

Effect of Curing Duration on the Properties of One-part Alkali-Activated Slag Concrete in an Unsaturated Environment

Sadmontazi¹, H. Zanganeh^{2*}

1-Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan

2-Ph.D. Candidate, Civil Engineering, University of Guilan

Hamedzanganeh@gmail.com

Received: 02 August 2025

Revised: 14 September 2025

Accepted: 25 October 2025

Research paper

Abstract

This study investigates the effect of curing duration on the properties of one-part alkali-activated slag (O-AAS) concrete and compares its performance with that of ordinary Portland cement (OPC) concrete. The specimens were cured under ambient moist conditions for 1, 7, 28, 56, and 360 days. Following curing, all samples were stored in an environment with 50% relative humidity for up to 360 days. The experimental program included compressive strength, chloride ion diffusion coefficient, free shrinkage, and restrained shrinkage tests. Additionally, core samples were extracted from the center of concrete columns to evaluate compressive strength and chloride ion diffusivity.

The results showed that increasing the ambient moist-curing duration significantly enhanced the performance of O-AAS concrete compared to OPC. Under unsaturated conditions, insufficient curing led to a reduction of up to 37% in the 360-day compressive strength of O-AAS concrete. Extending the curing period from 1 to 7 days reduced free shrinkage by 17.6% and the width of 28-day restrained shrinkage cracks by 60%. Core analysis revealed that inadequate curing resulted in the penetration of microcracks into the inner zones of O-AAS concrete, adversely affecting its mechanical and durability performance. However, increasing the curing duration from 1 to 7 days eliminated the influence of such internal microcracking. In contrast, OPC core specimens exhibited no significant differences in compressive strength and chloride ion diffusion between 1-day, 7-day, and 360-day curing regimes. Overall, the findings underscore the critical importance of providing adequate early-age curing for O-AAS concrete to ensure long-term durability and mechanical performance, especially in unsaturated environments.

Keywords: One-Part Alkali-Activated Slag Concrete, Chloride Ion Diffusion Coefficient, Curing Duration, Aging, Shrinkage cracking.

*Corresponding Author: , H. Zanganeh

Zanganeh H., Sadrmomtazi A. Effect of Curing Duration on the Properties of One-part Alkali-Activated Slag Concrete in an Unsaturated Environment. *J. Concr. Struct. Mater.*, 2024; 9(2): 170-187.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.538727.1396>

2538-5828/ © 2025The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی تأثیر مدت عمل آوری بر خواص بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی در محیط غیر اشباع

علی صدر ممتازی، حامد زنگانه

استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان

دانشجوی دکتری سازه دانشگاه گیلان

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hamedzanganeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

۱. چکیده

این تحقیق به بررسی اثر مدت زمان عمل آوری بر خواص بتن قلیا فعال سرباره‌ای تک جزئی (O-AAS^۱) می‌پردازد و آن را با بتن سیمان پرتلند معمولی (OPC^۲) مقایسه می‌کند. عمل آوری تا سنین ۱، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۳۶۰ روز انجام شد. پس از عمل آوری، نمونه‌ها تا ۳۶۰ روز در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد نگهداری شدند. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری، ضریب انتشار یون کلرید، جمع شدگی آزاد و جمع شدگی مقید بودند. همچنین، مغزه‌گیری از مرکز ستون‌های بتنی برای آزمایش مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش مدت زمان عمل آوری به‌طور قابل توجهی موجب بهبود خواص بتن O-AAS در مقایسه با OPC شده است. در شرایط غیر اشباع، عدم تأمین عمل آوری کافی منجر به کاهش تا ۳۷ درصدی مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه در بتن O-AAS شد. افزایش مدت عمل آوری از ۱ به ۷ روز، جمع شدگی آزاد را تا ۱۷.۶ درصد و عرض ترک ناشی از جمع شدگی مقید را تا ۶۰ درصد کاهش داد. بررسی مغزه‌ها نشان داد که در صورت عمل آوری ناکافی، ریزترک‌ها به نواحی درونی بتن O-AAS نفوذ کرده و موجب کاهش دوام و مقاومت شده است. با افزایش مدت عمل آوری از ۱ روز به ۷ روز در بتن O-AAS، آثار این ریزترک‌ها بر روی دوام و مقاومت مشاهده نشده است. در مقابل، نمونه‌های مغزه‌گیری شده از بتن OPC در شرایط ۱، ۷ و ۳۶۰ روز عمل آوری، تفاوت معناداری در نتایج مقاومت و نفوذپذیری نشان ندادند. یافته‌ها بر ضرورت تأمین شرایط مناسب عمل آوری در سنین اولیه برای حفظ عملکرد بلندمدت بتن O-AAS، به‌ویژه در محیط‌های غیر اشباع، تأکید دارند.

کلمات کلیدی: بتن تک جزئی قلیا فعال سرباره‌ای، ضریب انتشار یون کلرید، مدت عمل آوری، پیرشدگی، ترک‌های جمع شدگی.

¹ One-part Alkali-Activated Slag

² Ordinary Portland Cement

۲. مقدمه

یکی از مهم‌ترین منابع انتشار دی‌اکسیدکربن در صنعت ساخت‌وساز، تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) است که سهم قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای جهانی را به خود اختصاص می‌دهد. این چالش، ضرورت توسعه مصالحی جایگزین با ردپای کربنی کمتر را برجسته می‌سازد. در این راستا، بتن‌های قلیافعال (AAM^3) به‌عنوان یکی از جایگزین‌های مناسب برای OPC مطرح شده‌اند [۱-۳]. این مصالح، که از واکنش یک فعال‌کننده قلیایی با مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و غیره تشکیل می‌شوند، می‌توانند خواص مکانیکی قابل مقایسه یا حتی برتری نسبت به OPC فراهم آورند و هم‌زمان با کاهش چشمگیر انتشار کربن همراه باشند.

از منظر روش فعال‌سازی، بتن‌های قلیافعال به دو گروه اصلی دوجزئی و تک‌جزئی تقسیم می‌شوند. در سیستم‌های دوجزئی، محلول فعال‌کننده معمولاً از ترکیب سیلیکات سدیم مایع و هیدروکسید سدیم تهیه می‌شود که پیش از اختلاط با مصالح خشک آماده‌سازی می‌گردد. اگرچه این روش امکان کنترل دقیق بر پارامترهایی مانند زمان گیرش و مقاومت را فراهم می‌کند، اما با محدودیت‌هایی نظیر خطر حمل و آماده‌سازی محلول‌های قلیایی و نیاز به تجهیزات خاص همراه است [۴-۵]. در مقابل، در سیستم‌های تک‌جزئی، فعال‌کننده به‌صورت پودری مانند متاسیلیکات سدیم در ترکیب خشک وارد شده و تنها با افزودن آب فعال می‌شود. این رویکرد به‌دلیل شباهت زیاد با روش ساخت بتن معمولی، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای درجاریز به‌شمار می‌رود. با این حال، قلیائیت زیاد و انحلال سریع این نوع فعال‌کننده می‌تواند به گیرش سریع و افزایش استعداد جمع‌شدگی منجر گردد [۴-۶]. بتن‌های تک‌جزئی پایه‌سرباره‌ای به‌دلیل توانایی کسب مقاومت مناسب در دمای محیط (۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد)، از قابلیت استفاده در شرایط بتن‌های درجاریز برخوردارند [۱،۴،۶،۷]. با این وجود، توسعه‌ی کاربرد صنعتی آن‌ها مستلزم درک دقیق رفتار این مواد در شرایط محیطی مختلف، به‌ویژه محیط‌های غیراشباع، و نیز کنترل ضعیف‌هایی مانند حساسیت به جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی است.

در بسیاری از کاربردهای سازه‌ای، نظیر عرشه پل‌ها و اعضای بتنی در ساختمان‌ها، رطوبت نسبی محیط، غیراشباع است. در چنین شرایطی، خروج تدریجی رطوبت داخلی منجر به جمع‌شدگی خشک و ناپایداری حجمی بتن می‌شود که می‌تواند زمینه‌ساز توسعه‌ی ریزترک‌ها و در نهایت کاهش دوام باشد [۸،۹]. این پدیده در هر دو نوع بتن OPC و AAS رخ می‌دهد؛ اما به دلیل تفاوت ساختار ژل C-S-H بتن OPC با ژل C-A-S-H بتن AAS، شدت آن متفاوت است. به‌طور خاص، بتن‌های AAS پایه‌سرباره‌ای نسبت به OPC رفتار جمع‌شدگی شدیدتری از خود نشان می‌دهند، به‌طوری که جمع‌شدگی خشک آن‌ها تا ۶ برابر بیشتر گزارش شده است. این مسئله عمدتاً به ریزتر بودن منافذ ژل‌های تشکیل‌شده و افزایش فشار مویبندی ناشی از خروج رطوبت نسبت داده می‌شود [۸]. لازم بذکر است که علاوه بر جمع‌شدگی خشک شدن، جمع‌شدگی خودبخودی بتن قلیافعال سرباره‌ای بیشتر از بتن سیمان پرتلند بوده که می‌تواند باعث ایجاد ترک گردد. از دلایل جمع‌شدگی خودبخودی بیشتر بتن قلیافعال سرباره‌ای کاهش مدول الاستیک، کاهش سریع رطوبت داخلی مخلوط و افزایش انقباض ناشی از واکنش‌های شیمیایی است [۸].

در محیط غیراشباع با توسعه‌ی ریزترک‌های خشک‌شدگی در طی زمان، نفوذپذیری بتن‌های OPC افزایش می‌یابد، اما مقاومت فشاری به این دلیل اغلب دستخوش تغییر قابل توجهی نمی‌گردد [۹-۱۲]. زیرا با برقراری تعادل بین رطوبت داخلی بتن با محیط، گسترش ریزترک‌های جمع‌شدگی متوقف می‌شوند [۹]. در بتن OPC عمق نفوذ ریزترک‌ها از سطح به درون بتن محدود (حداکثر چند میلی‌متر) بوده و لذا اثر آنها بر مقاومت فشاری ناچیز است [۱۳]. اما نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۹]. با این حال، در بتن‌های AAS، علاوه بر افزایش نفوذپذیری در طول زمان [۱۴]، کاهش تدریجی مقاومت فشاری نیز گزارش شده است [۱۵-۱۹]. در حالی

³ Alkali-Activated Materials

که ساختار ژل این بتن‌ها در برابر خشک‌شدگی همانند OPC بلحاظ شیمیایی پایدار است [۱۹]، توسعه‌ی پیش‌رونده‌ی ریزترک‌های ناشی از جمع‌شدگی قابل توجه این بتن در مقایسه با OPC می‌تواند عامل اصلی این پدیده قلمداد شود [۱۵].

با این حال، مقدار افت مقاومت فشاری AAS در پژوهش‌های مختلف، به شدت متغیر بوده و از حدود ۷٪ تا ۷۰٪ گزارش شده است [۱۷-۱۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از تفاوت‌های کلیدی میان آن‌ها، مدت زمان عمل‌آوری اولیه پیش از قرارگیری در محیط غیراشباع با رطوبت نسبی حدود ۵۰٪ بوده است. این مشاهده حاکی از آن است که مدت زمان عمل‌آوری، عامل تعیین‌کننده‌ای در کنترل پدیده‌ی پیرشدگی مقاومت در بتن‌های AAS می‌باشد. با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات در این رابطه، پژوهش حاضر با هدف مشخص کردن نقش مدت زمان عمل‌آوری بر خواص بلندمدت O-AAS در محیط‌های غیراشباع طراحی شده است. آزمون‌ها شامل ارزیابی مقاومت فشاری، جمع‌شدگی (آزاد و مقید) و نفوذپذیری کلراید می‌باشند. در این راستا، ضریب انتشار یون کلرید به‌عنوان شاخص حساس به توسعه‌ی ریزترک‌ها برای تحلیل تغییرات نفوذپذیری انتخاب شده است [۲۰]. آزمون‌ها در بازه‌های زمانی مختلف تا ۳۶۰ روز انجام شده است. به‌منظور بررسی عمق نفوذ ریزترک‌های جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن، نمونه‌های مغزه‌گیری شده از مرکز ستون‌های بتنی نیز مورد آزمایش مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید قرار گرفته‌اند.

نتایج این مطالعه می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های اجرایی برای تعیین مدت زمان بهینه‌ی عمل‌آوری بتن‌های قلیافعال سرباره ای تک جزئی درجاریز نقش مؤثری ایفا کند.

۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۳. مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق از منابع مختلف تهیه شده و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آنها با روش‌های استاندارد تعیین گردیده و با استاندارد مقایسه شده است. در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ شرکت سیمان نهاوند، منطبق با استاندارد ASTM C150 [۲۱] با جرم حجمی $3,14 \text{ gr/cm}^3$ ، سطح ویژه 3250 gr/cm^2 و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات استاندارد 428 kg/cm^2 استفاده شده است. سرباره کوره بلند آهن گدازی صنایع ذوب آهن اصفهان مورد استفاده، منطبق با استاندارد ASTM C989 [۲۲] با جرم حجمی $2,79 \text{ gr/cm}^3$ ، سطح ویژه 4010 gr/cm^2 و شاخص فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه ۱۰۸٪ است. متاسلیکات خشک مورد استفاده از صنایع شیمیایی Qingdao Darun چین با جرم حجمی $1,20 \text{ gr/cm}^3$ و باقیمانده نامحلول ۰,۱۲٪ است. در جدول ۱ نتایج آنالیز شیمیایی مصالح چسبنده فوق ارائه شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان، سرباره و متاسلیکات سدیم

ترکیب (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
سیمان	۲۰,۸۰	۴,۸۰	۴,۰۰	۶۳,۷۰	۲,۱۰	۲,۴۰	۰,۳۷	۰,۸۵	۰,۹۶
سرباره	۳۵,۹۲	۱۱,۹۱	۰,۶۲	۳۸,۳۸	۸,۸۹	۰,۵۹	۰,۵۷	۰,۹۶	۱,۰۸
متاسلیکات	۴۶,۲۱	--	--	--	--	--	۵۰,۸۳	--	--
سدیم									



سنگدانه‌های مورد استفاده از معادن جنوب غربی تهران شامل شن با اندازه حداکثر اسمی ۱۲٫۵ میلی متر و ماسه مطابق با الزامات استاندارد ASTM C33 [۲۳] بوده است. درصد ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ برای ماسه ۱٫۹ درصد و مورد شن ۰٫۲ درصد بوده است. درصد جذب آب اشباع با سطح خشک و جرم حجمی اشباع با سطح خشک شن به ترتیب ۱٫۸ درصد و ۲۵۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقادیر متناظر برای ماسه ۳٫۷ درصد و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. برای ساخت مخلوط از آب شرب شهر تهران استفاده شده است.

۲٫۳. طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها

مخلوط‌های بتن با عیار 450 kg/m^3 و نسبت آب به ماده چسبنده ۰٫۵۲ ساخته شد. نسبت‌های اختلاط O-AAS به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شرایط عمل‌آوری درون محلول قلیایی مشابه با OPC باشد. طرح اختلاط‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. در این گزارش مخلوط‌های سیمان پرتلند با علامت OPC و مخلوط‌های بتن قلیا فعال با علامت O-AAS نام‌گذاری شده‌اند.

جدول ۲. طرح اختلاط‌های ساخته شده

کد طرح	W/B	سیمان (kg/m^3)	سرباره (kg/m^3)	متاسیلیکات سدیم (kg/m^3)	شن (%SSD) (kg/m^3)	ماسه (%SSD) (kg/m^3)	دمای بتن تازه
OPC	۰٫۵۲	۴۵۰٫۰	-	-	۵۳۹٫۰	۱۰۰۱٫۰	۲۳٫۱
O-AAS	۰٫۵۲	-	۴۰۵٫۰	۴۵٫۰	۵۲۵٫۰	۹۷۵٫۰	۲۶٫۱

*SSD: اشباع با سطح خشک

پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیطی با حداقل رطوبت نسبی ۹۰ درصد نگهداری شدند. پنج حالت نگهداری نمونه‌ها از زمان خروج از قالب تا زمان انجام آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. در طول عمل‌آوری محلول قلیایی OPC و O-AAS به ترتیب شامل محلول آب آهک اشباع و محلول حاوی ده درصد متاسیلیکات سدیم بوده است. استفاده از محلول متاسیلیکات سدیم برای نمونه‌های O-AAS (بتن فعال شده با قلیا بر پایه سرباره) به منظور جلوگیری از شست‌وشوی یون‌های قلیایی و حفظ pH بالا در محیط اطراف انتخاب شد [۲۴]. محیط غیراشباع دارای رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد بود که مشابه شرایط نگهداری نمونه‌ها در خشک‌شدن استاندارد ASTM C157 (تعیین تغییر طول نمونه‌ها بر اثر جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن) می‌باشد [۲۵].

جدول ۳. شرایط نگهداری نمونه‌ها از زمان خارج شدن از قالب تا زمان انجام آزمایش

کد اختصاری	W360	W0A	W6A	W27A	W55A
مستغرق در محلول قلیایی (روز)	تا ۳۶۰	۰	۶	۲۷	۵۵
شرایط غیراشباع (۵۰٪ رطوبت نسبی)	۰	تا ۳۶۰	تا ۳۶۰	تا ۳۶۰	تا ۳۶۰

۳.۳. آزمایش های انجام شده

آزمایش های انجام شده شامل آزمایش کارآیی، مقاوت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ تسریع شده یون کلرید، جمع شدگی آزاد و مقید و مغزه گیری می باشد. آزمایش تعیین مقاومت فشاری طبق استاندارد BSEN12390 part 3 [۲۶] بر روی ۳ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰ سانتی متری در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز انجام شد.

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCMT) طبق استاندارد NT Build 492 [۲۷] بر روی سه نمونه دیسکی شکل به ضخامت ۵ سانتی متر و قطر ۱۰ سانتی متر، در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز انجام شد. نمونه ها در زمان آزمایش مستقیماً از محلول اشباع قلیایی خارج شده، برش خورده و مطابق استاندارد اشباع و آزمایش شده اند.

اما تغییراتی در زمان برش نمونه های نگهداری شده در شرایط غیر اشباع داده شده است. پس از پایان دوره عمل آوری اولیه، از هر نمونه استوانه ای ۱۰×۲۰ سانتی متری یک دیسک به ضخامت ۲.۵ سانتی متر از سطح ماله کشی جدا شده و کنار گذاشته شد. بخش باقیمانده استوانه تا زمان انجام آزمایش در محیطی با رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۳ درجه سانتی گراد نگهداری شد. در زمان آزمایش، از هر استوانه باقی مانده یک دیسک به ضخامت ۵ سانتی متر از سطح برش خورده قبلی جدا گردید و سپس مطابق روش استاندارد اشباع شده و آزمایش بر روی آن ها انجام شد.

آزمایش تعیین تغییر طول نمونه ها بر اثر جمع شدگی ناشی از خشک شدن، مطابق با استاندارد ASTM C157 [۲۷]، بر روی سه نمونه با ابعاد ۲۸.۵ × ۷.۵ × ۷.۵ سانتی متر انجام شد. پس از عمل آوری اولیه، نمونه ها در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در معرض محیط غیر اشباع با رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار گرفتند. شایان ذکر است که جمع شدگی از زمان آغاز خشک شدن، مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C596 [۲۸] اندازه گیری شد.

همچنین، آزمایش جمع شدگی مقید بتن بر روی دو نمونه حلقوی با قطر خارجی ۴۰.۵ سانتی متر، قطر داخلی ۳۲.۵ سانتی متر و ضخامت ۱۵ سانتی متر، طبق استاندارد ASTM C1581 [۲۹] انجام شد. پس از قالبگیری اطراف نمونه با گونی مرطوب پوشانده شد. پس از باز نمودن قالب، عمل آوری نمونه ها با گونی مرطوب صورت گرفته است. نمونه ها پس از عمل آوری اولیه به مدت ۱ و ۷ روز در شرایط اشباع، به محیطی با رطوبت نسبی ۵۰ درصد منتقل شدند. بر اساس زمان آغاز ترک خوردگی، طبقه بندی بتن از نظر پتانسیل ایجاد ترک انجام گرفت.

عملیات مغزه گیری بر روی ستون های بتنی با ابعاد ۲۵ × ۲۵ × ۵۰ سانتی متر انجام شد. عمل آوری ستون های بتنی با استفاده از گونی مرطوب و پوشاندن با پلاستیک انجام شده است. گونی ها روزانه دو بار با محلول اشباع قلیایی مرطوب نگه داشته شدند. مغزه گیری از ستون هایی که در شرایط نگهداری W0A، W6A و W360 قرار گرفته اند، در سن ۳۶۰ روز انجام گرفت. در مغزه گیری ابتدا از سطح ماله کشی، یک مغزه به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۸ سانتی متر (به منظور حذف لایه سطحی) تهیه و دور انداخته شد. در ادامه دو مغزه دیگر با ارتفاع های تقریبی ۱۱ و ۲۰ سانتی متر برداشت شد. در شکل ۱ عملیات مغزه گیری از ستون های بتنی و نمونه تحت عمل آوری مرطوب نشان داده شده است.

برای هر شرایط نگهداری، عملیات مغزه گیری بر روی دو ستون انجام شده و مجموعاً چهار مغزه برای هر حالت استخراج گردید. نمونه های مغزه گیری شده جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و تعیین ضریب انتشار یون کلرید، به ترتیب طبق استانداردهای ASTM C42 [۳۰] و NT Build 492 [۲۷] آماده و آزمایش شده اند.



شکل ۱. الف) عملیات مغزه‌گیری از ستون بتنی (ب) عمل‌آوری آزمونه‌های مرطوب

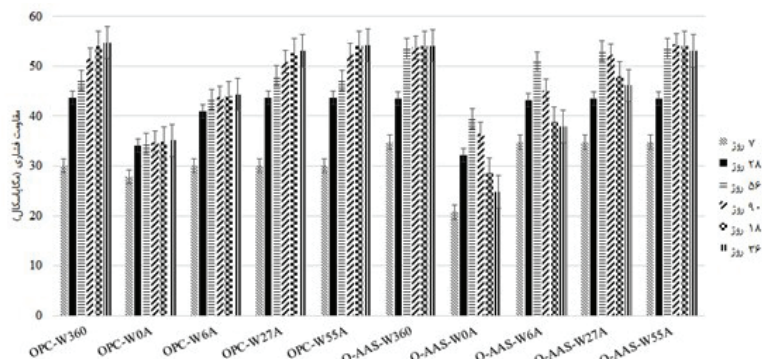
۴. نتایج و تفسیر آن‌ها

۱.۴. کارآیی

آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C143 [۳۱] انجام شد. اسلامپ مخلوط OPC برابر با ۲۰ سانتیمتر بود. کارآیی مخلوط O-AAS بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از OPC و مشابه بتن های خودتراکم بود. زیرا علیرغم مشابه بودن نسبت های وزنی، حجم خمیر در مخلوط O-AAS بیشتر است. این نتایج مشابه نتایج بدست آمده در تحقیق Palankar و همکاران [۳۲] است. برای اندازه گیری کارآیی O-AAS از استاندارد ASTM C1161 [۳۳] استفاده شده است. متوسط قطر بازشدگی O-AAS برابر با ۶۲ سانتیمتر بود.

۲.۴. مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری در شکل ۲ نشان داده شده است. مقاومت فشاری بتن OPC در شرایط W360 با افزایش سن افزایش یافته است. برای مقایسه مقاومت فشاری در سنین مختلف از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) یک طرفه استفاده شد. ابتدا آزمون لوین نشان داد که واریانس‌ها همگن هستند ($\text{Sig.} = 0.347 > 0.05$)، بنابراین شرایط برای اجرای آزمون ANOVA یک طرفه برقرار است.



شکل ۲. نتایج مقاومت فشاری در شرایط محیطی مختلف در طی زمان

نتایج آزمون ANOVA یکطرفه برای OPC-W360 بیانگر آن بود که سن نمونه تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری دارد ($\text{Sig.} < 0.001$). آزمون تعقیبی دانکن نیز نشان داد که با اطمینان ۹۵ درصد، مقاومت فشاری در تمام سنین (۷ تا ۱۸۰ روز) با هم متفاوت است، اما بین سنین ۱۸۰ و ۳۶۰ روز تفاوت معناداری وجود ندارد ($\text{Sig.} = 0.275$). این یافته، رسیدن مقاومت فشاری به حالت پایدار را پس از ۱۸۰ روز تأیید می‌کند. لازم بذکر است که مزیت آزمون دانکن در این است که خطای نوع اول (خطای تأیید برابری میانگین دو سن با مقاومت فشاری متفاوت) و خطای نوع دوم (خطای عدم تأیید برابری میانگین دو سن با مقاومت فشاری یکسان) در آن برابر است. تحلیل آماری مشابهی برای سایر شرایط عمل‌آوری OPC و همچنین برای مخلوط‌های O-AAS انجام شد. بر این اساس، روند تغییرات مقاومت فشاری در طول زمان به سه دوره مشخص تقسیم می‌شود: دوره افزایش، دوره پایداری نسبی، و دوره کاهش مقاومت یا پیرشدگی، که به معنای افت مقاومت با افزایش سن بتن است. این طبقه‌بندی در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که در بتن OPC، مقاومت فشاری در شرایط W360، W27A، W55A و W360 از سن ۱۸۰ روز به بعد ثابت باقی مانده است. این پایداری احتمالاً به دلیل تکمیل واکنش‌های هیدراته شدن سیمان و کاهش تدریجی فعالیت شیمیایی در سنین زیاد است [۳۴]. در مقابل، در شرایط W0A و W6A، مقاومت فشاری نسبت به W360 کمتر است. همچنین پس از ۹۰ روز تغییر قابل توجهی ندارد. زیرا قرارگیری زود هنگام در محیط غیراشباع (با رطوبت نسبی ۵۰٪) موجب کاهش رطوبت داخلی و عدم انجام واکنش‌های هیدراته شدن می‌شود [۱۲ و ۳۴]. در مجموع، پدیده پیرشدگی مقاومت فشاری در بتن OPC مشاهده نشده است.

جدول ۴. تقسیم بندی تغییرات مقاومت فشاری در طی زمان

کد طرح	تغییر مقاومت فشاری با افزایش سن		
	افزایش	ثبات	کاهش
OPC-W360	۷ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰	-
OPC-W0A	۷ تا ۲۸	۲۸ تا ۳۶۰	-
OPC-W6A	۷ تا ۵۶	۵۶ تا ۳۶۰	-
OPC-W27A	۷ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰	-
OPC-W55A	۷ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰	-
O-AAS-W360	۷ تا ۵۶	۵۶ تا ۳۶۰	-
O-AAS-W0A	۷ تا ۵۶	--	۵۶ تا ۳۶۰
O-AAS-W6A	۷ تا ۵۶	۵۶ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰
O-AAS-W27A	۷ تا ۵۶	۵۶ تا ۹۰	۹۰ تا ۱۸۰
O-AAS-W55A	۷ تا ۵۶	۵۶ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰

مقاومت فشاری بتن O-AAS بسته به مدت زمان عمل‌آوری، رفتارهای کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهد. روند تغییرات مقاومت فشاری طی زمان در شرایط W55A مشابه با روند W360 است. در مقابل، نمونه‌های W6A، W0A و W27A با پدیده پیرشدگی مقاومت فشاری در محیط غیراشباع مواجه شدند. نمونه شرایط W0A دارای بیشترین پیرشدگی به میزان ۳۷٫۴٪ بود. لازم بذکر است که مقاومت ۳۶۰ روزه این شرایط ۵۴٫۱٪ کمتر از W360 است.

این نتایج نشان می‌دهد که مدت‌زمان عمل‌آوری نقش مهمی در جلوگیری از پیرشدگی بتن O-AAS دارد. قرارگیری زود هنگام آرمونه‌ها در محیط غیراشباع (کمتر از ۵۶ روز در این تحقیق) موجب ایجاد تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی در شرایطی می‌شود که بتن هنوز از مقاومت کافی برخوردار نیست؛ در نتیجه، ریزترک‌ها به سرعت توسعه می‌یابند [۱۵-۱۷]. با این حال، شدت زیاد واکنش‌های شیمیایی (پلیمر شدن و هیدراته شدن) در سنین اولیه [۶-۴] مانع از تأثیر قابل‌ملاحظه این ریزترک‌ها بر مقاومت فشاری شده و مقاومت افزایش می‌یابد. در سنین بالاتر دلیل کاهش سرعت واکنش اثرات این ریزترک‌ها بر مقاومت فشاری می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های W0A و W6A، میزان توسعه ترک در W27A کمتر بوده و همین موضوع باعث حفظ مقاومت فشاری بیشتر در این شرایط شده است. شایان ذکر است که در پدیده پیرشدگی بتن‌های O-AAS، کاهش مقاومت فشاری عمدتاً ناشی از آسیب‌های فیزیکی بوده و تغییر شیمیایی قابل توجهی در فازهای تشکیل‌دهنده مشاهده نشده است [۱۹].

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نتایج این تحقیق با یافته‌های سایر پژوهش‌ها هم‌راستا است. در تحقیق کالینز و سانجیان [۱۵]، بتن AAS که بلافاصله پس از قالب‌برداری در محیط غیراشباع (رطوبت نسبی ۵۰٪) نگهداری شده، در پایان یک سال حدود ۵۴٪ افت مقاومت نسبت به شرایط اشباع و ۱۷٪ کاهش مقاومت ناشی از پیرشدگی داشته است. در پژوهش Alham-oud و همکاران [۱۶]، نمونه‌هایی که تنها ۲ روز عمل‌آوری شده و سپس در محیط غیراشباع نگهداری شدند، پس از ۸۰۰ روز حدود ۸۲٪ افت مقاومت نسبت به حالت اشباع داشته و اثر پیرشدگی منجر به ۷۰٪ کاهش مقاومت شده است. همچنین، در تحقیق پرینس و همکاران [۱۷]، بتن‌های AAS پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۵٪، تا ۹۱ روز افزایش ۵٪ مقاومت نشان دادند، اما پس از آن پدیده پیرشدگی باعث ۷٪ افت مقاومت تا سن ۶۹۵ روز شد.

تعیین حداقل زمان بهینه عمل‌آوری مقاومت فشاری بلند مدت برای هر نوع بتن بر اساس مقایسه مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه شرایط مختلف نگهداری (جدول ۳) با شرایط مرجع عمل‌آوری در محلول قلیایی اشباع (W360) صورت پذیرفت. بر این اساس، زمان عمل‌آوری زمانی بهینه تلقی می‌گردد که مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه نمونه با مقدار متناظر آن در شرایط W360 برابری نماید. مقایسه آماری مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه بتن OPC با استفاده از آزمون ANOVA یک‌طرفه و آزمون تعقیبی دانکن حاکی از آن است که نمونه‌های W27A، W360، و W55A در سطح اطمینان ۹۵٪ فاقد تفاوت آماری معنادار می‌باشند. در مقابل، نمونه‌های W0A و W6A به ترتیب ۳۵.۸٪ و ۱۹.۰٪ افت مقاومت نسبت به W360 نشان داده و از نظر آماری متمایز بودند. این یافته‌ها دلالت بر ضرورت حداقل ۲۸ روز عمل‌آوری آرمونه‌های استاندارد در محیط اشباع جهت حفظ مقاومت بلندمدت بتن OPC در شرایط غیراشباع دارد.

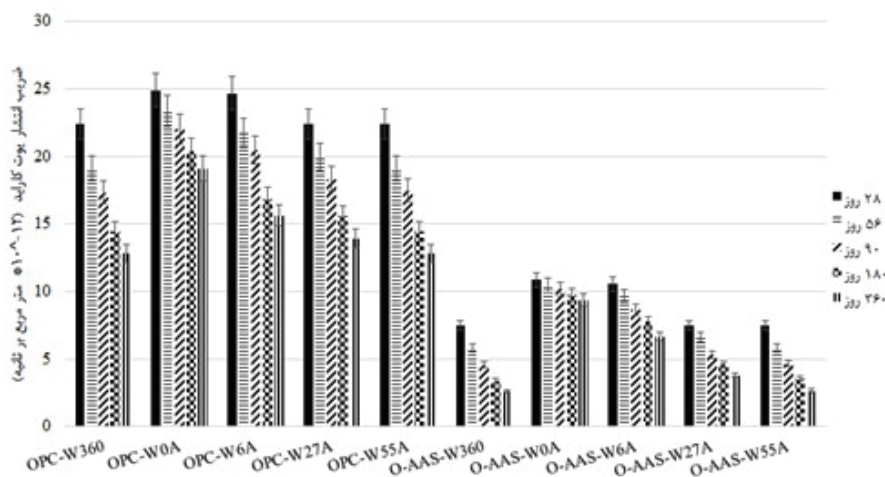
تحلیل مشابه برای بتن O-AAS نشان داد که مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه شرایط W360 با W55A و شرایط W6A با W27A در سطح اطمینان ۹۵٪ فاقد تفاوت آماری معنادار می‌باشند. با این حال، مقاومت نمونه W0A به‌طور معناداری کمتر از سایر شرایط بود. افت مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه نمونه‌های W27A، W6A، W0A، و W55A نسبت به W360 به ترتیب ۲۹.۹٪، ۱۴.۷٪ و ۱.۸٪ است. این یافته‌ها دلالت بر ضرورت حداقل ۵۶ روز عمل‌آوری آرمونه‌های استاندارد در محیط اشباع جهت حفظ مقاومت بلندمدت بتن O-AAS در شرایط غیراشباع دارد.

۳.۴. ضریب انتشار یون کلرید

نتایج ضریب انتشار یون کلرید حاصل از آزمایش RCMT در شکل ۳ نمایش داده شده است. در کلیه شرایط عمل‌آوری، با افزایش سن نمونه‌ها تا ۳۶۰ روز، روند کاهش ضریب انتشار به‌وضوح قابل مشاهده است. قرارگیری آرمونه‌ها در محیط غیراشباع موجب افزایش

ضریب انتشار یون کلرید در هر دو نوع بتن OPC و O-AAS شده است. این تأثیر در بتن O-AAS به مراتب شدیدتر بوده و اختلاف قابل توجهی میان عملکرد نفوذپذیری در حالت‌های اشباع و غیراشباع مشاهده شده است.

ضریب انتشار یون کلرید در بتن‌های OPC و O-AAS با افزایش سن در عمل‌آوری مورد بررسی کاهش داشته است. در بتن OPC-W360، ضریب انتشار یون کلرید از $10^{-12} \times 22,4$ در ۲۸ روز به $10^{-12} \times 12,8$ مترمربع بر ثانیه در ۳۶۰ روز کاهش یافته است. ضریب انتشار یون کلرید O-AAS-W360 نیز از $10^{-12} \times 7,5$ در ۲۸ روز به $10^{-12} \times 2,6$ مترمربع بر ثانیه در ۳۶۰ روز کاهش یافته است. ضریب انتشار یون کلرید ۲۸ و ۳۶۰ روزه AAS-W360 به ترتیب ۶۷٪ و ۸۰٪ کمتر از OPC-W360 است. این نتایج نشان می‌دهد در شرایط W360 کاهش ضریب انتشار O-AAS بیشتر از OPC است. در بازه زمانی ۲۸ تا ۳۶۰ روز، میزان کاهش ضریب انتشار یون کلرید در بتن OPC برای شرایط W0A، W6A، W27A و W55A به ترتیب برابر ۲۳.۳٪، ۳۶.۷٪، ۳۸.۰٪ و ۴۲.۸٪ بوده است. این مقادیر در بتن O-AAS به ترتیب ۱۳.۹٪، ۳۶.۸٪، ۴۹.۱٪ و ۶۴.۷٪ گزارش شده است. این نتایج بیانگر آن است که بتن O-AAS به مراتب نسبت به مدت‌زمان عمل‌آوری حساس‌تر از OPC است و بهبود شرایط عمل‌آوری در آن تأثیر قابل توجه‌تری بر کاهش نفوذپذیری دارد. همچنین، برخلاف مقاومت فشاری، در روند ضریب انتشار یون کلرید بتن O-AAS، پدیده پیرشدگی مشاهده نشده است، و با گذشت زمان، روند بهبود دوام ادامه یافته است.



شکل ۳. نتایج ضریب انتشار یون کلرید شرایط محیطی مختلف در طی زمان

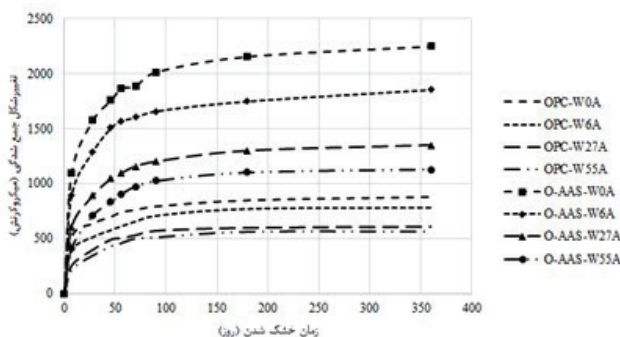
نتایج Bondar و همکاران [۳۵] نشان می‌دهد در بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر، ضریب انتشار یون کلرید بتن قلیا فعال سرباره ای دو جزئی در حدود ۶۷ درصد کمتر OPC است. در تحقیق Fan و همکاران [۳۶] نیز ضریب انتشار بتن قلیا فعال سرباره ای دو جزئی در حدود ۷۳ کمتر از ضریب انتشار OPC با نسبت آب به چسباننده برابر بوده است. نتایج فوق‌الذکر نیز با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

تعیین حداقل زمان بهینه عمل‌آوری مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید برای هر نوع بتن بر اساس مقایسه ضریب انتشار یون کلرید ۳۶۰ روزه شرایط مختلف نگهداری (جدول ۳) با شرایط مرجع عمل‌آوری در محلول قلیایی اشباع (W360) صورت پذیرفت. تحلیل آماری مقایسه ضریب انتشار یون کلرید ۳۶۰ روزه در شرایط عمل‌آوری‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون ANOVA یکطرفه و آزمون تعقیبی دانکن برای بتن‌های OPC و O-AAS نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵٪، ضریب انتشار OPC در شرایط

W55A از نظر آماری با W360 تفاوت معناداری ندارد. در مقابل، شرایط W6A، W0A و W27A به ترتیب با افزایش ۴۹٪، ۲۲٪ و ۹٪ نسبت به W360، تفاوت آماری معناداری با آن نشان دادند. برای بتن O-AAS نیز نتایج مشابهی مشاهده شد. ضریب انتشار یون کلرید ۳۶۰ روزه در شرایط W55A از نظر آماری با W360 برابر بود، در حالی که شرایط W6A، W0A و W27A به طور معناداری با W360 تفاوت داشتند. مقادیر متناظر این افزایش به ترتیب ۳.۵۸، ۲.۵۵، ۱.۴۶ و ۱.۰۱ برابر W360 بوده است. مطالعه Hajibabae و همکاران [۳۷] نیز نشان داد که قرارگیری بتن OPC در محیط غیراشباع منجر به افزایش ضریب انتشار یون کلرید می‌شود، و افزایش مدت زمان عمل‌آوری پیش از ورود به چنین شرایطی، موجب کاهش نفوذپذیری کلرید شده است. این یافته‌ها به طور کلی با نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا هستند و نقش کلیدی مدت عمل‌آوری را در کنترل دوام بلندمدت بتن OPC تأیید می‌کنند. نتایج حاصله حاکی از آن است که برخلاف مقاومت فشاری، برای جلوگیری از تأثیر نامطلوب شرایط غیراشباع بر ضریب انتشار یون کلرید ۳۶۰ روزه OPC و O-AAS، عمل‌آوری تا سن ۵۶ روز ضروری است. لازم به ذکر است که عامل اصلی افزایش ضریب انتشار یون کلرید در محیط‌های غیراشباع، توسعه ریزترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خشک‌شدن است [۱۷ و ۹]. افزایش مدت زمان عمل‌آوری پیش از قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰٪، این اثرات منفی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد؛ زیرا با زیاد شدن مقاومت بتن، مقاومت آن در برابر ایجاد ترک افزایش می‌یابد و در نتیجه ریزترک‌های کمتری در مخلوط ایجاد می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تأثیر کاهش مدت زمان عمل‌آوری بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن O-AAS شدیدتر از بتن OPC است. این امر ناشی از جمع‌شدگی بالاتر بتن O-AAS نسبت به OPC است، که منجر به گسترش بیشتر ریزترک‌ها در محیط‌های غیراشباع می‌شود [۱۵ و ۸].

۴.۴ جمع شدگی آزاد

در شکل ۴ نتایج آزمایش جمع شدگی آزاد ناشی از جمع شدگی خشک شدن ارائه شده است. جمع شدگی آزاد O-AAS از OPC به میزان قابل توجهی بیشتر است. در شرایط W55A و W0A، W6A، W27A جمع شدگی در ۳۶۰ روز O-AAS به ترتیب ۲،۵۶، ۲،۳۸، ۲،۲۱ و ۲،۰۱ برابر جمع شدگی OPC است. در مراجع مقدار جمع شدگی آزاد بتن‌های قلیا فعال سرباره ای تک جزئی با ۱ روز عمل‌آوری در محدوده بین ۱۲۰۰ تا ۱۹۰۰ میکرو کرنش در ۹۰ روز گزارش شده است [۳۴]. لازم بذکر است که حداقل ۲ برابر جمع شدگی O-AAS نسبت به OPC گزارش شده است. دلایل مطرح شده برای بیشتر بودن جمع شدگی O-AAS در مقایسه با OPC عبارتند از: انطباق پذیری زیاد ویسکو-الاستیک/ویسکو-پلاستیک^۴ در زل C-A-S-H غنی شده با قلیا، توزیع ریزتر اندازه‌ی منافذ و افزایش کشش سطحی محلول منافذ در اثر افزایش واکنش پذیری سرباره [۳۹].



شکل ۴. جمع شدگی خشک شدن آزاد مخلوط‌ها تا ۳۶۰ روز خشک شدن

⁴ high visco-elastic/visco-plastic compliance

با افزایش مدت زمان عمل‌آوری قبل از قرار گیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد مقدار جمع شدگی OPC و O-AAS کاهش یافته است. جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن ۳۶۰ روزه OPC در شرایط W0A، W6A و W27A نسبت به جمع شدگی شرایط W56A به ترتیب ۵۷، ۳۹ و ۹ درصد بیشتر است. براساس رابطه ACI209 [۴۰] جمع شدگی OPC در شرایط W0A، W6A و W27A نسبت به شرایط W56A به ترتیب حدود ۶۰، ۳۳ و ۱۵٪ بیشتر می باشد. که بصورت کلی تایید کننده نتایج تحقیق حاضر است. اما نتایج تحقیق Bagheri و همکاران [۴۱] نشانگر افزایش ۱۱ درصدی جمع شدگی آزاد OPC با ۷ روز عمل‌آوری ۷ روز نسبت به جمع شدگی با ۱ روز عمل‌آوری است. دلیل این اختلاف می تواند مربوط به تفاوت نسبت آب به سیمان و مشخصات سیمان بکار رفته باشد.

جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن ۳۶۰ روزه O-AAS در شرایط W0A، W6A و W27A نسبت به جمع شدگی شرایط W56A به ترتیب ۹۹، ۶۴ و ۲۰ درصد بیشتر است. نتایج نشان می دهد که افزایش مدت زمان عمل‌آوری اثر قابل توجهی در کاهش جمع شدگی آزاد داشته است. نتایج تحقیق Aiken و همکاران [۴۲] نیز نشانگر آن است که افزایش مدت زمان عمل‌آوری از یک روز به ۲۱ روز در بتن قلیا فعال سرباره ای حاوی خاکستر بادی باعث ۴۸ درصد کاهش جمع شدگی آزاد شده است.

۵.۴. جمع شدگی مقید

در جدول ۵، نتایج آزمایش جمع شدگی مقید طبق استاندارد ASTM C1581 [۲۹] ارائه شده است. با توجه به اینکه حداکثر مدت زمان این آزمایش طبق استاندارد مذکور ۲۸ روز تعیین شده است، تنها مخلوط‌های بتنی در شرایط W0A و W6A برای دو نوع بتن OPC و O-AAS مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل ترک خوردگی در تمامی مخلوط‌ها زیاد است. نتایج نشان می‌دهد که زمان ایجاد ترک در آزمون حلقه جمع‌شدگی برای O-AAS به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر از OPC است. نمونه O-AAS-W0A، ترک خوردگی تنها ۲۰ دقیقه پس از قرارگیری در محیط با رطوبت نسبی ۵۰٪ مشاهده شد. این ترک‌زایی سریع، نتیجه‌ی تجمع تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی خودبخودی و تنش‌های افزوده‌شده‌ی ناشی از خشک‌شدن است.

جدول ۵. نتایج آزمایش حلقه جمع شدگی

کد طرح	مدت زمان عمل‌آوری (روز)	سن ترک خوردگی (روز)	سن خالص ترک خوردگی (روز)	پتانسیل ترک خوردگی	متوسط باز شدگی عرض ترک در ۸۲ روز (mm)
OPC-W0A	۱	۷،۴۸	۶،۴۸	H	۱،۲۳
OPC-W6A	۷	۱۲،۲۶	۵،۲۶	H	۲،۱۵
O-AAS-W0A	۱	۱،۰۱	۰،۰۱	H	۷،۸۶
O-AAS-W6A	۷	۷،۰۶	۰،۰۶	H	۳،۴۶

برخلاف بتن OPC، میزان جمع‌شدگی خودبخودی در بتن‌های AAS به مراتب بیشتر است. نتایج تحقیق Li و همکاران [۴۳]، نشانگر آن است که خمیر قلیا فعال سرباره‌ای تنها در مدت ۱۲.۳ ساعت از زمان ساخت و بدون اعمال شرایط خشک‌شدن و بدون تبادل رطوبتی با محیط، در آزمون حلقه جمع‌شدگی دچار ترک خوردگی شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بتن‌های AAS

به واسطه‌ی جمع‌شدگی خودبخودی زیاد، در همان ساعات اولیه پس از ساخت، دچار تنش‌های داخلی قابل توجهی می‌شوند. در نتیجه، با قرارگیری در محیط غیراشباع (مانند رطوبت نسبی ۵۰٪)، این تنش‌های انباشته‌شده با تنش‌های خشک‌شدگی ترکیب شده و موجب بروز ترک در مدت‌زمان بسیار کوتاه می‌گردند. این مسئله نشان‌دهنده‌ی آسیب‌پذیری ذاتی بتن‌های O-AAS در برابر ترک‌خوردگی زود هنگام در شرایط غیر اشباع است.

متوسط بازشدگی عرض ترک با میانگین‌گیری از ۱۰ نقطه اندازه‌گیری به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که عرض ترک در نمونه‌ی OPC-W6A حدود ۱.۷۵ برابر بیشتر از OPC-W0A بوده است؛ در حالی که این نسبت برای O-AAS-W0A نسبت به O-AAS-W6A حدود ۲.۲۷ برابر بوده است.

در OPC، افزایش مدت عمل‌آوری از یک روز به هفت روز موجب افزایش بازشدگی عرض ترک می‌شود. این پدیده را می‌توان با کاهش قطر منافذ و در نتیجه افزایش فشار مویینگی طی فرآیند خشک‌شدن توضیح داد؛ به‌گونه‌ای که سازوکار تنش‌های مویین نقش پررنگ‌تری در ایجاد جمع‌شدگی خشک‌شدن ایفا می‌کند. از آنجا که بتن‌های OPC دارای خزش اولیه نسبتاً پایین هستند، آزادسازی تنش‌های جمع‌شدگی محدود بوده و بنابراین افزایش بازشدگی ترک در این شرایط قابل انتظار است [۴۱].

در مقابل، در بتن‌های O-AAS، افزایش مدت عمل‌آوری منجر به کاهش بازشدگی عرض ترک می‌گردد. این رفتار ناشی از کاهش تدریجی اثر جمع‌شدگی خودبخودی و نیز توسعه ساختار داخلی خمیر و افزایش مقاومت آن در برابر ایجاد ترک است. همچنین، به دلیل خزش زیاد در بتن‌های O-AAS، بخشی از تنش‌های انباشته‌شده طی دوره عمل‌آوری آزاد و از تمرکز تنش‌ها در زمان خشک‌شدن کاسته می‌شود [۴۲]. در نتیجه، افزایش زمان عمل‌آوری در بتن‌های O-AAS منجر به بهبود عملکرد در برابر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی ترکیبی (خودبخودی و خشک‌شدن) می‌شود.

با افزایش مدت زمان عمل‌آوری از یک روز به هفت روز، زمان ایجاد ترک در آزمون حلقه جمع‌شدگی برای هر دو نوع بتن OPC و O-AAS افزایش یافته است. اما زمان خالص ایجاد ترک در محیط غیراشباع متفاوت بوده است. در بتن O-AAS، افزایش مدت زمان عمل‌آوری موجب افزایش زمان خالص ایجاد ترک گردیده، در حالی که در بتن OPC این زمان کاهش یافته است. نتایج مشابهی در پژوهش Bagheri و همکاران [۴۱] نیز گزارش شده است، به‌گونه‌ای که با افزایش زمان عمل‌آوری، در بتن‌های OPC کاهش در عرض بازشدگی ترک و زمان خالص ایجاد ترک مشاهده شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که شرایط عمل‌آوری W0A و W6A برای بتن O-AAS کافی نیست و نمی‌تواند به‌طور مؤثر از ایجاد ریزترک‌ها جلوگیری کند. در نتیجه، قرارگیری این بتن‌ها در محیط غیراشباع، منجر به کاهش قابل توجه مقاومت و دوام شده و می‌تواند پدیده‌ی پیرشدگی مقاومت فشاری را نیز به‌دنبال داشته باشد.

۶.۴. مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید مغزه‌ها

در جدول ۶، میانگین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید مربوط به شرایط W0A، W7A و W360 در سن ۳۶۰ روز ارائه شده است. مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در نمونه‌های مغزه‌گیری‌شده‌ی مربوط به OPC-W360 و O-AAS-W360 با داده‌های آزمون‌های استاندارد (مطابق با بخش ۳.۴) نشان می‌دهد که این مقادیر با یکدیگر مطابقت مناسبی دارند. همچنین، مقاومت فشاری مغزه‌ها نیز با در نظر گرفتن تأثیر شکل آزمون، مشابه با مقادیر ثبت‌شده در آزمون‌های استاندارد متناظر (مطابق با بخش ۲.۴) بوده است.

نتایج تحلیل آماری آزمون ANOVA یک‌طرفه و آزمون تعقیبی دانکن نشان می‌دهد که در سطح اطمینان ۹۵٪، بین مقاومت

فشاری و ضریب انتشار یون کلرید سن ۳۶۰ روزه بتن‌های OPC در شرایط W0A، W7A و W360 تفاوت معناداری وجود ندارد. این یافته بیانگر آن است که ریزترک‌های ناشی از فرارگیری بتن OPC در محیط غیراشباع، عمدتاً محدود به نواحی سطحی بوده و تأثیری بر مقاومت و دوام نواحی داخلی بتن نداشته‌اند. با این حال، در نظر نگرفتن این موضوع در طراحی سازه‌های در معرض عوامل مهاجم، می‌تواند منجر به برآورد بیش از حد از دوام بتن و در نتیجه کاهش عمر مفید سازه گردد.

جدول ۶. نتایج آزمایش مغزه‌ها

کد طرح	OPC-W360	OPC-W0A	OPC-W6A	O-AAS-W360	O-AAS-W0A	O-AAS-W6A
مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه (مگاپاسکال)	۴۴٫۷	۴۴٫۲	۴۴٫۵	۴۴٫۱	۴۱٫۰	۴۳٫۹
ضریب انتشار یون کلرید ۳۶۰ روزه (۱۰× مترمربع بر ثانیه)	۱۳٫۰۵	۱۳٫۴۷	۱۳٫۲۴	۲٫۶۶	۳٫۴۱	۲٫۶۷

در خصوص O-AAS، نتیجه تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که در سطح اطمینان ۹۵٪، تفاوت معناداری بین شرایط W7A و W360 از نظر مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید وجود ندارد، در حالی که بین شرایط W0A و W360 این تفاوت معنادار است. مقایسه شرایط W0A با W360 بیانگر آن است که عدم تأمین عمل‌آوری اولیه کافی برای AAS منجر به افت حدود ۷۱٪ در مقاومت فشاری و افزایش حدود ۲۸۲٪ در ضریب انتشار یون کلرید در سن ۳۶۰ روز شده است. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که برخلاف بتن OPC، در صورت فقدان عمل‌آوری مناسب، ریزترک‌های ایجادشده در بتن O-AAS می‌تواند تا اعماق بیشتری از مقطع نفوذ کرده و موجب افت دوام و مقاومت داخلی بتن شوند. بنابراین، عدم تأمین شرایط عمل‌آوری مناسب در مراحل اولیه می‌تواند منجر به بروز چالش‌های جدی در هر دو بعد دوامی و مقاومتی گردد و عملکرد بلندمدت سیستم سازه‌ای را به‌ویژه در محیط‌های مهاجم به‌طور چشمگیری کاهش دهد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری، ضریب انتشار یون کلرید، جمع‌شدگی آزاد و مقید، عملکرد مغزه‌های به‌دست‌آمده از ستون‌های بتنی و تحلیل‌های آماری انجام‌شده، جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است:

در محیط غیراشباع بتن OPC در طول زمان، پایداری مناسبی از نظر مقاومت فشاری نشان داده و پیرشدگی مقاومت فشاری مشاهده نشده است. در مقابل، بتن O-AAS در شرایط عمل‌آوری ناکافی (به‌ویژه در نمونه‌های W0A) با افت مقاومت قابل توجهی مواجه شدند که تا ۳۷٪ کاهش مقاومت در سن ۳۶۰ روز ایجاد شد. این افت ناشی از ایجاد ریزترک‌های ناشی از خشک‌شدگی زود هنگام بوده و با تأمین عمل‌آوری مناسب قابل پیشگیری است.

در شرایط اشباع، بتن O-AAS دارای ضریب انتشار یون کلرید کمتر و در نتیجه دوام بیشتری نسبت به OPC بود. اما کاهش مدت زمان عمل‌آوری موجب افزایش شدید ضریب انتشار در بتن O-AAS (تا بیش از ۲۵۸٪) شده است. که نشان‌دهنده حساسیت زیاد این نوع بتن به شرایط عمل‌آوری است.

در همه شرایط مورد بررسی، میزان جمع‌شدگی آزاد در بتن‌های O-AAS به‌طور معناداری بیشتر از OPC بود. آزمایش

جمع‌شدگی مقید نشان داد که نمونه‌های O-AAS در مدت‌زمان بسیار کوتاهی پس از قرارگیری در محیط غیراشباع دچار ترک‌خوردگی شدند و عرض ترک نیز در آن‌ها بیشتر از OPC بود. این رفتار ناشی از ترکیب تنش‌های حاصل از جمع‌شدگی خودبخودی و خشک‌شدن است.

مغزه‌های تهیه‌شده از مرکز ستون‌های بتنی OPC در سن ۳۶۰ روز، تفاوت آماری معناداری در مقاومت و نفوذپذیری در شرایط مختلف عمل‌آوری نشان ندادند. در مقابل، مغزه‌های O-AAS در شرایط WOA کاهش مقاومت حدود ۷.۱٪ و افزایش ضریب انتشار یون کلرید حدود ۲۸.۲٪ را نسبت به W360 نشان دادند که حاکی از نفوذ ریزترک‌ها به نواحی داخلی بتن و کاهش کیفیت ساختاری آن است.

در مجموع، اگرچه بتن‌های O-AAS پتانسیل دستیابی به عملکرد مقاومتی و دوامی برتری نسبت به OPC را دارا هستند، اما این عملکرد به شدت وابسته به شرایط عمل‌آوری اولیه آن‌هاست. عدم تأمین عمل‌آوری مناسب در سنین اولیه می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک، افزایش نفوذپذیری، و کاهش مقاومت در عمق مقطع نیز شود.

لازم بذکر است که استفاده از مواد مکمل سیمانی دیگر به همراه سرباره در بتن‌های قلیا فعال تک جزئی و یا استفاده از دیگر مواد فعال‌کننده قلیایی می‌تواند مدت زمان عمل‌آوری مورد نیاز را تغییر دهد. لذا به منظور تدوین دستورالعمل اجرایی عمل‌آوری بتن‌های قلیا فعال تک جزئی نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

۶. قدردانی

نویسندگان این مقاله از مسئولین آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی جهت مساعدت در مراحل مختلف این پژوهش تشکر می‌نمایند.

مراجع

1. Nasir M, Mahmood AH, Ashraf A, Bahraq AA, (2024). "History, recent progress, and future challenges of alkali-activated binders – An overview", *Constr. Build. Mater.*, 426, 136141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136141>
2. Jiang L, Niu Y, Jin W, Gao H, Chen L, (2022). "Influence of chloride salt type on chloride ion diffusion performance of alkali-activated slag mortar", *Constr. Build. Mater.*, 351, 128930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128930>
3. Duzy P, Choinska M, Hager I, Amiri O, Claverie J, (2022). "Mechanical Strength and Chloride Ions' Penetration of Alkali-Activated Concretes (AAC) with Blended Precursor", *Materials*, 15(13), 4475. <https://doi.org/10.3390/ma15134475>
4. Elzeadani M, Bompa DV, Elghazouli AY, (2022). "One part alkali activated materials: A state-of-the-art review", *J. Build. Eng.*, 57, 104871. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2022.104871>
5. Luukkonen T, (2022). "Alkali-Activated Materials in Environmental Technology Applications", *Woodhead Publ. Ser. Civ. Struct. Eng.*
6. Pacheco-Torgal F, Chindapasirt P, Ozbakkaloglu T (Eds.), (2021). "Handbook of advances in Alkali-activated Concrete", 1st Ed., *Woodhead Publ. Ser. Civ. Struct. Eng.*
7. Fu Q, Bu M, Zhang Zh, Xu W, Yuan Q, Niu D, (2023). "Hydration Characteristics and Microstructure of Alkali-Activated Slag Concrete: A Review", *Engineering*, 20, 162–179. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.100000>

org/10.1016/j.eng.2021.07.026

8. Amran M, Onaizi AM, Makul N, Abdelgader HS, Tang WC, Alsulami BT, Alluqmani AE, Gamil Y, (2023). "Shrinkage mitigation in alkali-activated composites: A comprehensive insight into the potential applications for sustainable construction", *Results Eng.*, 20, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101452>
9. Sanjuán MA, Muñoz-Martialay R, (1995). "Influence of the age on air permeability of concrete", *J. Mater. Sci.*, 30(22), 5657–5662. <https://doi.org/10.1007/BF00356701>
10. Ogawa Y, Suzuki SH, Kawai K, (2024). "Impact of air exposure post-steam curing on the internal curing efficiency of porous ceramic roof-tile waste fine aggregate in steam-cured fly ash concrete", *Mater. Lett.*, 366, 136576. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136576>
11. Xia H, Lv X, Wang H, Song L, Zhang G, Cao D, Chen H, (2024). "Shrinkage, mechanical properties and freeze-thaw resistance of cement mortar containing internal curing materials with different absorption behaviors at low humidity", *Constr. Build. Mater.*, 416, 135182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135182>
12. Arayeshgar M, Madandoust R, Ranjbar MM, (2024). "A comparative study on superabsorbent polymer (SAP) and recycled lightweight aggregate (LWA) as internal curing agents for high-strength concrete (HSC)", *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*
13. Bazant ZP, Raftshol WJ, (1982). "Effect of cracking in drying and shrinkage specimens", *Cem. Concr. Res.*, 12(2), 209–226. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(82)90031-5)
14. Wardhono A, Gunasekara C, Law DW, Setunge S, (2017). "Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes", *Constr. Build. Mater.*, 143, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.153>
15. Collins FG, Sanjayan JG, (2000). "Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete", *Cem. Concr. Compos.*, 23(4–5), 345–352. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00003-8)
16. Alhamoud A, Riahi HT, Ataei A, (2024). "Mechanical properties and stress-strain relationship of slag-based one-part geopolymer concrete: A comparative study", *Results Eng.*, 24, 102952. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102952>
17. Prinsse S, Hordijk DA, Ye G, Legendijk P, Luković M, (2020). "Time-dependent material properties and reinforced beams behavior of two alkali-activated types of concrete", *Struct. Concr.*, 21(2), 642–658. <https://doi.org/10.1002/suco.201900235>
18. El-Hassan H, Shehab E, Al-Sallamin A, (2018). "Influence of Different Curing Regimes on the Performance and Microstructure of Alkali-Activated Slag Concrete", *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(9), 04018230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002436)
19. Lloyd RR, (2009). "Accelerated ageing of geopolymers", In: *Geopolymers Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publ. Ser. Civ. Struct. Eng. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.139>
20. Yang Q, Wu Y, Zhi P, Zhu P, (2024). "Effect of micro-cracks on chloride ion diffusion in concrete based on stochastic aggregate approach", *Buildings*, 14(5), 1353. <https://doi.org/10.3390/buildings14051353>
21. ASTM C150, (2017). "Standard specification for Portland Cement", ASTM Int., Philadelphia, PA.

22. ASTM C989, (2017). "Standard specification for Slag cement for use in concrete and mortars", ASTM Int., Philadelphia, PA.
23. ASTM C33, (2017). "Standard specification for concrete aggregates", ASTM Int., Philadelphia, PA.
24. Marvila M.T., Garcez de Azevedo A.R., Linhares Junior J.A.T., Vieira C.M.F., (2023). "Activated alkali cement based on blast furnace slag: effect of curing type and concentration of Na₂O", *J. Mater. Res. Technol.*, 23, 4551–4565. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.088>
25. ASTM C157, (2017). "Standard test method for length change of hardened cement mortar and concrete", ASTM Int., Philadelphia, PA.
26. BS EN 12390-3, (2009). "Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test Specimens", BSI, London.
27. NT Build 492, (1999). "Chloride migration coefficient from Non-steady state migration experiments", NORDTEST, Finland.
28. ASTM C596, (2021). "Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement", ASTM Int., Philadelphia, PA.
29. ASTM C1581, (2024). "Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage", ASTM Int., Philadelphia, PA.
30. ASTM C42, (2017). "Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete", ASTM Int., Philadelphia, PA.
31. ASTM C143, (2017). "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete", ASTM Int., Philadelphia, PA.
32. Palankar N, Shankar AUR, Mithun BM, (2015). "Air-cured alkali-activated binders for concrete pavements", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8, 289-294. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(4\).289](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(4).289)
33. ASTM C1611, (2021). "Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete", ASTM Int., Philadelphia, PA.
34. Neville AM, (2008). "Concrete technology", Pearson Education India.
35. Bondar D, Ma Q, Soutsos M, Basheer M, Provis JL, Nanukuttan S, (2018). "Alkali activated slag concretes designed for a desired slump, strength and chloride diffusivity", *Constr. Build. Mater.*, 190, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.124>
36. Fan J, Zhu H, Shi J, Li Z, Yang S, (2020). "Influence of slag content on the bond strength, chloride penetration resistance, and interface phase evolution of concrete repaired with alkali activated slag/fly ash", *Constr. Build. Mater.*, 263, 120639. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120639>
37. Hajibabae A, Moradillo MK, Behravan A, Ley MT, (2018). "Quantitative measurements of curing methods for concrete bridge decks", *Constr. Build. Mater.*, 162, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.023>
38. Zhou S, et al., (2020). "A novel non-Portland cementitious material: Mechanical properties, durability and characterization", *Constr. Build. Mater.*, 238, 117671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117671>
39. Coppola L, Coffetti D, Crotti E, Candamano S, Crea F, Gazzaniga G, Pastore T, (2021).

“The combined use of admixtures for shrinkage reduction in one-part alkali activated slag-based mortars and pastes”, *Constr. Build. Mater.*, 248, 118682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118682>

40. ACI 209.2R-08, (2008). “Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete”, ACI, Farmington Hills, MI.

41. Bagheri AR, Jamali A, Pourmir M, Zanganeh H, (2019). “The influence of curing time on restrained shrinkage cracking of concrete with shrinkage reducing admixture”, *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 8(1), 596–610. <https://doi.org/10.1520/ACEM20190100>

42. Aiken TA, Kwasny J, Zhou Z, McPolin D, Sha W, (2023). “Factors affecting the drying shrinkage of alkali-activated slag/fly ash mortars”, *MRS Adv.*, 8, 1266–1272. <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00647-6>

43. Li Z, Wyrzykowski M, Dong H, Granja J, Azenha M, Lura P, Ye G, (2020). “Internal curing by superabsorbent polymers in alkali-activated slag”, *Cem. Concr. Res.*, 135, 106123. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106123>