

The Effect of Alkali-Silica Reaction (ASR) on the Mechanical Properties of Concretes Containing Trass

Ebrahim Ghiasvand^{1*}, Afshin Mohammadi², Mahmoud Nili³, Zahra Rezaei²

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Master's student, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

3-Associate Professor, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

The Alkali-silica reaction (ASR) is one of the most significant concerns in the concrete life cycle. It reduces the serviceability and increases the expense of maintaining structures. In addition, the occurrence of ASR impacts the internal structure of concrete and decreases its integrity. Thus, the mechanical properties of concrete can be significantly affected by ASR. Different researchers have mentioned this issue, and most of the results have proved the reduction of the mechanical properties of concrete due to ASR. In this study, in addition to examining the length changes of mortar and concrete samples, the effect of ASR on three main mechanical properties of concrete (compressive strength, bending strength and tensile strength) was also investigated. In order to evaluate the aforementioned parameters, mixtures with and without Trass containing aggregates with varying degrees of reactivity were prepared and cured under various conditions. The results showed all studied properties decreased under ASR conditions (accelerated ASTM C1293 at 60 °C). However, this reduction depended on the reactivity degree of the used aggregates. Furthermore, using the Trass as a partial replacement for cement could reduce ASR's destructive effects. In addition, a significant relationship can be established between the results of the length changes and the changes of the studied mechanical characteristics.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 October 2023

Revise Date: 26 December 2023

Accept Date: 20 February 2024

Keywords:

Alkali-silica reaction (ASR)

Compressive strength

Flexural strength

Tensile strength

Trass

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.416590.3220>

*Corresponding author: Ebrahim Ghiasvand.

Email address: e.ghiasvand@basu.ac.ir

تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر خواص مکانیکی بتن‌های حاوی تراس

ابراهیم قیاسوند^{۱*}، افشین محمدی^۲، محمود نیلی^۳، زهرا رضایی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

واکنش قلیایی سیلیسی یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها را در عمر سرویس دهی بتن ایجاد کرده است. این واکنش عمر سازه‌های بتنی را کاهش داده و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری سازه‌ها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، وقوع این واکنش مخرب، بر ساختار داخلی بتن تأثیر می‌گذارد و یکپارچگی مخلوط بتنی را کاهش می‌دهد. بنابراین، خواص مکانیکی بتن می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تأثیر واکنش قلیایی سیلیسی قرار گیرد. تحقیقات گوناگونی پیرامون این موضوع انجام شده است و بیشتر نتایج کاهش خواص مکانیکی بتن در اثر واکنش یادشده را ثابت کرده است. در این مطالعه علاوه بر بررسی تغییرات طول نمونه‌های ملاتی و بتنی، اثر این واکنش بر روی سه ویژگی مکانیکی اصلی بتن (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی) نیز بررسی شده است. به این منظور، مخلوط‌هایی با و بدون تراس و حاوی سنگدانه‌هایی با درجات واکنش‌پذیری متفاوت (از معادنی از تبریز و زنجان) تهیه و تحت شرایط مختلف عمل‌آوری شدند. عبارتی در پژوهش حاضر، از ماده پوزولانی تراس (تا سقف ۳۵ درصد در ملات و تا سقف ۲۰ درصد در بتن) به عنوان راهی جهت کنترل واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که تمامی خواص مورد مطالعه، در بتن‌هایی که تحت تأثیر واکنش یادشده بودند، کاهش یافت. با این حال، این کاهش خواص مکانیکی به درجه واکنش‌پذیری سنگدانه‌های مورد استفاده بستگی داشت. علاوه بر این، استفاده از تراس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان توانست اثرات مخرب واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش دهد. در مجموع با توجه به نتایج حاصل در بخش ملات و بتن مقدار بهینه مصرف تراس را می‌توان حدود ۲۰ جرم سیمان برای کنترل این واکنش عنوان نمود. ضمناً می‌توان عنوان نمود که بین نتایج تغییرات طول و تغییرات مشخصه‌های مکانیکی مطالعه‌شده، ارتباط برقرار است.

کلمات کلیدی: واکنش قلیایی سیلیسی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، تراس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.416590.3220	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.416590.3220	۱۴۰۳/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۰۱	۱۴۰۲/۱۲/۰۱	۱۴۰۲/۱۰/۰۵	۱۴۰۲/۰۷/۱۰
				* نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				ابراهیم قیاسوند		
				e.ghiasvand@basu.ac.ir		

* Corresponding Author

۱- مقدمه

واکنش قلیایی سیلیسی (ASR^۲)، واکنشی بین قلیایی‌های محلول منفذی و سیلیس واکنش‌پذیر ناپایدار سنگدانه‌هاست. محصول این واکنش، یک ژل آب‌دوست و قابل انبساط است که آب را از محیط اطراف جذب کرده و منبسط می‌شود. این انبساط تا پرشدن کل حفره‌ها در بتن ادامه می‌یابد. پس از آن، ژل بر روی حفره‌ها فشار وارد نموده و در بتن تنش کششی داخلی ایجاد می‌شود. به دلیل مقاومت کششی پایین بتن، تنش ایجاد شده باعث ایجاد ترک‌های ریز می‌شود. با افزایش سرعت واکنش، ترک‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و منجر به ضعیف‌شدن ساختار داخلی بتن می‌شود. در نهایت، این امر می‌تواند خواص مکانیکی بتن را تغییر (کاهش) دهد [۱-۳].

مطالعات مختلف تغییرات خواص مکانیکی را تحت تاثیر ASR ارزیابی و تایید نموده‌اند که بیشتر خواص مکانیکی بتن، تحت تاثیر وقوع ASR قرار می‌گیرند [۴ و ۵]. نتایج تحقیقات قبلی نیز نشان داده است که میزان تخریب خواص مکانیکی مختلف یکسان نبوده و به چندین ویژگی بتن از جمله خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها، میزان سنگدانه‌ها و شرایط آزمایش بستگی دارد [۶ و ۷].

نتایج مطالعات قبلی در مورد تاثیر ASR بر مقاومت فشاری بسیار متناقض است. در یک تحقیق [۸]، کاهش مقاومت فشاری مخلوط ملات به ترتیب در حدود ۲۲٪ و ۲۵٪ تحت شرایط مشروح در استانداردهای ASTM C1260 و ASTM C227 بود. در مطالعه دیگری [۹] نشان داده شد که ASR بر مقاومت فشاری تاثیر می‌گذارد. با این حال، مقدار کاهش مقاومت فشاری برای مخلوط‌های حاوی انواع مختلف سنگدانه‌ها ثابت نبود و کاهش مقاومت فشاری واریانس بالایی (۶۰-۱۰٪) داشت. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش خواص مکانیکی بتن (به دلیل وقوع ASR) به میزان قابل توجهی تحت تاثیر درجه واکنش‌پذیری سنگدانه است. ضمناً چنین نتایجی توسط سایر محققین نیز بیان شده است [۱۰]. در مطالعه دیگری ملاحظه شد، وجود سنگدانه‌های واکنش‌پذیر در مخلوط‌های بتن و ASR لزوماً تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن ندارد و حتی گاهی، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سنگدانه‌های واکنش‌پذیر بیشتر از بتن‌های حاوی سنگدانه‌های غیر واکنش‌پذیر است [۱۱-۱۳]. در مطالعه دیگری [۱۴]، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌هایی که تحت آزمایش طولانی مدت مطابق با شرایط مشروح در استاندارد ASTM C1293 قرار گرفته بودند، اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد، مقاومت فشاری تغییر یافته، اما تغییرات آن در نوسان بوده و نرخ ثابتی ندارد. این نوسانات مقاومت فشاری را می‌توان به غلبه واکنش هیدراسیون بر ASR نسبت داد که باعث افزایش مقاومت می‌شود. از سوی دیگر، گرچه نرخ کاهش مدول الاستیسیته متغیر بود، اما در تمام طرح‌های بررسی شده تحت پدیده ASR، به صورت مستمر مدول الاستیسیته کاهش یافت.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم ناشی از وقوع ASR، ایجاد تنش کششی داخلی در بتن به دلیل تورم ژل است. بدون شک ضعیف‌ترین ویژگی بتن را می‌توان مقاومت کششی آن دانست و ایجاد تنش کششی داخلی ناشی از ASR، می‌تواند تاثیرات مخربی بر بتن داشته باشد. سمائوی و همکاران [۱۵] اثر ASR را بر خواص مکانیکی بتن ارزیابی و بیان نمودند که تمام خواص ارزیابی شده به دلیل وقوع ASR کاهش می‌یابد. در میان این ویژگی‌های ارزیابی‌شده، مقاومت کششی بالاترین حساسیت را به ASR داشت و حداکثر کاهش را تجربه کرد.

مانند سایر خواص، مقاومت خمشی نیز تحت تاثیر وقوع ASR قرار می‌گیرد و ASR منجر به کاهش قابل توجه مقاومت خمشی می‌شود. اگرچه حساسیت مقاومت خمشی به اندازه مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نبوده اما، مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری در مواجهه با ASR حساس‌تر است [۱۲ و ۱۶ و ۱۷].

مطمئناً هر تأثیری بر پیشرفت ASR می‌تواند بر تغییر خواص مکانیکی بتن تأثیر بگذارد. تحقیقات مختلف بر روی تأثیر مواد مکمل سیمانی (SCMs^۳) بر اثرات ASR نشان داده است که استفاده از این مواد می‌تواند در کاهش اثرات مخرب ASR موفق باشند. بنابراین، استفاده از مواد مکمل سیمانی می‌تواند از تخریب خواص مکانیکی بتن به دلیل ASR جلوگیری کند. راهکارهای دیگر، مانند حذف یا کاهش پیش‌نیازهای واکنش (یعنی مقدار کافی سیلیس فعال، قلیایی‌ها و رطوبت)، می‌توانند ASR و در نتیجه اثرات آن بر خواص

^۲ Alkali Silica Reaction

^۳ Supplementary Cement Materials

مکانیکی را تغییر دهند. علی‌رغم مطالعات متعدد در مورد تاثیر ASR بر خواص مکانیکی بتن، کماکان لازم است برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، خصوصاً در سطح ملی و بر روی سنگدانه‌های بومی مطالعات بیشتری صورت گیرد. به این منظور در این مطالعه، مخلوط‌های بتنی حاوی سنگدانه‌هایی با درجات واکنش‌پذیری متفاوت از معادنی در زنجان و آذربایجان تهیه و تحت شرایط مختلف عمل‌آوری قرار گرفته است. سپس، شرایط وقوع ASR در آن‌ها ایجاد و علاوه بر بررسی تغییرات طول مخلوط‌های ملات و بتن، برخی خواص مکانیکی مخلوط‌های بتنی ساخته شده از آن‌ها (مقاومت فشاری، خمشی و کششی) در سنین مختلف بررسی شد. علاوه بر این، اثر جایگزینی تراس به جای بخشی از سیمان بر وقوع ASR و خواص مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایش

۲-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق از دو نوع مختلف سنگدانه استفاده شده است که درجات واکنش‌پذیری متفاوتی دارند. این سنگدانه‌ها از معادنی در مجاورت شهرهای زنجان (Z) و تبریز (T) تهیه شده است. به منظور ساخت ملات و بتن، ابتدا مصالح سنگی یادشده به تفکیک مانده بر روی هر الک آماده و سپس حین ساخت، از دانه‌بندی یکسان مطابق با استانداردهای مرتبط استفاده شده است. در جدول ۱، مشخصات دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی برای ساخت ملات و بتن ارائه شده است. سنگدانه‌های ریز (T) و (Z)، به ترتیب دارای وزن مخصوص ۲۲۸۰ و ۲۴۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۲/۰۵ و ۱/۹ درصد و سنگدانه‌های درشت (T) و (Z) نیز، به ترتیب دارای وزن مخصوص ۲۳۱۰ و ۲۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۱/۴ و ۱/۱ درصد هستند. ضمناً مقادیر استفاده از پوزولان طبیعی تراس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ملات و بتن به ترتیب برابر با صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۵ درصد جرمی و صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد جرمی بوده است.

جدول ۱: دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی جهت ساخت ملات و بتن منطبق بر استاندارد ASTM C1260 [۱۸] و ASTM C1293 [۱۹] تسریع‌یافته

اندازه الک		درصد باقیمانده بر روی هر الک به صورت منفرد (%)
عبوری	مانده	
ریزدانه		
۴/۷۵ (No. 4) میلی‌متر	۲/۳۶ (No. 8) میلی‌متر	۱۰
۲/۳۶ (No. 8) میلی‌متر	۱/۱۸ (No. 16) میلی‌متر	۲۰
۱/۱۸ (No. 16) میلی‌متر	۶۰۰ (No. 30) میکرومتر	۲۵
۶۰۰ (No. 30) میکرومتر	۳۰۰ (No. 50) میکرومتر	۳۰
۳۰۰ (No. 50) میکرومتر	۱۵۰ (No. 100) میکرومتر	۱۵
درشت‌دانه		
۱۹ (3/4 in) میلی‌متر	۱۲/۵ (1/2 in) میلی‌متر	۳۳
۱۲/۵ (1/2 in) میلی‌متر	۹/۵ (3/8 in) میلی‌متر	۳۳
۹/۵ (3/8 in) میلی‌متر	۴/۷۵ (No. 4) میلی‌متر	۳۳

سیمان پرتلند معمولی (OPC^۴) نیز، به عنوان چسباننده پایه در همه نمونه‌ها استفاده شده است. ضمناً در کنار سیمان پرتلند از یکی از مواد مکمل سیمانی، به نام تراس (تهیه شده از منطقه جاجرد ایران) استفاده شده که در برخی طرح مخلوط‌ها با بخشی از سیمان جایگزین شده است. لازم است اشاره شود که تراس یک پوزولان طبیعی آتشفشانی است که در ترکیب با آهک و آب به صورت هیدرولیکی

⁴ Ordinary Portland Cement

سخت می‌شود. هدف از استفاده تراس به عنوان یک ماده مکمل سیمانی در پژوهش حاضر، کاهش اثرات مخرب ناشی از ASR بوده است. ترکیب شیمیایی چسباننده‌های مصرفی در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی چسباننده‌ها

چسباننده		
Main Oxides	سیمان پرتلند (C)	تراس
Calcium Oxide (CaO) (%)	۶۳/۷۴	۲/۹۹
Silicon Dioxide (SiO ₂) (%)	۲۱/۴۸	۶۹/۳۸
Magnesium Oxide (MgO) (%)	۱/۴۸	۱/۶۱
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃) (%)	۴/۵۲	۱۲/۶۶
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃) (%)	۳/۶۹	۲/۱۶
Sulfate Oxide (SO ₃) (%)	۲/۲۶	-
Potassium Oxide (K ₂ O) (%)	۰/۴۴	۱/۹۰۵
Sodium Oxide (Na ₂ O) (%)	۰/۵۲	۱/۵۱۳
Titanium Oxide (TiO ₂) (%)	۰/۱۸	-
Phosphorus Oxide (P ₂ O ₅) (%)	۰/۰۵	-
LOI (%)	۱/۴	۷/۴۳
Specific Gravity	۳/۱۲	۲/۳۲
Blaine (cm ² /gr)	۳۳۵۰	۸۵۰۰

۲-۲- نسبت مخلوط طرح‌های ملات و بتن

برای ساخت ملات از روش استاندارد مشروح در استانداردهای ASTM C1260 [۱۸] و ASTM C1567 [۲۰] و برای ساخت بتن نیز از روش استاندارد مشروح در استاندارد ASTM C1293 [۱۹] استفاده شده است. مطابق با استاندارد یادشده برای ملات، نسبت ماسه به مجموع مواد سیمانی (سیمان پرتلند + تراس) برابر با ۲/۲۵، جرم مجموع مواد سیمانی برابر با ۴۴۰ گرم و نسبت آب به مجموع مواد سیمانی برابر با ۰/۴۷ است. ضمناً در جدول ۱، توزیع اندازه دانه‌ها برای ماسه مصرفی، منطبق بر استاندارد ASTM C1260 و ASTM C1567 یاد شده است. طرح مخلوط بتن‌های ساخته‌شده و نیز شرایط نگهداری آن‌ها در جدول ۳ با جزئیات کامل ارائه شده است.

جدول ۳: نسبت اختلاط نمونه‌های بتنی

شرایط نگهداری	میزان قلیایی (%)	نسبت آب به چسباننده	سنگدانه (کیلوگرم)		آب (کیلوگرم)	چسباننده (کیلوگرم)		نوع سنگدانه
			ماسه	شن		تراس	سیمان	
تبریز RH 100% and 60 °C	۰/۸	۰/۴۵	۶۶۴	۸۱۱	۱۸۹	۰	۴۲۰	TONS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۶۶۴	۸۱۱	۱۸۹	۰	۴۲۰	T0AS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۶۶۴	۸۱۱	۱۸۹	۴۲	۳۷۸	T10AS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۶۶۴	۸۱۱	۱۸۹	۸۴	۳۳۶	T20AS
	۰/۸	۰/۴۵	۶۶۴	۸۱۱	۱۸۹	۰	۴۲۰	T0NL
زنجان RH 100% and 60 °C	۰/۸	۰/۴۵	۷۴۶	۹۱۲	۱۸۹	۰	۴۲۰	ZONS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۷۴۶	۹۱۲	۱۸۹	۰	۴۲۰	Z0AS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۷۴۶	۹۱۲	۱۸۹	۴۲	۳۷۸	Z10AS
	۱/۲۵	۰/۴۵	۷۴۶	۹۱۲	۱۸۹	۸۴	۳۳۶	Z20AS
	۰/۸	۰/۴۵	۷۴۶	۹۱۲	۱۸۹	۰	۴۲۰	Z0NL

T : سنگدانه تبریز، Z : سنگدانه زنجان، A : طرح حاوی قلیایی افزوده شده است، N : طرح حاوی قلیایی افزوده شده نیست، L : طرح در دمای ۲۳ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد نگهداری شده است، S : طرح در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد نگهداری شده است. عدد استفاده شده در نامگذاری طرح‌های مخلوط، میزان مصرف تراس برحسب درصد وزنی مجموع مواد چسباننده است.

۳-۲- روش آزمایش و آماده سازی نمونه

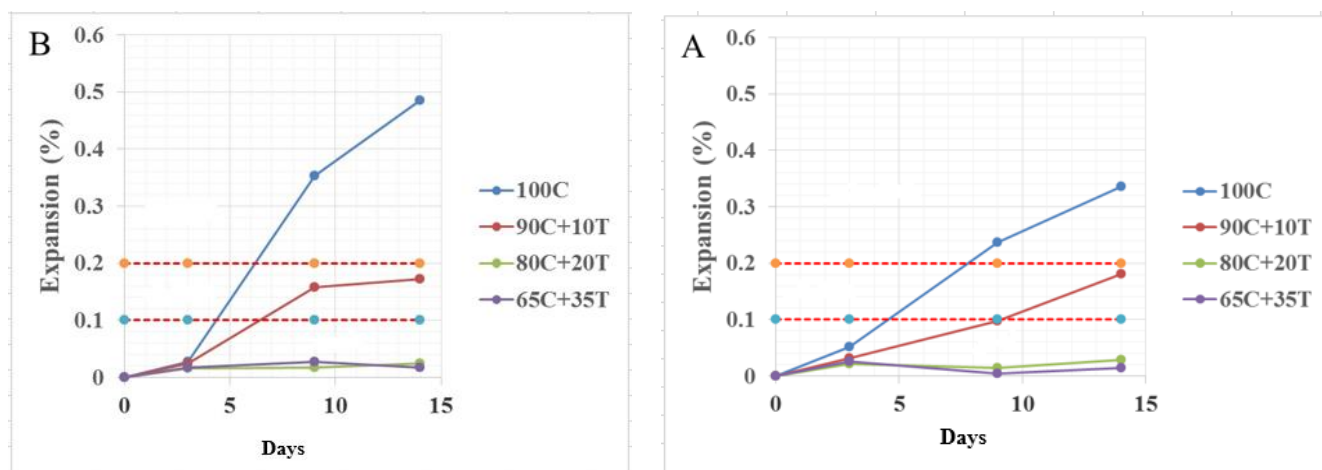
در این مطالعه، میزان انبساط نمونه‌های ملات و مخلوط‌های بتن (به ترتیب مطابق با ASTM C1260 یا C1567 و ASTM C1293 تسریع شده) بدست آمده است. ضمناً آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی (مطابق با ASTM C293) و مقاومت کششی (مطابق با ASTM C496) انجام شده است. به این منظور نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در قالب، به مدت چند دقیقه بر روی میز ارتعاشی و سپس نمونه‌ها با حوله مرطوب پوشانیده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند. تا زمان انجام آزمایش، نمونه‌های بتنی در دو رژیم عمل‌آوری قرار گرفتند. مخلوط‌های TONL و ZONL در شرایط آزمایشگاهی (در آب آهک اشباع در دمای ± 2 درجه سلسیوس)، و سایر مخلوط‌ها در معرض محیطی با شرایط توصیف شده در ASTM C1293 تسریع یافته (۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت 95 ± 5 درصد) قرار گرفتند. شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. برای تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب، برای بررسی تغییرات طول نمونه‌های ملات از منشورهایی با ابعاد $25 \times 25 \times 285$ میلی‌متر مکعب، برای تعیین مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و جهت تعیین پارامترهای مقاومت خمشی و تغییرات طول نمونه‌های بتن از منشورهایی با ابعاد $75 \times 75 \times 300$ میلی‌متر مکعب استفاده شد. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ملات تا سن ۱۴ روز پس از غوطه‌وری در محلول آزمایش و بر روی نمونه‌های بتن تا ۶ ماه پس از غوطه‌وری در محلول آزمایش ادامه یافت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انبساط نمونه‌های ملات

در این آزمایش، اثر میزان واکنش‌پذیری سنگدانه‌های مصرفی و نیز توانایی کنترل این واکنش توسط پوزولان طبیعی تراس به عنوان یک ماده مکمل سیمانی بررسی شده است. شکل ۱، تغییرات طول نمونه‌های ملات را مطابق با استانداردهای ASTM C1260 و ASTM C1567 برای هشت مخلوط مجزا نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر مجاز انبساط مشخص شده در استانداردهای یادشده، اگر پس از ۱۴ روز قرارگرفتن در معرض محلول یک نرمال سود با دمای ۸۰ درجه سلسیوس، انبساط نمونه ملات از 0.2% ، بیشتر شود، سنگدانه

واکنش پذیر در نظر گرفته می شود. همانطور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، انبساط ۱۴ روزه نمونه های ملات شاهد (حاوی ۱۰۰ درصد سیمان با سنگدانه T و ۱۰۰ درصد سیمان با سنگدانه Z) به ترتیب ۰/۳۴٪ و ۰/۴۸٪ است. در نتیجه، هر دو مصالح مورد استفاده در این تحقیق را می توان در دسته واکنش پذیر قرار داد. علاوه بر این، می توان تلقی نمود که سنگدانه های Z، نسبت به سنگدانه های T واکنش پذیرتر هستند. ضمناً، بوضوح روشن است که انبساط نمونه های ملات ناشی از واکنش ASR، در تمام مخلوط های حاوی تراس به طور قابل توجهی کاهش یافته است. این یافته را می توان به کاهش نفوذپذیری نمونه های ملات حاوی تراس مرتبط دانست که بر سرعت انتشار قلیایی موجود در محلول آزمایش در نمونه های ملات تأثیر می گذارد. علاوه بر این، افزایش میزان ژل های هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در مخلوط، به دلیل واکنش بین هیدروکسید کلسیم و تراس (که به واکنش پوزولانی معروف است)، باعث کاهش تشکیل ژل مخرب ASR شده است. بدیهی است به علت بالا بودن دمای محیط آزمایش، فرایند هیدراسیون کلینگر با نرخ بیشتری انجام می شود و در همان مراحل ابتدایی آزمایش ماده پوزولانی تراس فعال می شود. هم چنین، مطابق با استاندارد ASTM C1567، مخلوط های حاوی سیمان و مواد مکمل سیمانی و سنگدانه، در صورتی که دارای انبساط کمتر از ۰/۱٪ باشند، می توان استفاده از آن ها را در کارگاه کم خطر تلقی نمود. شکل ۱ نشان می دهد که انبساط مخلوط های شامل ۲۰٪ و ۳۵٪ تراس کمتر از ۰/۱٪ بوده است. به عنوان مثال، در سن ۱۴ روزه، انبساط مخلوط حاوی ۳۵ درصد تراس و سنگدانه T، برابر با تقریباً ۰/۱٪ و همین میزان نیز برای طرح مشابه ساخته شده از سنگدانه Z، برابر با تقریباً ۰/۲٪ بوده است. علاوه بر این، جایگزینی سیمان با ۱۰٪ تراس نتوانسته میزان انبساط را به سطح ایمن (کمتر از ۰/۱٪) در مخلوط های حاوی هر دو نوع سنگدانه کاهش دهد. چندین محقق مشاهدات مشابهی را در این خصوص گزارش نموده اند [۲۱-۲۳].

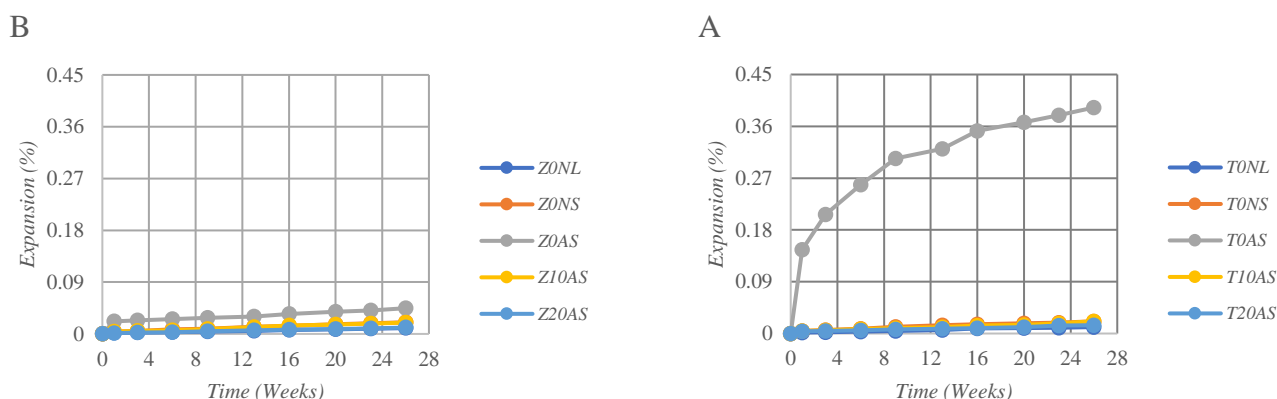


شکل ۱: انبساط مخلوط های ملات حاوی ۳۵٪ تراس. (A) ملات حاوی سنگدانه Z، (B) ملات حاوی سنگدانه T

۲-۳- انبساط نمونه های بتنی

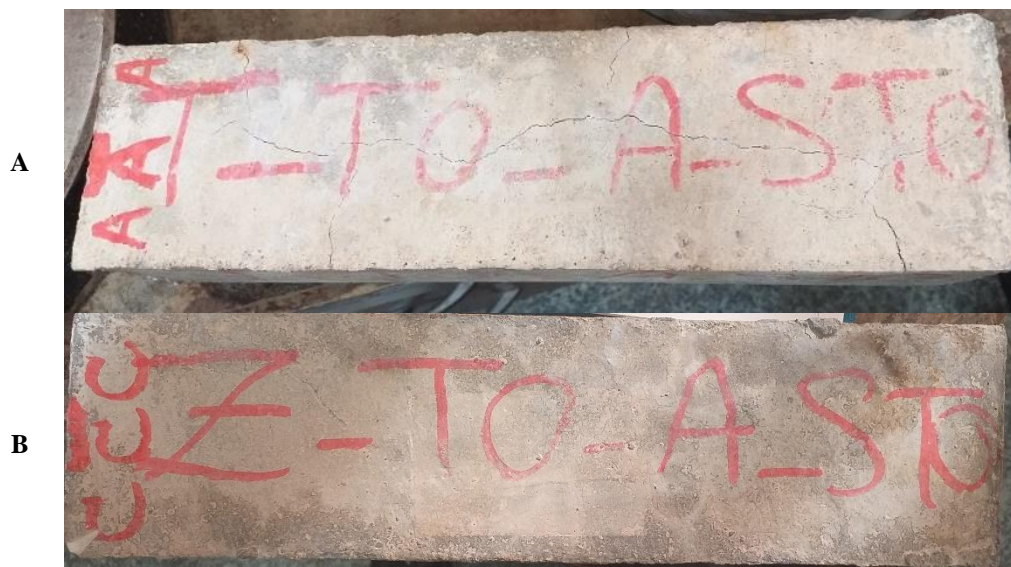
در خصوص ارزیابی واکنش پذیری سنگدانه در بتن، از روش مشروح در استاندارد ASTM C1293 می توان به عنوان مهم ترین آزمون موجود یاد نمود. با این وجود در طرح هایی که فاقد مواد مکمل سیمانی اند، این آزمون به حداقل یک سال زمان نیاز داشته و اگر در مخلوط بتنی از مواد مکمل سیمانی استفاده شود، زمان مورد نیاز برای دستیابی به نتیجه به دو سال افزایش می یابد. از این رو، اکثر محققین از روش های تسریع شده جهت ارزیابی مصالح سنگی در بتن استفاده نموده اند. با الگوبرداری از تحقیقات متعدد انجام شده [۷]، در مطالعه حاضر از روش ASTM C1293 تسریع یافته استفاده شده است. به بیان دیگر، دمای نگهداری از ۳۸ به ۶۰ درجه سلسیوس افزایش و تغییرات طول تا سن شش ماهگی اندازه گیری شد. شکل ۲، تغییرات طول نمونه های بتنی را با توجه به توضیحات فوق، برای همه مخلوط های بتن نشان می دهد. بر اساس داده های ارائه شده، نمونه های شاهد به نام های TOAS و ZOAS، نسبت به نمونه های مشابه خود که دارای مقادیر متفاوتی از تراس بودند (۱۰ و ۲۰ درصد تراس به عنوان جایگزین سیمان)، انبساط بیشتری نشان دادند.

علاوه بر این، می توان نتیجه گرفت که سنگدانه T واکنش پذیر است (میزان انبساط طرح ساخته شده از این سنگدانه که فاقد تراس نیز بود، دارای انبساطی بیشتر از ۰/۰۴ درصد در طول سه ماه بود). در مقابل، سنگدانه Z را نمی توان بر اساس نتایج انبساط مخلوط ZAOS (۰/۰۴ درصد در طول سه ماه) واکنش پذیر در نظر گرفت. با این وجود، سنگدانه Z بر اساس یافته های آزمایش ASTM C1260 واکنش پذیر در نظر گرفته شد. این یافته نشان می دهد که نتایج آزمایش تسریع شده ASTM C1260 یا ASTM C1567 لزوماً دقیق نیستند. این اختلاف توسط محققان دیگر گزارش شده است [۲۴ و ۲۵].



شکل ۲: انبساط مخلوط های بتن حاوی تا ۲۰٪ تراس. (A) بتن حاوی سنگدانه T، (B) بتن حاوی سنگدانه Z

همچنین، استفاده از پوزولان طبیعی تراس در محدود کردن انبساط بتن تحت اثر واکنش ASR، فوق العاده موثر بوده است. با جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان با تراس، بعد از شش ماه، انبساط در نمونه های ساخته شده از سنگدانه های T، به ترتیب ۹۵ و ۹۷ درصد در مقایسه با نمونه شاهد نظیر خود کاهش یافته است. از طرف دیگر، این مقادیر برای طرح های متناظر ساخته شده از سنگدانه های Z، به ترتیب ۶۰ و ۸۰ درصد بود. سطح جایگزینی بهینه تراس را می توان بر اساس نتایج حاصل ۱۰٪ گزارش نمود. در این پژوهش، علاوه بر مطالعه اثر تراس بر میزان انبساط ناشی از ASR، اثرات شرایط عمل آوری و میزان قلیایی بر ASR نیز مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط های ZONL و TONL از سنگدانه های Z و T، فاقد تراس و قلیایی افزوده شده بوده و در یک محیط آزمایشگاهی (آب اشباع شده با آهک در دمای 23 ± 2 درجه سلسیوس) نگهداری شدند. تنها تفاوت بین مخلوط های ZONS و TONS و مخلوط های ZONL و TONL، محیط عمل آوری آنها بود. با توجه به نتایج، مشخص می شود که عدم وجود هر یک از شرایط لازم برای وقوع ASR (غلظت بالای یون هیدروکسید در محلول منفذی بتن، سنگدانه سیلیسی واکنش پذیر و رطوبت) در پیشگیری از وقوع بسیار موثر بوده است. فقدان قلیایی اضافی در این مخلوط ها، به ویژه در مخلوط های حاوی سنگدانه های T، سرعت انبساط را به طور قابل توجهی کاهش داده است. همچنین افزایش دمای عمل آوری سرعت انبساط را اندکی تسریع کرد. به عنوان مثال، شش ماه پس از شروع آزمایش، زمانی که دما از ۲۳ به ۶۰ درجه سلسیوس افزایش یافت، مقادیر انبساط مخلوط های حاوی سنگدانه های T و Z به ترتیب حدوداً ۸۹ و ۱۰۰ درصد افزایش یافت. در این مطالعه، مخلوط ها به صورت چشمی نیز ارزیابی شده اند. به طور مثال، در شکل ۳ ترک های ناشی از ASR در مخلوط های TOAS و ZOAS قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در طرح هایی که میزان انبساط در آنها کنترل شده بود، ترک های مشهودی نیز مشاهده نشد.



شکل ۳: ایجاد ترک در سطح نمونه‌های A : TOAS و B : ZOAS

۳-۳- تاثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر خواص مکانیکی بتن

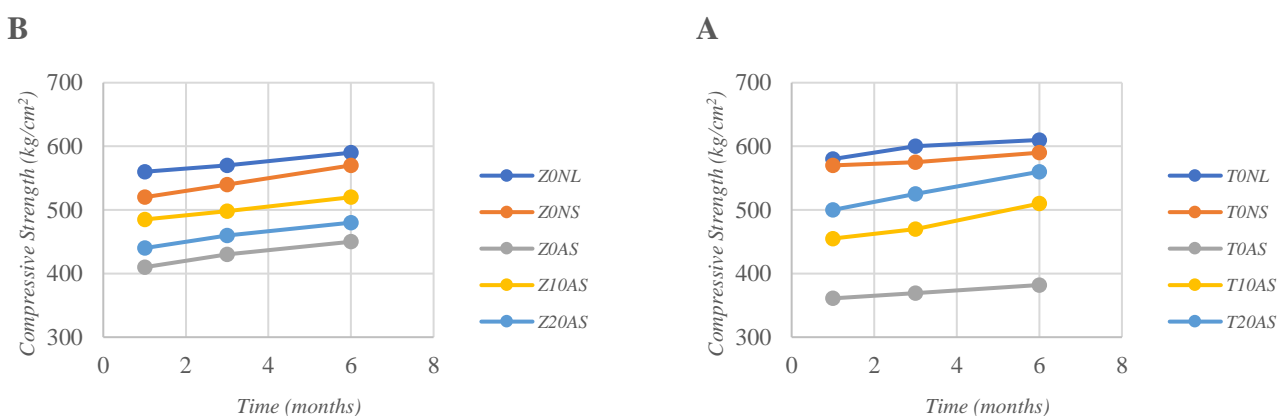
رابطه بین دوام و خواص مکانیکی بتن و تأثیر آنها بر یکدیگر، غیرقابل انکار است. روشن است که یکی از مشکلات دوامی که می‌تواند باعث کاهش خواص مهندسی بتن شود، واکنش قلیایی سیلیسی است. ASR به دلیل ایجاد ریزترک در داخل بتن باعث تضعیف ساختار داخلی بتن و از دست دادن یکپارچگی آن می‌شود. نتایج هر آزمون مرتبط با خواص مکانیکی بتن در زیر گزارش شده است. به عبارتی در این بخش به دنبال پاسخ به این سوال بوده که آیا در پژوهش حاضر نیز می‌توان بین وقوع ASR و تغییرات خواص مکانیکی مطالعه شده، روندی مشخص ملاحظه نمود؟

۳-۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در تمام سنین، وقوع ASR در مخلوط‌های حاوی هر دو نوع سنگدانه (T یا Z)، مقاومت فشاری را نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داده است. به عنوان مثال، نمونه TOAS که (بر اساس آزمایش‌های ASTM C1260 و ASTM C1293 تسریع‌یافته) انبساط قابل ملاحظه‌ای داشت (حدود ۰/۰۴٪)، با بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری مواجه شد. مقاومت فشاری این نمونه نسبت به مقاومت فشاری نمونه TONS (نمونه شاهد) در سنین یک، سه و شش‌ماه به ترتیب ۳۷، ۳۶ و ۳۵ درصد کاهش یافته است. مقاومت فشاری مخلوط ZOAS نیز نسبت به مخلوط ZONS، در این سنین، ۲۰، ۱۰ و ۸ درصد کاهش یافت. با دقت در نتایج روشن است که کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های Z کمتر از مخلوط‌های ساخته شده با سنگدانه‌های T بود، که این موضوع نتایج انبساط ناشی از ASR را در نمونه‌های بتنی را در درازمدت تأیید می‌کند. به عبارت دیگر، تغییرات (کاهش) مقاومت فشاری نسبت به وقوع ASR در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های با درجه واکنش‌پذیری پایین‌تر کمتر بود. با این حال، در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌هایی با درجه واکنش‌پذیری بالا، تغییرات (کاهش) مقاومت فشاری نسبت به وقوع ASR به‌طور قابل‌مشهودی بیشتر بود. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که وقوع واکنش قلیایی سیلیسی با شدت بالا می‌تواند به‌طور چشمگیری بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن تأثیر بگذارد. اکثر مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که درجه واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها بر کاهش مقاومت فشاری ناشی از ASR تأثیر می‌گذارد [۷]. نتایج این تحقیق نیز این ادعا را تأیید و اثبات نموده است. از طرف دیگر، مقاومت فشاری نمونه‌های TOAS و ZOAS با گذشت زمان کاهش نیافته و کماکان روندی افزایشی داشته است (هرچند با نرخ کم). این بازیابی مقاومت بتن را می‌توان به غلبه اثر واکنش‌های هیدراسیون بر وقوع واکنش مخرب ASR نیز نسبت داد. ضمناً با گذر زمان، پدیده شستشوی قلیایی در مخزن رخ می‌دهد.

به دلیل عدم وجود تمام فاکتورهای لازم برای وقوع ASR، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی فاقد قلیایی اضافی (در هر دو سنگدانه مصرفی) که در طول آزمایش در آب و محیط آزمایشگاه غوطه‌ور بودند، تغییرات زیادی نداشت. با دقت در نتایج نیز روشن است که نتیجه مشابهی برای این نمونه‌ها در مورد نرخ انبساط به دست آمد که در قسمت قبل ذکر شد. علاوه بر این، انتظار می‌رفت که با توجه به افزایش دما و افزایش سرعت واکنش‌های هیدراسیون، مقاومت فشاری مخلوط‌های فاقد قلیایی در داخل مخزن، بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های مشابه در محلول آب و آهک اشباع باشد، اما مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی فاقد قلیایی در داخل مخزن کاهش یافت. به نظر می‌رسد افزایش دما، نرخ وقوع ASR را در نمونه‌های داخل مخزن تسریع نموده است. به عبارت دیگر، افزایش دما می‌تواند قلیایی موجود در سیمان را فعال و منجر به آسیب جزئی به بتن وارد شود.

نتایج مقاومت فشاری نشان داد که استفاده از پوزولان طبیعی تراس در مخلوط‌های حاوی هر دو نوع سنگدانه بر میزان ASR و تغییر مقاومت فشاری ناشی از ASR تأثیر مثبت دارد. به عبارت دیگر جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان با تراس، باعث افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مورد بررسی شده است. به عنوان مثال، مقاومت فشاری مخلوط T10AS در مقایسه با مقاومت فشاری مخلوط T0AS در یک، سه و شش‌ماه به ترتیب ۲۶، ۲۸ و ۳۶ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، مقاومت فشاری مخلوط T20AS در مقایسه با مخلوط T0AS در یک، سه و شش‌ماه به ترتیب ۳۹، ۴۲ و ۴۷ درصد افزایش یافت. همچنین، مقاومت فشاری مخلوط Z10AS در مقایسه با مقاومت فشاری مخلوط Z0AS در یک، سه و شش‌ماه به ترتیب ۱۹، ۱۵ و ۱۶ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، مقاومت فشاری مخلوط Z20AS در مقایسه با مخلوط Z0AS در یک، سه و شش‌ماه به ترتیب ۱۳، ۷ و ۶ درصد افزایش یافت. دقت در نتایج نشان می‌دهد در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های Z، افت مقاومت ناشی از استفاده از این سنگدانه‌های واکنش‌پذیر در مقایسه با زمانی که از سنگدانه‌های T، استفاده می‌شود، کمتر است. مشابه این نتایج در مورد میزان انبساط نمونه‌های بتنی نیز ملاحظه شد. در بخش ۳-۲، میزان انبساط نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های Z در مقایسه با همین پارامتر در نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های T، کمتر بدست آمد. ضمناً با گذر زمان، بواسطه توسعه واکنش‌های پوزولانی میزان افزایش مقاومت در مخلوط‌های بتنی حاوی تراس، نسبت به مخلوط‌های فاقد تراس بیشتر است. ضمناً می‌توان بیان نمود که مخلوطی که بیشترین میزان انبساط را داشته است، با بیشترین تغییرات مقاومت فشاری روبه‌رو بوده است.

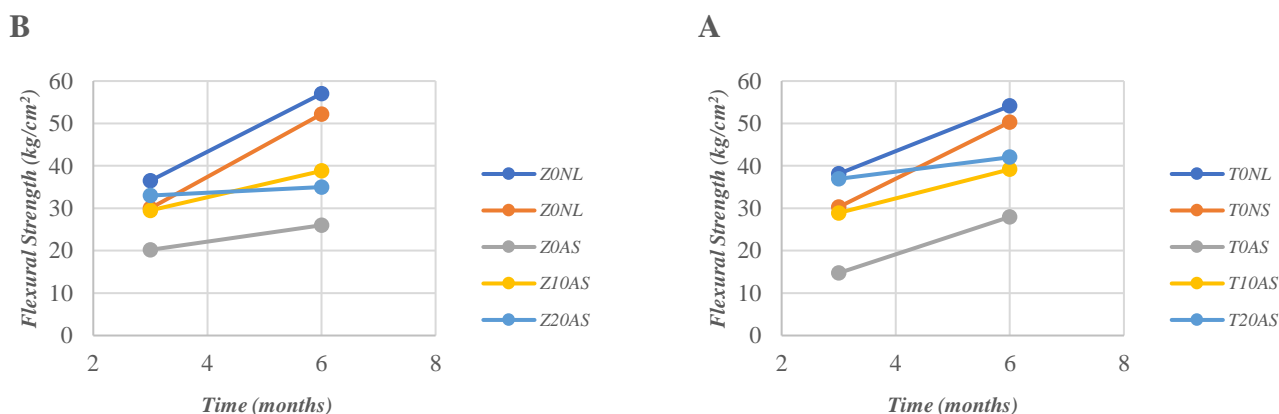


شکل ۴: مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن حاوی تا ۲۰٪ تراس. (A) بتن حاوی سنگدانه T، (B) بتن حاوی سنگدانه Z

۲-۳-۳- مقاومت خمشی

شکل ۵، نتایج آزمایش مقاومت خمشی را برای مخلوط‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که وقوع ASR، صرف نظر از نوع سنگدانه (T یا Z)، مقاومت خمشی را نسبت به نمونه‌های شاهد در هر سنی کاهش داده است. علاوه بر این، نمونه‌های با بیشترین انبساط، ضعیف‌ترین مقاومت خمشی را داشتند. در سنین سه و شش‌ماه، مقاومت خمشی مخلوط T0AS در مقایسه با نمونه TONS (نمونه شاهد) به ترتیب ۵۲ و ۴۵ و برای مخلوط ZOAS در مقایسه با مخلوط ZONS، به ترتیب ۳۵ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. همانند آزمایش‌های مقاومت فشاری و انبساط نمونه، داده‌های حاصل نشان داده است که با گذشت زمان، از میزان کاهش مقاومت خمشی کاسته

می‌شود و بازیابی مقاومت در مخلوط‌ها رخ می‌دهد. این نتایج را می‌توان با نتایج آزمایش انبساط مطابق با ASTM C1293 تسریع یافته مقایسه نمود. همانطور که پیش‌تر بیان شد، سهم عمده‌ای از انبساط نمونه‌ها، به ویژه برای نمونه‌های TOAS و ZOAS، در ماه اول اتفاق افتاد و سرعت واکنش پس از آن، به طور چشمگیری با گذشت زمان کاهش یافت. به عنوان مثال، از سن سه‌ماهه تا پایان آزمایش (شش‌ماه)، انبساط نمونه TOAS تنها ۰/۰۷٪، افزایش یافت. با این حال، میزان انبساط در ماه اول حدوداً ۰/۲۵٪ و ۰/۱٪ در بازه زمانی یک تا سه ماهگی افزایش یافت. از آنجایی که نرخ انبساط نمونه TOAS در طول زمان به طور چشمگیری کاهش یافته است، انتظار می‌رفت مقادیر مقاومت خمشی آن افزایش بیابد، که این اتفاق رخ داد. همانطور که اشاره شد، مقاومت خمشی مخلوط TOAS در مقایسه با مقاومت خمشی مخلوط TONS در سنین سه و شش‌ماهگی ۵۲ و ۴۵ درصد کاهش یافت، در حالی که مقاومت فشاری آن در همان سنین، ۳۶ و ۳۵ درصد کاهش یافت. این تفاوت نشان می‌دهد که میزان حساسیت خواص مکانیکی مختلف بتن نسبت به وقوع ASR متفاوت است. به طور مثال، در نمونه ZOAS به وضوح حساسیت بیشتر مقاومت خمشی در مقایسه با مقاومت فشاری در مواجهه با ASR، قابل ملاحظه است. در سنین سه و شش‌ماهگی، مقاومت خمشی این نمونه به ترتیب ۳۵ و ۳۰ درصد در مقایسه با مقاومت خمشی مخلوط ZONS کاهش یافت. اما کاهش مقاومت فشاری برای این نمونه در سه و شش‌ماهگی به ترتیب ۱۰ و ۹ درصد بود. به بیان دیگر، میزان کاهش در مقاومت فشاری خمشی مخلوط‌های بتنی در هنگام وقوع ASR برابر نیست و تغییرات مقاومت خمشی در مواجهه با پدیده ASR از تغییرات مقاومت فشاری در برابر آن پدیده بیشتر است. لازم به ذکر است که محققان دیگری [۷] نیز این نتیجه را ذکر کرده و آن را تایید کرده‌اند.



شکل ۵: مقاومت خمشی مخلوط‌های بتن حاوی ۲۰٪ تراس. (A) بتن حاوی سنگدانه T، (B) بتن حاوی سنگدانه Z

مشابه نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی مخلوط‌های عمل‌آوری شده در شرایط تسریع یافته (T(Z)ONS) کمتر از مخلوط‌های عمل‌آوری شده در شرایط آزمایشگاهی (T(Z)ONL) بود. با توجه به دمای عمل‌آوری بالا، در بخش قبل نیز ذکر شد که میزان هیدراسیون مخلوط‌های T(Z)ONS باید بیشتر از نمونه T(Z)ONL باشد و به تبع آن مقاومت خمشی بیشتری نیز باید بدست آید؛ با این حال، به دلیل وقوع ASR در نمونه T(Z)ONS و تأثیر ASR بر ساختار داخلی نمونه، معکوس این پیش‌بینی رخ داده است. مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نمونه T(Z)ONS کمتر از نمونه T(Z)ONL بود، اما تفاوت در مقادیر مقاومت خمشی آنها بسیار بارزتر بود. به طور مثال، تفاوت بین مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبتاً کم بود (کمتر از ۱۰٪)؛ اما تفاوت مقاومت خمشی آنها در سن سه‌ماهه برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های Z و T به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد بود. این نتایج این ادعا را که تغییرات مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری در مواجهه با ASR بیشتر است، تایید می‌نماید.

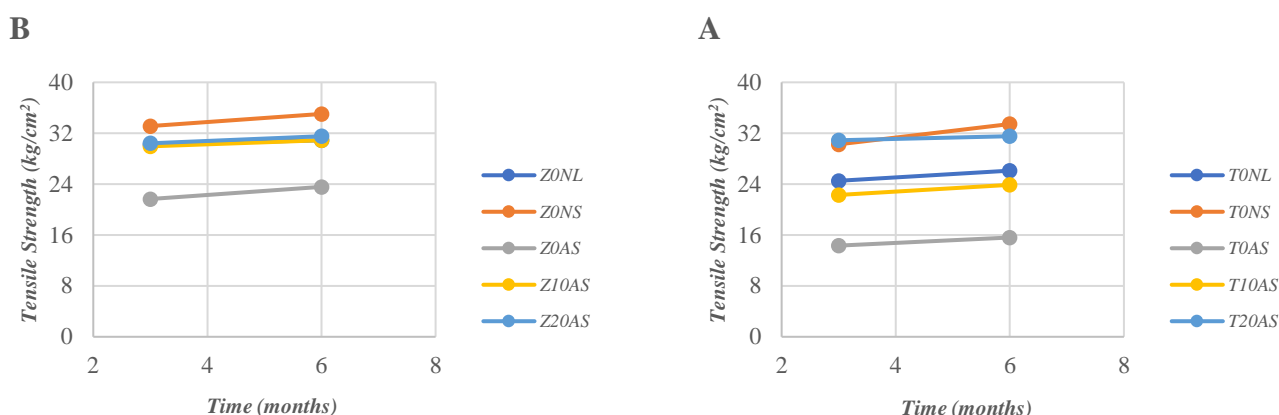
در این بخش نیز نتایج نشان داد که افزودن تراس در سطوح جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد، باعث افزایش مقاومت خمشی و کاهش اثرات مخرب ASR در نمونه‌های Z(T)10AS و Z(T)20AS در مقایسه با نمونه Z(T)0AS شد. در سه و شش‌ماه، مقاومت خمشی نمونه T10AS به ترتیب ۹۶٪ و ۱۱۵٪ درصد در مقایسه با مقاومت خمشی نمونه TOAS افزایش یافت. علاوه بر این، مقاومت خمشی مخلوط T20AS نسبت به مخلوط TOAS در سنین سه و شش‌ماه به ترتیب ۴۰٪ و ۵۰٪ افزایش یافت. این تغییر مقاومت ناشی از واکنش پوزولانی به دلیل وجود پوزولان تراس در بتن است. این واکنش پوزولانی به تدریج مقاومت بتن را افزایش می‌دهد و تأثیر آن در سنین بعدی بیشتر

می‌شود. علاوه بر این، نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های با درجه واکنش‌پذیری کمتر (سنگدانه‌های Z) افت مقاومت خمشی کمتری را نشان دادند. نتایج آزمون مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های T و Z با یافته‌های مطالعات قبلی مطابقت داشت. مطالعات قبلی تأثیر ASR را بر مقاومت خمشی نشان داده‌اند. این کاهش به طور مستقیم با درجه واکنش‌پذیری سنگدانه، که توسط یافته‌های این مطالعه تایید شده است، متناسب است. ضمناً می‌توان بیان نمود که مخلوطی که بیشترین میزان انبساط را داشته است، با بیشترین تغییرات مقاومت خمشی روبه‌رو بوده است.

۳-۳-۳- مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی مخلوط‌های مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. همه نتایج نشان داد که وقوع ASR بر مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های T و Z تأثیر می‌گذارد. با توجه به پیشرفت ASR که در نمونه‌های TOAS و ZOAS رخ داد، مقاومت کششی آنها به‌طور چشمگیری کاهش یافت و مقاومت کششی آنها در بین همه مخلوط‌ها کمترین بود. در مقایسه با مخلوط TONS، مقاومت کششی مخلوط TOAS در سه و شش‌ماه به ترتیب ۵۳ و ۵۴ درصد کاهش یافت. در سنین سه و شش‌ماه، مقاومت کششی نمونه ZOAS به ترتیب ۳۴ و ۳۳ درصد در مقایسه با مخلوط ZONL کاهش یافت.

در نمونه TOAS در سنین سه و شش‌ماه، کاهش مقاومت فشاری ۳۶٪ و ۳۵٪ بود، در حالی که کاهش مقاومت خمشی این نمونه در این سنین به ترتیب ۵۲٪ و ۴۵٪ بود. همانطور که قبلاً گفته شد، نتایج حاصل نشان داد در مواجهه با پدیده واکنش قلیایی سیلیسی، تغییرات مقاومت خمشی در مقایسه با مقاومت فشاری بیش‌تر است. با بررسی نتایج مقاومت کششی نیز می‌توان عنوان نمود که مقاومت کششی نسبت به دو پارامتر دیگر (مقاومت فشاری و خمشی) تغییرات بیشتری در مواجهه با این پدیده مخرب تجربه خواهد نمود. ضمناً مقاومت کششی در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های کمتر واکنش‌پذیر نیز تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشت، اما کماکان نرخ از دست‌دادن مقاومت در مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های واکنش‌پذیرتر، بیشتر بود. به عنوان مثال، نمونه Z(T)OAS بخش قابل توجهی از مقاومت خمشی و فشاری خود را پس از شش‌ماه بازیافت، اما این موضوع برای مقاومت کششی رخ نداد و مقاومت کششی از سه تا شش‌ماه افزایش زیادی نداشت. این امر نشان می‌دهد که مقاومت‌های خمشی و کششی پارامترهای ضروری جهت نشان دادن اثر ASR بر ساختار داخلی بتن هستند و می‌توان از آنها برای ارزیابی ASR استفاده نمود. علاوه بر این، حساسیت مقاومت کششی به وقوع ASR به میزان قابل توجهی بیشتر از مقاومت خمشی و فشاری است. در دو آزمایش قبلی (آزمایش مقاومت خمشی و فشاری)، صرف نظر از نوع سنگدانه (T یا Z)، مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط آزمایشگاهی (T(Z)ONL) از مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده تحت شرایط تسریع‌شده (T(Z)ONS) بیشتر بود. با این حال، نتایج مربوط به مقاومت کششی روند کاملاً مخالف را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، مقاومت کششی و نرخ افزایش مقاومت کششی نمونه T(Z)ONS بیشتر از نمونه T(Z)ONL بود. علاوه بر این، از نتایج مشخص شد که استفاده از تراس، مقاومت کششی را افزایش داده و اثرات مخرب پدیده ASR را کاهش می‌دهد. مقاومت کششی این نمونه‌ها با افزایش سطح جایگزینی تراس، به ویژه در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های T افزایش یافت. به عنوان مثال، شش‌ماه پس از شروع آزمایش، جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان با تراس، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های T را به ترتیب ۵۳ و ۱۰۲ درصد در مقایسه با مخلوط TOAS و مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های Z را به ترتیب ۳۱ و ۳۴ درصد، در مقایسه با مخلوط ZOAS، افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که تأثیر تراس جایگزین شده در مخلوط‌هایی با سنگدانه‌های واکنش‌پذیرتر بیشتر بود. در مجموع تحت اثر پدیده ASR، مقاومت کششی نمونه‌های TOAS و ZOAS به طور قابل توجهی کاهش یافت و با افزودن تراس این کاهش مقاومت تا حدود زیادی جبران شد. بنابراین، اثر مثبت استفاده از پوزولان تراس بر مقاومت کششی مخلوط‌های بتنی کاملاً مشهود است.



شکل ۶: مقاومت کششی مخلوط‌های بتن حاوی ۲۰٪ تراس. (A) بتن حاوی سنگدانه Z، (B) بتن حاوی سنگدانه T

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مخلوط‌های بتنی حاوی سنگدانه‌هایی با درجات واکنش‌پذیری متفاوت از معادنی در زنگان و آذربایجان تهیه و تحت شرایط مختلف عمل‌آوری قرار گرفته است. سپس، شرایط وقوع ASR در آن‌ها ایجاد و علاوه بر بررسی تغییرات طول مخلوط‌های ملات و بتن، برخی خواص مکانیکی مخلوط‌های بتنی ساخته شده از آن‌ها (مقاومت فشاری، خمشی و کششی) در سنین مختلف بررسی شد. علاوه بر این، اثر جایگزینی تراس به جای بخشی از سیمان بر وقوع ASR و خواص مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار گرفت.

اهم نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

(۱) بر اساس نتایج آزمایش ASTM C1260، هر دو سنگدانه مورد استفاده در این مطالعه (Z و T) بسیار واکنش‌پذیر بودند. با این حال، با توجه به آزمایش ASTM C1293 تسریع شده، سنگدانه T بسیار واکنش‌پذیر بود، در حالی که سنگدانه‌های Z غیر واکنش‌پذیر بودند. این نتایج یکی از موضوعاتی را که سایر محققان همیشه به آن اشاره کرده‌اند برجسته می‌کند: آزمایش‌های کوتاه‌مدت به دلیل تشدید شرایط، اغلب نتایج نادرستی ارائه می‌کنند، اما آزمایش‌های طولانی‌مدت، قابل اعتمادتر هستند.

(۲) در هر دو آزمایش کوتاه مدت و طولانی مدت، انبساط ناشی از ASR با افزودن تراس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان کاهش یافت. مطالعات قبلی نشان داده است که حداقل ۲۰٪ تراس برای جلوگیری از انبساط ناشی از ASR به منطقه امن ضروری است. این نتیجه بر اساس ASTM C1260 (آزمون کوتاه مدت) است. با این حال، همانطور که گفته شد، اعتبار و دقت نتایج آزمون‌های بلند مدت بیشتر است. به منظور بررسی این ادعا، آزمون بلند مدت ASTM C1293 تسریع یافته انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۰٪ تراس نیز می‌تواند انبساط ناشی از ASR را به سطح ایمن برساند. بنابراین، بر اساس نتایج بدست آمده، حداقل درصد تراس توصیه‌شده برای جلوگیری از آسیب ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی، برابر با ۱۰ درصد است.

(۳) مطالعه تغییرات خواص مکانیکی طرح مخلوط‌های بتنی در مواجهه با پدیده ASR، نشان داد که وقوع ASR، باعث تضعیف ساختار داخلی و کاهش مقاومت مخلوط‌های بتنی می‌شود. از بین خواص مکانیکی بررسی شده، شاخصه مقاومت فشاری در مقایسه با مقاومت خمشی و کششی کمتر با افت مواجه شد. به عبارت دیگر، تغییرات مقاومت خمشی و کششی در مواجهه با پدیده ASR بیشتر بود. هم‌چنین نتایج نشان داد که با وقوع ASR، مقاومت برخی از نمونه‌ها تنها بعد از قرارگیری در مخزن به مدت شش ماه، تا ۶۰ درصد کاهش یافته است. در این بین استفاده از پوزولان تراس نقش به‌سزایی در کنترل پدیده ASR ایفا نمود. به عبارت دیگر این پوزولان علاوه بر کاهش انبساط ناشی از ASR، از کاهش پارامترهای مکانیکی بررسی شده در مواجهه با ASR نیز تا حدود زیادی جلوگیری نمود و ساختار داخلی بتن را بهبود بخشید. لذا می‌توان عنوان نمود که بین نتایج تغییرات طول، که ابزاری برای سنجش میزان واکنش‌پذیری است، با نتایج تغییرات خصوصیات مکانیکی ارتباط برقرار است.

۴) بر اساس نتایج بدست آمده می توان عنوان نمود که حد بهینه‌ی استفاده از پوزولان تراس در مخلوط‌های ملاتی و بتنی، جهت کنترل پدیده واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه، حدود ۲۰ درصد است.

مراجع

- [1] Samimi, K. Pakan, M. and Eslami, J. (2023). Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions. *Journal of Building Engineering*. 68. 106126.
- [2] Ajayi, J.A. Gana, A.J. Adanikian, A. and Busari, A. (2023). Mitigation of Alkali- Silica reactions in concrete pavements using supplementary cementitious materials. *Materials Today: Proceedings*. 86. 59-66.
- [3] Maraghechi, H. Shafaatian, S.M.H. Fischer, G. and Rajabipour, F. (2012). The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 41-47.
- [4] Haddad, H, Jamal M Shannag. and Al-Hamouth, M.T. (2008), Repair of reinforced concrete beams damaged by alkali-silica reaction, *ACI Structural Journal*, 105(2), 145-153.
- [5] Okpin, Na. Yunping, Xi. Edward, O.V. and Saouma, E. (2016). The effects of alkali-silica reaction on the mechanical properties of concretes with three different types of reactive aggregate. *Structural Concrete*, 17(1), 74-83.
- [6] Diab, S. H. Soliman, A.M. and Nokken, M.R. (2020). Changes in mechanical properties and durability indices of concrete undergoing ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 251, 118951.
- [7] Mohammadi, A. Ghiasvand, E. and Nili, M. (2020). Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. *Construction and Building Materials*, 258, 119567.
- [8] Junaid Munir, Muhammad. Abbas, S. Ullah Qazi, A. and Nehdi, M. (2018). Role of test method in detection of alkali-silica reactivity of concrete aggregates. *Construction Materials*, 171(5), 203-221.
- [9] Islam, M.S. and Ghafoori, N. (2018). A new approach to evaluate alkali-silica reactivity using loss in concrete stiffness. *Construction and Building Materials*, 167, 578-586.
- [10] Kongshaug, S.S. Oseland, O. Kanstad, T. Rodum, E. and Markeset, G. (2020). Experimental investigation of ASR-affected concrete-The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices. *Construction and Building Materials*, 245, 118384.
- [11] Zhengu, Shi. Caijun, Shi. Shu, W. and Zhihua, O. (2017). Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 143, 16-23.
- [12] Yurtdas, I. Chen, D. Hu, D.W. and Shao, J.F. (2013). Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 47, 165-174.
- [13] Ahmed, Tarig. Burley, Eldon. Rigden, Stephen. and Abu-Tair, Abid. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 123-144.
- [14] Giaccio, G. Zerbino, R. Ponce, J.M. and Batic, O.R. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 993-1004.
- [15] Smaoui, N. Bérubé, M.A. Fournier, B. Bissonnette, B. and Durand, B. (2005). Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cement and concrete research*, 35(2), 203-212.
- [16] 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), 549-556.
- [17] Diab, S.H. Soliman, A.M. and Nokken, M.R. (2020). Changes in mechanical properties and durability indices of concrete undergoing ASR expansion. *Construction and Building Materials*. 251. 118951.
- [18] ASTM C1260-23, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
- [19] ASTM C1293-20a, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.
- [20] ASTM C1567-23, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method).
- [21] Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and concrete composites*, 32(2), 134-141.
- [22] Serpa, D. Santos Silva, A. de Brito, J. Pontes, J. and Soares, D. (2013). ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials*, 47, 489-495.
- [23] Ghiasvand, E. and Ramezani pour, A. A. (2017). Effect of grinding method and particle size distribution on long term properties of binary and ternary cements. *Construction and Building Materials*, 134, 75-82.

- [24] Yukio, H. Takashi, Y. Yoshihiko, T. Hideki, M. and Toyo, M. (2016). Experimental and analytical studies on flexural behaviour of post-tensioned concrete beam specimen deteriorated by alkali-silica reaction (ASR). In: *15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. Sao Paulo, Brazil, 321–329.
- [25] Raja, M. Jain, S. Vijn, G. Gupta, S. and Ratnam, M. (2014). Test methods for identifying the susceptibility of aggregate to alkali silica reaction (ASR)—an overview. *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(8), 328-334.