

## Effect of variations in W/C ratio and using non-reactive fine or coarse aggregate in controlling the negative effects of ASR on the concrete bond strength

Maryam Abbasiyan Taeb<sup>1</sup>, Freydoon Rezaie<sup>2\*</sup>, Ebrahim Ghiasvand<sup>3</sup>

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

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

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

### ABSTRACT

Alkali-silica reaction (ASR) is accompanied by expansion and cracking in the concrete, which weakens the mechanical properties, including bond strength of the concrete. This paper intends to quantitatively investigate the effect of fine and coarse reactive aggregate and variations in the water-cement (W/C) ratio on bonding strength of the ASR-damaged concrete. To this aim, a number of cubic specimens reinforced with 12 and 16 mm rebars and six concrete mixtures of different combinations of reactive/non-reactive fine and coarse aggregate and different W/C (0.45, 0.5, 0.55) were produced and immersed in NaOH solution. Then, pull-out tests (POTs) are conducted to evaluate the bond strength of the specimens. The results showed that the use of only non-reactive coarse aggregate in specimens with 12 and 16 mm diameter rebars increased the bond strength by 2.2 and 8.3 percent, respectively, and the use of only non-reactive fine aggregate increased by 8.3 and 18 percent, respectively, compared to R-0.5 sample. Therefore, the use of non-reactive fine aggregate is more effective than non-reactive coarse aggregate to improve the rebar anchorage in the ASR-damaged concrete. Also, in the specimens with 12 mm rebar, the loss in bond strength tended to intensify with the increase in W/C ratio. In contrast, in the specimens with 16 mm rebar, the amount of bond strength loss did not follow a constant trend according to the changes in W/C ratio. Finally, both solutions namely W/C reduction and reactive aggregate replacement were recommended as suitable strategies to control the negative effects of ASR on bonding behavior. However, with the furthering of the reaction and in the long term, the effect of the former alternative tends to diminish. In addition, it seems that the second option is a more suitable solution to improve bonding strength of thicker rebars in the long term.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 03 April 2024

**Revise Date:** 08 July 2024

**Accept Date:** 04 August 2024

### Keywords:

Alkali-silica reaction  
concrete bond strength  
pull-out test  
water-to-cement ratio  
fine and coarse aggregate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.450487.3380](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450487.3380)

\*Corresponding author: Freydoon Rezaie.

Email address: [frezaie@basu.ac.ir](mailto:frezaie@basu.ac.ir)

## تأثیر تغییرات نسبت آب به سیمان و مصرف ریزدانه یا درشت‌دانه غیرواکنش‌زا در کنترل اثرات منفی واکنش سیلیسی - قلیایی بر مقاومت پیوستگی بتن

مریم عباسیان طائب<sup>۱</sup>، فریدون رضایی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم قیاسوند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

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

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

### چکیده

واکنش سیلیسی-قلیایی موجب تضعیف مشخصات مکانیکی از جمله مقاومت پیوستگی بتن می‌شود. این پژوهش به بررسی کمی تأثیر ریزدانه یا درشت‌دانه بودن سنگدانه واکنش‌زا و تغییرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت پیوستگی بتن تحت این واکنش می‌پردازد. بدین منظور تعدادی نمونه مکعبی مسلح با میلگردهای به قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و شش مخلوط بتنی از ترکیب‌های مختلف درشت‌دانه و ریزدانه واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا و با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ ساخته و در محلول NaOH غوطه‌ور شد. نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی نشان داد، مصرف صرفاً درشت‌دانه غیرواکنش‌زا در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر مقاومت پیوستگی را به ترتیب ۲/۲ و ۸/۳ درصد و مصرف صرفاً ریزدانه غیرواکنش‌زا به ترتیب ۸/۳ و ۱۸ درصد در مقایسه با نمونه R-0.5 افزایش داد. بنابراین مصرف ریزدانه غیرواکنش‌زا در مقایسه با مصرف درشت‌دانه غیرواکنش‌زا برای کنترل افت مقاومت پیوستگی و بهبود مهار میلگرد مؤثرتر می‌باشد. همچنین در نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۲ میلی‌متر، افت مقاومت پیوستگی با افزایش نسبت آب به سیمان شدت یافت، اما در نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۶ میلی‌متر، افت مقاومت پیوستگی و تغییرات نسبت آب به سیمان روند ثابتی نداشت. هر دو گزینه کاهش نسبت آب به سیمان و یا تعویض سنگدانه واکنش‌زا، راهکار مناسبی برای بهبود رفتار پیوستگی بتن آسیب‌دیده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی می‌باشد. اما با پیشرفت واکنش در بلند مدت، تأثیر گزینه اول کم‌رنگتر می‌شود. علاوه بر این به نظر می‌رسد، گزینه دوم راهکار مناسب‌تری برای کنترل تأثیرات منفی این واکنش بر رفتار پیوستگی میلگردهای قطورتر در بلند مدت می‌باشد.

کلمات کلیدی: واکنش سیلیسی - قلیایی، مقاومت پیوستگی بتن، آزمایش بیرون‌کشیدگی، سنگدانه ریز و درشت، نسبت آب به سیمان

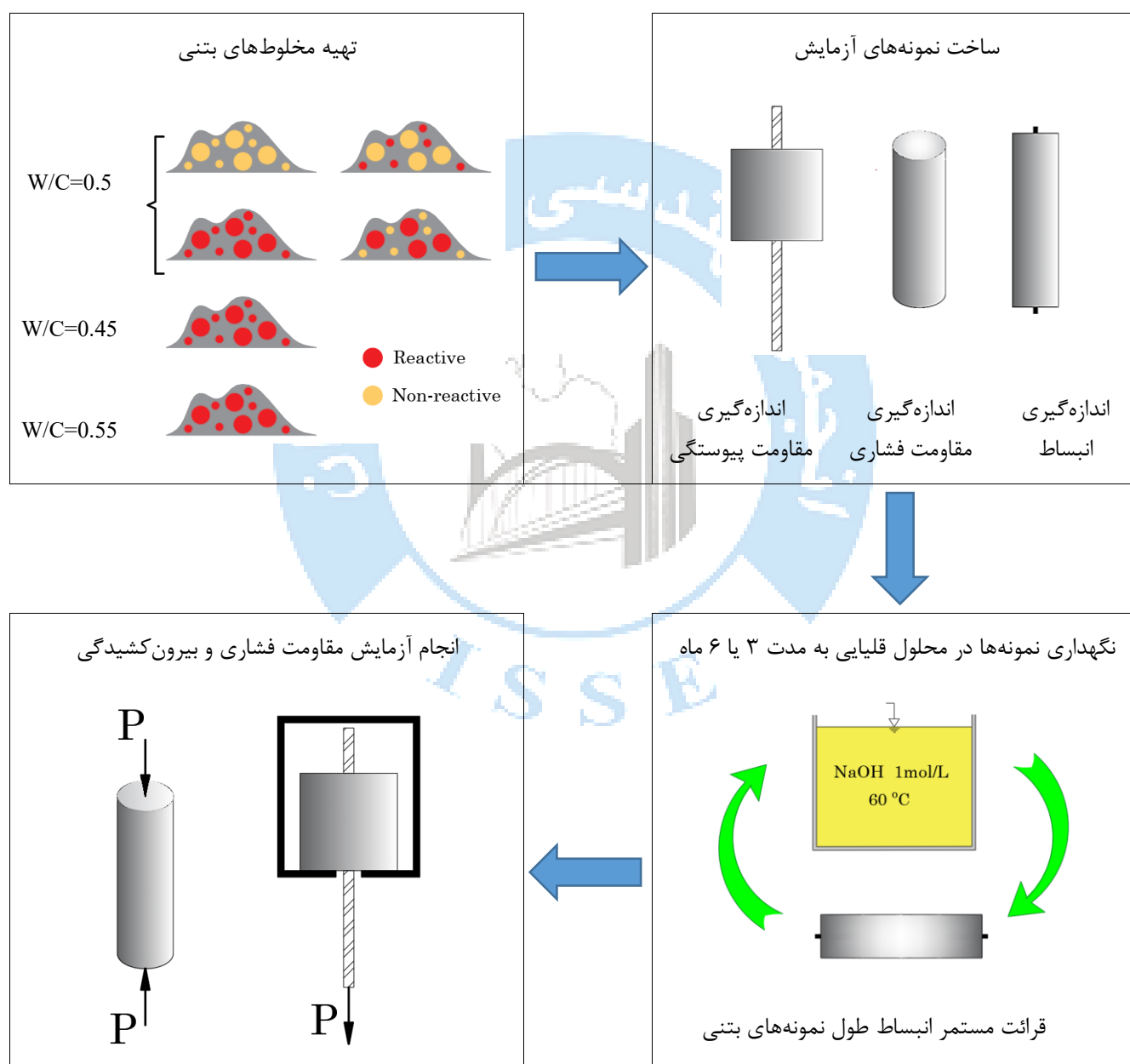
شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450487.3380">10.22065/jsce.2024.450487.3380</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450487.3380">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450487.3380</a>	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۵/۱۴	۱۴۰۳/۰۵/۱۴	۱۴۰۳/۰۱/۱۸	۱۴۰۳/۰۱/۱۵
			فریدون رضایی <a href="mailto:frezaie@basu.ac.ir">frezaie@basu.ac.ir</a>		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بخش عمده‌ای از حجم بتن، چیزی بین ۶۰ تا ۷۵ درصد، به سنگدانه‌ها اختصاص دارد. بنابراین مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها تأثیر زیادی بر مقاومت، دوام و رفتار سازه‌های بتن دارد [۱]. یکی از مواردی که باید در انتخاب سنگدانه‌ها برای ساخت بتن در نظر گرفته شود، پتانسیل واکنش‌زایی سنگدانه یا به عبارتی احتمال وقوع واکنش سیلیسی-قلیایی می‌باشد. سیلیس فعال موجود در این سنگدانه‌های واکنش‌زا به تدریج با قلیایی موجود در آب حفره‌های بتن واکنش می‌دهد. محصول این واکنش، نوعی ژل است که با جذب آب متورم شده و در نتیجه ترک‌هایی در جسم بتن ایجاد می‌کند [۲]. این ترک‌ها ضمن تضعیف بتن دوام و مشخصات مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳]. البته شدت و میزان این تأثیرگذاری به عواملی همچون نوع و خصوصیات سنگدانه واکنش‌زا، شرایط و کیفیت واکنش‌زایی بستگی دارد [۴، ۵]. در مورد تأثیر این واکنش بر خصوص مکانیکی بتن شامل مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. مروری بر این تحقیقات نشان می‌دهد که اغلب در اثر این واکنش، مشخصات مکانیکی تضعیف می‌شود [۶، ۷]. البته مشخصات فیزیکی و شیمیایی بتن و ویژگی‌های وابسته به زمان ژل تولید شده، منجر به نوسانات و بازیابی برخی از مشخصات مکانیکی در طی دوره واکنش‌زایی می‌شود [۸، ۹] همچنین دو مشخصه مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نسبت به واکنش سیلیسی-قلیایی حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهند. بنابراین، شاخص مناسب‌تری برای برآورد واکنش‌زایی سنگدانه‌ها هستند [۱۰]. تغییرات ایجاد شده در مشخصات مکانیکی بتن به دلیل واکنش سیلیسی-قلیایی، متعاقباً بر رفتار و عملکرد اعضا و سازه‌های بتن مسلح تأثیر می‌گذارد. بنابراین برخی محققان در مورد اثرات این واکنش بر رفتار اعضای مختلف بتن آرمه همچون تیر، ستون و دیوار مطالعه نمودند. حاجی قاسمعلی [۱۱]، اثر واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه در مقیاس آزمایشگاهی و تحت بار دراز مدت را مطالعه کرد. نتایج نشان داد، این واکنش باعث افزایش مقدار انحنای تیر، کاهش بار نظیر اولین ترک خمشی و افزایش تنش آرماتور کششی تیر می‌گردد. کوبات و همکاران [۱۲، ۱۳] تأثیر استفاده از ورق‌های CFRP، به عنوان یکی از روش‌های ترمیم سازه، بر کاهش انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی در ستون‌های بتنی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که اثربخشی تقویت با ورق‌های CFRP در کنترل انبساط، به زمان تقویت و تعداد لایه‌های تقویتی مورد استفاده بستگی دارد. فرچه و همکاران [۱۴] تأثیر انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار سازه‌های دیوارهای برشی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، هرچند این واکنش منجر به افزایش مقاومت نهایی دیوارهای مورد مطالعه شد، اما گسیختگی ناگهانی در این دیوارها را بدنبال داشت. علاوه بر این مطالعه رفتار اعضای بتن مسلح تحت واکنش سیلیسی-قلیایی در مقیاس کوچکتر حاکی از آن است که ضعف ایجاد شده در مقاومت بتن ناشی از این واکنش، پیوستگی میلگرد و بتن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵]. تحقیقات نشان داد، با شروع واکنش و ایجاد انبساط در بتن، مقاومت پیوستگی در ابتدا افزایش یافته و به اوج می‌رسد و پس از آن با افزایش بیش‌تر انبساط، مقاومت پیوستگی با روندی خطی کاهش پیدا می‌کند [۱۶]. این واکنش نه تنها مقاومت پیوستگی بتن را کاهش می‌دهد، بلکه مقدار لغزش میلگرد در لحظه گسیختگی را نیز افزایش می‌دهد [۱۷].

میزان انبساط ایجاد شده و شدت آسیب‌های وارده به بتن با خصوصیات مختلف سنگدانه همچون نوع، شکل، بافت، اندازه و دانه‌بندی سنگدانه مرتبط است. مشاهده شده است، با وجود شباهت شیمیایی و کانی‌شناسی هرچه شکل و بافت سنگدانه شکسته‌تر باشد، انبساط ایجاد شده و آسیب‌های ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی تشدید می‌یابد [۱۸]. دانه‌بندی سنگدانه نیز بطور قابل توجهی بر انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی تأثیر دارد [۱۹]. به طوری که بر اساس نتایج گزارش شده، انحراف ۱۰ درصدی از دانه‌بندی سنگدانه درشت واکنش‌زا در مقایسه با بتن دانه‌بندی شده به روش ASTM C1293، افزایش انبساط تا مقدار ۵۰ درصد را بدنبال داشت [۲۰]. اندازه سنگدانه هم عامل مهمی در مطالعه واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها و عملکرد بتن تحت اثر واکنش قلیایی محسوب می‌شود که همواره مورد توجه محققان بوده است. در اغلب موارد انبساط ناشی از واکنش و در نتیجه آسیب‌های وارده به بتن با کاهش اندازه سنگدانه واکنش‌زا تشدید یافته است [۱۹، ۲۱]. علاوه بر این، مطالعات حاکی از آن است که خصوصیات مکانیکی بتن اعم از مقاومت فشاری، کششی و مدول گسیختگی نیز با کاهش اندازه سنگدانه واکنش‌زا بیشتر تضعیف می‌شود [۲۲]. بنابراین به نظر می‌رسد، اندازه سنگدانه واکنش‌زا می‌تواند بر میزان افت مقاومت پیوستگی بتن مستعد واکنش سیلیسی-قلیایی نیز تأثیر بگذارد. هدف از این تحقیق، بررسی کمی تأثیر ریزدانه یا درشت‌دانه بودن سنگدانه واکنش‌زا و تغییرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت پیوستگی بتن تحت واکنش سیلیسی-قلیایی می‌باشد. با

توجه به اینکه تاکنون اثر تغییرات این دو عامل بر مقاومت پیوستگی بتن مطالعه نشده است، این موضوع نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌شود. بی‌شک مشخص شدن سهم مشارکت ریزدانه و درشت‌دانه واکنش‌زا در رفتار پیوستگی بتن و نتایج بدست آمده، جهت اتخاذ تصمیم مناسب برای کنترل اثرات واکنش بر مقاومت پیوستگی مفید خواهد بود. بدین منظور شش مخلوط بتنی با ترکیب‌های مختلف ریزدانه و درشت‌دانه واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا و با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ تولید شد. سپس تعدادی نمونه مکعبی مسلح با میلگردهای به قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و مخلوط‌های مذکور بتن‌ریزی شد. به منظور تسریع در واکنش‌زایی، این نمونه‌ها در محلول هیدروکسید سدیم، NaOH، با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری، به کمک آزمایش بیرون‌کشیدگی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد. علاوه بر این مقاومت فشاری و انبساط ایجاد شده هر یک از طرح مخلوط‌های بتنی نیز اندازه‌گیری شد. مراحل انجام پژوهش در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱: مراحل انجام پژوهش

<sup>1</sup> Pull-out test

## ۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

با توجه به تجربی بودن روش این تحقیق، ابتدا مصالح لازم برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شد. این مصالح شامل سنگدانه (از دو نوع واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا)، سیمان، NaOH و میلگرد (با قطرهای ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر) بود. در گام بعد مخلوط‌های بتنی بر اساس روش استاندارد ملی ایران [۲۳]، در آزمایشگاه ساخته و سپس نمونه‌های آزمایشگاهی بتن‌ریزی شد. پس از قالب‌برداری و طی دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها به مخزن تسریع واکنش سیلیسی-قلیایی منتقل شد و در نهایت آزمایش‌های مورد نظر بر روی نمونه‌ها انجام شد.

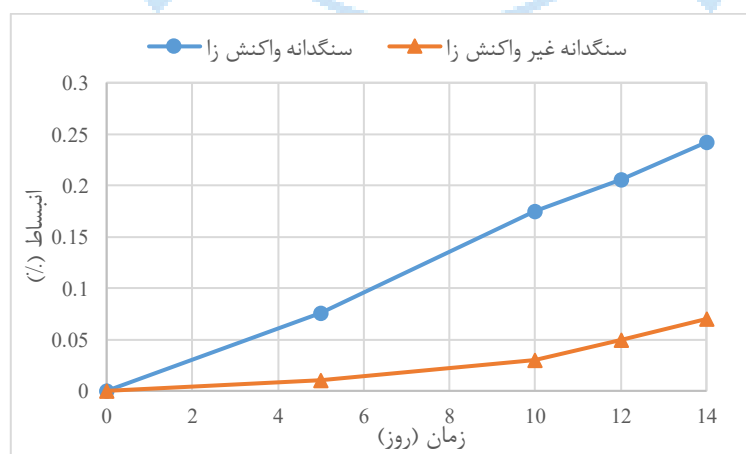
## ۲-۱- مصالح مصرفی و طرح مخلوط بتن

در تهیه مخلوط‌های بتن از دو نوع سنگدانه واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا استفاده شده است. مشخصات فیزیکی هریک از این سنگدانه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگدانه [۲۲]

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

برای تعیین واکنش‌زایی سنگدانه‌های مذکور نیز آزمایش منشور ملات تسریع شده مطابق با استاندارد ASTM C1260 [۲۴] انجام شد. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس استاندارد ASTM C1260، در صورتی که نمونه‌های منشور ملات ساخته شده با سنگدانه مورد نظر پس از ۱۴ روز غوطه‌وری در محلول یک مولار NaOH با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد، بیش‌تر از ۰/۲ درصد انبساط طولی داشته باشند، آن سنگدانه واکنش‌زا قلمداد می‌شوند. اگر انبساط ایجاد شده کم‌تر از ۰/۱ درصد باشد، سنگدانه مورد آزمایش، غیرواکنش‌زا محسوب می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقدار انبساط در نمونه ملات حاوی سنگدانه واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۰۷ درصد می‌باشد.



شکل ۲: نتایج آزمایش منشور ملات تسریع شده

از سیمان نوع دو کارخانه‌ی هگمتانه همدان با قلیایی معادل ۰/۶۵ درصد برای ساخت بتن استفاده شد. ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم است اشاره شود که آزمایش تعیین خواص شیمیایی سیمان توسط یکی از آزمایشگاه‌های

همکار استاندارد و به درخواست نویسندگان مقاله حاضر، مطابق با استانداردهای ملی ایران به شماره ۱۶۹۲، ۱-۱۶۹۳، ۲-۱۶۹۳، ۱۶۹۴ و ۱۶۹۵ [۲۵-۲۹] انجام شد.

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان

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

در این پژوهش از میلگردهای با قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر برای تهیه نمونه‌های بتن مسلح استفاده شد. مشخصات مکانیکی هر یک از این میلگردها در جدول ۳ ارائه شده است. لازم است اشاره شود که آزمایش کشش میلگرد توسط یکی از آزمایشگاه‌های همکار استاندارد و به درخواست نویسندگان مقاله حاضر، مطابق با استانداردهای ملی ایران به شماره ۱-۸۱۰۳ [۳۰] انجام شد.

جدول ۳: مشخصات مکانیکی میلگرد مصرفی

قطر (میلی‌متر)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
۱۲	۵۳۸	۷۰۰
۱۶	۵۷۷	۷۶۳

## ۲-۲- ساخت مخلوط بتن و عمل‌آوری بتن

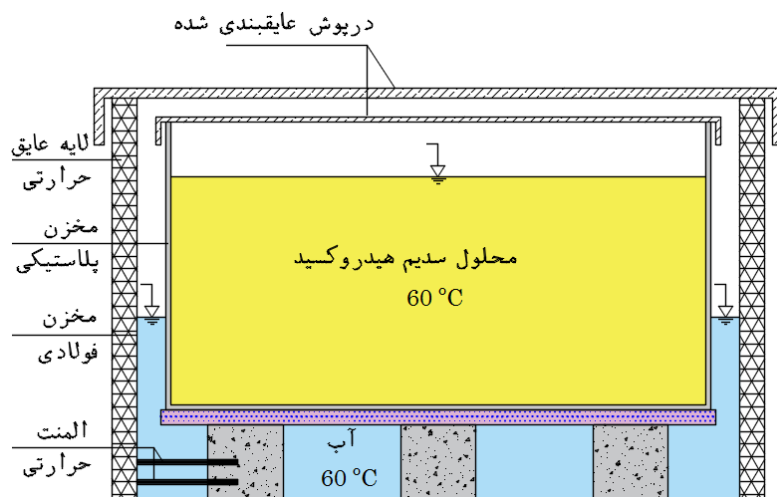
برای انجام آزمایش‌ها، شش مخلوط بتنی از ترکیب سنگدانه‌های واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا و حداکثر اندازه‌ی سنگدانه‌ی ۱۹ میلی‌متر و با نسبت‌های مختلف آب به سیمان ساخته شد. جزئیات هر یک از طرح مخلوط‌ها در جدول ۴ درج شده است. مخلوط‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ برای بررسی اثر تغییرات اندازه‌ی سنگدانه و مخلوط‌های شماره ۲، ۵ و ۶ برای بررسی اثر تغییرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت پیوستگی بتن مستعد واکنش سیلیسی قلیایی طراحی شد.

جدول ۴: جزئیات طرح مخلوط مورد استفاده در آزمایشگاه (kg/m<sup>3</sup>)

شماره طرح	نام مخلوط	سیمان	آب	سنگدانه درشت	سنگدانه ریز
۱	N-0.5	۳۸۰	۱۹۰	غیرواکنش‌زا	۹۱۸
۲	R-0.5	۳۸۰	۱۹۰	واکنش‌زا	۸۹۰
۳	FR-0.5	۳۸۰	۱۹۰	غیرواکنش‌زا	۹۰۷
۴	CR-0.5	۳۸۰	۱۹۰	واکنش‌زا	۸۹۸
۵	R-0.45	۳۸۰	۱۷۱	واکنش‌زا	۹۱۸
۶	R-0.55	۳۸۰	۲۰۹	واکنش‌زا	۸۶۵

برای اختلاط بتن در آزمایشگاه از مخلوط کن برقی استفاده شد. پس از ریختن بتن در قالب‌ها و اتمام عملیات بتن‌ریزی، سطح قالب‌ها با نایلون پوشیده شد تا از تبخیر آب بتن تازه جلوگیری شود. عملیات قالب برداری ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی انجام شد. سپس نمونه‌های بتنی، داخل یک لایه گونی مرطوب و پلاستیک پیچیده و به مدت ۷ روز در اتاقی با دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتیگراد نگهداری شد. در طول این مدت به طور مداوم عملیات رطوبت رسانی به نمونه‌ها انجام شد.

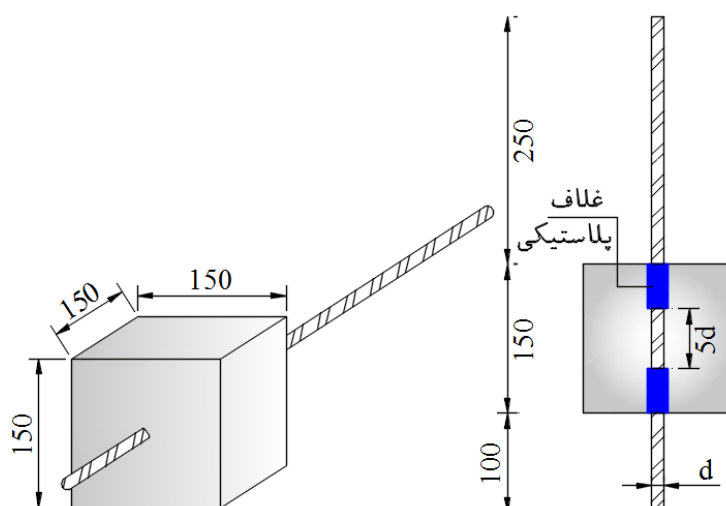
وقوع واکنش سیلیسی-قلیایی نیازمند گرما، رطوبت و قلیایی کافی می‌باشد [۳۱]. لذا بعد از ۷ روز عمل‌آوری، نمونه‌های بتنی از اتاق به داخل مخزن ویژه واکنش سیلیسی-قلیایی منتقل شدند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است به جهت تسریع واکنش سیلیسی-قلیایی این مخزن با محلول یک مولار NaOH با دمای بالا و ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد پر شده بود.



شکل ۳: مخزن ویژه واکنش سیلیسی-قلیایی

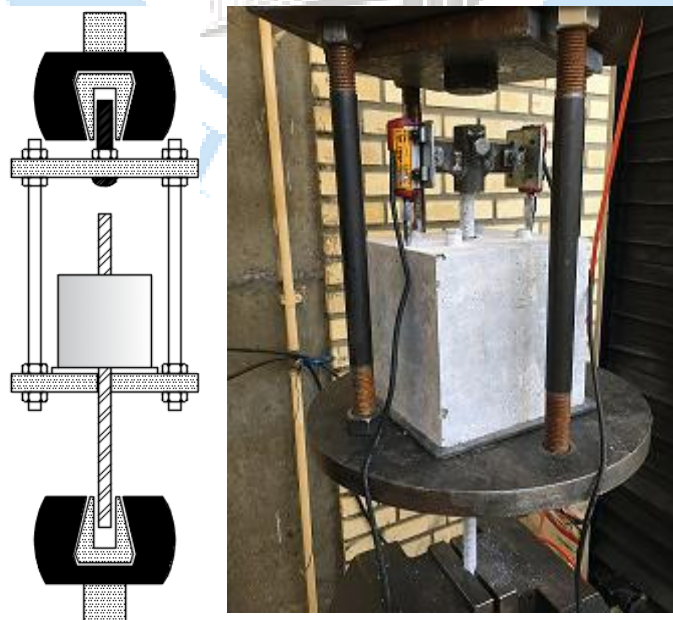
### ۳-۲- آزمایش پیوستگی بتن

برای اندازه‌گیری پیوستگی بین بتن و میلگرد، تعدادی نمونه بتنی مسلح بر اساس آیین نامه RILEM RC6 [۳۲] ساخته شد. جزئیات این نمونه‌ها، موسوم به نمونه‌های بیرون کشیدگی، در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، این نمونه‌ها متشکل از مکعب‌های بتنی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر و با میلگرد به قطر ۱۲ یا ۱۶ میلی‌متر مسلح بودند و صرفاً بخش میانی میلگرد (طولی برابر با ۵ برابر قطر میلگرد) در تماس با بتن بود. برای جلوگیری از نفوذ بتن در مابقی طول میلگرد از لوله‌های پلیاستیکی استفاده شد. جهت اطمینان از عدم نفوذ شیره‌ی بتن داخل فضای بین میلگرد و لوله‌ها، انتهای این لوله‌ها با چسب پلی‌یورتان به دقت درزبندی شد.



شکل ۴: جزئیات نمونه‌های بیرون کشیدگی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

برای اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی بتن، از یک جک به ظرفیت ۴۰۰ کیلونیوتن و یک قاب فولادی استفاده شد. در شکل ۵، تصویری از قاب فولادی موردنظر و نحوه استقرار نمونه بتنی داخل قاب برای انجام آزمایش نشان داده شده است. با شروع آزمایش، فک پایین جک ثابت مانده و حرکت فک فوقانی به سمت بالا آغاز می‌شود. بدین صورت میلگرد فولادی به صورت پیوسته و با سرعت یکنواخت ۱ میلی‌متر در دقیقه تحت کشش قرار گرفت. بارگذاری تا شکست کامل مقاومت پیوستگی یا شکاف خوردن نمونه مکعبی ادامه داشت. در طی بارگذاری، لغزش ایجاد شده در انتهای آزاد میلگرد به صورت پیوسته توسط دو ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT) با گستره اندازه‌گیری ۱۰ میلی‌متر مطابق با شکل ۵ اندازه‌گیری و ثبت شد.

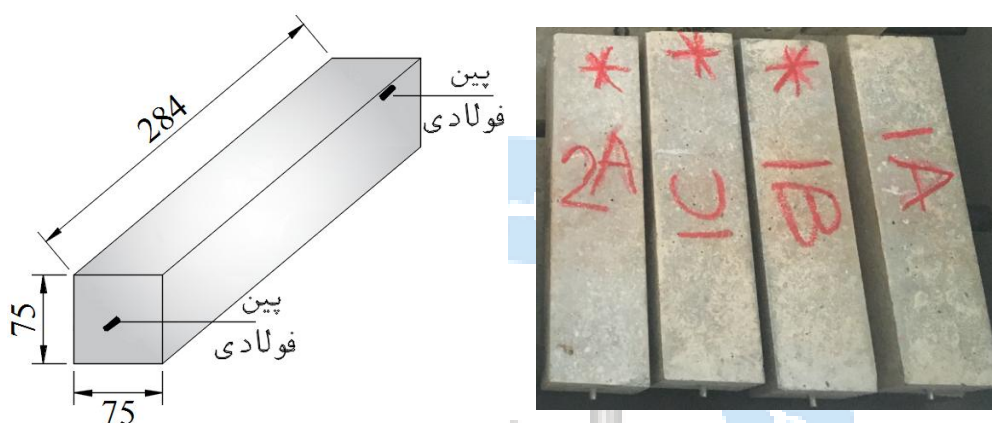


شکل ۵: نحوه انجام آزمایش بیرون کشیدگی



## ۲-۴- اندازه‌گیری انبساط

انبساط ایجاد شده در اثر واکنش سیلیسی-قلیایی، مهمترین شاخص برای ارزیابی وقوع این واکنش می‌باشد. لذا تعدادی نمونه بتنی منشوری مطابق با شکل ۶ با ابعاد  $284 \times 75 \times 75$  میلی‌متر و مجهز به دو پین فولادی ضد زنگ، جهت رصد کردن انبساط ایجاد شده در هریک از طرح مخلوط‌های بتنی در دوران غوطه‌وری ساخته شد. این نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مشخصی از مخزن ویژه‌ی واکنش سیلیسی-قلیایی خارج و پس از اندازه‌گیری طولی به روشی مطابق با استاندارد ASTM C 1293 [۳۳]، مجدداً به داخل مخزن بازگردانده می‌شد.



شکل ۶: جزئیات نمونه‌های منشوری اندازه‌گیری انبساط (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

## ۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری بتن

اندازه‌گیری تغییرات مشخصات مکانیکی ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی می‌تواند نمایانگر تصویری واضح‌تر از تأثیرات واکنش بر تخریب داخلی بتن باشد [۳۴]. بنابراین تعدادی نمونه مکعبی با ابعاد  $100$  میلی‌متر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری هریک از طرح مخلوط‌ها مطابق با استانداردهای BS EN 12390-3 [۳۵]، ساخته شد. مقاومت فشاری این نمونه‌ها همزمان با آزمایش پیوستگی بتن اندازه‌گیری شد.

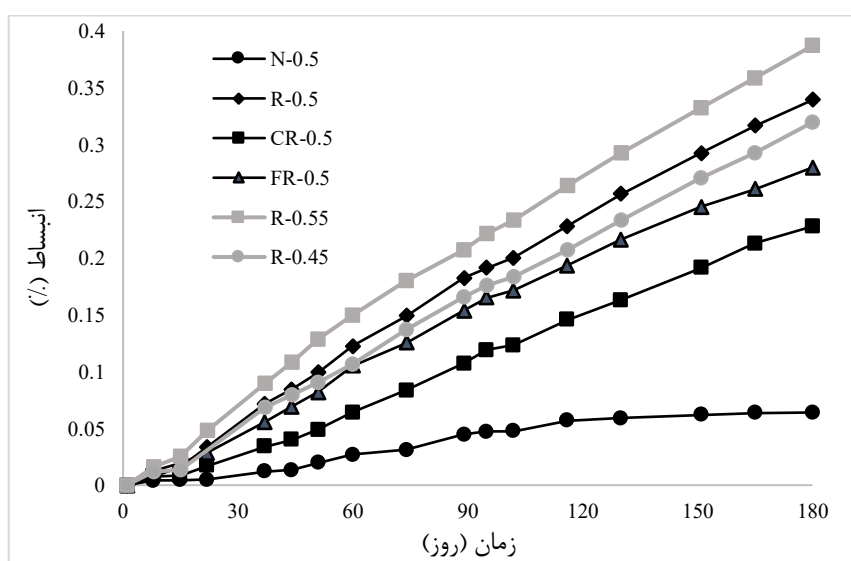
## ۳- بحث و بررسی نتایج

## ۳-۱- انبساط نمونه‌ها

شکل ۷، مقادیر انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش قلیایی را در ۶ مخلوط بتنی مورد آزمایش طی ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH نشان می‌دهد. مقدار و نرخ انبساط ایجاد شده نمایانگر شدت پیشرفت واکنش در هر یک از مخلوط‌های بتنی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار انبساط در پایان دوره آزمایش به میزان  $0.064$  و  $0.387$  درصد می‌باشد که به ترتیب در نمونه‌های N-0.5 و R-0.55 رخ داده است. انبساط نهایی ایجاد شده در نمونه‌های CR-0.5، FR-0.5، R-0.5 و R-0.45 نیز به ترتیب  $0.228$ ،  $0.280$ ،  $0.339$  و  $0.320$  درصد می‌باشد. بنابراین نتایج آزمایش نشان می‌دهد، مصرف ریزدانه واکنش‌زا در مقایسه با درشت‌دانه واکنش‌زا منجر به انبساط بیش‌تر مخلوط بتنی می‌شود. این موضوع مؤید آن است که با کاهش اندازه سنگدانه واکنش‌زا، انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی افزایش می‌یابد [۱۹، ۲۱]. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان انبساط ایجاد شده در طرح مخلوط‌های حاوی سنگدانه واکنش‌زا افزایش یافته است. افزایش نسبت آب به سیمان از  $0.45$  به  $0.5$  و از  $0.5$  به  $0.55$  به ترتیب منجر به افزایش  $6$  و  $14$

درصد انبساط در این طرح‌ها شده است. بنابراین هرچند نسبت آب به سیمان به مقدار یکسانی اضافه شده است، اما تفاوت در میزان انبساط ایجاد شده یکسان نیست. به بیان دیگر با افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های مورد بررسی، انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی تشدید شده است و این افزایش انبساط، با افزایش نسبت آب به سیمان رابطه خطی ندارد.

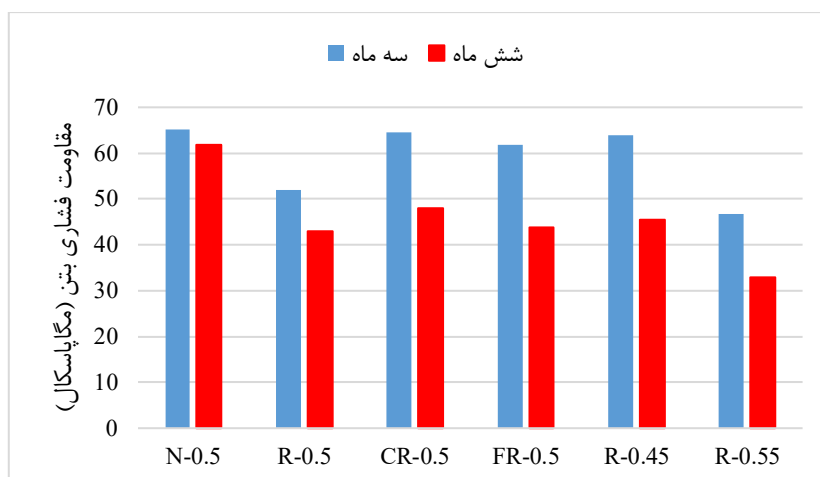
دقت بیش‌تر در نتایج نشان می‌دهد، مقدار انبساط طرح R-0.45، که تمام سنگدانه‌ها در آن از نوع واکنش‌زا می‌باشد، در مقایسه با نمونه CR-0.5 و FR-0.5، که فقط بخشی از سنگدانه‌ها از نوع واکنش‌زا می‌باشد، بیش‌تر است. لذا کاهش نسبت آب به سیمان تا حدودی انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی را تقلیل داده است، اما نتوانسته کاملاً آن را دفع کند. بنابراین جایگزینی ریزدانه واکنش‌زا با ریزدانه غیرواکنش‌زا، در مقایسه با کاهش نسبت آب به سیمان، راهکار مؤثرتری جهت کنترل انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی می‌باشد.



شکل ۷: انبساط ایجاد شده در نمونه‌های منشوری مورد آزمایش

## ۲-۳- مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها، پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH، در شکل ۸ ارائه شده است. مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های نمونه‌های N-0.5، CR-0.5، FR-0.5، R-0.5، R-0.45 و R-0.55 پس از ۳ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH، به ترتیب ۶۵/۱، ۶۴/۶، ۶۱/۹، ۵۲/۱، ۶۳/۹ و ۴۶/۷ مگاپاسکال و پس از ۶ ماه غوطه‌وری به ترتیب ۶۱/۹، ۴۷/۹، ۴۳/۸، ۴۳، ۴۵/۵ و ۳۲/۹ مگاپاسکال شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با مرور زمان و توسعه واکنش سیلیسی-قلیایی، مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها، در مقایسه با نمونه مشابه خود، کاهش پیدا کرده است [۶].



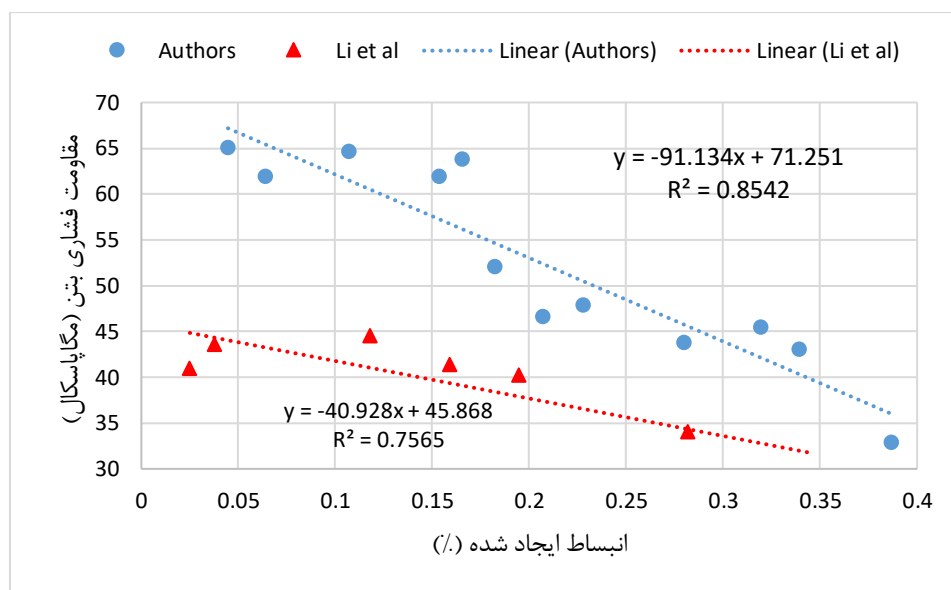
شکل ۸: مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش

نتایج نشان می‌دهد، مقاومت فشاری نمونه FR-0.5 و CR-0.5 در مقایسه با نمونه N-0.5 پس از ۳ ماه غوطه‌وری، به ترتیب ۴/۹ و ۰/۸ درصد و پس از ۶ ماه غوطه‌وری، به ترتیب ۲۹/۳ و ۲۲/۶ درصد کاهش یافت. بنابراین مصرف ریزدانه واکنش‌زا در مقایسه با درشت‌دانه واکنش‌زا منجر به کاهش بیش‌تر مقاومت فشاری مخلوط بتنی می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود ریزتر شدن اندازه سنگدانه واکنش‌زا بر کاهش مقاومت فشاری بتن در سه ماهه دوم غوطه‌وری بیش‌تر از سه ماهه اول تأثیر دارد. این موضوع می‌تواند، به علت فراوانی حضور سدیم در محلول قلیایی [۳۶] باشد و به نوعی مؤید همان رفتار نوسانی مقاومت فشاری بتن تحت واکنش قلیایی در گذر زمان می‌باشد که در مطالعات قبلی [۳۷، ۳۸] گزارش شده است.

مقایسه مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های R-0.55 و R-0.5، R-0.45 در سنین مختلف نیز نشان می‌دهد، با مرور زمان از سن ۳ تا ۶ ماه، مقاومت فشاری این نمونه‌ها به ترتیب ۲۹ و ۱۷ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین، هرچند با افزایش میزان واکنش مقاومت فشاری همه نمونه‌های کاهش یافته است، اما مقدار این کاهش در مخلوط‌های بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است و یک روند ثابتی ندارد. کم‌ترین افت مقاومت فشاری در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ رخ داده است و در دو مخلوط بتن دیگر با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵، افت مقاومت بیش‌تر و تقریباً یکسان است. لذا کاهش هر چه بیش‌تر نسبت آب به سیمان برای کنترل افت مقاومت فشاری بتن ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی همواره کارآمدتر نیست یا همواره توصیه نمی‌شود، بلکه یک مقدار بهینه برای نسبت آب به سیمان وجود دارد.

### ۳-۳- ارتباط بین مقاومت فشاری بتن و انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی

به منظور بررسی ارتباط بین مقاومت فشاری و انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی در این پژوهش و مطالعات پیشین از برازش مدل رگرسیون استفاده شد. در این مدل رگرسیونی، مقاومت فشاری به عنوان متغیر وابسته و انبساط ایجاد شده به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، یک رابطه خطی و معکوس بین متغیر مستقل (X) و متغیر وابسته (Y) برقرار است. به عبارتی با افزایش انبساط ایجاد شده، در هر دو مطالعه، مقاومت فشاری بتن به صورت خطی تقلیل می‌یابد. مقدار ضریب  $R^2$  نشان می‌دهد، ۸۵ درصد تغییرات مقاومت فشاری در این پژوهش و ۷۶ درصد تغییرات مقاومت فشاری در آزمایش‌های لی و همکاران [۱۶] توسط مقادیر انبساط‌ها قابل توضیح است.



شکل ۹: ارتباط بین مقاومت فشاری و انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی

### ۳-۴- مقاومت پیوستگی بتن

نمونه‌هایی بیرون کشیدگی پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری از مخزن تسریع واکنش قلیایی خارج شد و تحت بارگذاری قرار گرفت. تنش پیوستگی بین میلگرد و بتن از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{P}{\pi d_s \ell_e} \quad (1)$$

در این رابطه  $\tau_u$  تنش پیوستگی،  $P$  نیروی اعمال شده،  $d_s$  قطر میلگرد و  $\ell_e$  طول مدفون شده میلگرد در بتن می‌باشد. نتایج آزمایش بیرون کشیدگی در جدول ۵ خلاصه شده‌است. نمونه‌های مورد آزمایش به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شود. گروه اول شامل نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ که همگی دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ هستند، برای مطالعه اثر تغییرات اندازه سنگدانه بر مقاومت پیوستگی تهیه شدند. گروه دوم شامل نمونه‌هایی شماره ۲، ۵ و ۶ که دارای نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵) می‌باشند، برای مطالعه اثر تغییرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت پیوستگی تهیه شدند.

جدول ۵: نتایج آزمایش پیوستگی بتن

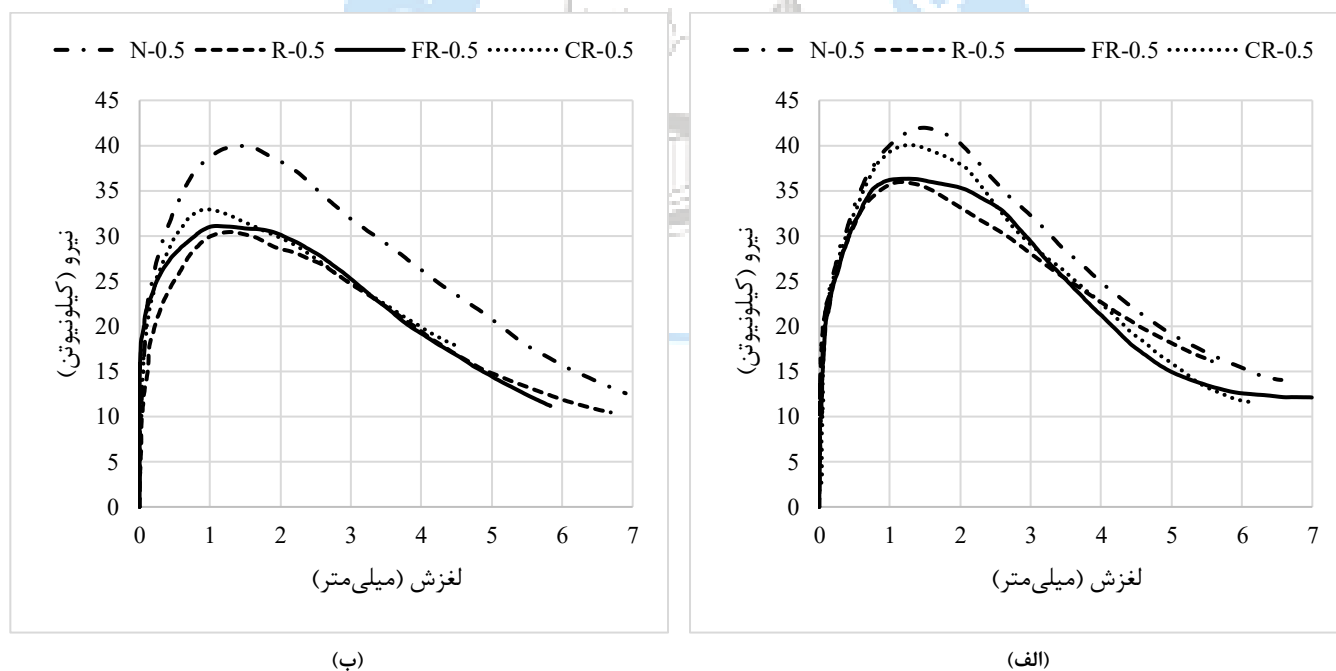
شماره طرح	نام مخلوط	نمونه مسلح با میلگرد ۱۲ به قطر میلی‌متر				نمونه مسلح با میلگرد ۱۶ به قطر میلی‌متر			
		نیروی نهایی (کیلو نیوتن)		تنش پیوستگی نهایی (مگاپاسکال)		نیروی نهایی (کیلو نیوتن)		تنش پیوستگی نهایی (مگاپاسکال)	
		۳ ماه	۶ ماه	۳ ماه	۶ ماه	۳ ماه	۶ ماه	۳ ماه	۶ ماه
۱	N-0.5	۴۲/۰۲	۴۰/۱۰	۱۸/۵۹	۱۷/۷۰	۷۳/۷۴	۷۰/۲۰	۱۸/۳۵	۱۷/۴۷
۲	R-0.5	۳۶/۰۰	۳۰/۴۶	۱۵/۹۳	۱۳/۴۷	۶۰/۴۳	۴۸/۳۲	۱۵/۰۴	۱۲/۰۲
۳	FR-0.5	۳۶/۳۵	۳۱/۱۲	۱۶/۰۵	۱۳/۷۶	۶۴/۳۲	۵۲/۳۳	۱۶/۰۰	۱۳/۰۲
۴	CR-0.5	۴۰/۱۳	۳۳/۰۰	۱۷/۷۵	۱۴/۳۰	۷۰/۵۵	۵۷/۰۱	۱۷/۵۵	۱۴/۱۸
۵	R-0.45	۴۱/۱۴	۳۶/۸۹	۱۸/۲۰	۱۶/۳۲	۷۱/۷۷	۵۴/۴۶	۱۷/۷۱	۱۳/۵۵
۶	R-0.55	۳۵/۰۵	۲۵/۰۵	۱۵/۵۱	۱۱/۰۷	۵۵/۱۷	۳۸/۸۰	۱۳/۷۳	۹/۶۵

همانطور که مشاهده می‌شود، مطابق با مطالعات قبلی [۱۶، ۱۷]، با گذشت زمان و افزایش میزان واکنش، نیروی نهایی بیرون کشیدگی ( $P_u$ ) و در نتیجه تنش پیوستگی نهایی ( $\tau_{ii}$ ) در همه نمونه‌ها کاهش یافته است.

### ۵-۳- تأثیر مصرف ریزدانه یا درشت‌دانه غیرواکنش‌زا

نتایج ارائه شده برای نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر (جدول ۵) در گروه اول، نشان می‌دهد، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی به ترتیب مربوط به نمونه‌های N-0.5 و R-0.5 است. همچنین نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه CR-0.5 در مقایسه با نمونه FR-0.5 بیش‌تر است. نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه FR-0.5 و CR-0.5 در مقایسه با نمونه R-0.5 پس از ۳ ماه غوطه‌وری به ترتیب مقدار ۱ و ۱۱/۵ درصد و پس از ۶ ماه به ترتیب ۲/۲ و ۸/۳ درصد بیش‌تر است. همچنین نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه N-0.5 در مقایسه با نمونه R-0.5 پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری به ترتیب مقدار ۱۶/۷ و ۳۱/۴ درصد بیش‌تر است.

در شکل ۱۰، نمودارهای نیرو-لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۲ به قطر میلی‌متر در گروه اول پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کاهش اندازه سنگدانه‌های واکنش‌زا منجر به کاهش مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه‌های مورد مطالعه می‌شود. بنابراین استفاده از ریزدانه غیرواکنش‌زا به جای ریزدانه واکنش‌زا در مقایسه با استفاده از درشت‌دانه غیرواکنش‌زا به جای درشت‌دانه واکنش‌زا تأثیر بیش‌تری در بهبود مقاومت پیوستگی دارد.



شکل ۱۰: نمودار نیرو-لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر در گروه اول (الف) پس از ۳ ماه (ب) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول

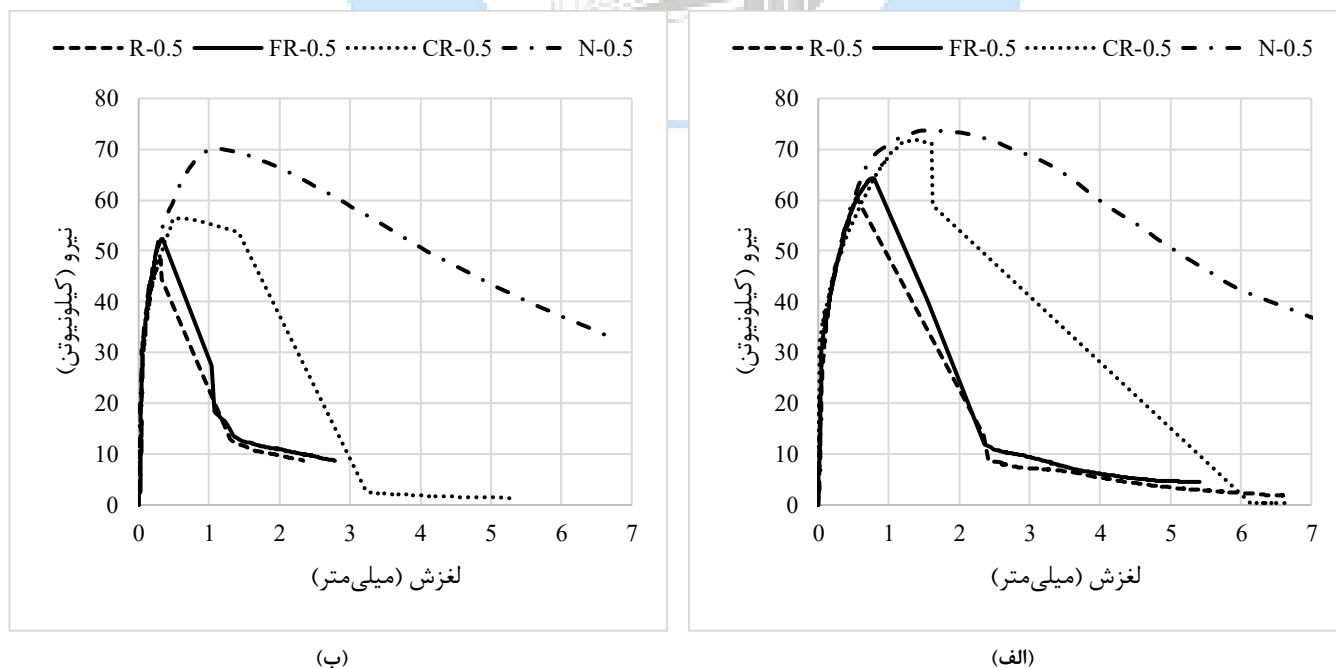
با دقت در شکل ۱۰-الف ملاحظه می‌شود، شیب قسمت اولیه منحنی نیرو-لغزش نمونه‌های مختلف در اوایل بارگذاری (تقریباً تا جابجایی ۰/۲ میلی‌متر) تقریباً یکسان است و پس از آن به تدریج شیب‌ها تغییر پیدا می‌کند، اما در شکل ۱۰-ب منحنی‌های نیرو-لغزش از همان اوایل بارگذاری شیب متفاوتی دارند. به عبارتی با گذر زمان و افزایش میزان واکنش سیلیسی-قلیایی سختی پیوستگی کاهش

می‌یابد. بیش‌ترین کاهش سختی مربوط به نمونه R-0.5 و پس از آن نمونه FR-0.5 می‌باشد. نمونه CR-0.5 هم کم‌ترین کاهش سختی را دارد. بنابراین، با کاهش یافتن اندازه سنگدانه واکنش‌زا علاوه بر مقاومت پیوستگی، سختی پیوستگی هم کاهش پیدا می‌کند.

نتایج مربوط به نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر در گروه اول (جدول ۵) نیز نشان می‌دهد، بیش‌ترین مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی مربوط به نمونه‌ی N-0.5 و پس از آن نمونه CR-0.5 می‌باشد. کم‌ترین مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی به نمونه R-0.5 تعلق دارد. نتایج نشان می‌دهد، نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه FR-0.5 و CR-0.5 در مقایسه با نمونه R-0.5 پس از ۳ ماه غوطه‌وری به ترتیب مقدار ۶/۴ و ۱۶/۷ درصد و پس از ۶ ماه به ترتیب ۸/۳ و ۱۸ درصد بیش‌تر است. همچنین نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه N-0.5 در مقایسه با نمونه R-0.5 پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری به ترتیب مقدار ۲۲ و ۴۵/۳ درصد بیش‌تر است. بنابراین، مشابه با نمونه‌هایی مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر، استفاده از ریزدانه غیرواکنش‌زا به جای ریزدانه واکنش‌زا در مقایسه با استفاده از درشت‌دانه غیرواکنش‌زا به جای درشت‌دانه واکنش‌زا تأثیر بیش‌تری در افزایش مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی دارد.

همچنین ملاحظه می‌شود، میزان کاهش (افت) نیرو و تنش پیوستگی نهایی در سه ماهه دوم غوطه‌وری با افزایش قطر میلگرد از ۱۲ به ۱۶ میلی‌متر در کلیه طرح‌ها بیش‌تر است. در توجیه این مطلب می‌توان بیان کرد اتصال بین خمیر سیمان و میلگرد می‌تواند مشابه ناحیه انتقالی در بتن تلقی گردد، بنابراین با افزایش قطر میلگرد کیفیت بتن ناحیه اتصال کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت پیوستگی در اثر واکنش سیلیسی-قلیایی بیش‌تر کاسته می‌شود.

نمودارهای نیرو-لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر برای مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH، در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، شیب منحنی نیرو-لغزش نمونه‌های مختلف تا قبل از گسیختگی تقریباً یکسان است. به عبارتی، کاهش اندازه سنگدانه واکنش‌زا تأثیر به‌سزایی روی سختی پیوستگی نمونه‌های نداشته و صرفاً مقدار نیرو و تنش پیوستگی نهایی را در آزمایش بیرون کشیدگی کاهش داده‌است.

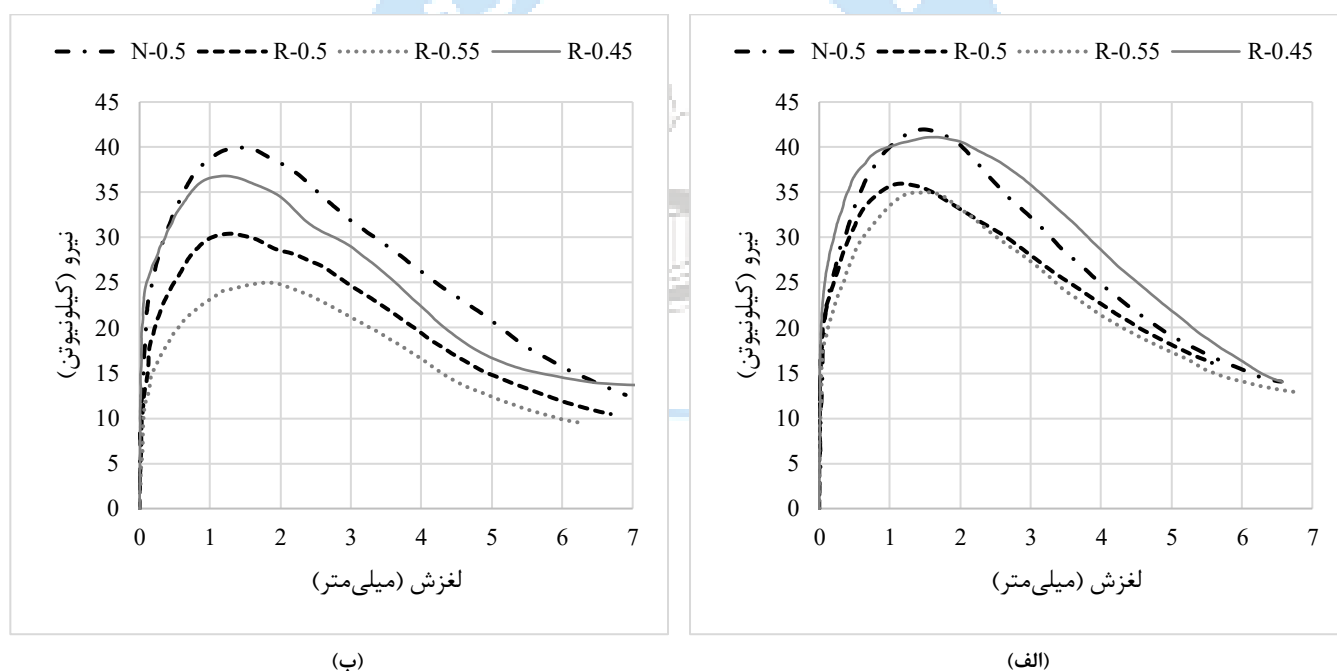


شکل ۱۱: نمودار نیرو-لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر در گروه اول (الف) پس از ۳ ماه (ب) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول

## ۳-۶- تأثیر تغییرات نسبت آب به سیمان

نتایج ارائه شده نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر (جدول ۵) در گروه دوم، نشان می‌دهد، با گذر زمان و افزایش میزان واکنش از سن ۳ تا ۶ ماه، نیرو و تنش پیوستگی نهایی کاهش یافته است. بیش‌ترین مقدار کاهش نیرو و تنش پیوستگی نهایی مربوط به نمونه R-0.55 و به مقدار ۲۹ درصد و پس از آن نمونه R-0.5 به مقدار ۱۵ درصد می‌باشد. کم‌ترین مقدار کاهش نیرو و تنش پیوستگی نهایی هم مربوط به نمونه R-0.45 و به مقدار ۱۰ درصد می‌باشد. بنابراین افت نیرو و تنش پیوستگی نهایی ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی در گذر زمان در مخلوط‌های بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است و با افزایش نسبت آب به سیمان شدیدتر می‌شود. ضمناً کاهش نیروی نیرو و تنش پیوستگی نهایی، با افزایش نسبت آب به سیمان، رابطه خطی ندارد.

نمودارهای نیرو- لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر و مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. با دقت در منحنی‌های نیرو- لغزش ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت آب به سیمان در بتن، میلگرد با اعمال نیروی کم‌تری شروع به لغزیدن نموده و منحنی نیرو- لغزش وارد ناحیه غیر خطی شده است. به عبارتی افزایش نسبت آب به سیمان در بتن مستعد واکنش سیلیسی-قلیایی، زوال سختی پیوستگی را تسریع می‌نماید.

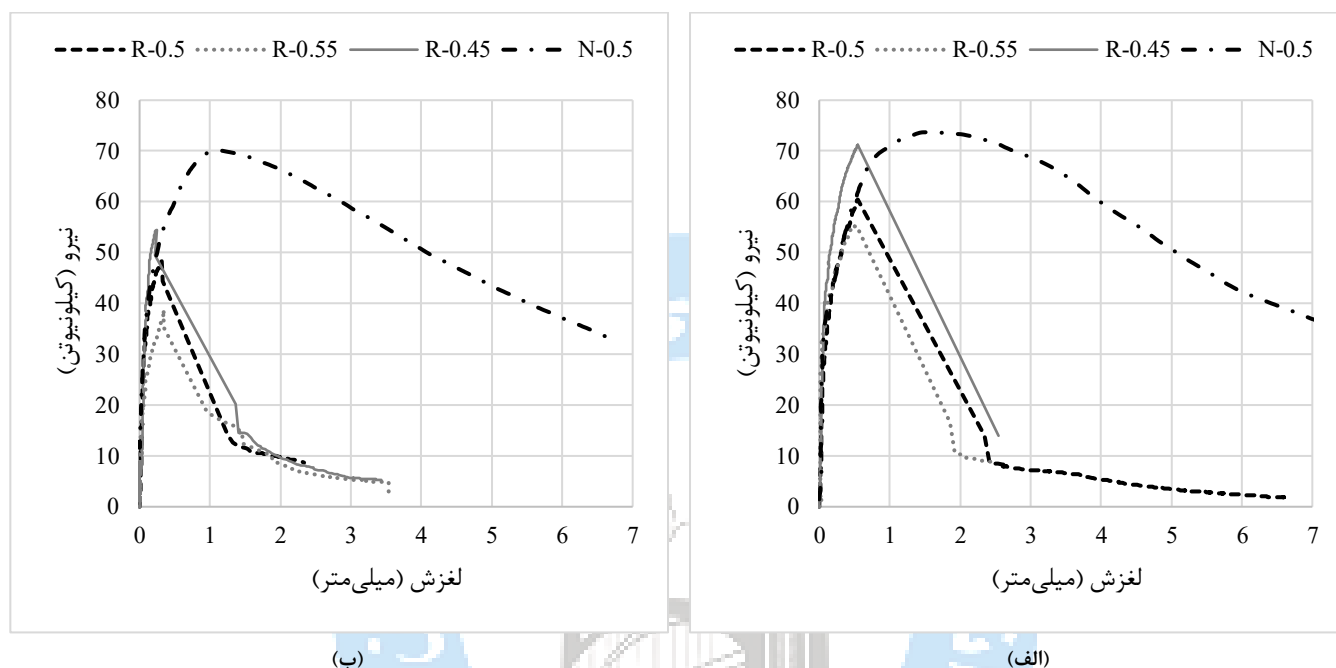


شکل ۱۲: نمودار نیرو- لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۲ میلی‌متر در گروه دوم (الف) پس از ۳ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH (ب) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH

نتایج ارائه شده برای نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر در جدول ۵، نشان می‌دهد، نیرو و تنش پیوستگی نهایی نمونه‌های R-0.55 و R-0.5 با گذر زمان و افزایش میزان واکنش از سن ۳ تا ۶ ماه به ترتیب ۲۳ و ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. برای این نمونه‌ها نیز، افت نیرو و تنش پیوستگی نهایی ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی در گذر زمان به ازای نسبت‌های آب به سیمان مختلف، متفاوت است و روند یکسانی ندارد، طوری که در مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ بیش‌ترین افت نیرو و تنش

پیوستگی نهایی ایجاد شده است و در دو مخلوط بتن دیگر با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ مقدار افت نیرو و تنش پیوستگی نهایی تقریباً یکسان می‌باشد.

نمودارهای نیرو- لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر و مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵ و ۰/۵۵ پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشابه نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان، آغاز لغزش میلگرد از داخل بتن با اعمال نیروی کمتری اتفاق می‌افتد و زوال سختی پیوستگی تسریع می‌شود.

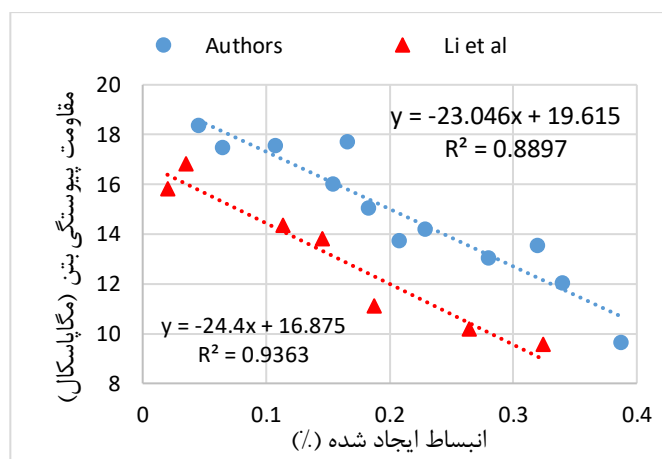


شکل ۱۳: نمودار نیرو- لغزش نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۶ میلی‌متر در گروه دوم (الف) پس از ۳ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH (ب) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول NaOH

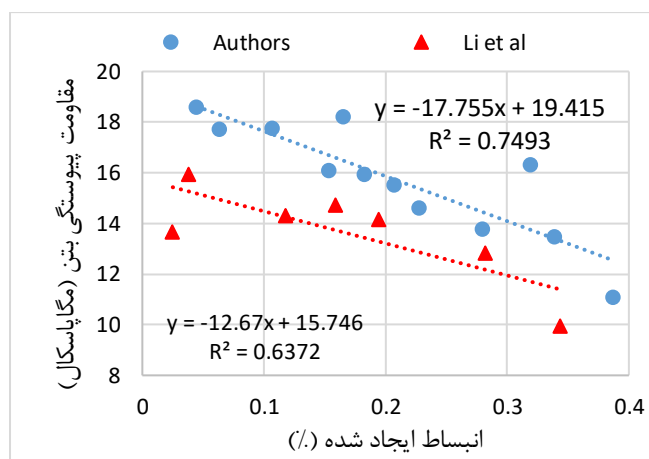
### ۷-۳- ارتباط بین مقاومت پیوستگی بتن و انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی

ارتباط بین مقاومت پیوستگی و انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی در این پژوهش و مطالعه لی و همکاران [۱۶] در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در هر دو مطالعه، یک رابطه خطی و معکوس بین مقاومت پیوستگی بتن و انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی نقش بسته است. به عبارتی همراه با گسترش انبساط ایجاد شده در نمونه‌های مورد آزمایش، مقاومت پیوستگی بتن با روندی خطی کاهش می‌یابد. نکته جالب دیگر این است که در هر دو مطالعه، ضریب  $R^2$  نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر بیشتر است. به عبارتی با افزایش قطر میلگرد از ۱۲ به ۱۶ میلی‌متر آسیب‌های ناشی از انبساط شدت بیشتری یافته است. همانطور که قبلاً اشاره شد این موضوع می‌تواند ریشه در کاهش کیفیت بتن ناحیه اتصال در اثر افزایش قطر میلگرد داشته باشد.





(ب)



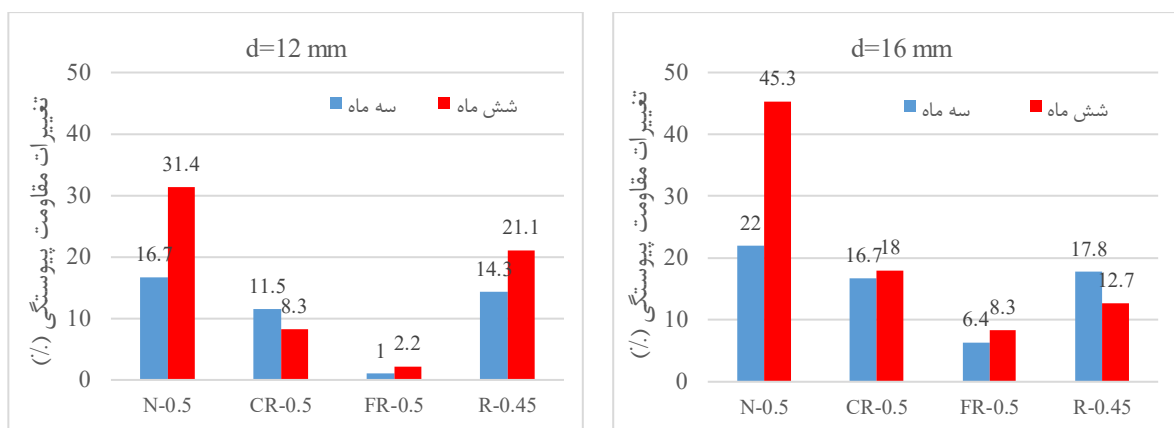
(الف)

شکل ۱۴: ارتباط بین مقاومت پیوستگی بتن و انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی (الف) نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۲ میلی‌متر (ب) نمونه‌های مسلح با میلگرد ۱۶ میلی‌متر

### ۸-۳- راهکارهای پیشنهادی برای کنترل تأثیرات منفی واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار پیوستگی

برای درک بهتر تأثیر تغییرات نسبت آب به سیمان و ریزدانه یا درشت‌دانه بودن سنگدانه واکنش‌زا بر مقاومت پیوستگی بتن‌های آسیب دیده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی، تغییرات تنش پیوستگی نهایی نمونه‌های مختلف در مقایسه با نمونه R-0.5 در شکل ۱۶ نشان شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از سنگدانه ریز غیرواکنش‌زا در مقایسه با سنگدانه درشت غیرواکنش‌زا توصیه می‌شود، چرا که در تمام حالات تغییرات تنش پیوستگی نهایی نمونه CR-0.5 بیش‌تر از نمونه FR-0.5 است. همچنین در تمام حالات، بجز نمونه R-0.45 و فقط در سن ۶ ماه، با افزایش قطر میلگرد از ۱۲ به ۱۶ میلی‌متر تغییرات تنش پیوستگی نهایی نمونه‌های بیش‌تر شده است. چنانچه اتصال بین خمیر سیمان و میلگرد، مشابه ناحیه انتقالی در بتن فرض شود، با افزایش قطر میلگرد کیفیت بتن ناحیه اتصال کاهش می‌یابد؛ در نتیجه مقاومت پیوستگی در اثر واکنش سیلیسی-قلیایی بیش‌تر آسیب می‌بیند؛ لذا در این حالت راهکارهای پیشنهادی برای کنترل تأثیرات منفی واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار پیوستگی، مؤثرتر عمل می‌کنند.

تغییرات تنش پیوستگی نهایی نمونه N-0.5 نیز در تمام حالات، بویژه در سن ۶ ماه و برای میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر، بیش‌تر از نمونه R-0.45 است. بنابراین هرچند در سنین کوتاه مدت، کاهش نسبت آب به سیمان و تعویض سنگدانه واکنش‌زا هر دو می‌توانند گزینه مناسبی برای کنترل تأثیرات منفی واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار پیوستگی باشد، اما با گذر زمان و پیشرفت واکنش در سنین بلند مدت، اثر کاهش نسبت آب به سیمان کم‌رنگ‌تر می‌شود. لذا به نظر می‌رسد، برای میلگردهای قطورتر در سنین بلند مدت، راهکار تعویض کل سنگدانه‌های واکنش‌زا یا حداقل ریزدانه واکنش‌زا با نوع غیرواکنش‌زا در مقایسه با کاهش نسبت آب به سیمان مناسب‌تر باشد. البته برای نتیجه‌گیری قطعی نیاز به تحقیقات بیش‌تر و آزمایش میلگردهایی با قطرهای متنوع‌تری است.



شکل ۱۶: تغییرات تنش پیوستگی نهایی نمونه‌های مختلف در مقایسه با نمونه N-0.5

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی بروی نمونه‌های بتنی آسیب‌دیده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی با شدت‌های مختلف انجام شد. هدف از این آزمایش‌ها، بررسی کمی اثر جایگزینی ریزدانه یا درشت‌دانه غیرواکنش‌زا بجای ریزدانه یا درشت‌دانه واکنش‌زا و تغییرات نسبت آب به سیمان به منظور بهبود رفتار پیوستگی اعضای بتن مسلح در معرض واکنش سیلیسی-قلیایی بود. بدین منظور، تعدادی نمونه مکعبی مسلح با میلگردهای به قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و شش مخلوط بتنی با ترکیب‌های مختلف از شن و ماسه واکنش‌زا و غیرواکنش‌زا و نسبت‌های آب به سیمان مختلف ساخته و به مدت ۶ ماه در محلول قلیایی غوطه‌ور شد. در این مدت انبساط ایجاد شده در هریک از مخلوط‌های بتنی به طور مستمر اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت فشاری و مقاومت پیوستگی مخلوط‌های بتنی مورد نظر پس از ۳ و ۶ ماه غوطه‌وری اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- وقوع واکنش سیلیسی-قلیایی موجب افت مقاومت پیوستگی، مقاومت فشاری و ایجاد انبساط در کلیه مخلوط‌های مورد بررسی شد.

۲- با افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های مورد بررسی، انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی بیش‌تر شد. ضمناً این افزایش انبساط، با افزایش نسبت آب به سیمان، رابطه خطی نداشت و بنظر می‌رسد برای کنترل افت مقاومت فشاری ناشی از وقوع واکنش سیلیسی-قلیایی یک نسبت آب به سیمان بهینه وجود دارد.

۳- افت مقاومت پیوستگی در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر بیش‌تر بود. این موضوع می‌تواند به علت کاهش بیش‌تر کیفیت بتن در ناحیه اتصال بین خمیر سیمان و میلگرد پیرو افزایش قطر میلگرد باشد.

۴- میزان افت مقاومت پیوستگی در مخلوط‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت بود. در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر، افزایش نسبت آب به سیمان منجر به افت بیش‌تر مقاومت پیوستگی شد. اما در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان افت مقاومت پیوستگی روند ثابتی نداشت.

۵- مصرف صرفاً درشت‌دانه یا ریزدانه غیرواکنش‌زا در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر، مقاومت پیوستگی را به ترتیب

۲/۲ و ۸/۳ درصد و مصرف صرفا درشت‌دانه یا ریزدانه واکنش‌زا در نمونه‌های مسلح با میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر، مقاومت پیوستگی را به ترتیب ۸/۳ و ۱۸ درصد در مقایسه با نمونه R-0.5 افزایش داد. بنابراین راهکار تأمین ریزدانه غیرواکنش‌زا در مقایسه با تأمین درشت‌دانه غیرواکنش‌زا برای کنترل تأثیرات منفی واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار پیوستگی و بهبود مهار میلگرد در بتن مؤثرتر است.

۶- جایگزینی سنگدانه ریز واکنش‌زا با سنگدانه غیرواکنش‌زا، در مقایسه با کاهش نسبت آب به سیمان (از ۰/۵ به ۰/۴۵)، راهکار مؤثرتری جهت کنترل انبساط ایجاد شده ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی است.

۷- هر دو گزینه کاهش نسبت آب به سیمان و یا تعویض سنگدانه واکنش‌زا راهکار مناسبی برای کنترل تأثیرات منفی واکنش سیلیسی-قلیایی بر رفتار پیوستگی می‌باشد، اما با پیشرفت واکنش در بلند مدت، اثر کاهش نسبت آب به سیمان کم‌رنگ‌تر می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که در بلند مدت، گزینه تعویض سنگدانه واکنش‌زا راهکار مناسب‌تری برای میلگردهای قطورتر باشد.

## مراجع

- [1] Sohrab Veisoh, S., Doosti, A. (2017) Identify the potential aggregates transaction around Tabriz and ways to reduce their negative effects on concrete properties. *Building Engineering and Housing Science*, 11(3), p. 43-54.
- [2] Figueira, R., et al. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, 222, p. 903-931.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Multon, S., et al. (2010). Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 40(4), p. 508-516.
- [6] 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, p. 119567.
- [7] 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.
- [8] Ji, X., et al. (2021) Time-dependent Effect of Expansion due to Alkali-silica Reaction on Mechanical properties of Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(6), p. 714-729.
- [9] Takahashi, Y., Okano, Y. and Yang Z. (2020). Contribution of alkali-silica reaction gel on time-dependent mechanical properties of concrete. *In: Proceedings of the Conmat'20*, No.7-3\_6.
- [10] Reinhardt, H.W., Ozkan, H., and Mielich, O. (2018). Changes in mechanical properties of concrete due to ASR. *Hormigony Acero*, 69, p. 15-19.
- [11] Hajighasemali, S., Ramezani pour, A., Kashfizadeh, M. (2014). The effect of alkali-silica reaction on strength and ductility analyses of RC beams. *Magazine of Concrete Research*. 66(15), p. 751-760.
- [12] Kubat, T., Al-Mahaidi, R., and Shayan, A. (2016). CFRP confinement of circular concrete columns affected by alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, 116, p. 98-109.
- [13] Kubat, T., Al-Mahaidi, R., and Shayan, A. (2016). Strain development in CFRP-wrapped circular concrete columns affected by alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, 113, p. 603-612.
- [14] Ferche, A.C., Gautam, B., Habibi, F., Panesar, D.K, Sheikh, S.A., Vecchio, F.J., Orbovic, N. (2019). Material, structural and modelling aspects of alkali aggregate reaction in concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 351, p. 87-93.
- [15] 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.
- [16] Li, P., Tan, N., An, X., Maekawa, K., Jiang, Z. (2020). Restraint Effect of Reinforcing Bar on ASR Expansion and Deterioration Characteristic of the Bond Behavior. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 18(4), p. 192-210. <https://doi.org/10.3151/jact.18.192>
- [17] Haddad, R.H., Numayr, K.S. (2007). Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond. *Construction and Building Materials*, 21(2), p. 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.012>
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Abbasiyan Taeb, M., Rezaie, F., Ghiasvand, E. (2023). The impact of the size of reactive aggregate on the mechanical properties of concrete and the extent of ASR damage over the time. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.408846.3183>
- [23] 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
- [24] ASTM C1260, Standard. (2007). *Test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. Section, 4, p. 676-680.
- [25] National standard of Iran, INSO 1692, (2019). *Hydraulic Cement- Test Methods for Chemical Analysis- Determination of Major Components*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization.
- [26] National standard of Iran, INSO 1693-1, (2019). *Hydraulic Cement- Test Methods for Chemical Analysis- part 1 Determination Of minor Constituents*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization.
- [27] National standard of Iran, INSO 1693-2, (2019). *Hydraulic Cement- Test Methods for Chemical Analysis- part 2 Determination of Free Calcium Oxide*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization.
- [28] National standard of Iran, INSO 1694, (2019). *Hydraulic Cement- Test Methods for Chemical Analysis- Determination of Sulfur as sulfid*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization.
- [29] National standard of Iran, INSO 1695, (2019). *Hydraulic Cement- Test Methods for Chemical Analysis- Determination of Sodium and Potassium Oxides*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization.
- [30] National standard of Iran, INSO 8103-1, (2020). *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete- Test methods- Part 1: Reinforcing bars, rods and wire*. Tehran, Iran: Iranian National Standardization Organization, p. 5-7.
- [31] Chéruel, 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.
- [32] RILEM, Standard. (1994). *RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test*. RILEM TC 9-RC.
- [33] ASTM C1293, Standard. (2008). *Test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [34] Ghiasvand, E., Rezaei, Z., Mohammadi, H., Ayyoubi, M., Dehghani, S., (2023). Evaluation of long-term properties of products containing alkali-activated slag exposed to alkali-silica reaction by mechanical parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), p. 04023240. <https://doi-org.squ.idm.oclc.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15545>
- [35] BS EN 12390-3, Standard. (2009). *Testing hardened concrete—compressive strength of test specimens*, British Standard: London, UK.
- [36] Gholhaki, M., Sharbatdar, M., Pachideh, G., (2022). An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments. *Journal of Building Engineering*, 61, p. 105275. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105275>.
- [37] 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.
- [38] Giaccio, G., et al. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), p. 993-1004.