of rupture, and (2) the extent of expansion that occurred over time due to the occurrence of this phenomenon. To this aim, four concrete mixtures are made using different combinations of fine and coarse aggregates, that could be reactive or nonreactive, with a water-cement ratio of 0.5. According to the results, the concrete mix whose reactive part was only sand or only gravel expanded 4.4 or 3.5 times over the control mix design (a concrete mixture that is only made of non-reactive aggregates), respectively. Furthermore, using fine reactive aggregates in the concrete mixture reduces compressive strength, tensile strength, and modulus of rupture compared to using coarse reactive aggregates. Therefore, replacing reactive sand with non-reactive sand is recommended as a more effective solution to control the ASR, compared to replacing reactive gravel with non-reactive gravel.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 July 2023

Revise Date: 16 September 2023

Accept Date: 24 September 2023

Keywords:

Alkali-silica reaction
Reactive aggregate Size
Compressive strength
Tensile strength
Modulus of rupture

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408846.3183>

*Corresponding author: Freydoon Rezaie
Email address: frezaie@basu.ac.ir

تأثیر اندازه‌ی سنگ‌دانه بر خصوصیات مکانیکی و میزان آسیب‌های وارده به بتن ناشی از وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی در گذر زمان

مریم عباسیان طائب^۱، فریدون رضایی^{۲*}، ابراهیم قیاسوند^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

واکنش قلیایی-سیلیسی به عنوان یکی از دلایل تخریب سازه‌های بتنی در گذر زمان و تهدیدی برای دوام آنها شناسایی شده است. این واکنش موجب انبساط خمیر سیمان، ترک خوردن و به دنبال آن از دست رفتن مقاومت بتن می‌شود. ساده‌ترین راهکار برای جلوگیری از این واکنش، بررسی قابلیت واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها و عدم مصرف سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر در بتن است. هدف از این پژوهش، بررسی میزان تأثیرگذاری سنگ‌دانه‌ی ریز و درشت واکنش‌پذیر بر خصوصیات مکانیکی بتن آسیب‌دیده شامل مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی و نیز میزان انبساط رخ داده در آن ناشی از وقوع این پدیده‌ی مخرب در گذر زمان است. بدین منظور، چهار نوع مخلوط بتنی از ترکیب‌های مختلف سنگ‌دانه‌ی ریز و درشت واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر با نسبت آب به سیمان ۰/۵ در آزمایشگاه ساخته شد. نمونه‌های مورد مطالعه به مدت ۶ ماه در محیط شبیه‌سازی شده و تحت شرایط تسریع‌شده قرار گرفت. نتایج نشان داد، انبساط مخلوط بتنی که بخش واکنش‌پذیر سنگ‌دانه‌های مصرفی آن، فقط ماسه یا فقط شن بود، به ترتیب به مقدار ۴/۴ و ۳/۵ برابر طرح مخلوط شاهد (مخلوط بتنی که تمام سنگ‌دانه‌های ریز و درشت آن غیر واکنش‌پذیر می‌باشد) بود. همچنین، مصرف سنگ‌دانه‌ی ریز واکنش‌پذیر در مقایسه با مصرف سنگ‌دانه‌ی درشت واکنش‌پذیر، موجب کاهش بیشتر مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی در مخلوط بتن شد. بنابراین، جایگزینی ماسه‌ی واکنش‌پذیر با ماسه‌ی غیر واکنش‌پذیر، در مقایسه با جایگزینی شن واکنش‌پذیر با شن غیر واکنش‌پذیر به عنوان راهکار مؤثرتری برای کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: واکنش قلیایی - سیلیسی، اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408846.3183	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.408846.3183	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۲	۱۴۰۲/۰۷/۰۲	۱۴۰۲/۰۶/۲۵	۱۴۰۲/۰۵/۰۵
			فریدون رضایی frezaie@basu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

واکنش قلیایی - سیلیسی پدیده‌ای مخرب است که به مرور زمان بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر رخ می‌دهد. وقوع این واکنش موجب تولید ژل خاصی می‌شود که تمایل زیادی به جذب آب داشته و با جذب آن متورم می‌شود و به تدریج ترک‌هایی در بتن ایجاد می‌کند [۱]. این ترک‌ها، بتن را تضعیف نموده و بر خصوصیات مکانیکی بتن و دوام بتن تأثیر نامناسبی دارد [۲]. البته خواص مکانیکی و دوام بتن، با توجه به نوع سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر، شرایط و کیفیت واکنش، با شدت و درجات مختلف تحت تأثیر واکنش قلیایی قرار می‌گیرد [۳]. تحقیقات متعدد در مورد تأثیر این واکنش بر روی مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن انجام شده است. این مطالعات در شرایط تسریع شده، یعنی دما و قلیائیت بالا، انجام شده است. هرچند انتظار می‌رود، با انجام آزمایش‌ها در شرایط تسریع‌نشده نتایج واقعی‌تری حاصل شود، اما با این وجود رابطه معناداری بین واکنش قلیایی و برخی از این خواص مکانیکی گزارش شده است. محمدی و همکاران [۴]، با مروری که بر تحقیقات پیشین داشتند، به این نتیجه رسیدند که اغلب خواص مکانیکی تحت تأثیر این واکنش کاهش می‌یابد؛ البته برخی خواص، رفتار یکنواخت نشان نمی‌دهند. مدول الاستیسیته و مقاومت کششی در مقایسه با سایر خواص، حساسیت بالایی نسبت به واکنش قلیایی دارند و معیار بهتری برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها هستند [۵].

خصوصیات مختلف سنگ‌دانه فعال مثل نوع، اندازه، شکل و بافت سنگ‌دانه بر انبساط ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی تأثیر دارد. تحقیقات زیادی در مورد اثر اندازه سنگ‌دانه بویژه اندازه مخرب^۱ انجام شده است. منظور از اندازه مخرب، یک اندازه خاص یا رده‌ای از اندازه‌ی سنگ‌دانه است که بیشترین انبساط را ایجاد کند [۶]. بیشتر تحقیقات با موضوع اندازه مخرب بر روی ماسه و نمونه‌های ملات متمرکز بوده است [۷]. در بعضی موارد، نتایج بدست آمده از تحقیقات نیز متناقض هستند. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که با کاهش اندازه سنگ‌دانه فعال، انبساط ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی افزایش می‌یابد [۸، ۹]. از طرف دیگر تحقیقات دیگر نشان داده است که وقتی اندازه ذرات واکنش‌پذیر، کمتر از ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر باشد، انبساط ناچیز خواهد بود [۱۰]. در برخی منابع، حتی استفاده از پودر بدست آمده از سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر، برای مقابله با اثرات واکنش قلیایی - سیلیسی پیشنهاد شده است [۱۰].

ژانگ و همکاران [۹]، تأثیر اندازه و دانه‌بندی سنگ‌دانه را روی انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی در نمونه‌های ملات مطالعه کردند. نتایج ایشان نشان داد، دانه‌بندی سنگ‌دانه می‌تواند بطور قابل توجهی بر انبساط ایجاد شده تأثیر بگذارد. چنانچه سنگ‌دانه‌های بزرگتری در نمونه وجود داشته باشد، انبساط در سنین اولیه کوچکتر است، اما در سنین بعدی به طور مستمر افزایش می‌یابد. رامیار و همکاران [۱۱]، تأثیر اندازه و شکستگی ذرات سنگ‌دانه‌ها را بر روی انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی بررسی کردند. علی‌رغم شباهت شیمیایی و کانی‌شناسی، مشاهده شد که در تمام رده‌های اندازه‌ای، سنگ‌دانه شکسته انبساط بیشتری نسبت به سنگ‌دانه مشابه طبیعی دارد. به عبارت دیگر، شکستن سنگ‌دانه باعث تشدید انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی می‌شود. دونانت و اسکریونر [۱۲]، برای بررسی اثر اندازه سنگ‌دانه بر روی آسیب‌ها و انبساط‌های ایجاد شده، با ترکیب دو نوع سنگ‌دانه واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر از چهار رده اندازه‌های مختلف (شامل ۰-۲، ۲-۴، ۴-۸، ۸-۱۶ میلی‌متر)، مخلوط‌های بتنی متفاوتی ساختند. ایشان مشاهده نمودند که مخلوط متشکل از سنگ‌دانه واکنش‌پذیر با رده اندازه‌ی ۴-۸ میلی‌متر بیشترین انبساط را دارد. گائو و همکاران [۱۳]، اثر اندازه سنگ‌دانه و اندازه نمونه آزمایش را در ترکیب با هم بر روی انبساط ایجاد شده مطالعه کردند. بدین منظور تعدادی نمونه‌ی منشوری ملات در سه اندازه و از چهار رده اندازه سنگ‌دانه تهیه شد. نتایج این محققین نشان داد، با افزایش اندازه نمونه، اثر اندازه مخرب سنگ‌دانه کم‌رنگ می‌شود. گاتم و همکاران [۷]، اثر دانه‌بندی سنگ‌دانه درشت را بر انبساط و خسارات وارده بر بتن تحت اثر واکنش قلیایی - سیلیسی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد، ۱۰ درصد انحراف در دانه‌بندی درشت‌دانه‌ی واکنش‌پذیر، انبساط بتن را تا ۵۰ درصد می‌تواند افزایش دهد. بنابراین، دانه‌بندی پارامتر مهمی در مطالعه واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها و عملکرد بتن تحت اثر واکنش قلیایی - سیلیسی است.

¹ Pessimum size

در کلیه مطالعات، انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی، به عنوان معیاری از وقوع واکنش و شاخصی برای ارزیابی شدت آسیب‌ها مورد توجه بوده است. در سال‌های اخیر با گسترش مدل‌های تحلیلی اجزای محدود، برخی از پژوهشگران به دنبال ارائه روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی مقدار این انبساط بودند. به عنوان مثال یانگ و همکاران [۱۴]، توانستند با روش تحلیلی شبکه ذرات گسسته، ویژگی انبساط ناهمگن، ترک‌خوردگی و آسیب‌های وارده به بتن ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی را مدل‌سازی کنند. مدل ارائه شده برای مطالعه اثرات اندازه، توزیع و محتوای سنگ‌دانه‌ی واکنش‌زا بر انبساط و زوال بتن آسیب‌دیده ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی مورد استفاده قرار گرفت. پن و همکاران [۱۵]، نیز مدلی در مقیاس ذرات مزو برای شبیه‌سازی واکنش قلیایی - سیلیسی و مطالعه اثر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های درشت در بتن مورد استفاده برای سدها ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که اندازه سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی در بتن سدها، در مقایسه با بتن معمولی به طور قابل توجهی بر گسترش این پدیده و تخریب خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد. ژو و تاکاهاشی [۱۶]، نیز مدلی برای تخمین انبساط اعضای بتنی در معرض واکنش قلیایی - سیلیسی ارائه کردند که قادر به ارزیابی منطقی انبساط نمونه‌ها با در نظر گرفتن اندازه سنگ‌دانه‌ها و اثر سنگ‌دانه‌ی مخرب در ریزدانه‌های مصرفی (یعنی ماسه با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر) می‌باشد.

همانطور که اشاره شد، تحقیقات پیشین نشان داد که اندازه سنگ‌دانه بر مقدار انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی تأثیر دارد. از طرف دیگر مشخص شده است که خصوصیات مکانیکی بتن آسیب دیده ناشی از واکنش قلیایی با انبساط بتن رابطه دارد. لذا در این پژوهش، سعی بر آن است که میزان تأثیرگذاری اندازه سنگ‌دانه واکنش‌پذیر بر خصوصیات مکانیکی بتن آسیب‌دیده بررسی شود. بی‌شک نتیجه این مطالعه در تصمیم‌گیری برای جایگزینی سنگ‌دانه واکنش‌زا با نوع غیر واکنش‌زا، به عنوان یکی از راهکارهای کنترل واکنش قلیایی، مفید خواهد بود. بدین جهت چهار مخلوط بتنی از ترکیب‌های مختلف سنگ‌دانه‌ی ریز (ماسه) و درشت (شن) و واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر ساخته و مقاومت فشاری، کششی، مدول گسیختگی و انبساط ایجاد شده در بتن آسیب‌دیده اندازه‌گیری شد.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

روش انجام این تحقیق، تجربی و نیازمند انجام آزمایش‌هایی در محیط آزمایشگاه می‌باشد. بنابراین، مصالح لازم برای ساخت مخلوط بتن، یعنی سیمان و سنگ‌دانه‌ی مناسب تهیه گردید. از آنجا که هدف از این پژوهش، بررسی میزان تأثیرگذاری سنگ‌دانه‌ی ریز و درشت واکنش‌پذیر بر خصوصیات مکانیکی بتن می‌باشد، بنابراین دو نوع سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر تهیه و دانه‌بندی شد. مخلوط بتن بر اساس روش استاندارد ملی ایران [۱۷]، در آزمایشگاه ساخته و سپس نمونه‌های آزمایشگاهی بتن‌ریزی شد. از آنجا که وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی نیازمند گرما، رطوبت و قلیایی کافی می‌باشد [۱۸]، لذا، نمونه‌های ساخته شده برای مدتی، در محیط شبیه‌سازی شده، قرار گرفت تا این واکنش رخ دهد. در این مدت وضعیت نمونه‌ها پیوسته رصد گردید. در ادامه نیز، آزمایش‌های اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی بتن انجام شد.

۲-۱- مصالح و طرح مخلوط بتن

سیمان مورد استفاده برای تهیه بتن، سیمان نوع دو کارخانه‌ی هگمتانه همدان با قلیایی معادل ۰/۶۵ درصد بود. ترکیب شیمیایی سیمان در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

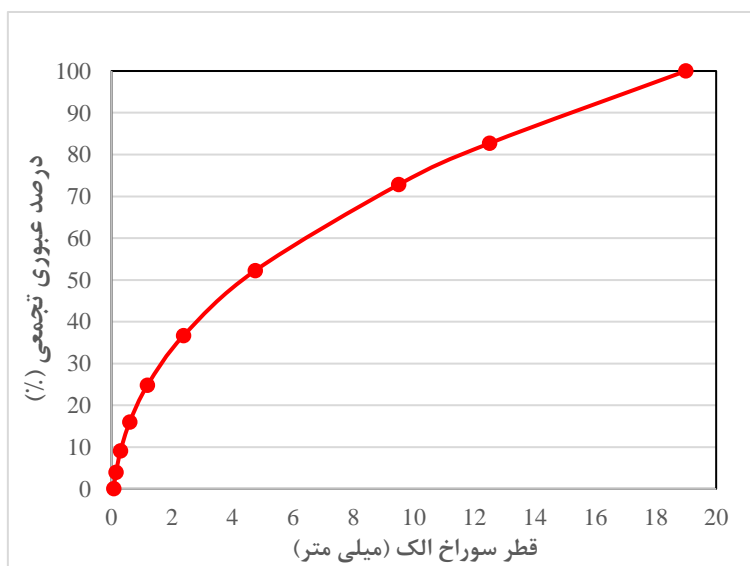
جدول ۱: خصوصیات شیمیایی سیمان

ترکیب	مقدار بر حسب درصد
SiO ₂	۲۱/۸۱
Al ₂ O ₃	۴/۵۲
Fe ₂ O ₃	۳/۶۹
CaO	۶۳/۶۴
MgO	۱/۴۸
Na ₂ O	۰/۴۲
K ₂ O	۰/۳۵
TiO ₂	۰/۱۵
SO ₃	۲/۲۶
LOI	۱/۴

سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر به ترتیب از معادن دامغان و همدان تهیه شد. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها در جدول ۲ درج شده است. حداکثر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر ۱۹ میلی‌متر و ضریب نرمی ترکیب شن و ماسه آنها ۴/۸۵ بود. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ی مصرفی برای ساخت بتن در شکل ۱ (اعم از واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر) نشان داده شده است.

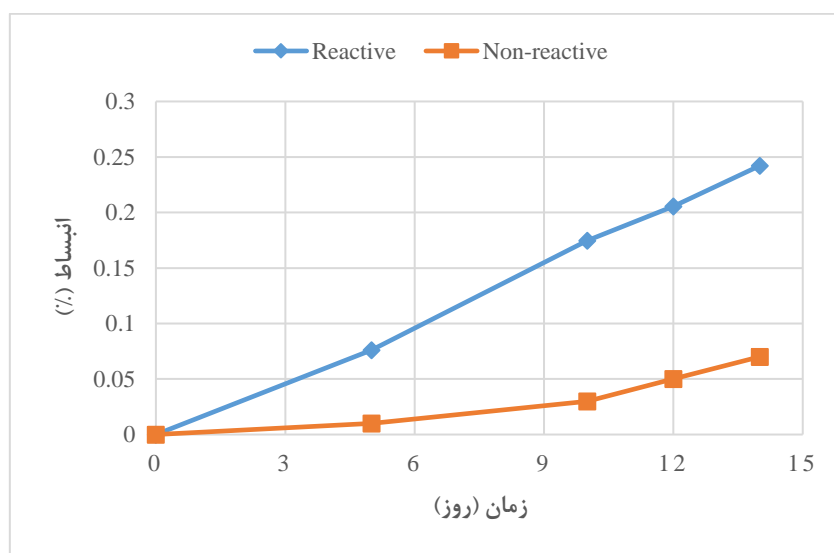
جدول ۲: خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه

سنگ‌دانه	جذب آب (%)	چگالی اشباع با سطح خشک	شکستگی (%)
ماسه	۲/۲	۲/۵۱	-
سنگ‌دانه واکنش‌پذیر	۱/۹	۲/۵۳	۲۰
ماسه	۲/۱۵	۲/۵۵	-
سنگ‌دانه غیر واکنش‌پذیر	۱/۳	۲/۶۳	۷۰



شکل ۱: منحنی دانه بندی

علاوه بر این، جهت ارزیابی واکنش پذیری سنگ‌دانه‌های مصرفی، آزمایش منشور ملات تسریع شده مطابق با استاندارد ASTM C1260 [۱۹] انجام شد. به این منظور، نمونه‌های منشوری ملات با ابعاد $۲۸۵ \times ۲۵/۴ \times ۲۵/۴$ میلی‌متر تهیه و جهت تسریع واکنش، در محلول یک مولار سدیم هیدروکسید با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. مطابق با استاندارد ASTM C1260، چنانچه انبساط ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش پس از طی ۱۴ روز بیشتر از ۰/۲ درصد باشد، سنگ‌دانه واکنش‌پذیر و اگر کمتر از ۰/۱ باشد، غیر واکنش‌پذیر تلقی می‌شود. مقدار انبساط اندازه‌گیری شده برای دو سنگ‌دانه‌ی دامغان و همدان در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، سنگ‌دانه‌ی دامغان واکنش‌پذیر و سنگ‌دانه‌ی همدان غیر واکنش‌پذیر می‌باشد.



شکل ۲: نتایج آزمایش منشور ملات تسریع شده

چهار طرح مخلوط بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و عیار سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ترکیبات مختلف سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر جهت بررسی اثر اندازه‌ی سنگ‌دانه تهیه شد. این طرح مخلوط‌ها در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

جدول ۳: جزئیات طرح مخلوط مورد استفاده در آزمایشگاه (kg/m^3)

شماره طرح	نام مخلوط	سیمان	آب	شن	ماسه
۱	GN-SN	۳۸۰	۱۹۰	۸۴۰	۹۱۸
۲	GR-SR	۳۸۰	۱۹۰	۸۴۰	۹۱۸
۳	GR-SN	۳۸۰	۱۹۰	۸۴۰	۹۱۸
۴	GN-SR	۳۸۰	۱۹۰	۸۴۰	۹۱۸

بتن در آزمایشگاه با کمک مخلوط‌کن برقی ساخته، در قالب ریخته و با ابزار مناسب متراکم شد. بلافاصله پس از عملیات تراکم، سطح نمونه‌های بتنی تازه با نایلون پوشیده شد. پس از ۲۴ ساعت تمام نمونه‌ها از قالب خارج و داخل یک لایه گونی مرطوب و پلاستیک پیچیده شد. مطابق با رویه معمول، نمونه‌ها باید ۲۸ روز در دمای اتاق و رطوبت بالا عمل‌آوری می‌شود، اما در این پژوهش با توجه به اهمیت کاهش مدت زمان انجام آزمایش‌ها و با توجه به یکسان بودن شرایط برای تمام نمونه‌ها، مدت دوره‌ی عمل‌آوری به ۷ روز کاهش داده شد. بنابراین نمونه‌ها به مدت ۷ روز در اتاقی با دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد به شرح فوق عمل‌آوری شد.

۲-۲- نحوه اعمال تسریع در واکنش سیلیسی قلیایی

بعد از ۷ روز عمل‌آوری، نمونه‌ها به مخزن ویژه‌ی تسریع واکنش قلیایی - سیلیسی منتقل شدند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مشابه با استاندارد ASTM C1260، نمونه‌ها در این مخزن تا زمان انجام آزمایش داخل محلول یک مولار سدیم هیدروکسید با دمای بالا غوطه‌ور شدند تا واکنش قلیایی - سیلیسی تسریع گردد. در مورد دمای بالای محیط آزمایش باید اشاره داشت، که افزایش دمای محیط تأثیر قابل توجهی بر نتایج واکنش قلیایی ندارد و صرفاً سرعت واکنش را افزایش می‌دهد [۲۰]. لذا در این پژوهش با الهام از استاندارد RILEM TC 219-ACS [۲۱] دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برای محلول قلیایی در نظر گرفته شد.



شکل ۳: نمونه‌های داخل مخزن

۲-۳- روش انجام آزمایش

مهمترین شاخصه برای اطلاع از وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی، اندازه‌گیری انبساط ایجاد شده در بتن می‌باشد که معیار بسیاری از استانداردها برای ارزیابی واکنش‌پذیری سنگ‌دانه‌ها نیز می‌باشد [۲]. در این تحقیق نیز، انبساط ایجاد شده در طرح‌های مختلف بتنی در طول مدت آزمایش (۶ ماه) به طور مستمر اندازه‌گیری و ثبت شد. جهت بررسی تأثیر وقوع واکنش قلیایی بر خصوصیات مکانیکی بتن نیز، مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی بتن پس از گذشت ۳ و ۶ ماه از شروع واکنش قلیایی اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۱- اندازه‌گیری انبساط

تعدادی نمونه‌ی منشوری با ابعاد $284 \times 75 \times 75$ میلی‌متر، با توجه به استاندارد ASTM C 1293 [۲۲]، برای اندازه‌گیری انبساط ایجاد شده در هریک از طرح مخلوط‌های بتنی در دوران غوطه‌وری، ساخته شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در طرفین نمونه‌ها دو پین فولادی ضد زنگ، برای اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه، داخل بتن مدفون شده‌است.



شکل ۴: نحوه‌ی اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه

نمونه‌های منشوری داخل مخزن واکنش قلیایی - سیلیسی غوطه‌ور شد. نمونه‌ها در این مدت به فاصله ۷ تا ۱۴ روز یکبار از مخزن خارج و طول آنها به کمک وسیله اندازه‌گیری با دقت ۱ میکرون اندازه‌گیری می‌شد. لازم به ذکر است، پس از اتمام دوره‌ی غوطه‌وری از همین نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی نیز، استفاده شد.

۲-۳-۲- تعیین برخی پارامترهای مکانیکی بتن

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی هریک از طرح مخلوط‌های بتنی از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر، نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 200×100 میلی‌متر و نمونه‌های منشوری با ابعاد $284 \times 75 \times 75$ میلی‌متر به ترتیب مطابق با استانداردهای BS EN 12390-3 [۲۳]، ASTM C496 [۲۴] و ASTM C78-02 [۲۵] استفاده شد. هر نمونه مشتمل بر سه آزمون می‌باشد. لازم به ذکر است روش‌های مختلفی، همچون آزمایش کشش مستقیم، غیر مستقیم و کشش ناشی از خمش، برای ارزیابی مقاومت کششی وجود دارد. در این تحقیق آزمایش کشش غیر مستقیم و کشش ناشی از خمش استفاده شد، چرا که بر اساس یافته‌های پیشین [۲۶]، واکنش قلیایی بر روی مقاومت کشش مستقیم تأثیر کمتری داشت.

۳- بحث و بررسی نتایج

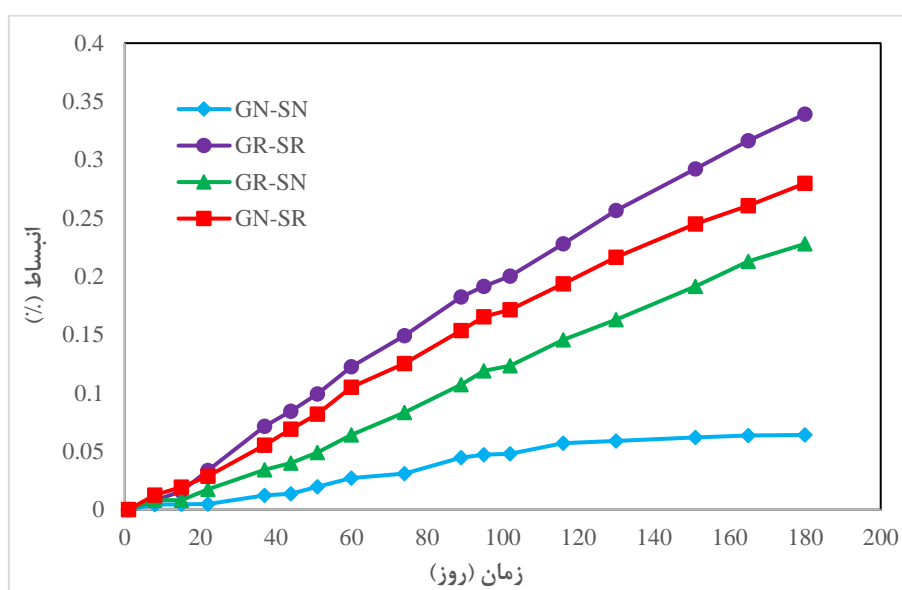
۳-۱- انبساط نمونه‌ها

انبساط نمونه‌های منشوری در شکل ۵ نشان داده شده‌است. اندازه‌گیری انبساط تا سن ۱۸۰ روز به طور مستمر ادامه داشت. با دقت در نتایج ارائه شده در شکل ۵، مشاهده می‌شود، در کلیه نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید، انبساط ایجاد شده‌است و با گذر زمان، مقدار انبساط افزایش پیدا کرده‌است. حتی طرح مخلوط شاهد (GN-SN) نیز دچار انبساط شده‌است، البته میزان آن در مقایسه با سایر طرح‌ها بسیار ناچیز است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، هر چند سنگ‌دانه‌های همدان از نظر استاندارد ASTM C1260 [۱۹] واکنش‌ناپذیر تلقی شد، اما به هر حال، مقداری انبساط در شرایط تسریع شده داشت (شکل ۲). بنابراین طبیعی است که استفاده از چنین سنگ‌دانه‌ای، در مخلوط بتنی که در شرایط محیطی تسریع شده قرار گرفته‌است، منجر به انبساط ناچیز بتن شود. انبساط نهایی ایجاد شده در طرح مخلوط‌های GN-SN، GR-SR، GR-SN و GN-SR به ترتیب 0.064% و 0.339% و 0.228% و 0.280% درصد

بود. استفاده از ماسه‌ی واکنش‌پذیر یا شن واکنش‌پذیر به تنهایی، موجب افزایش انبساط در مخلوط بتن به ترتیب به مقدار $4/4$ و $3/5$ برابر در مقایسه با طرح مخلوط شاهد (GN-SN) شده‌است. همچنین، استفاده‌ی هم‌زمان از ماسه و شن واکنش‌پذیر منجر به افزایش انبساط به مقدار $5/3$ برابر شده‌است. بنابراین مشابه با یافته‌های سایرین [۸، ۹]، نتایج این تحقیق نیز حاکی از آن است که با کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر در مخلوط بتن، انبساط ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی افزایش می‌یابد.

با دقت در شکل ۵، به وضوح روشن است که در هر یک از نمونه‌ها، پس از ۱۰۰ روز از آغاز غوطه‌وری، نرخ انبساط ایجاد شده تقریباً ثابت است. به عبارت دیگر نوسانات قابل ملاحظه‌ای در افزایش انبساط (شیب) ملاحظه نمی‌شود. همچنین نرخ انبساط ایجاد شده (شیب نمودار) در نمونه‌های مختلف متفاوت است. بیشترین نرخ انبساط مربوط به نمونه GR-SR و بعد از آن نمونه GR-SR می‌باشد. کمترین نرخ هم به نمونه GR-SN تعلق دارد.

بنابراین در مقایسه با دو گزینه‌ی جایگزینی شن یا ماسه‌ی واکنش‌پذیر با شن یا ماسه‌ی غیرواکنش‌پذیر، گزینه دوم، یعنی استفاده از ماسه‌ی غیر واکنش‌پذیر به جای ماسه‌ی واکنش‌پذیر، جهت کاهش انبساط توصیه می‌شود.



شکل ۵: انبساط نمونه‌های مورد آزمایش

ترک‌های سطحی ایجاد شده در نمونه‌های منشوری ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی، پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید در شکل ۶ نشان داده شده‌است. وسعت و مقدار ترک‌ها با انبساط نمونه‌ها رابطه مستقیم داشت. علاوه بر این، تصویربرداری‌های دوره‌ای نشان داد، این ترک‌ها از لبه‌های نمونه شروع شده و به سمت وسط وجوه پیش‌روی کردند. با دقت در نتایج ارائه شده در شکل ۶، مشاهده می‌شود ترک‌های ظاهر شده در سطح نمونه‌ها، الگوی نقشه ماند و جهات تصادفی دارد، که مؤید مطالعات پیشین [۲۷، ۲۸] می‌باشد.



شکل ۶: ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش

۳-۲- مقاومت مکانیکی بتن

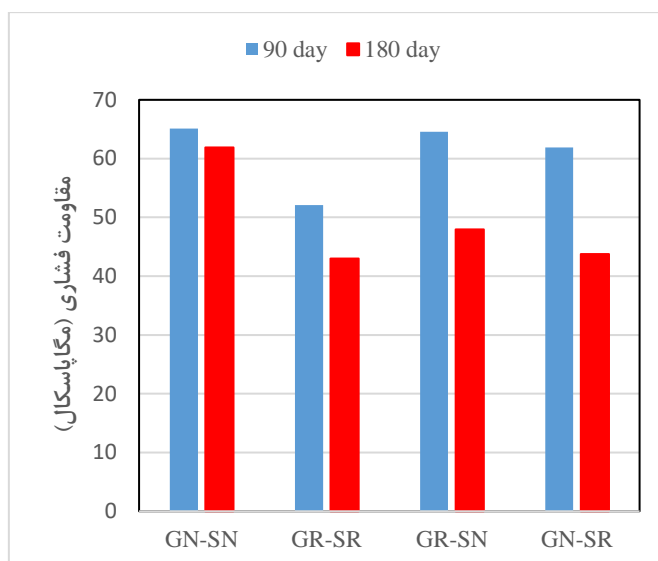
نتایج مقاومت فشاری و کششی و مدول گسیختگی نمونه‌ها، پس از ۹۰ و ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید، در جدول ۴ خلاصه شده است. همانطور که بر اساس مطالعات پیشین [۴] انتظار می‌رفت، مقاومت فشاری و کششی و مدول گسیختگی تمام نمونه‌ها، در مقایسه با نمونه مشابه خود، با گذر زمان و افزایش میزان واکنش قلیایی - سیلیسی کاهش پیدا کرده است. البته مقدار افت مقاومت در نمونه‌های مختلف متفاوت است. در ادامه و به تفکیک، نتایج هر یک از این آزمایش‌ها تحلیل و بررسی می‌شود.

جدول ۴: مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش (مگاپاسکال)

شماره نمونه	نام نمونه	مقاومت فشاری		مقاومت کششی		مدول گسیختگی	
		۹۰ روزه	۱۸۰ روزه	۹۰ روزه	۱۸۰ روزه	۹۰ روزه	۱۸۰ روزه
۱	GN-SN	۶۵/۰۹	۶۱/۹	۳/۸۶	۳/۷۰	۸/۲۵	۷/۸۳
۲	GR-SR	۵۲/۰۷	۴۲/۹۹	۲/۵۶	۲/۰۰	۶/۲	۴/۸
۳	GR-SN	۶۴/۵۸	۴۷/۹۳	۲/۹۴	۲/۶۹	۵/۸۵	۵/۳۹
۴	GN-SR	۶۱/۸۷	۴۳/۷۶	۲/۸۳	۲/۴۵	۵/۹۵	۵/۱۲

۳-۲-۱- مقاومت فشاری

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های GN-SN، GR-SR، GN-SR و GR-SR، پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید، به ترتیب ۶۵/۰۹ و ۵۲/۰۷ و ۶۴/۵۸ و ۶۱/۸۷ و پس از ۱۸۰ روز غوطه‌وری به ترتیب ۶۱/۹ و ۴۲/۹۹ و ۴۷/۹۳ و ۴۳/۷۶ مگاپاسکال می‌باشد.

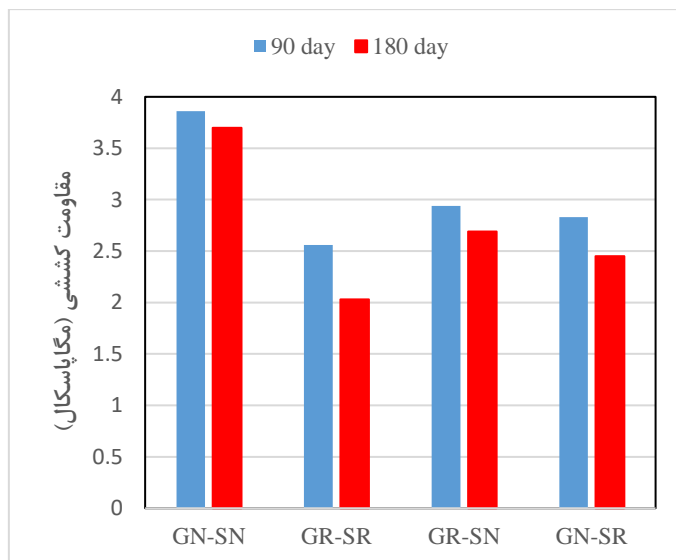


شکل ۷: مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش

نتایج نشان می‌دهد، استفاده از شن واکنش‌پذیر یا ماسه‌ی واکنش‌پذیر به تنهایی، در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵، باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در مقایسه با نمونه شاهد (GN-SN)، به ترتیب مقدار ۰/۸ و ۴/۹ درصد در سن ۹۰ روز و مقدار ۲۲/۶ و ۲۹/۳ درصد در سن ۱۸۰ روز شد. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از ماسه و شن واکنش‌پذیر، منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (GN-SN) به مقدار ۲۰ درصد در سن ۹۰ روز و مقدار ۳۰/۵ درصد در سن ۱۸۰ روز شد. بنابراین، هرچه اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر در مخلوط بتن کاهش می‌یابد، مقاومت فشاری بیشتر افت پیدا می‌کند و نیز این موضوع با مشارکت بیشتر مصالح سنگی از نظر واکنش‌پذیری تشدید می‌شود. مطالعات پیشین، حاکی از رفتار نوسانی مقاومت فشاری بتن تحت اثر واکنش قلیایی-سیلیسی در گذر زمان است. در اغلب مراجع [۲۶، ۲۹]، مشاهده شده‌است که واکنش قلیایی-سیلیسی منجر به کاهش مقاومت فشاری در درازمدت می‌شود. در این تحقیق نیز به وضوح مشاهده شد که اثر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر بر کاهش مقاومت فشاری در سه ماهه‌ی دوم در مقایسه با سه ماهه‌ی اول بیشتر بود.

۲-۲-۳- مقاومت کششی

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی طرح مخلوط‌های GN-SN، GR-SR، GN-SN و GR-SR، پس از ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم هیدروکسید به ترتیب ۳/۸۶ و ۲/۵۶ و ۲/۹۴ و ۲/۸۳ و پس از ۱۸۰ روز به ترتیب ۳/۷ و ۲/۰۳ و ۲/۶۹ و ۲/۴۵ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۸: مقاومت کششی نمونه‌های مورد آزمایش

نتایج نشان می‌دهد، استفاده از شن واکنش‌پذیر یا ماسه واکنش‌پذیر به تنهایی، در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵، مقاومت کششی بتن را به ترتیب مقدار ۲۳/۸ و ۲۶/۷ درصد در سن ۹۰ روز و به ترتیب مقدار ۲۷/۳ و ۳۳/۸ درصد در سن ۱۸۰ روز، در مقایسه با نمونه شاهد (GN-SN) کاهش داد. همچنین استفاده‌ی هم‌زمان از ماسه و شن واکنش‌پذیر، منجر به کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد (GN-SN) به مقدار ۳۳/۷ درصد در سن ۹۰ روز و مقدار ۴۵/۱ درصد در سن ۱۸۰ روز شد.

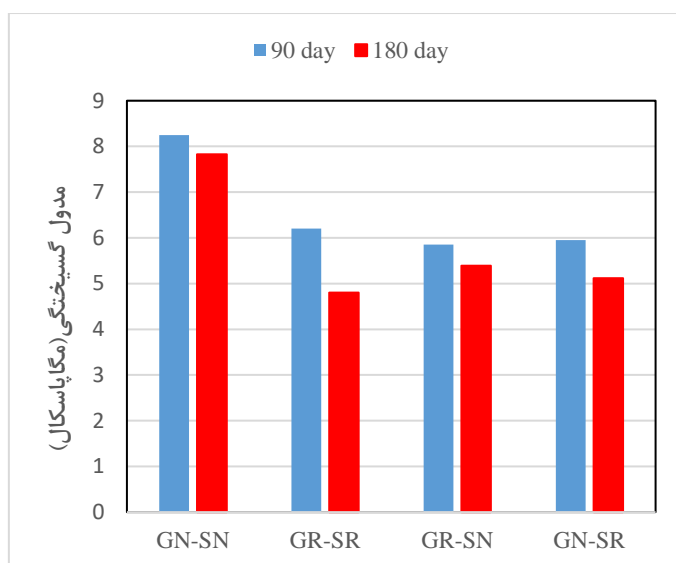
بنابراین وقتی بخش ریزدانه‌ی مصرفی در بتن از نوع واکنش‌پذیر باشد، میزان افت مقاومت کششی به وضوح بیشتر است. در ضمن مقدار افت مقاومت کششی در مقایسه با مقدار افت مقاومت فشاری در تمام سنین بیشتر بود. بر خلاف مقاومت فشاری که در ابتدای واکنش افت زیادی نداشت، مقاومت کششی از همان ابتدای واکنش، مشابه مطالعات پیشین [۲۶، ۲۷]، افت چشمگیری نشان داد. در واقع کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر، منجر به کاهش بیشتر مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن شد و این کاهش مقاومت از همان سنین پایین مشهود بود. در ضمن، در نمونه‌هایی که کلیه‌ی مصالح سنگی از نوع واکنش‌پذیر بود، میزان افت مقاومت کششی در مقایسه با سایر نمونه‌های متناظر که تنها بخشی از مصالح سنگی واکنش‌پذیر بود، بیشتر است.

۳-۲-۳- مدول گسیختگی

از نمونه‌های منشوری به ابعاد ۲۸۴×۷۵×۷۵ میلی‌متر، علاوه بر اندازه‌گیری انبساط طول، برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی بتن نیز استفاده شد. پس از اندازه‌گیری انبساط طول، این نمونه‌ها تحت آزمایش بارگذاری خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. مدول گسیختگی یا به عبارتی مقاومت کششی اندازه‌گیری شده ناشی از خمش در این نمونه‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.

با دقت در نتایج بدست آمده، مشابهت رفتاری بین نمونه‌های دو آزمایش مدول گسیختگی و آزمایش مقاومت کششی مشاهده می‌شود. به طوریکه با افزایش میزان واکنش و گذر زمان، مدول گسیختگی تمام نمونه‌ها کاهش یافته است و کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های واکنش‌پذیر منجر به افت بیشتر مدول گسیختگی شده است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، از بین طرح مخلوط‌های مختلف، طرح GR-SR که هر دو بخش سنگ‌دانه‌ی ریز و درشت آن از نوع واکنش‌پذیر می‌باشد، بیشترین کاهش مدول گسیختگی را دارد. مدول

گسیختگی این نمونه در مقایسه با نمونه شاهد (GN-SN)، در سن ۱۸۰ روز ۳۸/۷ درصد کاهش یافته است. مدول گسیختگی نمونه‌ای که فقط شن یا ماسه‌ی آن واکنش پذیر بود، در مقایسه با نمونه شاهد (GN-SN) در همین سن، به ترتیب ۳۱/۱ و ۳۴/۵ درصد کاهش یافت.



شکل ۹: مدول گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش

۴- نتیجه گیری

- هدف از این پژوهش، بررسی اثر اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر بر مقاومت مکانیکی بتن آسیب‌دیده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی بود. بدین منظور تعدادی نمونه‌ی مکعبی، استوانه‌ای و منشوری در چند طرح مخلوط بتن با ترکیب‌های مختلف از شن و ماسه واکنش‌پذیر و غیر واکنش‌پذیر ساخته شد و به مدت ۶ ماه در محلول سدیم هیدروکسید با مولاریته واحد و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور گردید. مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی این مخلوط‌های بتنی در سنین مختلف، اندازه‌گیری شد. علاوه بر این انبساط ایجاد شده در طول دوره استغراق نیز اندازه‌گیری شد. اهم نتایج حاصل از این پژوهش عبارت است از:
- از همان آغاز غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول سدیم هیدروکسید، در کلیه نمونه‌ها انبساط ناشی از وقوع پدیده واکنش قلیایی - سیلیسی رخ داد و این انبساط سیر صعودی داشت. البته انبساط در طرح مخلوط شاهد در مقایسه با سایر طرح‌ها بسیار ناچیز بود.
- انبساط در طرح مخلوط دارای ماسه‌ی واکنش‌پذیر - شن واکنش‌ناپذیر و مخلوط دارای ماسه‌ی واکنش‌ناپذیر - شن واکنش‌پذیر به ترتیب ۴/۴ و ۳/۵ برابر انبساط طرح مخلوط شاهد بود. همچنین، استفاده‌ی هم‌زمان از ماسه و شن واکنش‌پذیر، منجر به افزایش انبساط به مقدار ۵/۳ برابر در مقایسه با طرح مخلوط شاهد شد. به عبارتی با کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی واکنش‌پذیر، بر میزان انبساط افزوده شد. بنابراین جایگزینی ماسه‌ی واکنش‌پذیر با ماسه‌ی غیر واکنش‌پذیر، در مقایسه با جایگزینی شن واکنش‌پذیر با شن غیر واکنش‌پذیر راهکار مؤثرتری جهت کنترل انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی است.
- در هر یک از طرح‌های بررسی شده، نرخ افزایش تغییر طول در کلیه طرح‌ها پس از سن ۹۰ روزگی، تقریباً ثابت شد.
- مقدار افت مقاومت فشاری در ابتدای واکنش کمتر بود و با گذر زمان و افزایش میزان واکنش، شدت بیشتری پیدا نمود.
- در مخلوط بتنی که صرفاً بخش ریزدانه‌ی آن از نوع واکنش‌پذیر بود، میزان افت مقاومت کششی و مدول گسیختگی، در مقایسه با مقاومت فشاری بتن‌های آسیب‌دیده ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی، به وضوح بیشتر بود و بر خلاف مقاومت فشاری، افت مقاومت کششی و مدول گسیختگی از همان سنین پایین مشهود بود.

- مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی مخلوط بتنی که صرفاً بخش درشت‌دانه‌ی آن از نوع واکنش‌پذیر بود، پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول قلیایی به ترتیب ۲۲/۶، ۲۷/۳ و ۳۱/۱ درصد و مخلوط بتنی که فقط بخش ریزدانه‌ی آن از نوع واکنش‌پذیر بود، به ترتیب ۲۹/۳، ۳۳/۸ و ۳۴/۵ درصد در مقایسه با طرح مخلوط شاهد کاهش داشت. بنابراین با کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه واکنش‌پذیر در مخلوط بتن، خصوصیات مکانیکی آن در اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بیشتر کاهش یافت.

مراجع

- [1] Figueira, R., et al. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, 222, p. 903-931.
- [2] Fanijo, E.O., J.T. Kolawole, and A. Almakrab. (2021). Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States. *Case Studies in Construction Materials*, 15, p. e00563.
- [3] Diab, S., Soliman, A. and Nokken, M. (2020). Changes in mechanical properties and durability indices of concrete undergoing ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 251, p. 118951.
- [4] Mohammadi, A. Ghasvand, E. and Nili, M. (2020). Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. *Construction and Building Materials*, 258, p. 119567.
- [5] Reinhardt, H.W., Ozkan, H, and Mielich, O. (2018). Changes in mechanical properties of concrete due to ASR. *Hormigony Acero*, 69, p. 15-19.
- [6] Binal, A. (2015). The pessimum ratio and aggregate size effects on alkali silica reaction. *Procedia Earth and Planetary Science*. 15, p. 725-731.
- [7] Gautam, B.P., et al. (2017). Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete. *Cement and Concrete Research*, 95, p. 75-83.
- [8] Kuroda, T., et al. (2004). Effects of particle size grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method. In: *Proc. 12th Int. Conf. Alkali-Aggregate React.* Beijing, China.
- [9] Zhang, C., et al. (1999). Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 29(9), p. 1393-1396.
- [10] Multon, S., et al. (2008). Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 38(3), p. 350-359.
- [11] Ramyar, K., Topal, A. and Andic, O. (2005). Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 35(11), p. 2165-2169.
- [12] Dunant, C.F. and Scrivener, K.L. (2012). Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion. *Cement and Concrete Research*, 42(6), p. 745-751.
- [13] Gao, X.X., et al. (2013). Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimum effect versus scale effect. *Cement and Concrete Research*, 44, p. 25-33.
- [14] Yang, L., et al. (2022). Computational modelling of expansion and deterioration due to alkali-silica reaction: Effects of size range, size distribution, and content of reactive aggregate. *International Journal of Solids and Structures*, 234, p. 111220.
- [15] Pan, J., et al. (2022). Influence of coarse aggregate size on deterioration of concrete affected by alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, 329, p. 127228.
- [16] Joo, H.E. and Y. Takahashi. (2021). Development of alkali-silica reaction model considering the effect of aggregate size. *Cement and Concrete Composites*, 122, p. 104149.
- [17] Ministry of Housing and Urban Development of Iran, (2008). *The National Method For Concrete Mix Design*. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center, p.3-21
- [18] Chéruef, A. and M.B. Ftima. (2023). Unrestrained ASR volumetric expansion for mass concrete structures: Review and experimental investigation using 3d laser scanning. *Construction and Building Materials*, 399, p. 132565.
- [19] ASTM C1260, Standard. (2007). *Test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. Section, 4, p. 676-680.
- [20] Gautam, B.P. and D.K. Panesar. (2017). The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 140, p. 310-320.
- [21] RILEM TC 219-ACS, RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1. (2011). *Detection of Potential Alkali-Reactivity - 60 C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms (Draft)*. Bagnaux, France.
- [22] ASTM C1293, Standard. (2008). *Test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- [23] BS EN 12390-3, Standard. (2009). *Testing hardened concrete—compressive strength of test specimens*, British Standard: London, UK.
- [24] ASTM C496, Standard. (2011). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [25] ASTM C78-02, Standard. (2003). *Standard test methods for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [26] Ahmed, T., et al. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), p. 123-144.
- [27] Hafci, A., Turanli, L. and Bektas, F. (2021). Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete. *Cement-Wapno Beton*, 26(1), p. 12-23.
- [28] Thomas, M.D., Fournier, B. and Folliard, K.J. (2013) *Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book*. United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.
- [29] Giaccio, G., et al. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), p. 993-1004.