



Research Article

Multiscale Investigation of the Effects of Alumina Powder on the Wear Resistance, Mechanical Properties, and Freeze–Thaw Durability of Roller-Compacted Pavement Concrete

Yahya kazemi¹, Babak mansoori^{2*}, hadi Fatemi²

1- Department of Civil Engineering, Fir.C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

2*-Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3- Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 16 July 2026; Revised: 17 July 2026; Accepted: 19 August 2026; Published: 20 February 2027

Abstract

Roller-compacted concrete, due to its desirable mechanical strength, suitable compactability, high construction speed, and economic feasibility, is considered a suitable material for pavement construction. However, repeated freeze–thaw cycles can generate internal pressures caused by water freezing, promote microcrack development, and increase porosity, thereby leading to gradual deterioration of mechanical properties and durability. This study investigated the multiscale effect of partially replacing cement with alumina powder (Al_2O_3) on the mechanical behavior, abrasion resistance, and durability of roller-compacted concrete pavement under freeze–thaw cycles. Alumina powder was incorporated at 0, 5, 10, and 15% as a partial cement replacement, and specimens were subjected to 0, 50, 100, and 150 freeze–thaw cycles after 28 days of curing. Compressive strength, flexural strength, abrasion, and water absorption were evaluated at the macroscopic scale, while microstructural characteristics were examined at the microscopic scale. The results indicated that the mixture containing 10% Al_2O_3 exhibited the best overall performance. Compared with the control mixture, its compressive strength increased by 4.09, 9.98, 10.19, and 11.20% after 0, 50, 100, and 150 cycles, respectively. The corresponding increases in flexural strength were 8.13, 13.47, 14.81, and 14.30%. Moreover, abrasion decreased by 13.42, 14.45, 14.42, and 14.58%, while water absorption decreased by 6.32, 7.39, 7.32, and 7.58%, respectively. Microstructural observations revealed a relatively dense and continuous matrix in the 10% Al_2O_3 mixture, with a substantial portion of structural integrity preserved after freeze–thaw cycling. The simultaneous improvement in mechanical properties, abrasion resistance, and water absorption can be attributed to the filler effect of fine Al_2O_3 particles, enhanced matrix densification, reduced water penetration pathways, and limited freeze–thaw damage. Overall, 10% Al_2O_3 replacement was identified as the optimum content within the investigated range and demonstrated considerable potential for improving the performance and durability of roller-compacted concrete pavement under repeated freeze–thaw conditions.

Keywords: Roller-Compacted Concrete (RCC), Alumina Powder (Al_2O_3), Abrasion Percentage, Freeze–Thaw Cycle, Flexural Strength, Compressive Strength, Water Absorption Percentage.

Cite this article as kazemi,Y , Mansoori,B and Fatemi,H . (2027). Multiscale Investigation of the Effects of Alumina Powder on the Wear Resistance, Mechanical Properties, and Freeze–Thaw Durability of Roller-Compacted Pavement Concrete. (e251120). Civil and Project journal, 8(12), e251120 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.597607.1467> ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2027 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: babak.mansoori@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی چندمقیاسی اثر پودر آلومینا بر مقاومت سایشی، خواص مکانیکی و دوام بتن غلطکی روسازی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان

یحیی کاظمی^۱، بابک منصوری^{۲*}، هادی فاطمی^۳

۱- گروه مهندسی عمران، واحد فیروز آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروز آباد، ایران

۲* - استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- کارشناس مسئول آزمایشگاه گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۲۵ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۲۶ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اسفند ۱۴۰۵

چکیده

بتن غلظتی به دلیل مقاومت مکانیکی مطلوب، تراکم‌پذیری مناسب، سرعت اجرای بالا و توجیه اقتصادی، یکی از مصالح مناسب در ساخت روسازی‌هاست؛ با این حال، چرخه‌های متناوب ذوب و یخبندان با ایجاد فشارهای داخلی ناشی از انجماد آب، توسعه ریزترک‌ها و افزایش تخلخل، موجب افت تدریجی خواص مکانیکی و دوام آن می‌شوند. در این پژوهش، اثر چندمقیاسی جایگزینی پودر آلومینا (Al_2O_3) با بخشی از سیمان بر رفتار مکانیکی، مقاومت سایشی و دوام بتن غلظتی روسازی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان بررسی شد. پودر آلومینا در مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سیمان شد و نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان قرار گرفتند. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، سایش و جذب آب در مقیاس کلان و تغییرات ریزساختاری در مقیاس میکروسکوپی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد طرح حاوی ۱۰ درصد Al_2O_3 بهترین عملکرد را ارائه کرد. مقاومت فشاری این طرح نسبت به شاهد در چرخه‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ به ترتیب ۴/۰۹، ۹/۹۸، ۱۰/۱۹ و ۱۱/۲۰ درصد افزایش یافت. افزایش مقاومت خمشی نیز به ترتیب ۸/۱۳، ۱۳/۴۷، ۱۴/۸۱ و ۱۴/۳۰ درصد بود. همچنین، میزان سایش طرح ۱۰ نسبت به شاهد به ترتیب ۱۳/۴۲، ۱۴/۴۵، ۱۴/۴۲ و ۱۴/۵۸ درصد کاهش و جذب آب آن به ترتیب ۶/۳۲، ۷/۳۹، ۷/۳۲ و ۷/۵۸ درصد کاهش نشان داد. بررسی ریزساختاری بیانگر تشکیل ماتریسی نسبتاً متراکم و پیوسته در طرح ۱۰ و حفظ بخش قابل توجهی از انسجام ساختار پس از چرخه‌های ذوب و یخبندان بود. بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی، مقاومت سایشی و جذب آب را می‌توان به اثر پرکنندگی ذرات ریز Al_2O_3 ، افزایش تراکم ماتریس و محدود شدن مسیرهای نفوذ آب و توسعه آسیب‌های یخ‌زدگی نسبت داد. در مجموع، ۱۰ درصد جایگزینی Al_2O_3 مقدار بهینه در محدوده مطالعه بوده و قابلیت ارتقای عملکرد و دوام بتن غلظتی روسازی در شرایط ذوب و یخبندان را دارد.

کلمات کلیدی: بتن غلطکی، پودر آلومینا، درصد سایش، سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، درصد

جذب آب

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: babak.mansoori@iau.ac.ir

۱- مقدمه

بتن غلتکی روسازی (RCCP) به دلیل مصرف نسبتاً کم خمیر سیمان، سرعت اجرای بالا، نیاز محدود به قالب‌بندی و قابلیت دستیابی به مقاومت مکانیکی مناسب، به عنوان یکی از گزینه‌های اقتصادی برای روسازی‌های با ترافیک متوسط و سنگین مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، عملکرد بلندمدت این نوع روسازی به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن قرار دارد. به ویژه، مقاومت سایشی سطح روسازی و پایداری بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان از عوامل تعیین کننده در حفظ عملکرد و افزایش عمر خدمت RCCP در مناطق سردسیر محسوب می‌شوند (Goli, A (2022). با بررسی اثر سرباره فولاد بر مقاومت سایشی بتن غلتکی روسازی نشان دادند که اصلاح ترکیب مصالح می‌تواند به طور قابل توجهی رفتار سایشی RCCP را تغییر دهد و برای ارزیابی این ویژگی، استفاده هم‌زمان از آزمون‌های مختلف سایش ضروری است.

از سوی دیگر، قرارگیری بتن غلتکی در معرض چرخه‌های مکرر یخ‌زدگی و ذوب می‌تواند موجب ایجاد و گسترش ریزترک‌ها، تغییر ساختار منافذ و در نهایت کاهش مقاومت مکانیکی و دوام بتن شود (Du و همکاران (2022) با بررسی فرآیند آسیب بتن غلتکی تحت اثر هم‌زمان چرخه‌های ذوب و یخبندان و بارگذاری سه‌محوره نشان دادند که چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب موجب تشدید آسیب و کاهش عملکرد مکانیکی RCC می‌شوند. همچنین، Sun و همکاران (2024) با بررسی بتن غلتکی دارای آسیب اولیه تحت چرخه‌های ذوب و یخبندان، ارتباط میان تغییرات ساختار منافذ و افت خواص مکانیکی را نشان دادند و بیان کردند که آسیب اولیه ناشی از تراکم نامناسب می‌تواند حساسیت RCC را در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی افزایش دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد و مواد معدنی بسیار ریزدانه برای اصلاح ساختار خمیر سیمان و بهبود خواص بتن مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، آلومینا (Al_2O_3) به دلیل اندازه ذرات ریز، سطح ویژه بالا و قابلیت اثرگذاری بر ساختار خمیر سیمان می‌تواند از طریق پرکنندگی فضاهای خالی و اصلاح ریزساختار، خواص بتن را تحت تأثیر قرار دهد (Sargunan و همکاران (2022) در مطالعه‌ای بر بتن حاوی نانوالومینا و نانوخاک رس گزارش کردند که استفاده از مقدار بهینه نانوالومینا می‌تواند موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن شود و افزایش عملکرد را به اصلاح ساختار داخلی ماتریس نسبت دادند. همچنین، Amaranatha (2022) نشان دادند که افزودن نانوالومینا به بتن می‌تواند مقاومت آن را در برابر حمله سولفاتی افزایش دهد؛ این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت آلومینا برای اصلاح ساختار و ویژگی‌های انتقالی ماتریس سیمانی است.

مطالعات جدیدتر نیز نقش آلومینا را در شرایط محیطی نامطلوب تأیید کرده‌اند (Wang و همکاران (2024) در بررسی اثر نانوالومینا بر بتن در دمای پایین نشان دادند که افزودن نانوالومینا می‌تواند بخشی از افت مقاومت ناشی از عمل‌آوری در دمای پایین را جبران کند و عملکرد بتن را در مقیاس‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی بهبود دهد. همچنین، Trebukhin و همکاران (2024) با بررسی هم‌زمان نانوسیلیکا، نانوتیتانیا و نانوالومینا، ارتباط میان استفاده از نانومواد، خواص مکانیکی و ویژگی‌های دوام بتن را از دیدگاه ریزساختاری مورد مطالعه قرار دادند.

در سال ۲۰۲۵، Zhang و همکاران اثر اصلاح بتن با نانوالومینا، نانوسیلیکا و الیاف پلی‌پروپیلن را بر مقاومت در برابر یخ‌زدگی بررسی کردند. نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوالومینا تحت ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان قرار گرفتند و تغییرات جرم، مدول الاستیسیته دینامیکی و مقاومت فشاری ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانوالومینا در مقایسه با بتن شاهد موجب بهبود مقاومت در برابر یخ‌زدگی می‌شود؛ اگرچه عملکرد آن در این مطالعه از الیاف پلی‌پروپیلن پایین‌تر بود این یافته اهمیت بررسی نقش آلومینا در اصلاح ساختار داخلی بتن و کاهش آسیب ناشی از چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب را نشان می‌دهد.

در زمینه عملکرد سطحی RCCP نیز پژوهش‌های اخیر بر اهمیت مقاومت در برابر سایش تأکید کرده‌اند (Yaseen و همکاران (2025) با بررسی رفتار ضربه‌ای و سایشی بتن غلتکی مسلح‌شده با الیاف مختلف نشان دادند که نوع و مقدار ماده اصلاح‌کننده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت سایشی و مکانیکی RCC داشته باشد؛ به طوری که برخی مقادیر الیاف پلی‌پروپیلن موجب افزایش مقاومت سایشی شدند. همچنین، Singh (2023) نشان دادند که روش تراکم و طراحی مخلوط RCCP بر مجموعه‌ای از ویژگی‌های عملکردی شامل چگالی، مقاومت مکانیکی، جذب آب، تخلخل، سایش و مقاومت لغزشی تأثیرگذار است.

با وجود مطالعات انجام‌شده درباره اثر آلومینا بر خواص مکانیکی و دوام بتن و همچنین پژوهش‌های متعدد درباره سایش و ذوب و یخبندان بتن غلتکی، بررسی هم‌زمان اثر پودر آلومینا بر مقاومت سایشی، خواص مکانیکی و دوام RCCP در برابر چرخه‌های

ذوب‌ویخبندان همچنان محدود است. افزون بر این، در بسیاری از مطالعات، نتایج در مقیاس ماکروسکوپی گزارش شده و ارتباط میان تغییرات ریزساختاری و عملکرد نهایی بتن به صورت جامع تبیین نشده است. از این رو، شکاف پژوهشی اصلی این مطالعه، نبود یک ارزیابی چندمقیاسی از نقش Al_2O_3 در ارتباط دادن تغییرات ریزساختاری با عملکرد مکانیکی، مقاومت سایشی و پایداری بتن غلتکی روسازی در برابر چرخه‌های ذوب‌ویخبندان است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر مقادیر مختلف پودر آلومینا (Al_2O_3) بر مقاومت سایشی، مقاومت فشاری و سایر خواص مکانیکی، جذب آب و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب‌ویخبندان بتن غلتکی روسازی و تبیین سازوکارهای مؤثر بر تغییرات عملکردی آن در مقیاس‌های مختلف است. در این راستا، استفاده از روش‌های ریزساختاری نظیر SEM می‌تواند ارتباط میان اصلاح ساختار منافذ، تراکم ماتریس سیمانی و تغییرات عملکردی بتن را روشن کند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند مبنایی برای تعیین مقدار بهینه آلومینا و توسعه RCCP با مقاومت سایشی و دوام بالاتر در شرایط اقلیمی سرد فراهم آورد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- خصوصیات مصالح

سیمان مصرفی در مخلوط‌های آزمایشی از نوع سیمان پرتلند تیپ II بوده و چگالی این نوع سیمان برابر ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است

پودر آلومینا (Al_2O_3)

پودر آلومینا یا اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) ماده‌ای معدنی و سرامیکی است که معمولاً به شکل پودر سفیدرنگ تولید می‌شود و به دلیل سختی بسیار بالا، مقاومت حرارتی زیاد و پایداری شیمیایی مناسب، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. این ماده از نظر سختی پس از الماس و برخی مواد بسیار سخت، در رده مواد مقاوم قرار می‌گیرد و در برابر سایش و حرارت عملکرد مطلوبی دارد. پودر آلومینا در تولید سرامیک‌های مهندسی، مواد نسوز، ساینده‌ها، پوشش‌های مقاوم به سایش و همچنین برخی مواد سیمانی و بتن‌های ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حوزه بتن، ویژگی‌هایی مانند اندازه ذرات، خلوص و سطح ویژه آلومینا می‌تواند مطابق با شکل ۱ و جدول ۱ و ۲



شکل ۱: پودر آلومینا

جدول ۱: آنالیز مکانیکی پودر آلومینا

عنوان	چگالی	استحام فشاری Mpa	مدول گسیختگی Mpa	سختی ویکرز
میزان	۲/۹۸۵	۲۴۰۰-۲۲۰۰	۴۰۰-۳۲۰	۱۶۵۰-۱۵۰۰

جدول ۲: آنالیز شیمیایی پودر آلومینا

ترکیب شیمیایی	(%) مقدار تقریبی
Al ₂ O ₃	≥ 99
SiO ₂	≤ 0.05
Fe ₂ O ₃	≤ 0.05
Na ₂ O	≤ 0.40
CaO	≤ 0.05
MgO	≤ 0.05
سایر اکسیدها	≤ 0.40

سنگدانه

سنگدانه‌های استفاده شده در این پژوهش شامل ماسه معدنی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر و جذب آب ۲/۰۳ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک ۱۶۴۰ kg/m³، سنگدانه نخودی معدنی با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر و چگالی اشباع با سطح خشک ۱۶۳۰ kg/m³ و سنگدانه بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر درصد و چگالی اشباع با سطح خشک ۱۶۲۰ kg/m³ بوده‌اند. مطابق شکل ۲



شکل ۲: مصالح سنگی شن و ماسه

۲-۲- روش کار

در این پژوهش، به منظور بررسی چندمقیاسی اثر پودر آلومینا بر عملکرد بتن غلتکی روسازی، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح شامل سیمان، سنگدانه‌ها، آب و پودر آلومینا تعیین شد. پودر آلومینا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی در نظر گرفته شد که در آن طرح حاوی صفر درصد به عنوان مخلوط شاهد انتخاب گردید. برای تمامی طرح‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی، دانه‌بندی سنگدانه‌ها و شرایط اختلاط و تراکم ثابت نگه داشته شد تا اثر مستقل مقدار پودر آلومینا بر عملکرد بتن ارزیابی شود. برای ساخت بتن غلتکی، ابتدا سنگدانه‌های، سیمان و پودر آلومینا با یکدیگر به صورت خشک مخلوط شدند تا توزیع یکنواخت مواد حاصل شود. سپس مقدار مشخص آب به تدریج به مخلوط افزوده و اختلاط تا

دستیابی به توزیع یکنواخت رطوبت ادامه یافت. مخلوط حاصل در قالب‌های استاندارد ریخته شده و تحت انرژی تراکم ثابت متراکم گردید. نمونه مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C642 با ASTM C39 استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ و جهت مقاومت خمشی سه نقطه ای مطابق استاندارد ASTM C78 از نمونه مکعبی ابعاد ۱۰×۱۰×۴۰ و جهت آزمایش مقاومت سایشی مطابق استاندارد ASTM C944 مکعبی ابعاد ۱۰×۵×۴ سانتیمتر است. جهت ساخت از میکسر با حجم ۳۰ لیتر استفاده گردید که در هر بیج تعداد ۱۵ عدد نمونه ساخته شد تعداد کل نمونه‌های ساخته شده ۱۹۵ عدد می باشد از هر نمونه سه عدد نمونه تهیه گردید و سپس میانگین گیری شد. پس از قالب‌برداری، نمونه‌ها در شرایط استاندارد و به مدت ۲۸ روز در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در مخزن آب عمل‌آوری شدند. پس از پایان دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمون‌های مکانیکی و دوام قرار گرفتند. مقاومت فشاری و مقاومت خمشی همچنین مقاومت سایشی و درصد جذب آب نمونه‌ها پیش از اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان آن‌ها ثبت گردید. عملکرد آن‌ها پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت آزمایش ذوب و یخبندان از استاندارد ASTM C666 استفاده گردیده است. نمونه‌های ساخته شده جهت این آزمایش قالب مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر می باشد. سیکل ذوب یخبندان در محدوده ۱۸- درجه سانتیگراد تا ۴ درجه سانتیگراد تنظیم گردیده است. سپس ابعاد و وزن نمونه‌های مکعبی مشخص گردیده و در مخزن دستگاه قرار گرفته سپس دستگاه روشن می گردد هر سیکل دستگاه در محدوده دمای مورد نظر تنظیم می گردد. که معمولاً هر سیکل ۵ ساعت زمان دارد که بین دو دما ابتدا افزایش یابد و سپس تقلیل یابد. آزمایش روی نمونه‌ها تا ۳۰۰ سیکل تنظیم گردید. سپس پس از پایان سیکل نمونه‌ها وزن می گردد و سپس ابعاد آن اندازه گیری گردیده و سپس مقاومت فشاری آن اندازه گیری گردید. بر اساس استاندارد ASTM C944 برای سایش بتن یا ملات (روش سمباده چرخان) جهت ارزیابی مقاومت سایشی بتن از دستگاه با یک استوانه دوار استفاده شد. ابعاد نمونه مورد استفاده طول ۱۵ سانتیمتر و عرض ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع آن ۶ سانتیمتر می باشد. نمونه داخل دستگاه قرار می گیرد استوانه دوار به قطر ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۷ سانتیمتر بر روی سطح نمونه قرار می گیرد. سپس مخزن مواد ساینده بر روی نمونه قرار می گیرد. درون مخزن مواد ساینده از جنس الومینا به قطر ۸۰ میکرون ریخته شد. سپس دستگاه با سرعت ۷۵ درو در دقیقه تنظیم و روشن گردید. سپس پس از اتمام کار وزن نمونه با ترازو وزن گردید و میزان سایش اندازه گیری گردید. درصد افت مقاومت فشاری و خمشی برای تعیین شدت آسیب ناشی از چرخه‌های ذوب و یخبندان محاسبه گردید. بررسی جذب آب جهت دوام بررسی گردید. و تصاویر SEM نیز برای تبیین تغییرات ریزساختاری و ارتباط آن‌ها با عملکرد مکانیکی و دوام انجام می‌شود. در نهایت، نتایج طرح‌های مختلف از نظر تغییرات مقاومت مکانیکی، مقاومت سایشی و میزان آسیب ناشی از چرخه‌های ذوب و یخبندان مقایسه شده و با تحلیل هم‌زمان مقیاس مصالح، ریزساختار و عملکرد مهندسی، سازوکار اثر پودر آلومینا بر عملکرد چندمقیاسی بتن غلتکی روسازی تعیین می‌شود. بر اساس این نتایج، درصد جایگزینی بهینه آلومینا با توجه به مجموع عملکرد مکانیکی، مقاومت سایشی و دوام تعیین خواهد شد



شکل ۳: دستگاه تست ذوب و یخبندان

طرح اختلاط بتن غلطکی

طرح اختلاط بتن غلتکی با افزودن پودر آلومینا جایگزین سیمان مطابق جدول ۳

جدول ۳: طرح اختلاط بتن غلتکی

شماره نمونه	W/C	درصد پودر الومینا	میزان پودر آلومینا kg/m^3	ماسه Kg/m^3	سنگدانه Kg/m^3	سیمان Kg/m^3	آب Kg/m^3
۰	۰/۴	۰	۰	۷۵۰	۱۲۵۰	۳۵۰	۱۴۰
A5		۵	۱۷/۵	۷۵۰	۱۲۵۰	۳۳۲/۵	۱۳۳
A10		۱۰	۳۵	۷۵۰	۱۲۵۰	۳۱۵	۱۲۶
A15		۱۵	۵۲/۵	۷۵۰	۱۲۵۰	۲۹۷/۵	۱۱۹

جدول معرفی نمونه ها

نمونه های ساخته شده با افزودن پودر الومینا مطابق جدول ۴ است

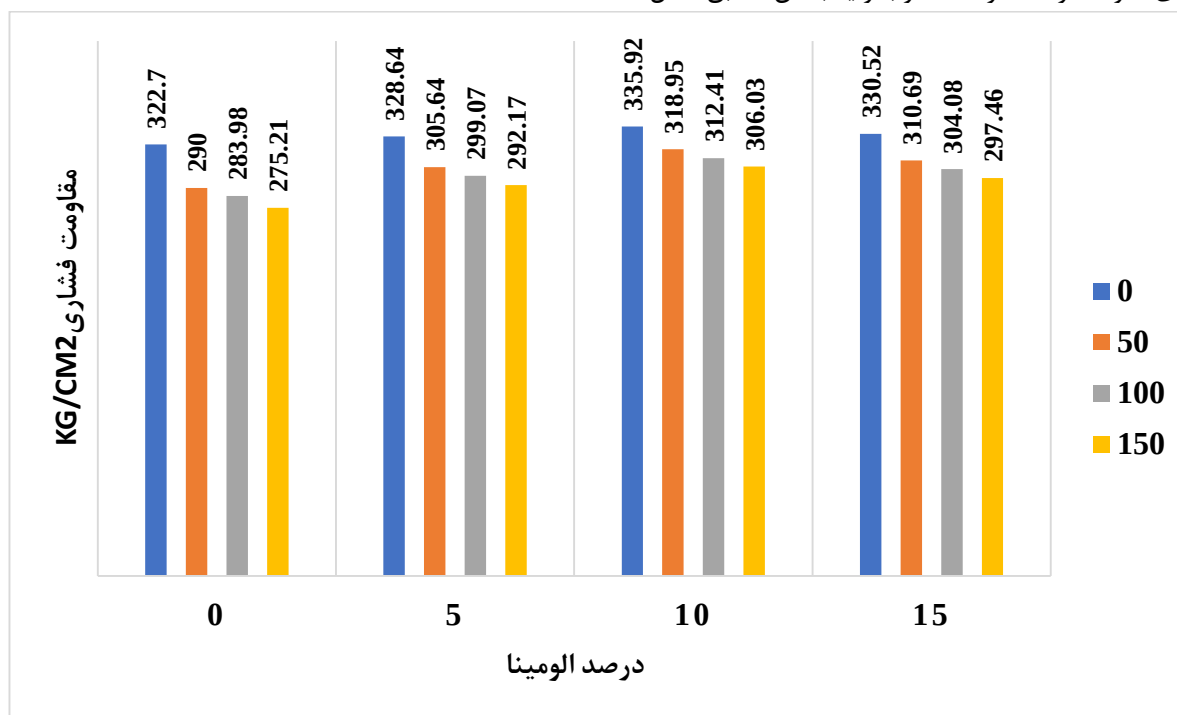
جدول ۴: معرفی نمونه ها

طرح اختلاط	جایگزینی
شاهد	۰
A5	درصد الومینا جایگزین سیمان ۵
A10	درصد الومینا جایگزین سیمان ۱۰
A15	درصد الومینا جایگزین سیمان ۱۰

۳- نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بتن غلطکی در بازه عمل آوری ۲۸ روزه با ۰ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر آلومینا جایگزین سیمان در سیکل های ۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ ذوب و یخبندان مطابق شکل ۴

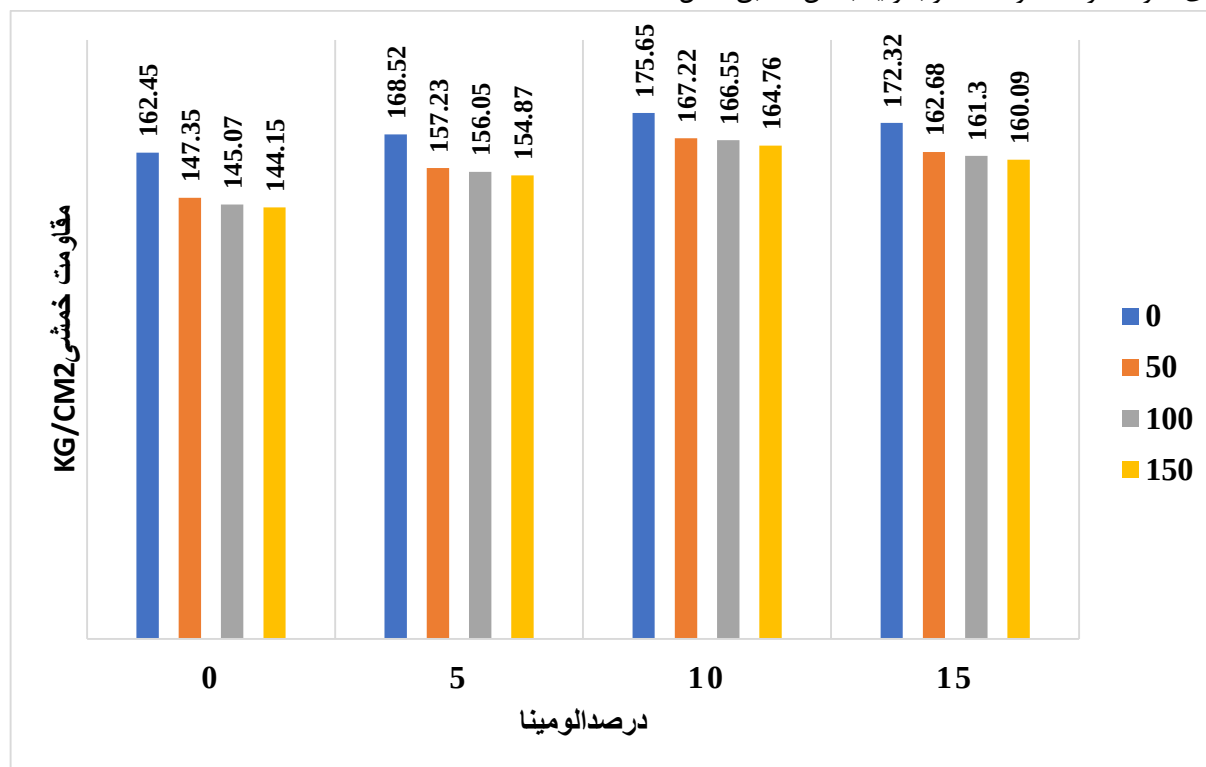


شکل ۴: نمودار مقاومت فشاری با افزودن پودر آلومینا در سیکل های ذوب و یخبندان متفاوت

نتایج مقاومت فشاری بتن غلتکی در سن ۲۸ روز نشان داد که اعمال چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان موجب کاهش مقاومت فشاری در تمامی طرح‌های اختلاط شده است؛ با این حال، شدت کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی پودر آلومینا به‌طور محسوسی کمتر از نمونه شاهد بود. در نمونه شاهد، مقاومت فشاری از $322/7 \text{ kg/cm}^2$ در شرایط اولیه به $283/98$ و $275/21$ kg/cm^2 پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه کاهش یافت که نشان‌دهنده افت نهایی $14/72$ درصدی نسبت به مقاومت اولیه است. این کاهش مقاومت را می‌توان به انجماد آب موجود در منافذ، ایجاد فشارهای داخلی، گسترش ریزترک‌ها و تضعیف ناحیه انتقالی خمیر سیمان - سنگدانه نسبت داد. تکرار این فرایند در چرخه‌های متوالی موجب افزایش آسیب ریزساختاری و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری بتن می‌شود. در طرح A5 با ۵ درصد جایگزینی پودر Al_2O_3 ، مقاومت فشاری اولیه $328/64 \text{ kg/cm}^2$ بود که نسبت به نمونه شاهد $1/84$ درصد افزایش نشان داد. پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه، مقاومت این نمونه به ترتیب به $305/64$ ، $299/07$ و $292/17 \text{ kg/cm}^2$ رسید. بنابراین، افت مقاومت A5 پس از ۱۵۰ چرخه برابر $11/10$ درصد بود که در مقایسه با افت $14/72$ درصدی نمونه شاهد، حدود $24/6$ درصد کاهش در شدت افت مقاومت را نشان می‌دهد. این رفتار بیانگر آن است که حضور ۵ درصد آلومینا توانسته است تا حدودی مقاومت بتن را در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی بهبود دهد. نمونه A10 با ۱۰ درصد جایگزینی آلومینا بهترین عملکرد را در میان طرح‌های مورد مطالعه نشان داد. مقاومت اولیه این نمونه $335/92 \text{ kg/cm}^2$ بود که نسبت به شاهد $4/09$ درصد بیشتر است. پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه، مقاومت فشاری آن به ترتیب $318/95$ ، $312/41$ و $306/03 \text{ kg/cm}^2$ رسید. در نتیجه، افت مقاومت این نمونه پس از ۱۵۰ چرخه تنها $8/90$ درصد بود. بنابراین، در مقایسه با نمونه شاهد، شدت افت مقاومت در A10 حدود $29/5$ درصد کمتر بوده است. همچنین، اختلاف مقاومت A10 با شاهد از $4/09$ درصد در شرایط اولیه به $11/20$ درصد پس از ۱۵۰ چرخه افزایش یافته است. این افزایش اختلاف نشان می‌دهد که اثر حفاظتی آلومینا در برابر تخریب ناشی از ذوب و یخبندان با افزایش تعداد چرخه‌ها آشکارتر شده است. در نمونه A15 با ۱۵ درصد جایگزینی آلومینا، مقاومت اولیه $330/52 \text{ kg/cm}^2$ بود که $2/42$ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. مقاومت این نمونه پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه به ترتیب به $310/69$ ، $304/08$ و $297/46 \text{ kg/cm}^2$ کاهش یافت. افت نهایی مقاومت A15 برابر $9/99$ درصد محاسبه شد که نسبت به نمونه شاهد عملکرد مطلوب‌تری دارد. همچنین مقاومت A15 پس از ۱۵۰ چرخه حدود $8/09$ درصد بیشتر از نمونه شاهد باقی مانده است. با وجود این، عملکرد A15 از A10 ضعیف‌تر بوده و این مسئله نشان می‌دهد که افزایش مقدار آلومینا از ۱۰ به ۱۵ درصد الزاماً موجب افزایش بیشتر مقاومت و دوام نمی‌شود. مقایسه درصد افت مقاومت نشان می‌دهد که نمونه شاهد با $14/72$ درصد بیشترین افت و نمونه A10 با $8/90$ درصد کمترین افت مقاومت فشاری را داشته است. به عبارت دیگر، جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد آلومینا به ترتیب موجب کاهش شدت افت مقاومت نسبت به شاهد به میزان تقریبی $24/6$ ، $39/5$ و $32/1$ درصد شده است. عملکرد مطلوب A10 را می‌توان به بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل مؤثر ماتریس سیمانی در اثر حضور مقدار مناسب پودر آلومینا نسبت داد. ذرات ریز Al_2O_3 می‌توانند با پر کردن بخشی از فضاهای خالی و افزایش تراکم ماتریس، مسیرهای نفوذ آب را محدود کنند. کاهش آب ورودی به منافذ، احتمال ایجاد فشارهای داخلی در هنگام یخ‌زدگی را کاهش داده و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کند. این موضوع با نتایج جذب آب نیز سازگار است؛ به‌طوری‌که A10 کمترین جذب آب را در تمام مراحل آزمایش نشان داد. کاهش آسیب ریزساختاری در نهایت باعث حفظ بیشتر ظرفیت باربری و کاهش افت مقاومت فشاری می‌شود. از سوی دیگر، کاهش عملکرد A15 نسبت به A10 می‌تواند بیانگر وجود مقدار بهینه جایگزینی آلومینا باشد. افزایش بیش از حد مواد بسیار ریز ممکن است موجب افزایش سطح ویژه ذرات، تغییر نیاز آبی، کاهش کارایی مخلوط یا تجمع ذرات و در نتیجه کاهش یکنواختی و تراکم واقعی ماتریس شود. بنابراین، افزایش مقدار آلومینا از ۱۰ به ۱۵ درصد، برخلاف انتظار، بهبود بیشتری در مقاومت فشاری ایجاد نکرده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۰ درصد پودر Al_2O_3 با سیمان، در محدوده مورد مطالعه، مناسب‌ترین عملکرد را داشته است؛ زیرا مقاومت فشاری اولیه را حدود $4/09$ درصد افزایش داده، افت مقاومت پس از ۱۵۰ چرخه را به $8/90$ درصد محدود کرده و موجب شده است مقاومت فشاری نمونه پس از ۱۵۰ چرخه همچنان حدود $11/20$ درصد بیشتر از نمونه شاهد باشد. بنابراین، می‌توان ۱۰ درصد جایگزینی آلومینا را به‌عنوان مقدار بهینه از نظر مقاومت فشاری و دوام بتن غلتکی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان معرفی کرد.

۳-۲- مقاومت خمشی

نتایج مقاومت خمشی بتن غلطکی در بازه عمل آوری ۲۸ روزه با ۰ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر آلومینا جایگزین سیمان در سیکل های ۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ ذوب و یخبندان مطابق شکل ۵



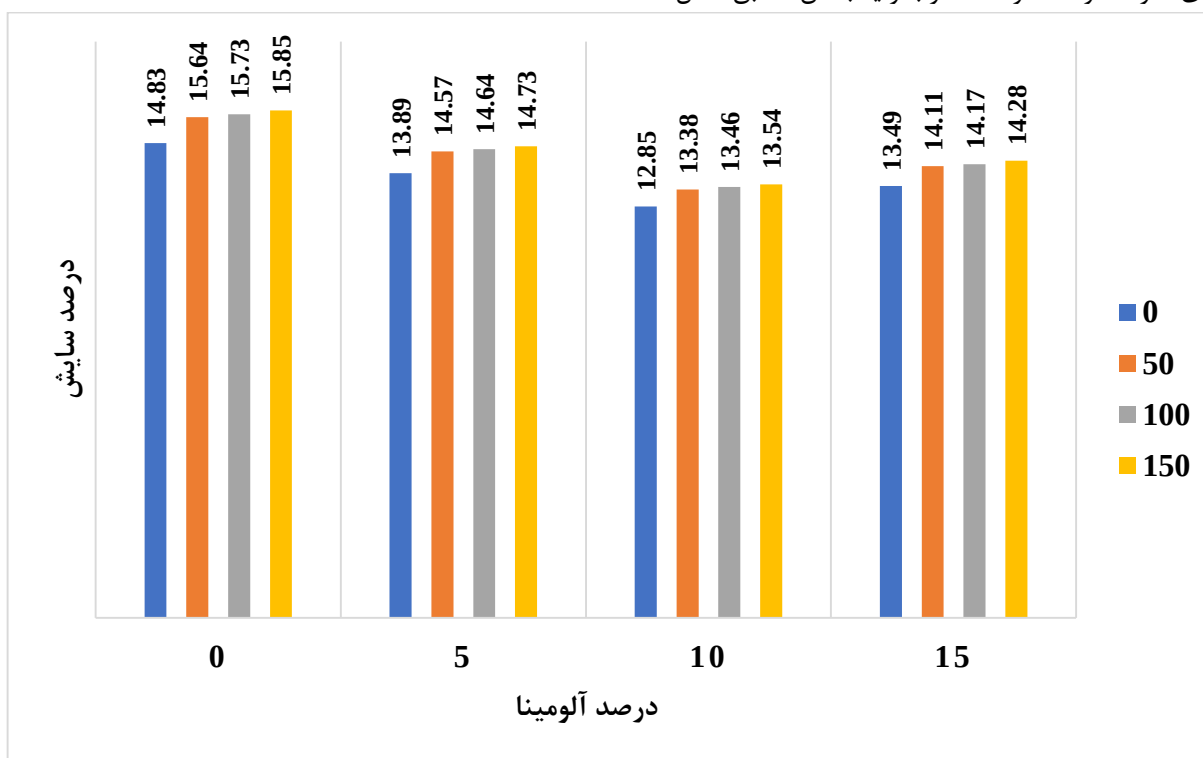
شکل ۵: نمودار مقاومت خمشی با افزودن پودر آلومینا در سیکل های ذوب و یخبندان متفاوت

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بتن غلتکی در سن ۲۸ روز نشان می دهد که جایگزینی بخشی از سیمان با پودر آلومینا، تأثیر محسوسی بر مقاومت خمشی اولیه و همچنین عملکرد بتن در برابر چرخه های متوالی ذوب و یخبندان دارد. در تمامی طرح های اختلاط، با افزایش تعداد چرخه های ذوب و یخبندان از صفر به ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه، مقاومت خمشی کاهش یافته است. این کاهش را می توان به ماهیت مخرب چرخه های یخ زدگی و ذوب آب موجود در شبکه منافذ بتن نسبت داد. نفوذ آب به منافذ و ناپیوستگی های داخلی، به دنبال یخ زدگی و افزایش حجم آب، موجب ایجاد فشار هیدرولیکی و تنش های داخلی شده و تکرار این فرایند سبب رشد ریز ترک ها، اتصال ترک ها و کاهش پیوستگی خمیر سیمان و سنگدانه ها می شود. از آنجا که مقاومت خمشی بتن به شدت تحت تأثیر وجود و رشد ترک ها قرار دارد، افزایش آسیب داخلی در اثر چرخه های ذوب و یخبندان به افت مقاومت خمشی منجر می شود. در نمونه شاهد، مقاومت خمشی از $162/45 \text{ kg/cm}^2$ در شرایط اولیه به $144/15$ و $145/07$ و $147/35$ و $162/45$ به ترتیب پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه کاهش یافته است. نکته قابل توجه آن است که بخش عمده افت مقاومت در ۵۰ چرخه نخست اتفاق افتاده و پس از آن، نرخ کاهش مقاومت کمتر شده است. این رفتار می تواند بیانگر آن باشد که بخش قابل توجهی از آسیب های اولیه ناشی از یخ زدگی در مراحل ابتدایی چرخه ها ایجاد شده و پس از ایجاد و تثبیت بخشی از ریز ترک ها، سرعت کاهش مقاومت نسبت به مرحله اولیه کمتر شده است. در مقابل، استفاده از پودر آلومینا موجب افزایش مقاومت خمشی اولیه شده است. مقاومت نمونه های A5، A10 و A15 در حالت بدون چرخه به ترتیب $168/52$ ، $175/65$ و $172/32 \text{ kg/cm}^2$ بوده است. بنابراین، افزایش مقاومت تا سطح ۱۰ درصد جایگزینی نشان می دهد که حضور مقدار مناسب پودر آلومینا احتمالاً با اثر پرکنندگی، اصلاح ساختار منافذ و افزایش تراکم ریزساختار همراه بوده است. ذرات ریز آلومینا می توانند بخشی از فضاهای خالی موجود در ساختار خمیر سیمان را پر کرده و پیوستگی و انسجام ناحیه خمیر را افزایش دهند. در نتیجه، مسیرهای نفوذ آب کاهش یافته و مقاومت بتن در برابر ایجاد و توسعه ترک های ناشی از یخ زدگی افزایش می یابد. عملکرد نمونه A10 از نظر مقاومت خمشی و دوام در برابر ذوب و یخبندان، در میان طرح های مورد بررسی مطلوب تر است. مقاومت خمشی

این نمونه از $175/65 \text{ kg/cm}^2$ در شرایط اولیه به $167/22$ ، $166/55$ و $164/76 \text{ kg/cm}^2$ پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه رسیده است. بنابراین، حتی پس از ۱۵۰ چرخه، مقاومت خمشی A10 همچنان حدود $20/61 \text{ kg/cm}^2$ بیشتر از نمونه شاهد است. از نظر افت نسبی نیز، کاهش مقاومت A10 حدود ۶/۲ درصد بوده، در حالی که افت نمونه شاهد حدود ۱۱/۳ درصد است. این اختلاف نشان می‌دهد که آلومینا نه تنها مقاومت اولیه را افزایش داده، بلکه توانسته است حساسیت بتن به تخریب ناشی از چرخه‌های ذوب و یخبندان را نیز کاهش دهد. با این حال، افزایش مقدار آلومینا از ۱۰ به ۱۵ درصد باعث افزایش بیشتر مقاومت نشده است. مقاومت اولیه A15 برابر $172/32 \text{ kg/cm}^2$ و پس از ۱۵۰ چرخه برابر $160/09 \text{ kg/cm}^2$ است که در هر دو حالت کمتر از A10 است. این رفتار نشان می‌دهد که اثر آلومینا احتمالاً دارای یک مقدار بهینه است و افزایش بیش از حد آن لزوماً به بهبود خواص مکانیکی و دوام منجر نمی‌شود. در مقادیر بالاتر، افزایش سطح ویژه ذرات و نیاز به آب یا خمیر بیشتر، احتمال تجمع ذرات و تغییر در ساختار خمیر سیمان می‌تواند باعث کاهش بخشی از اثر مطلوب آلومینا شود. از سوی دیگر، مقایسه A5 و A15 نیز نشان می‌دهد که مقدار ۱۵ درصد آلومینا اگرچه عملکرد بهتری نسبت به ۵ درصد در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دارد، اما به سطح عملکرد A10 نمی‌رسد. بنابراین، بر اساس مجموعه داده‌های حاضر، می‌توان ۱۰ درصد جایگزینی پودر آلومینا را به عنوان مقدار بهینه در محدوده مورد مطالعه معرفی کرد.

۳-۳- درصد سایش

نتایج درصد سایش بتن غلطکی در بازه عمل آوری ۲۸ روزه با ۰ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر آلومینا جایگزین سیمان در سیکل های ۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ ذوب و یخبندان مطابق شکل ۵



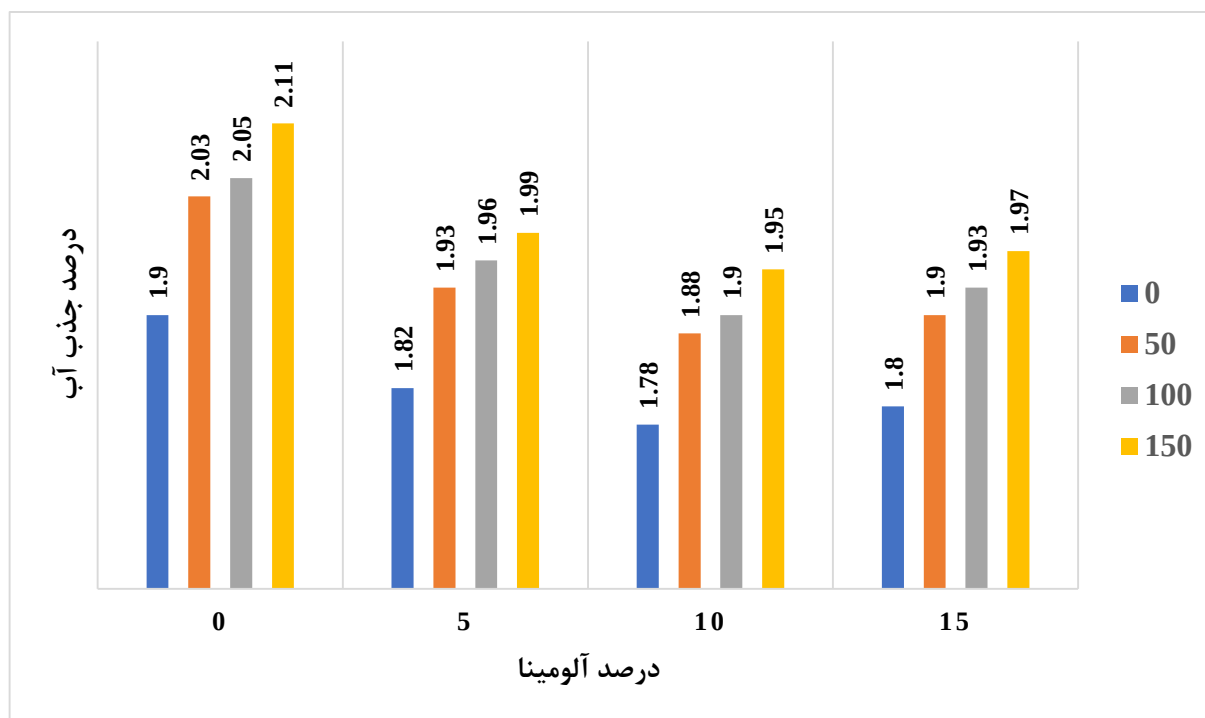
شکل ۶: نمودار مقاومت سایشی با افزودن پودر آلومینا در سیکل های ذوب و یخبندان متفاوت

نتایج حاصل از آزمایش درصد سایش بتن غلتکی در سن ۲۸ روز نشان داد که اعمال چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان موجب افزایش تدریجی میزان سایش در تمامی طرح‌های اختلاط شده است؛ با این حال، شدت این افزایش در نمونه‌های حاوی پودر آلومینا کمتر از نمونه شاهد بوده است. در نمونه شاهد، درصد سایش از $14/83$ درصد در شرایط اولیه به $15/64$ ، $15/73$ و $15/85$ درصد پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه افزایش یافت. این روند را می‌توان ناشی از تخریب تدریجی ریزساختار بتن در اثر تغییرات مکرر حالت آب موجود در شبکه منافذ دانست. در فرایند یخ‌زدگی، افزایش حجم آب و ایجاد فشار هیدرولیکی و فشار انبساطی

در منافذ، موجب ایجاد و گسترش ریزترک‌ها در خمیر سیمان و ناحیه انتقالی خمیر - سنگدانه می‌شود. تداوم این فرایند در چرخه‌های متوالی، پیوستگی و انسجام لایه سطحی بتن را کاهش داده و در نتیجه، ذرات سطحی با سهولت بیشتری در معرض جداسازی و سایش قرار می‌گیرند. در نمونه حاوی ۵ درصد پودر آلومینا (A5)، مقدار سایش اولیه ۱۳/۸۹ درصد بود که پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب به ۱۴/۵۷، ۱۴/۶۴ و ۱۴/۷۳ درصد افزایش یافت. کاهش میزان سایش A5 نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد که حضور مقدار محدودی از Al_2O_3 توانسته است تا حدی ساختار ماتریس سیمانی را اصلاح کند. ذرات ریز آلومینا، به دلیل سطح ویژه بالا، می‌توانند با پر کردن بخشی از فضاهای خالی بین ذرات سیمان و محصولات هیدراتاسیون، موجب کاهش تخلخل مؤثر و افزایش تراکم خمیر سیمان شوند. در نتیجه، پیوستگی ریزساختار افزایش یافته و حساسیت سطح بتن به تخریب ناشی از یخ‌زدگی و سایش کاهش می‌یابد. مؤثرترین عملکرد مربوط به طرح A10 با ۱۰ درصد جایگزینی آلومینا بود. در این طرح، درصد سایش از ۱۲/۸۵ درصد در شرایط اولیه به ترتیب به ۱۳/۳۸، ۱۳/۴۶ و ۱۳/۵۴ درصد پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه افزایش یافت. پایین بودن مقدار سایش A10 در تمام مراحل نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این طرح در برابر تخریب مکانیکی و یخبندان است. همچنین، افزایش سایش این نمونه از حالت اولیه تا ۱۵۰ چرخه تنها ۰/۶۹ واحد درصد بوده است، در حالی که این افزایش برای نمونه شاهد ۱/۰۲ واحد درصد است. این اختلاف می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که مقدار ۱۰ درصد آلومینا قادر بوده است با ایجاد یک ماتریس متراکم‌تر و کاهش پیوستگی مسیرهای موئینه، میزان ورود و تجمع آب در ساختار بتن را محدود کند. در نتیجه، شدت فشارهای داخلی ناشی از یخ‌زدگی و توسعه ریزترک‌ها کاهش یافته و پایداری سطح بتن در برابر سایش حفظ شده است. در نمونه A15 با ۱۵ درصد جایگزینی آلومینا، درصد سایش اولیه برابر ۱۳/۴۹ درصد بوده و پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه به ترتیب به ۱۴/۱۱، ۱۴/۱۷ و ۱۴/۲۸ درصد افزایش یافته است. اگرچه این مقادیر همچنان پایین‌تر از نمونه شاهد هستند، اما در تمام مراحل بیشتر از A10 مشاهده می‌شوند. این رفتار حاکی از آن است که افزایش مقدار Al_2O_3 فراتر از مقدار بهینه، الزاماً موجب بهبود بیشتر مقاومت سایشی نمی‌شود. در مقادیر بالاتر جایگزینی، افزایش سطح ویژه ذرات و تغییر نیاز آبی مخلوط می‌تواند بر تراکم واقعی، کارایی و یکنواختی ماتریس اثر گذاشته و بخشی از مزیت ناشی از اثر پرکنندگی آلومینا را خنثی کند. بنابراین، رابطه بین مقدار آلومینا و مقاومت سایشی را نمی‌توان کاملاً خطی در نظر گرفت و به نظر می‌رسد در محدوده مورد بررسی، مقدار بهینه جایگزینی در حدود ۱۰ درصد قرار دارد. از دیدگاه دوام، مقایسه روند تغییرات نشان می‌دهد که نمونه شاهد با افزایش چرخه‌های ذوب و یخبندان بیشترین حساسیت به افزایش سایش را داشته است، در حالی که نمونه A10 کمترین تغییر را نشان داده است. درصد افزایش سایش نسبت به مقدار اولیه پس از ۱۵۰ چرخه برای نمونه شاهد حدود ۶/۸۸ درصد، برای A5 حدود ۶/۰۵ درصد، برای A10 حدود ۵/۳۷ درصد و برای A15 حدود ۵/۸۶ درصد محاسبه می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که افزودن Al_2O_3 ، به‌ویژه در مقدار ۱۰ درصد، نه تنها موجب کاهش سایش اولیه شده، بلکه پایداری بتن غلتکی در برابر تخریب ناشی از چرخه‌های ذوب و یخبندان را نیز بهبود بخشیده است. در مجموع، می‌توان بیان کرد که کاهش درصد سایش در بتن‌های حاوی آلومینا ناشی از بهبود احتمالی تراکم و انسجام ماتریس سیمانی و محدود شدن توسعه آسیب‌های ریزساختاری است. عملکرد مطلوب A10 در مقایسه با A5 و A15 نشان می‌دهد که ۱۰ درصد جایگزینی، در محدوده مورد مطالعه، تعادل مناسبی میان اثر پرکنندگی ذرات آلومینا، تراکم ریزساختار و ویژگی‌های ماتریس سیمانی ایجاد کرده است. بنابراین، بر اساس نتایج آزمایش حاضر، جایگزینی ۱۰ درصد پودر Al_2O_3 را می‌توان به‌عنوان درصد بهینه از نظر کاهش سایش و افزایش مقاومت بتن غلتکی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان پیشنهاد کرد؛ هرچند تأیید سازوکارهای مطرح‌شده نیازمند بررسی‌های ریزساختاری مانند تخلخل، جذب آب، SEM و توزیع اندازه منافذ است.

۳-۴- درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب بتن غلتکی در بازه عمل آوری ۲۸ روزه با ۰ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر آلومینا جایگزین سیمان در سیکل های ۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ ذوب و یخبندان مطابق شکل ۷



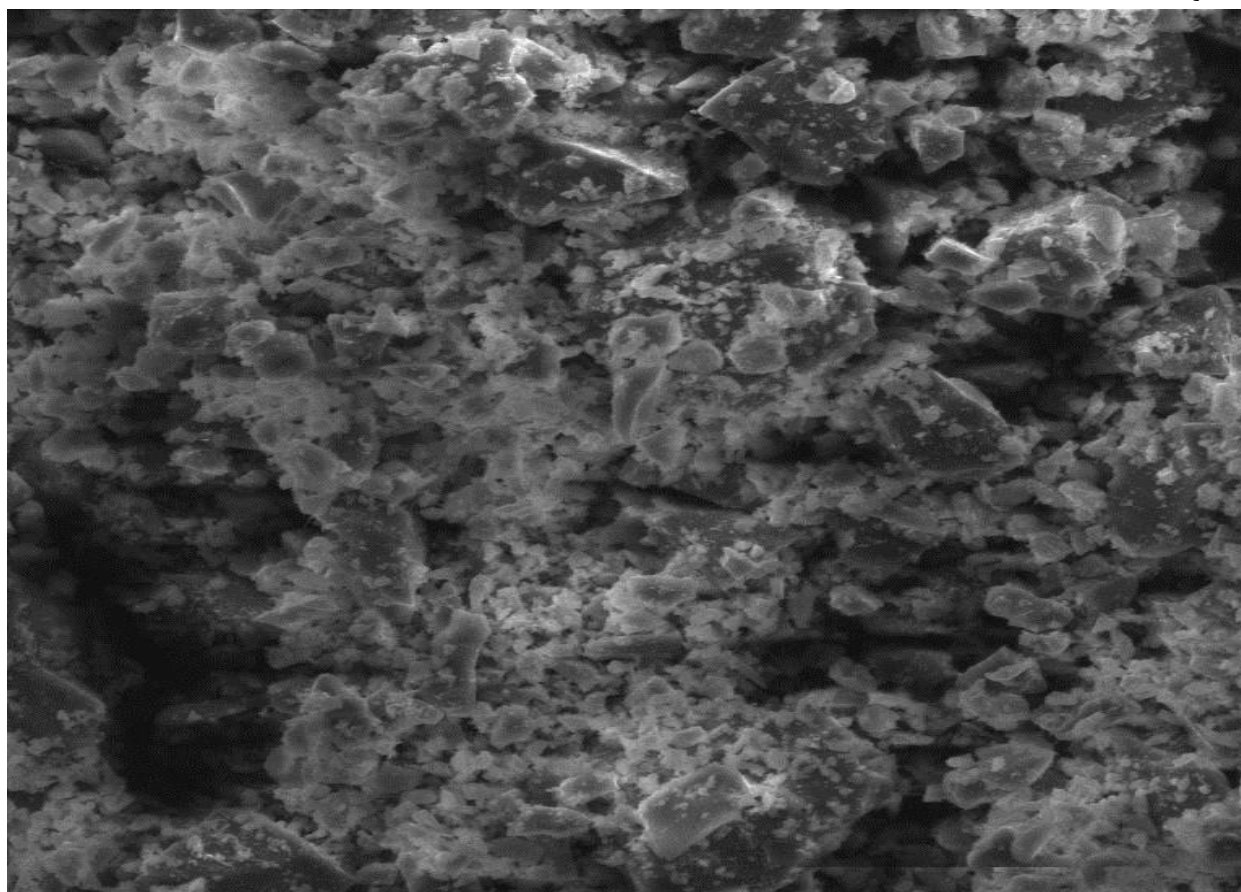
شکل ۷: نمودار درصد جذب آب با افزودن پودر آلومینا در سیکل های ذوب و یخبندان متفاوت

نتایج آزمایش درصد جذب آب بتن غلتکی در سن ۲۸ روز نشان می دهد که جایگزینی بخشی از سیمان با پودر آلومینا موجب کاهش جذب آب بتن در شرایط اولیه شده و همچنین باعث شده است افزایش جذب آب در اثر چرخه های متوالی ذوب و یخبندان با شدت کمتری رخ دهد. در نمونه شاهد، میزان جذب آب از ۱/۹۰ درصد قبل از چرخه های ذوب و یخبندان به ۲/۰۳، ۲/۰۵ و ۲/۱۱ درصد به ترتیب پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه افزایش یافته است. این افزایش بیانگر ایجاد یا گسترش مسیرهای نفوذپذیر در ساختار بتن در اثر آسیب های ناشی از یخ زدگی است. در واقع، تکرار فرایند انجماد و ذوب آب موجود در منافذ موجب ایجاد فشار داخلی، توسعه ریزترک ها و افزایش ارتباط بین منافذ شده و در نتیجه ظرفیت بتن برای جذب و نگهداری آب افزایش می یابد. در طرح A5 با ۵ درصد جایگزینی Al_2O_3 ، جذب آب اولیه برابر ۱/۸۲ درصد بوده که پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه به ترتیب به ۱/۹۳، ۱/۹۶ و ۱/۹۹ درصد افزایش یافته است. اگرچه افزایش جذب آب در این نمونه نیز مشاهده می شود، مقادیر آن در تمامی مراحل کمتر از نمونه شاهد است. این رفتار نشان می دهد که حضور پودر آلومینا احتمالاً با اصلاح ساختار منافذ و افزایش تراکم ماتریس سیمانی، میزان فضای خالی و مسیرهای پیوسته برای انتقال آب را کاهش داده است. بنابراین، آسیب ناشی از چرخه های ذوب و یخبندان در مقایسه با نمونه شاهد با شدت کمتری در ساختار A5 توسعه یافته است. نمونه A10 با ۱۰ درصد جایگزینی آلومینا کمترین میزان جذب آب را در تمام مراحل آزمایش نشان داده است. مقدار جذب آب این نمونه از ۱/۷۸ درصد در شرایط اولیه به ۱/۸۸ درصد پس از ۵۰ چرخه، ۱/۹۰ درصد پس از ۱۰۰ چرخه و ۱/۹۵ درصد پس از ۱۵۰ چرخه افزایش یافته است. بنابراین، حتی پس از ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان، جذب آب این نمونه همچنان پایین تر از سایر طرح ها باقی مانده است. این نتیجه از نظر دوام اهمیت ویژه ای دارد، زیرا کاهش جذب آب بیانگر کاهش حجم یا پیوستگی منافذ قابل نفوذ و در نتیجه کاهش میزان آب قابل ورود به ساختار بتن است. از آنجا که آب یکی از عوامل اصلی ایجاد آسیب ناشی از یخ زدگی محسوب می شود، محدود شدن ورود آب می تواند موجب کاهش فشارهای داخلی ناشی از انجماد و محدود شدن رشد ریزترک ها

شود. در نمونه A15 با ۱۵ درصد جایگزینی آلومینا، جذب آب اولیه ۱/۸۰ درصد بوده و پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه به ترتیب به ۱/۹۰، ۱/۹۳ و ۱/۹۷ درصد افزایش یافته است. این مقادیر نیز نسبت به نمونه شاهد پایین تر هستند، اما در تمامی مراحل اندکی بیشتر از A10 مشاهده می شوند. بنابراین، افزایش مقدار آلومینا از ۱۰ به ۱۵ درصد موجب کاهش بیشتر جذب آب نشده است. این موضوع می تواند نشان دهنده وجود مقدار بهینه جایگزینی آلومینا باشد؛ به گونه ای که در مقادیر بالاتر از مقدار بهینه، افزایش سطح ویژه ذرات و نیاز آبی مخلوط، احتمال تجمع ذرات یا تغییر در توزیع منافذ می تواند مانع از ادامه روند بهبود شود. از نظر تغییرات ناشی از چرخه های ذوب و یخبندان، نمونه شاهد بیشترین افزایش جذب آب را نشان داده است؛ به طوری که از ۱/۹۰ به ۲/۱۱ درصد رسیده و افزایش آن حدود ۰/۲۱ واحد درصد است. در مقابل، افزایش جذب آب در A5 برابر ۰/۱۷ واحد درصد، در A10 برابر ۰/۱۷ واحد درصد و در A15 برابر ۰/۱۷ واحد درصد بوده است. بنابراین، اگرچه تمامی نمونه ها در اثر چرخه های ذوب و یخبندان جذب آب داشته اند، نمونه های حاوی آلومینا تغییرات محدودتری نسبت به شاهد نشان داده اند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که جایگزینی پودر Al_2O_3 با بخشی از سیمان، به ویژه در مقدار ۱۰ درصد، موجب کاهش جذب آب و افزایش پایداری ساختار بتن غلتکی در برابر چرخه های ذوب و یخبندان شده است. عملکرد بهتر A10 را می توان به ایجاد ساختار متراکم تر، کاهش منافذ موئینه و محدود شدن ارتباط بین منافذ نسبت داد. کاهش جذب آب در این نمونه با نتایج سایش نیز هم راستا است؛ زیرا کاهش نفوذ آب و آسیب داخلی ناشی از یخ زدگی می تواند از تخریب و جداسازی ذرات سطحی جلوگیری کند. بنابراین، با توجه به داده های حاضر، ۱۰ درصد جایگزینی Al_2O_3 مناسب ترین مقدار در محدوده مورد بررسی از نظر کنترل جذب آب و بهبود دوام بتن غلتکی در برابر ذوب و یخبندان است

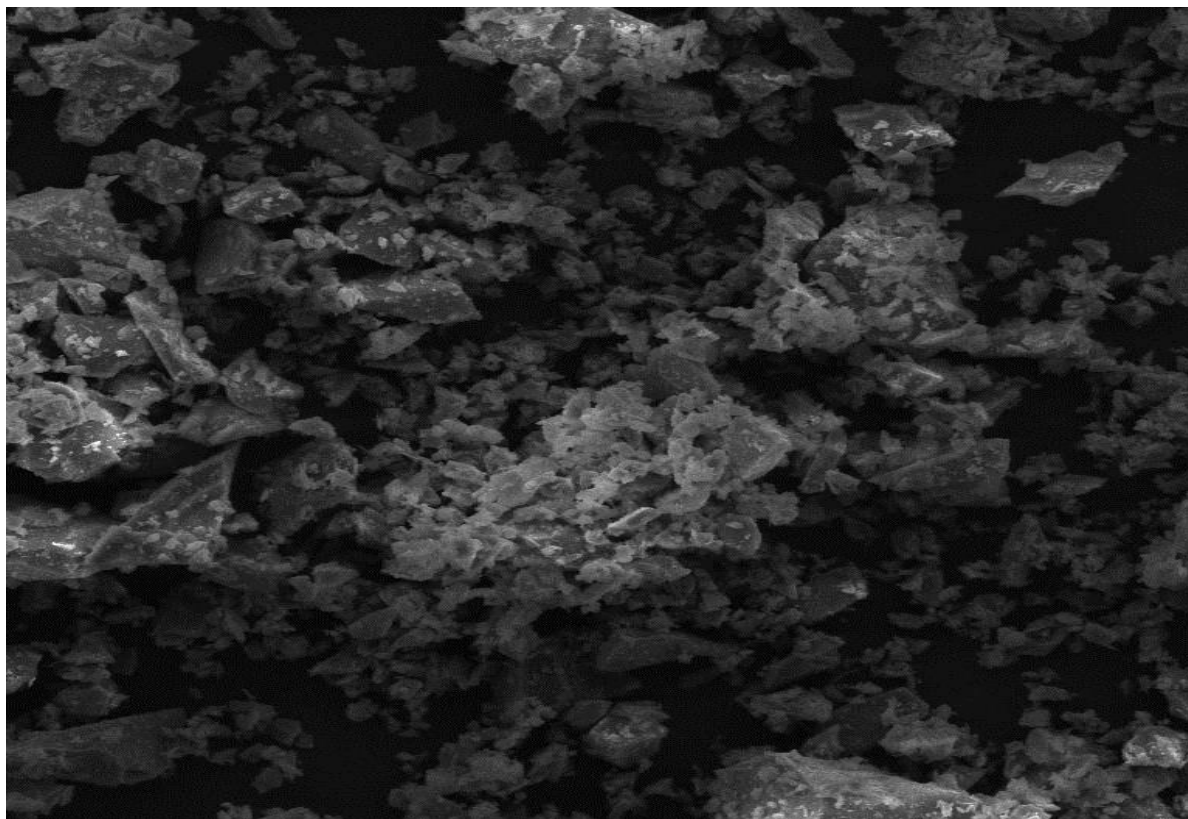
۳-۵- بررسی ریز ساختار SEM

ریز ساختار بتن غلطکی با افزودن ۱۰ درصد پودر آلومینا جایگزین سیمان قبل و بعد از سیکل ذوب و یخبندان مطابق شکل ۸ و ۹



شکل ۸: عکس ریز ساختار بتن غلطکی با افزودن ۱۰ درصد پودر آلومینا قبل از سیکل ذوب و یخبندان

تصویر ۷ ریزساختاری نمونه A10 نشان‌دهنده تشکیل یک ماتریس سیمانی نسبتاً متراکم و پیوسته است که در آن ذرات زاویه‌دار و نامنظم در زمینه خمیر سیمانی پراکنده شده‌اند. حضور ذرات ریزدانه و نسبتاً متراکم در سراسر تصویر، بیانگر آن است که پودر آلومینا توانسته است بخشی از فضاهای خالی موجود بین ذرات سیمان و محصولات هیدراتاسیون را پر کرده و موجب اثر پرکنندگی در ساختار خمیر سیمان شود. این پدیده می‌تواند به کاهش فضاهای خالی بزرگ و افزایش تراکم موضعی ماتریس منجر شود. در بخش‌های مختلف تصویر، ذرات با شکل‌های زاویه‌دار، ورقه‌ای و نامنظم مشاهده می‌شوند که در میان یک زمینه ریزدانه سیمانی قرار گرفته‌اند. اطراف برخی از این ذرات، محصولات ریزدانه هیدراتاسیون به صورت توده‌ای و متراکم مشاهده می‌شود. این وضعیت می‌تواند نشان‌دهنده پیوستگی مناسب بین ذرات و خمیر سیمانی باشد. همچنین، در بسیاری از نواحی، مرز مشخص و گسترده‌ای میان ذرات و زمینه مشاهده نمی‌شود که می‌تواند بیانگر شکل‌گیری یک ناحیه انتقالی نسبتاً متراکم باشد؛ البته برای تأیید این موضوع به تصاویر با بزرگنمایی‌های بالاتر نیاز است. از نکات قابل توجه در تصویر، وجود حفرات و فضاهای تیره‌رنگ موضعی در میان ماتریس است. این نواحی می‌توانند مربوط به منافذ، حفرات ناشی از آماده‌سازی نمونه یا فضاهای خالی موجود در ساختار باشند. با این حال، توزیع آن‌ها به نظر کاملاً گسترده و پیوسته نیست و بخش قابل توجهی از زمینه با مواد ریزدانه و محصولات سیمانی پر شده است. بنابراین، می‌توان گفت که ساختار نمونه A10 قبل از چرخه‌های ذوب و یخبندان، از نظر ظاهری دارای ماتریس نسبتاً متراکم با منافذ موضعی و محدود است. وجود ذرات بسیار ریز در اطراف ذرات بزرگ‌تر نیز می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد. پودر Al_2O_3 به دلیل ریزدانه‌گی و سطح ویژه بالا می‌تواند با قرارگیری در فضاهای بین ذرات سیمان و سنگدانه‌های ریز، بسته‌بندی ذرات را بهبود دهد. در نتیجه، مسیرهای موئینه و ارتباط بین منافذ می‌تواند کاهش یابد. چنین ساختاری با نتایج آزمایش جذب آب شما نیز سازگاری دارد؛



شکل ۹: عکس ریز ساختار بتن غلطکی با افزودن ۱۰ درصد پودر آلومینا بعد از سیکل ذوب و یخبندان

در تصویر ۸ پس از چرخه‌های ذوب و یخبندان، ساختار نمونه همچنان شامل ذرات ریز و درشت با شکل‌های نامنظم است، اما در مقایسه با تصویر قبل از چرخه‌ها، افزایش نواحی تیره و فضاهای خالی و کاهش پیوستگی ظاهری ماتریس سیمانی قابل مشاهده است. این نواحی تیره می‌توانند بیانگر منافذ، فضاهای خالی یا نواحی جداشدگی باشند. بنابراین، می‌توان استنباط کرد که

چرخه‌های ذوب و یخبندان موجب ایجاد یا گسترش بخشی از منافذ و ناپیوستگی‌های موجود در ریزساختار شده‌اند. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های قابل توجه در تصویر، افزایش فاصله بین برخی ذرات و کاهش میزان دربرگیری آن‌ها توسط زمینه سیمانی است. در برخی نواحی، ذرات نسبتاً بزرگ‌تر در زمینه‌ای از مواد ریزدانه قرار گرفته‌اند، اما اتصال بین ذرات در مقایسه با نمونه قبل از چرخه، یکنواخت و متراکم به نظر نمی‌رسد. این وضعیت می‌تواند ناشی از توسعه ریزترک‌ها و تضعیف پیوند میان محصولات هیدراتاسیون، ذرات سیمانی و سنگدانه‌ها در اثر تکرار انجماد و ذوب باشد. مکانیزم اصلی این تخریب را می‌توان به یخ‌زدگی آب موجود در منافذ نسبت داد. با کاهش دما، آب موجود در منافذ منجمد شده و افزایش حجم آن موجب ایجاد فشار درون منافذ می‌شود. در صورت تجاوز فشار داخلی از ظرفیت تحمل موضعی ماتریس، ریزترک‌هایی ایجاد یا ترک‌های موجود گسترده‌تر می‌شوند. با افزایش دما و ذوب یخ، آب مجدداً در منافذ حرکت کرده و در چرخه بعدی، فرایند تخریب تکرار می‌شود. در نتیجه، پس از تعداد زیادی چرخه، بخشی از منافذ به یکدیگر متصل شده و ساختار داخلی بتن نسبت به حالت اولیه بازتر و ناپیوسته‌تر می‌شود. با وجود این آسیب‌ها، تصویر نشان می‌دهد که ماتریس نمونه A10 کاملاً تخریب نشده و هنوز بخش قابل توجهی از ساختار سیمانی نسبتاً متراکم باقی مانده است. این موضوع از نظر عملکرد دوام اهمیت دارد؛ زیرا نشان می‌دهد استفاده از ۱۰ درصد Al_2O_3 احتمالاً توانسته است تا حدی ساختار متراکم اولیه را حفظ کند و از گسترش شدید آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی جلوگیری نماید پس از اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان‌دهنده ایجاد تغییرات قابل توجه در مورفولوژی و پیوستگی ریزساختار نسبت به حالت اولیه است. افزایش نواحی تیره و فضاهای خالی در برخی قسمت‌های تصویر و کاهش پیوستگی ظاهری ماتریس سیمانی را می‌توان به توسعه منافذ و ناپیوستگی‌های ناشی از چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب نسبت داد. در طی فرایند یخ‌زدگی، انجماد آب موجود در منافذ موجب ایجاد فشار داخلی شده و تکرار این فرایند باعث رشد ریزترک‌ها، افزایش ناپیوستگی‌های داخلی و تضعیف موضعی پیوند بین محصولات هیدراتاسیون و ذرات جامد می‌شود. با این حال، باقی ماندن بخش قابل توجهی از ماتریس سیمانی نسبتاً متراکم در تصویر نشان می‌دهد که ساختار نمونه A10 علی‌رغم قرارگیری در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان، دچار تخریب گسترده نشده است.

۴- نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج حاصل از بررسی چندمقیاسی اثر پودر آلومینا (Al_2O_3) بر مقاومت سایشی، خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی روسازی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی بخشی از سیمان با پودر آلومینا تأثیر محسوسی بر بهبود عملکرد بتن غلتکی دارد. اگرچه افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و یخبندان در تمامی طرح‌ها موجب کاهش مقاومت فشاری و خمشی و افزایش میزان سایش و جذب آب شد، شدت این تغییرات در نمونه‌های حاوی Al_2O_3 به‌طور محسوسی کمتر از نمونه شاهد بود. این رفتار بیانگر نقش مؤثر آلومینا در افزایش پایداری بتن در برابر آسیب‌های ناشی از چرخه‌های متناوب انجماد و ذوب است.

از نظر مقاومت فشاری، تمامی طرح‌های حاوی آلومینا عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. در حالت اولیه، مقاومت فشاری A5، A10 و A15 به ترتیب ۱/۸۴، ۴/۰۹ و ۲/۴۲ درصد بیشتر از شاهد بود. این برتری با افزایش تعداد چرخه‌ها نیز حفظ شد و پس از ۱۵۰ چرخه، افزایش مقاومت نسبت به شاهد برای A5، A10 و A15 به ترتیب ۶/۱۶، ۱۱/۲۰ و ۸/۰۹ درصد رسید. همچنین، افت مقاومت فشاری نمونه A10 پس از ۱۵۰ چرخه تنها ۸/۹۰ درصد بود، درحالی‌که این مقدار برای نمونه شاهد ۱۴/۷۲ درصد به دست آمد. بنابراین، استفاده از ۱۰ درصد آلومینا توانست شدت افت مقاومت ناشی از ذوب و یخبندان را حدود ۳۹/۵۴ درصد نسبت به شاهد کاهش دهد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این طرح در حفظ ظرفیت باربری بتن است.

نتایج مقاومت خمشی نیز روند مشابهی را نشان داد. مقاومت خمشی اولیه A10 برابر $175/65 \text{ kg/cm}^2$ بود که نسبت به شاهد ۸/۱۳ درصد افزایش داشت. پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه، این برتری به ترتیب به ۱۳/۴۷، ۱۴/۸۱ و ۱۴/۳۰ درصد رسید. همچنین افت مقاومت خمشی A10 پس از ۱۵۰ چرخه تنها ۶/۲۰ درصد بود، درحالی‌که نمونه شاهد افتی معادل ۱۱/۲۷ درصد داشت؛ بنابراین شدت افت مقاومت خمشی در A10 حدود ۴۴/۹۸ درصد کمتر از شاهد بود. این نتایج نشان می‌دهد که حضور

آلومینا، علاوه بر افزایش مقاومت اولیه، موجب حفظ بهتر یکپارچگی ساختار و ظرفیت انتقال تنش در بتن تحت شرایط چرخه‌ای شده است.

در زمینه مقاومت سایشی، نمونه A10 در تمامی مراحل کمترین میزان سایش را نشان داد. مقدار سایش این نمونه از ۱۲/۸۵ درصد در حالت اولیه به ۱۳/۵۴ درصد پس از ۱۵۰ چرخه افزایش یافت، درحالی که مقدار سایش نمونه شاهد از ۱۴/۸۳ به ۱۵،۸۵ درصد رسید. بنابراین، میزان سایش A10 در حالت اولیه ۱۳/۴۲ درصد و پس از ۱۵۰ چرخه ۱۴/۵۸ درصد کمتر از شاهد بود. همچنین افزایش سایش A10 پس از ۱۵۰ چرخه تنها ۵/۳۷ درصد بود، درحالی که این افزایش برای نمونه شاهد ۶/۸۸ درصد محاسبه شد. این رفتار را می‌توان نشان‌دهنده انسجام بیشتر ماتریس سیمانی و مقاومت بهتر سطح بتن در برابر جدایش، فرسایش و تخریب ناشی از چرخه‌های محیطی دانست.

از نظر جذب آب نیز تمامی نمونه‌های حاوی آلومینا عملکرد بهتری نسبت به شاهد داشتند. نمونه A10 در حالت اولیه دارای جذب آب ۱/۷۸ درصد بود که نسبت به شاهد ۶/۳۲ درصد کمتر است. پس از ۱۵۰ چرخه، جذب آب این نمونه به ۱/۹۵ درصد رسید که همچنان ۷/۵۸ درصد کمتر از شاهد بود. افزایش جذب آب A10 نسبت به مقدار اولیه ۹/۵۵ درصد محاسبه شد، درحالی که این مقدار برای شاهد ۱۱/۰۵ درصد بود. این یافته نشان می‌دهد که حضور پودر آلومینا می‌تواند با کاهش مسیرهای نفوذ آب و محدود کردن پیوستگی منافذ، حساسیت ساختار بتن به نفوذ آب و آسیب ناشی از یخ‌زدگی را کاهش دهد. در یک رویکرد چندمقیاسی، ارتباط میان عملکرد ماکروسکوپی و تغییرات ریزساختاری بتن کاملاً قابل توجه است. ذرات ریز Al_2O_3 با ایفای نقش پرکنندگی، می‌توانند فضاهای خالی بین ذرات سیمان را پر کرده و موجب افزایش تراکم و پیوستگی ماتریس سیمانی شوند. کاهش تخلخل مؤثر و محدود شدن مسیرهای پیوسته نفوذ آب، احتمال ورود و تجمع آب در ساختار را کاهش می‌دهد. در نتیجه، در هنگام انجماد، مقدار آب قابل تبدیل به یخ و فشار داخلی ایجادشده در منافذ کاهش یافته و احتمال توسعه ریزترک‌ها و ناپیوستگی‌های داخلی محدود می‌شود. این سازوکار می‌تواند به حفظ بهتر مقاومت فشاری و خمشی، کاهش سایش و کنترل افزایش جذب آب منجر شود.

بررسی ریزساختاری نمونه A10 نیز شواهد مناسبی در تأیید این رفتار ارائه کرد. پیش از اعمال چرخه‌های ذوب‌ویخبندان، ریزساختار نمونه حاوی ۱۰ درصد Al_2O_3 دارای ماتریسی نسبتاً متراکم و پیوسته بود و ذرات ریز و درشت در زمینه سیمانی نسبتاً منسجمی قرار داشتند. وجود ذرات ریز آلومینا در فضاهای بین ذرات سیمانی می‌تواند به بهبود بسته‌بندی ذرات و کاهش فضاهای خالی کمک کرده باشد. این ویژگی با جذب آب کمتر و مقاومت‌های فشاری و خمشی بالاتر نمونه A10 در حالت اولیه سازگاری دارد.

پس از اعمال چرخه‌های ذوب‌ویخبندان، تغییرات مورفولوژیکی و کاهش نسبی پیوستگی ماتریس مشاهده شد. افزایش نواحی تیره، فضاهای خالی و برخی ناپیوستگی‌ها در ریزساختار را می‌توان به توسعه موضعی منافذ و آسیب‌های ناشی از چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب نسبت داد. همچنین، در برخی نواحی افزایش فاصله میان ذرات و کاهش میزان دربرگیری آن‌ها توسط زمینه سیمانی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از توسعه ریزترک‌ها و تضعیف موضعی پیوند میان محصولات هیدراتاسیون و ذرات جامد باشد.

از دیدگاه مکانیزم تخریب، انجماد آب موجود در منافذ و افزایش حجم آن موجب ایجاد فشار داخلی در ساختار بتن می‌شود. تکرار این فرایند در چرخه‌های متوالی می‌تواند موجب رشد ریزترک‌های موجود، ایجاد ناپیوستگی‌های جدید و افزایش ارتباط میان منافذ شود. با ادامه چرخه‌ها، ساختار داخلی بتن به تدریج بازتر شده و امکان نفوذ بیشتر آب فراهم می‌شود؛ بنابراین، یک چرخه تخریب متقابل میان افزایش نفوذپذیری و آسیب ناشی از یخ‌زدگی شکل می‌گیرد. افزایش جذب آب و کاهش مقاومت‌های مکانیکی مشاهده‌شده پس از ۱۵۰ چرخه را می‌توان در چارچوب همین سازوکار تفسیر کرد.

با وجود این آسیب‌ها، ریزساختار A10 پس از چرخه‌های ذوب‌ویخبندان دچار تخریب گسترده نشده و بخش قابل توجهی از ماتریس نسبتاً متراکم و پیوسته باقی مانده است. این یافته با نتایج ماکروسکوپی نیز مطابقت دارد؛ به‌طوری که A10 پس از ۱۵۰ چرخه کمترین افت مقاومت فشاری و خمشی، کمترین میزان سایش و کمترین جذب آب را در میان طرح‌های مورد بررسی نشان داد. بنابراین، حفظ نسبی یکپارچگی ماتریس می‌تواند یکی از عوامل اصلی عملکرد مطلوب این طرح در شرایط ذوب‌ویخبندان باشد.

در نهایت، مقایسه سه سطح جایگزینی نشان داد که افزایش درصد آلومینا لزوماً به بهبود مستمر خواص منجر نمی‌شود. اگرچه A5 و A15 نیز نسبت به نمونه شاهد عملکرد بهتری داشتند، اما طرح A10 در مجموع بهترین توازن را میان مقاومت مکانیکی، مقاومت سایشی، جذب آب و دوام در برابر چرخه‌های ذوب‌و‌یخبندان ایجاد کرد. بنابراین، جایگزینی ۱۰ درصد پودر Al_2O_3 به‌عنوان مقدار بهینه در محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. بر مبنای نتایج چندمقیاسی، می‌توان بیان کرد که بهبود عملکرد A10 حاصل برهم‌کنش میان اثر پرکنندگی ذرات آلومینا، افزایش تراکم و پیوستگی ماتریس، کاهش مسیرهای نفوذ آب و محدود شدن توسعه آسیب‌های ریزساختاری است. در مجموع، استفاده از ۱۰ درصد پودر آلومینا به‌جای بخشی از سیمان می‌تواند راهکاری مؤثر برای ارتقای هم‌زمان مقاومت مکانیکی، مقاومت سایشی و دوام بتن غلتکی روسازی در محیط‌های مستعد چرخه‌های مکرر ذوب‌و‌یخبندان باشد.

۴-۱- محدودیت پژوهش

با وجود نتایج مطلوب حاصل از این پژوهش، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی همراه بوده است. نخست، بررسی اثر پودر Al_2O_3 به درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد محدود شد و بنابراین رفتار بتن در درصدهای میانی یا بالاتر از این مقادیر مورد ارزیابی قرار نگرفت. همچنین، تمامی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند و تأثیر افزایش سن عمل‌آوری بر توسعه مقاومت و دوام بتن حاوی آلومینا بررسی نشد. از سوی دیگر، ارزیابی دوام در برابر ذوب‌و‌یخبندان به ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ چرخه محدود بود و امکان بررسی رفتار بتن در تعداد بسیار بالاتر چرخه‌ها و شرایط بهره‌برداری طولانی‌مدت فراهم نشد. علاوه بر این، شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی نمی‌تواند به‌طور کامل پیچیدگی‌های محیط واقعی روسازی، از جمله تغییرات هم‌زمان دما و رطوبت، بارگذاری ترافیکی، حضور نمک‌های یخ‌زدا و شرایط زهکشی را شبیه‌سازی کند. در بخش ریزساختاری نیز ارزیابی عمده‌تاً بر بررسی مورفولوژی و تغییرات ظاهری تصاویر میکروسکوپی متمرکز بود؛ بنابراین، برای شناسایی دقیق‌تر سازوکارهای هیدراتاسیون، ترکیب فازی و تغییرات کمی ساختار منافذ، استفاده از روش‌هایی نظیر XRD، EDS و MIP می‌تواند اطلاعات جامع‌تری ارائه دهد. همچنین، برهم‌کنش مستقیم پودر Al_2O_3 با محصولات هیدراتاسیون و نقش دقیق آن در اصلاح ساختار منافذ به‌صورت کمی بررسی نشد. از این‌رو، تعمیم نتایج این پژوهش به سایر مصالح، طرح‌های اختلاط، شرایط اقلیمی و دوره‌های بهره‌برداری باید با احتیاط انجام شود. در نهایت، اگرچه مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و جذب آب به‌عنوان شاخص‌های اصلی عملکرد و دوام بررسی شدند، سایر عوامل مؤثر بر دوام بلندمدت، از جمله نفوذ یون کلر، کربناتی‌شدن، جمع‌شدگی، نفوذپذیری و اثر هم‌زمان بارگذاری ترافیکی و چرخه‌های ذوب‌و‌یخبندان، نیازمند مطالعات تکمیلی هستند.

۴-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، درصدهای مختلف جایگزینی پودر Al_2O_3 در محدوده اطراف مقدار بهینه ۱۰ درصد، به‌ویژه درصدهای میانی، با دقت بیشتری بررسی شود تا مقدار بهینه جایگزینی با اطمینان بیشتری تعیین گردد. همچنین، بررسی اثر سنین مختلف عمل‌آوری و افزایش تعداد چرخه‌های ذوب‌و‌یخبندان می‌تواند درک دقیق‌تری از روند توسعه مقاومت و دوام بتن حاوی آلومینا در بلندمدت فراهم کند. از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود برای تبیین دقیق‌تر سازوکار عملکرد Al_2O_3 ، مطالعات ریزساختاری با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند SEM/EDS، XRD و MIP انجام شود تا تغییرات فازهای هیدراتاسیون، ساختار و توزیع منافذ، تراکم ماتریس سیمانی و توسعه ریزترک‌ها به‌صورت کمی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، بررسی هم‌زمان اثر چرخه‌های ذوب‌و‌یخبندان، بارگذاری ترافیکی و مواد یخ‌زدا می‌تواند شرایط واقعی بهره‌برداری روسازی را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند. پیشنهاد می‌شود سایر شاخص‌های دوام، از جمله نفوذپذیری، نفوذ یون کلر، کربناتی‌شدن، جمع‌شدگی و مقاومت سایشی بلندمدت نیز بررسی شوند. علاوه بر این، ساخت نمونه‌های بزرگ‌مقیاس و انجام آزمایش‌های میدانی بر روی بتن غلتکی حاوی ۱۰ درصد Al_2O_3 می‌تواند قابلیت تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط واقعی روسازی را افزایش دهد. بررسی اثر اندازه و دانه‌بندی ذرات آلومینا و همچنین امکان استفاده هم‌زمان آن با سایر مواد مکمل سیمانی یا افزودنی‌های معدنی نیز می‌تواند زمینه دستیابی به عملکرد مطلوب‌تر را فراهم نماید. در نهایت، انجام ارزیابی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی عمر بهره‌برداری بتن غلتکی حاوی آلومینا می‌تواند به تعیین امکان‌پذیری استفاده گسترده از این ماده در روسازی‌های مناطق سردسیر و افزایش دوام و عمر مفید آن‌ها کمک کند.

- 1-Sun, C., Zhu, B., Luo, T., Liu, K., Wei, T., & Yang, L. (2024). *Uniaxial compressive mechanical properties and stress–strain model for roller-compacted concrete with initial damage subjected to freeze–thaw cycles*. Construction and Building Materials, 411, 134256.
- 2-Wang, et al. (2024). *Effects of nano-alumina on Portland concrete at low temperatures (5 °C)*. Case Studies in Construction Materials, 20, e02922.
- 3- Zhang, Q., Li, C., Li, G., Chen, D., et al. (2025). *The Effect of Modification with Nano-Alumina, Nano-Silica, and Polypropylene Fiber on the Frost Resistance of Concrete*. Buildings, 15(21), 4002.
- 4- Yaseen, M. H., Hashim, S. F. S., Dawood, E. T., & Johari, M. A. M. (2025). *Impact and abrasion behavior of roller compacted concrete reinforced with different types of fibers*. Open Engineering, 15(1), 20250107
- 5- Selvam, M., & Singh, S. (2023). *Comparative investigation of laboratory and field compaction techniques for designing roller compacted concrete pavements (RCCP)*. International Journal of Pavement Engineering, 24(1).
- 6-Du, X., Si, Z., Li, Y., Huang, L., Si, Z., & Wen, L. (2023). *Dynamic compressive behavior of freeze–thaw damaged roller-compacted concrete and establishment of constitutive model*. Construction and Building Materials, 365, 130095.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130095
- 7-Nasr, D., Babagoli, R., Rezaei, M., & Andarz, A. (2023). *Evaluating the Influence of Carbon Fiber on the Mechanical Characteristics and Electrical Conductivity of Roller-Compacted Concrete Containing Waste Ceramic Aggregates Exposed to Freeze-Thaw Cycling*. Advances in Materials Science and Engineering, 2023, 1308387.
DOI: 10.1155/2023/1308387
- 8- Afroughsabet, V., & Al-Tabbaa, A. (2023). *Effect of SAPs and polypropylene fibres on the freeze-thaw resistance of low carbon roller compacted concrete pavement*. MATEC Web of Conferences, 378, 08006.
DOI: 10.1051/mateconf/202337808006
- 9- Salim, L. G., Salman, A. J., & Jawad, Z. F. (2023). *Effect of Nano Alumina on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete*. AIP Conference Proceedings, 2787, 080008.
DOI: 10.1063/5.0149418
- 10- Younus, S. J., Mosaberpanah, M. A., & Alzeebaree, R. (2023). *The Performance of Alkali-Activated Self-Compacting Concrete with and without Nano-Alumina*. Sustainability, 15(3), 2811.
DOI: 10.3390/su15032811
- 11- Evaluation of roller compacted concrete for its application as high traffic resisting pavements with fatigue analysis (2023). Construction and Building Materials, 401, 132977.
- 6- Du, X., Li, Y., Si, Z., Huang, L., & Wen, L. (2022). *Damage Process of Roller-Compacted Concrete Based on Combined Action of Freeze–Thaw and Triaxial Compression*. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(9).
- 7- Goli, A., Emadi, H., & Sadeghi, P. (2022). *Investigating the effect of using steel slag on abrasion resistance of roller-compacted concrete pavements*. Innovative Infrastructure Solutions, 7, 297.
- 8-Sargunan, K., Venkata Rao, M., Alex Rajesh, A., et al. (2022). *Experimental investigations on mechanical strength of concrete using nano-alumina and nano-clay*. Materials Today: Proceedings, 62, 5420–5426.
- 9-ASTM C944/C944M-19, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, ASTM International, 2019.
- 10-ASTM International. (2024). *ASTM C39/C39M-24: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24
- 11- ASTM International, ASTM C642-21, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- 12-ASTM International. (2022). *ASTM C78/C78M-22, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.