



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Optimization of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete Containing Wollastonite and Investigation of Its Durability and Microstructure against Chloride Ion Penetration

Babak mansoori^{1*}, hadi Fatemi², Yahya kazemi³

1*-Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, shiraz, Iran

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

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

Received: 10 July 2026; Revised: 16 July 2026; Accepted: 19 August 2026; Published: 22 December 2026

Abstract

Self-compacting concrete, owing to its flowability, filling ability, and self-compaction under its own weight, has been widely used in structures with densely arranged reinforcement. Previous studies have shown that wollastonite can affect the workability, mechanical strength, and durability indices of concrete by modifying the cementitious matrix structure. However, the simultaneous relationship among rheological behavior, microstructure, and resistance to chloride-ion transport in wollastonite-containing SCC has received limited attention. In this study, the effects of partial cement replacement with wollastonite on the rheological behavior, mechanical properties, resistance to chloride-ion transport, and microstructural characteristics of SCC were investigated. Six mixtures incorporating 0, 5, 10, 15, 20, and 25% wollastonite as a mass replacement of cement were prepared. As the replacement level increased from 0 to 25%, the slump-flow diameter decreased from 750 to 660 mm, while the V-Funnel time increased from 6 to 11 s. The L-Box ratio decreased from 0.9 to 0.8, whereas the U-Box height difference increased from 10 to 15 mm. Nevertheless, all mixtures maintained the required performance criteria for SCC. The mixture containing 20% wollastonite exhibited the best overall performance, with compressive strength increases of 20.45%, 14.25%, and 13.8% at 7, 28, and 90 days, respectively, compared with the reference mixture. Water absorption decreased by 21.34% and 20.65% at 28 and 90 days, respectively, while chloride-ion penetration decreased by 19.9% and 24.64% over the same periods. Resistance to freeze-thaw cycles also increased by 28.6% and 27.3% at 28 and 90 days, respectively. SEM images confirmed the formation of a denser matrix, reduced pore volume, and improved continuity of hydration products. Overall, the incorporation of wollastonite at an optimum replacement level improved the mechanical performance and durability of SCC through modification of rheological behavior and refinement of the microstructure.

Keywords: Self-Compacting Concrete (SCC), Wollastonite, Rheological Behavior, Chloride-Ion Penetration, Water Absorption, Freeze-Thaw Cycles

Cite this article as Mansoori, B., Fatemi, H. and Kazemi, Y. (2026). Optimization of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete Containing Wollastonite and Investigation of Its Durability and Microstructure against Chloride Ion Penetration. (e251119). Civil and Project Journal, 8(10), e251119
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.596448.1465>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 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/>

بهینه‌سازی خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم حاوی ولاستونیت و بررسی دوام و

ریزساختار آن در برابر نفوذ یون کلر

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

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

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

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

تاریخ دریافت: ۱۹ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۲۵ تیر ۱۴۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۵؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ دی ۱۴۰۵

چکیده

بتن خودتراکم به دلیل قابلیت جریان یابی، پرکنندگی و تراکم تحت وزن خود، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های با تراکم بالای آرماتور دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ولاستونیت می‌تواند با اصلاح ساختار ماتریس سیمانی، بر کارایی، مقاومت مکانیکی و شاخص‌های دوام بتن اثرگذار باشد. با این حال، بررسی هم‌زمان ارتباط میان رفتار رئولوژیکی، ریزساختار و مقاومت در برابر انتقال یون کلراید در بتن خودتراکم حاوی ولاستونیت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، اثر جایگزینی جزئی سیمان با ولاستونیت بر رفتار رئولوژیکی، خواص مکانیکی، مقاومت در برابر انتقال یون کلراید و ویژگی‌های ریزساختاری بتن خودتراکم بررسی شد. شش طرح اختلاط با درصدهای جایگزینی وزنی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت تهیه گردید. به‌طوری‌که با افزایش جایگزینی از ۰ به ۲۵ درصد، قطر اسلامپ‌فلو از ۷۵۰ به ۶۶۰ میلی‌متر کاهش و زمان $V-Funnel$ از ۶ به ۱۱ ثانیه افزایش یافت. نسبت $L-Box$ از ۰/۹ به ۰/۸ کاهش یافت، درحالی‌که اختلاف ارتفاع $U-Box$ از ۱۰ به ۱۵ میلی‌متر افزایش پیدا کرد. با این حال، تمامی مخلوط‌ها الزامات عملکردی بتن خودتراکم را حفظ کردند. مخلوط حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت بهترین عملکرد را نشان داد و مقاومت فشاری آن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به‌ترتیب ۲۰/۴۵، ۱۴/۲۵ و ۱۳/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. درصد جذب آب در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۲۱/۳۴ و ۲۰/۶۵ کاهش و نفوذ یون کلر در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ به ترتیب ۱۹/۹ و ۲۴/۶۴ کاهش و مقاومت سیکل ذوب و یخبندان در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ روزه به میزان ۲۸/۶ و ۲۷/۳ درصد افزایش داشته است. تصاویر SEM تشکیل ماتریس متراکم‌تر، کاهش حفرات و افزایش پیوستگی محصولات هیدراتاسیون را تأیید کردند. در مجموع، استفاده از ولاستونیت در مقدار بهینه، با اصلاح رفتار رئولوژیکی و بهبود تراکم ریزساختار، موجب ارتقای عملکرد مکانیکی و دوام بتن خودتراکم شد.

کلمات کلیدی: بتن خود تراکم ، ولاستونیت ، رفتار رئولوژیکی، نفوذ یون کلر، درصد جذب آب، سیکل ذوب و یخبندان

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

۱- مقدمه

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده مهندسی در جهان، نقش اساسی در توسعه زیرساخت‌های عمرانی، صنعتی و شهری ایفا می‌کند. افزایش روزافزون نیاز به سازه‌های با عمر بهره‌برداری طولانی، کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و ضرورت توسعه مصالح ساختمانی پایدار، موجب شده است که طراحی و تولید بتن‌های با عملکرد بالا به یکی از مهم‌ترین محورهای تحقیقات در مهندسی عمران و علوم مواد تبدیل شود. در سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد بتن تنها بر اساس مقاومت مکانیکی انجام نمی‌شود، بلکه شاخص‌هایی نظیر دوام، نفوذپذیری، مقاومت در برابر عوامل مهاجم محیطی، ویژگی‌های ریزساختاری و پایداری زیست‌محیطی نیز به عنوان معیارهای اصلی در توسعه بتن‌های نوین مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در این میان، بتن خودتراکم به عنوان یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های فناوری بتن، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های پیچیده، قطعات پیش‌ساخته، پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه پیدا کرده است. این نوع بتن قادر است تحت اثر وزن خود جریان یافته، تمامی فضای قالب را بدون نیاز به عملیات تراکم مکانیکی پر کند و در میان شبکه‌های متراکم آرماتورها عبور نماید. حذف عملیات ویبره، کاهش خطاهای اجرایی، افزایش کیفیت سطح بتن و بهبود یکنواختی ساختار از مهم‌ترین مزایای بتن خودتراکم محسوب می‌شوند. با وجود این مزایا، دستیابی به بتن خودتراکم با دوام بالا همچنان یک چالش علمی است، زیرا ویژگی‌های خاص طرح اختلاط این بتن می‌تواند بر رفتار انتقالی و عملکرد بلندمدت آن تأثیرگذار باشد.

بتن خودتراکم معمولاً دارای مقدار بیشتری مواد پودری، نسبت آب به مواد سیمانی پایین‌تر و استفاده گسترده‌تر از مواد افزودنی شیمیایی نسبت به بتن معمولی است. این ویژگی‌ها اگرچه موجب افزایش روانی و پایداری مخلوط می‌شوند، اما می‌توانند فرآیند هیدراتاسیون، تشکیل شبکه منافذ و کیفیت ناحیه انتقالی بین سنگدانه و خمیر سیمان را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین، طراحی بتن خودتراکم تنها بر اساس دستیابی به خواص تازه مطلوب کافی نیست، بلکه باید اصلاح ساختار داخلی و افزایش مقاومت آن در برابر عوامل تخریب‌کننده محیطی نیز مورد توجه قرار گیرد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مواد مکمل سیمانی و مواد معدنی فعال می‌تواند رویکردی مؤثر برای کنترل ریزساختار، کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن خودتراکم باشد.

یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده دوام سازه‌های بتن‌آرمه، نفوذ یون کلر به داخل بتن و آغاز فرآیند خوردگی آرماتورها است. یون‌های کلر موجود در محیط‌های دریایی، آب‌های شور، مناطق صنعتی و محل استفاده از نمک‌های یخ‌زدا، از طریق مکانیسم‌هایی مانند انتشار، جذب موئینه و انتقال تحت فشار وارد ساختار بتن می‌شوند. پس از رسیدن غلظت یون کلر به مقدار بحرانی در سطح میلگرد، لایه محافظ غیرفعال فولاد تخریب شده و فرآیند خوردگی آغاز می‌شود. افزایش حجم محصولات خوردگی نسبت به فولاد اولیه، موجب ایجاد فشار داخلی، تشکیل ترک، کاهش پیوستگی بتن و فولاد و در نهایت افت عملکرد سازه خواهد شد. از این رو، کاهش نفوذپذیری بتن و محدود کردن انتقال یون کلر، یکی از مهم‌ترین اهداف پژوهش‌های مرتبط با توسعه بتن‌های بادوام محسوب می‌شود.

بررسی‌های علمی نشان داده‌اند که مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر ارتباط مستقیمی با ویژگی‌های ریزساختاری آن دارد. پارامترهایی نظیر میزان تخلخل، توزیع اندازه منافذ، پیوستگی شبکه منافذ موئینه، کیفیت ناحیه انتقالی مقدار ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و ترکیب شیمیایی محصولات هیدراتاسیون، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار انتقالی بتن دارند. به همین دلیل، در سال‌های اخیر استفاده هم‌زمان از آزمون‌های دوام و روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس، پراش پرتو ایکس و تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه برای درک مکانیسم عملکرد مواد اصلاح‌کننده بتن مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش‌های اخیر، نقش مواد معدنی طبیعی در اصلاح ساختار داخلی بتن و افزایش دوام آن مورد توجه قرار گرفته است. Liu (2021) نشان دادند که استفاده از مواد معدنی ریزدانه می‌تواند با اصلاح ساختار منافذ و کاهش اندازه منافذ بحرانی، موجب کاهش ضریب انتقال یون کلر در ماتریس سیمانی شود. همچنین Zhang (2022) گزارش کردند که ارزیابی هم‌زمان ویژگی‌های دوام و مشخصه‌های ریزساختاری، درک دقیق‌تری از ارتباط میان ترکیب مواد سیمانی و عملکرد بلندمدت بتن فراهم می‌کند. این مطالعات نشان دادند که بهبود دوام بتن بیش از آنکه تنها به افزایش مقاومت فشاری وابسته باشد، به اصلاح مسیرهای انتقالی در ساختار داخلی بتن مرتبط است.

در میان مواد معدنی مورد استفاده در فناوری بتن، ولاستونیت به عنوان یک ماده معدنی سیلیکاتی طبیعی، در سال های اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. ولاستونیت دارای ساختار بلوری سوزنی شکل، پایداری شیمیایی بالا، سختی مناسب و سازگاری مطلوب با سیستم های سیمانی است. عملکرد این ماده در بتن ناشی از ترکیبی از اثرات فیزیکی و شیمیایی است؛ به گونه ای که ذرات ولاستونیت می توانند با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان، کاهش تخلخل، بهبود ناحیه انتقالی و افزایش تراکم ماتریس سیمانی، مسیرهای نفوذ عوامل مهاجم را محدود کنند. همچنین، ساختار الیافی این ماده می تواند با ایجاد اثر پل زنی، از گسترش ریزترک ها جلوگیری کرده و پیوستگی داخلی بتن را افزایش دهد.

Zhu (2024) اثر استفاده از میکروالیاف ولاستونیت و پودر زئولیت را بر خواص مکانیکی، نفوذپذیری یون کلر و ویژگی های ریزساختاری کامپوزیت های سیمانی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور ولاستونیت موجب کاهش منافذ درشت، افزایش تراکم ماتریس سیمانی و بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون کلر می شود. تحلیل های ریز ساختار نشان داد که اصلاح ساختار منافذ یکی از مهم ترین عوامل افزایش دوام نمونه های حاوی ولاستونیت است. همچنین نتایج پراش تغییر در محصولات هیدراتاسیون و تشکیل ساختار پایدارتر سیمانی را تأیید کرد.

Tong و همکاران (2024) با بررسی فرآیند انتقال یون کلر در بتن و ارائه یک مدل چندمقیاسی نشان دادند که توزیع اندازه منافذ و میزان پیوستگی شبکه انتقالی، تأثیر بیشتری نسبت به مقدار تخلخل کل بر نفوذ یون کلر دارد. بر اساس این نتایج، بررسی ریزساختار در کنار آزمون های دوام برای تحلیل عملکرد بتن های اصلاح شده با مواد معدنی ضروری است.

همچنین Avudaiappan (2025) عملکرد بتن حاوی ولاستونیت را بررسی کرده و نشان دادند که استفاده از مقدار بهینه این ماده می تواند موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر عوامل مهاجم محیطی شود. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که ولاستونیت با اصلاح مورفولوژی محصولات هیدراتاسیون و افزایش تراکم ساختار داخلی، نقش مؤثری در ارتقای عملکرد بتن دارد. در مطالعه دیگری، Sangeetha و همکاران (2025) بتن خودتراکم اصلاح شده با ولاستونیت و میکروسیلیس را بررسی کردند و نشان دادند که ترکیب بهینه این مواد می تواند ضمن حفظ خواص بتن تازه، موجب کاهش تخلخل و افزایش انسجام ریزساختار شود.

مطالعات پیشین نشان داده اند که ولاستونیت می تواند با اصلاح ساختار ماتریس سیمانی، بر کارایی، مقاومت مکانیکی و برخی شاخص های دوام بتن اثرگذار باشد. همچنین، در مطالعات اخیر استفاده از ولاستونیت در بتن خودتراکم مورد توجه قرار گرفته است؛ با این حال، بیشتر پژوهش ها خواص تازه، مکانیکی و دوام را به صورت مجزا بررسی کرده اند. از این رو، شکاف اصلی پژوهش حاضر، نبود یک بررسی یکپارچه از ارتباط میان رفتار رئولوژیکی بتن خودتراکم حاوی ولاستونیت، ساختار منافذ و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر است. نوآوری این پژوهش در تعیین ترکیب بهینه ولاستونیت بر اساس عملکرد رئولوژیکی و تبیین ارتباط میان رئولوژی بتن تازه، تغییرات ریزساختاری و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر خواهد بود. این رویکرد می تواند به درک مکانیزم اثر ولاستونیت بر عملکرد چندمقیاسی و دوام بتن خودتراکم کمک کند.

۲- روش کار و مواد

۲-۱- روش کار

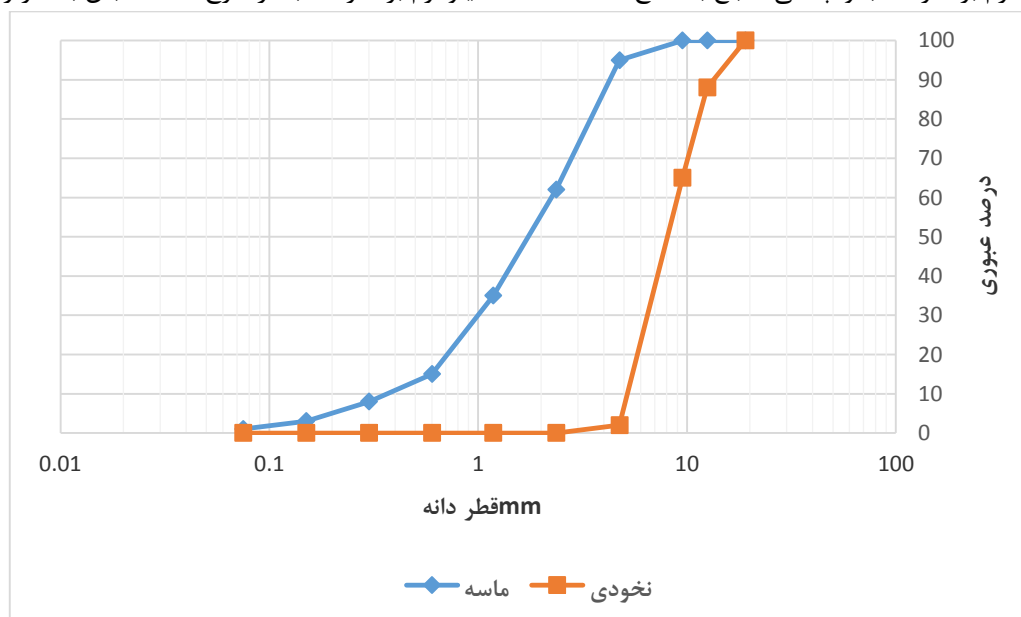
در این پژوهش، اثر جایگزینی بخشی از سیمان با ولاستونیت بر خواص تازه، مکانیکی و دوام بتن خودتراکم، با تأکید بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید، بررسی شد. طرح اختلاط بتن خودتراکم بر اساس الزامات ACI 237R تعیین شد. مصالح سنگی شامل ماسه و سنگدانه درشت پس از دانه بندی مطابق استاندارد ASTM C136 در طرح های اختلاط مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تأمین کارایی و قابلیت جریان مناسب بتن خودتراکم، از فوق روان کننده Super Plast P.C و پودر سنگ به عنوان ماده پرکننده (فیلر) استفاده شد. ولاستونیت در مقادیر ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی سیمان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در نظر گرفته شد. خواص بتن تازه با استفاده از آزمون های جریان اسلامپ، جعبه L، جعبه U و قیف V ارزیابی شد. مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه های استوانه ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر در سنین ۷،

۲۸ و ۹۰ روز اندازه‌گیری شد. به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های دوام، جذب آب، نفوذ یون کلراید و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گرفت. جذب آب مطابق استاندارد ASTM C642 با استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر انجام شد. نفوذ یون کلراید مطابق استاندارد NT BUILD 492 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تعیین شد. همچنین مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان مطابق استاندارد ASTM C666 با استفاده از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ارزیابی شد. آزمون‌های دوام در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفتند. برای ساخت نمونه‌ها از میکسر با ظرفیت ۳۰ لیتر استفاده شد. مواد تشکیل‌دهنده بتن به‌صورت مرحله‌ای وارد میکسر شدند؛ به‌گونه‌ای که ابتدا آب اختلاط و فوق‌روان‌کننده، سپس سنگدانه‌های درشت و ماسه و در ادامه پودر سنگ، سیمان و ولاستونیت به مخلوط افزوده شدند. زمان کل اختلاط ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اتمام اختلاط، خواص بتن تازه ارزیابی و سپس نمونه‌ها در قالب‌های مربوطه ریخته شدند. برای هر طرح اختلاط، ۱ بچ مستقل تهیه و از هر بچ ۲۰ نمونه برای هر آزمون و هر سن آزمایش ساخته شد. در مجموع، ۱۶۲ نمونه برای برنامه آزمایشگاهی تهیه گردید. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا رسیدن به سنین آزمایش در حوضچه آب با دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پیش از انجام آزمون‌ها، نمونه‌ها از حوضچه خارج شده و مطابق الزامات استاندارد مربوطه آماده‌سازی شدند. در آزمون مقاومت فشاری، سطوح انتهایی نمونه‌ها پیش از بارگذاری به‌منظور اطمینان از توزیع یکنواخت تنش، آماده و تسطیح شدند. سرعت اعمال بار مطابق الزامات استاندارد ASTM C39 تنظیم شد. آزمون‌های دوام نیز مطابق روش‌های اجرایی استانداردهای مربوطه انجام گرفتند. کلیه تجهیزات مورد استفاده، شامل دستگاه مقاومت فشاری، تجهیزات آزمون نفوذ یون کلراید و تجهیزات آزمون ذوب و یخبندان، پیش از انجام آزمایش‌ها از نظر عملکرد و صحت اندازه‌گیری بررسی و مطابق دستورالعمل‌های آزمایشگاهی و الزامات استاندارد مربوطه کالیبره شدند.

۲-۲- مواد

سنگدانه

مصالص سنگی مورد استفاده شامل ماسه معدنی به‌عنوان سنگدانه ریز و سنگدانه نخودی معدنی به‌عنوان سنگدانه درشت بود. دانه‌بندی مصالح مطابق استاندارد ASTM C136 انجام شد. ماسه معدنی با حداکثر اندازه اسمی $4/75$ میلی‌متر، جذب آب $1/2$ درصد، وزن مخصوص خشک 1575 کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی اشباع با سطح خشک 1645 کیلوگرم بر مترمکعب مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، سنگدانه نخودی با حداکثر اندازه اسمی $12/5$ میلی‌متر، جذب آب 1 درصد، وزن مخصوص خشک 1683 کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی اشباع با سطح خشک 1645 کیلوگرم بر مترمکعب در طرح اختلاط بتن به کار رفت.



شکل ۱: نمودار دانه بندی سنگدانه

فوق روان کننده

فوق روان کننده استفاده شده در این پژوهش از جدیدترین نسل فوق روان کننده‌ها به حساب می‌آید که مطابق با استاندارد ASTM C494 ساخته شده است و بر پایه کربوکسیلات اتر می‌باشد. پلی کربوکسیلات مایعی با رنگ قهوه‌ای روشن و وزن مخصوص ۱/۰۵ کیلوگرم می‌باشد.

سیمان

سیمان مورد استفاده در تمامی مخلوط‌های آزمایشی، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ بوده که توسط کارخانه سیمان فیروزآباد فارس تولید شده است. چگالی این نوع سیمان مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده برابر با ۳/۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. این سیمان به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مناسب، به عنوان ماده چسباننده اصلی در تهیه مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات شیمیایی مطابق با جدول شماره ۱ می‌باشد

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی سیمان تیپ ۲

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	I.O.I
۲۰/۷۱	۵/۷۰	۰/۱۴	۰/۷۹	۶۴/۸۱	۱/۴۵	۱/۹۹	۳/۳۹	۱/۰۲

ولاستونیت

ولاستونیت یک کانی سیلیکاتی کلسیم است که در گروه سیلیکات‌های زنجیره‌ای قرار می‌گیرد. این کانی عمدتاً از واکنش دگرگونی بین کلسیت و کوارتز تشکیل شده و حاوی مقادیر جزئی از عناصر آهن، منیزیم و منگنز است. دارای سختی حدود ۵ در مقیاس موس، وزن مخصوص تقریبی ۲/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و پایداری حرارتی تا حدود ۱۵۴۰ درجه سانتی‌گراد است. در این پژوهش، از ولاستونیت با اندازه ذرات حدود ۷۵ میکرومتر به عنوان یکی از مواد اولیه استفاده شد. جدول شیمیایی مطابق جدول ۲

جدول ۲: خصوصیات شیمیایی پودر ولاستونیت

عنوان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	I.O.I
درصد	۴۹	۰/۳	۴۲	۱/۶	۰/۳	۳



شکل ۲: ولاستونیت

۲-۳- معرفی نمونه ها

نمونه های مورد آزمایش در این تحقیق مطابق جدول ۳ نام گذاری گردیده است.

جدول ۳: معرفی نمونه ها

ردیف	نام نمونه	درصد ولاستونیت
۱	sh	۰
۲	V5	۵
۳	V10	۱۰
۴	V15	۱۵
۵	V20	۲۰
۶	V25	۲۵

۲-۴- طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن خود متراکم با درصد های ولاستونیت شامل ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ جایگزین سیمان متفاوت مطابق جدول ۴

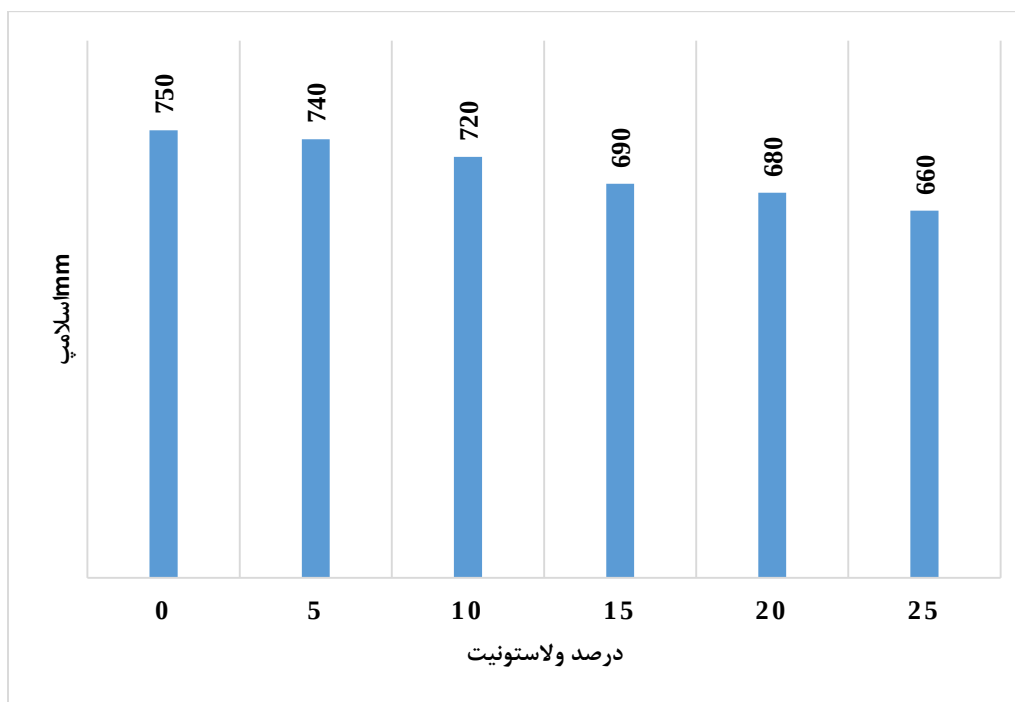
جدول شماره ۴: طرح اختلاط بتن

ردیف	عنوان نمونه	ولاستونیت (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	سنگدانه (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)
۱	SH	۰	۱۵۷/۵	۳۵۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۴
۲	V5	۱۷/۵	۱۴۹/۶۲	۳۳۲/۵	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۳۳
۳	V10	۳۵	۱۴۱/۷۵	۳۱۵	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۲۶
۴	V15	۵۲/۵	۱۳۳/۸	۲۹۷/۵	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۱۹
۵	V20	۷۰	۱۲۶	۲۸۰	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۱۲
۶	V25	۸۷/۵	۱۱۸/۱۲	۲۶۲/۵	۸۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱/۰۵

۳- نتایج

۳-۱- نتایج Slump Flow

نتایج قطر گسترش جریان بتن با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان مطابق شکل ۳



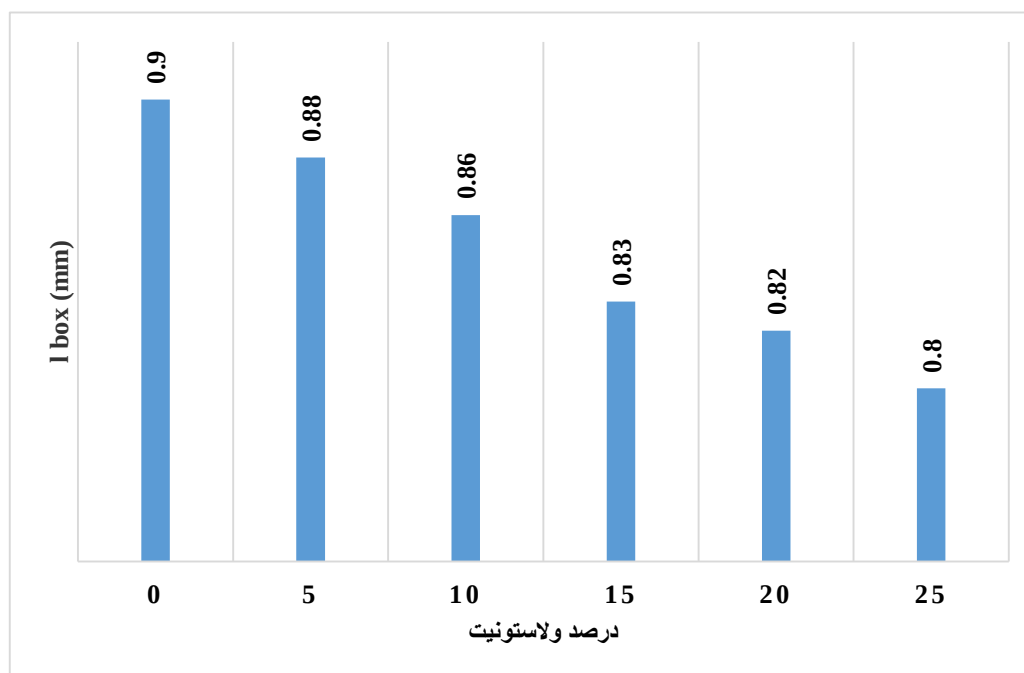
شکل ۳: نمودار نتایج Slump Flow با افزودن درصد های مختلف ولاستونیت

نتایج آزمون اسلامپ فلو نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ولاستونیت، قطر جریان آزاد بتن از ۷۵۰ میلی‌متر در نمونه شاهد به ۶۶۰ میلی‌متر در نمونه حاوی ۲۵ درصد ولاستونیت کاهش یافته است. این روند کاهشی بیانگر افت تدریجی قابلیت تغییر شکل و توانایی جریان آزاد بتن خودتراکم است. در بتن خودتراکم، قطر اسلامپ فلو مستقیماً به رفتار رئولوژیکی خمیر سیمان وابسته بوده و تابعی از تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک محسوب می‌شود. کاهش قطر جریان نشان می‌دهد که با افزایش میزان ولاستونیت، مقاومت داخلی مخلوط در برابر آغاز و تداوم جریان افزایش یافته و بتن برای تغییر شکل تحت اثر وزن خود به تنش برشی بیشتری نیاز دارد. از دیدگاه ریزساختاری، این رفتار را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و هندسی ذرات ولاستونیت نسبت داد. ذرات ولاستونیت دارای مورفولوژی سوزنی، نسبت طول به قطر زیاد و سطح ویژه بالا هستند که موجب افزایش تعداد نقاط تماس بین ذرات جامد و افزایش اصطکاک داخلی سیستم می‌شوند. این ویژگی سبب تشکیل شبکه‌ای متراکم‌تر از ذرات در خمیر سیمان شده و حرکت نسبی ذرات را در هنگام اعمال تنش محدود می‌کند. در نتیجه، انرژی لازم برای غلبه بر نیروهای اصطکاکی و آغاز جریان افزایش یافته و تنش تسلیم بتن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش سطح ویژه ولاستونیت باعث کاهش ضخامت لایه آب آزاد پیرامون ذرات سیمان و سنگدانه‌ها می‌شود. در سیستم‌های سیمانی، لایه آب آزاد نقش روان‌کننده را ایفا کرده و امکان لغزش ذرات روی یکدیگر را فراهم می‌کند. با افزایش مقدار ولاستونیت، بخش قابل توجهی از آب اختلاط صرف پوشش سطح ذرات شده و ضخامت این لایه کاهش می‌یابد. کاهش آب آزاد مؤثر، اصطکاک بین ذرات را افزایش داده و در نهایت موجب افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش قابلیت جریان بتن می‌شود. علاوه بر این، جایگزینی بخشی از سیمان با ولاستونیت موجب تغییر در توزیع اندازه ذرات و ساختار بسته‌بندی ذرات می‌شود. اگرچه ذرات ریز ولاستونیت در مقادیر بهینه می‌توانند با ایجاد اثر فیلری موجب پر شدن فضاهای خالی و افزایش تراکم خمیر سیمان شوند، اما افزایش بیش از حد مقدار آن سبب غالب شدن اثرات ناشی از افزایش سطح ویژه و مورفولوژی سوزنی ذرات شده و در نتیجه مقاومت رئولوژیکی

مخلوط افزایش می‌یابد. بنابراین، اثر مثبت تراکم ذرات در مقادیر زیاد ولاستونیت تحت تأثیر افزایش اصطکاک داخلی و کاهش آب آزاد قرار گرفته و روانی بتن کاهش می‌یابد. از منظر مکانیک جریان، ذرات سوزنی ولاستونیت با ایجاد درهم‌قفل‌شدگی مکانیکی و افزایش برهم‌کنش ذره، شبکه‌ای پایدارتر در خمیر سیمان تشکیل می‌دهند که در برابر تغییر شکل مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. این شبکه، حرکت ذرات را در هنگام جاری شدن محدود کرده و موجب افزایش تنش لازم برای شکست ساختار اولیه خمیر می‌شود. در نتیجه، قطر اسلامپ فلو کاهش یافته و سرعت گسترش بتن نیز کمتر می‌شود. با وجود کاهش قطر اسلامپ فلو از ۷۵۰ به ۶۶۰ میلی‌متر، تمامی مخلوط‌های مورد مطالعه همچنان در محدوده توصیه‌شده برای بتن خودتراکم ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه افزایش درصد ولاستونیت موجب افزایش تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک و در نتیجه کاهش روانی بتن شده است، اما مخلوط‌ها همچنان قابلیت جریان تحت وزن خود و پر کردن قالب بدون نیاز به ویبره را حفظ کرده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ولاستونیت ضمن کاهش تدریجی روانی، موجب افزایش انسجام و پایداری رئولوژیکی مخلوط نیز می‌شود؛ ویژگی‌ای که می‌تواند خطر جداشدگی سنگدانه‌ها و آب‌انداختگی را کاهش داده و در صورت انتخاب درصد بهینه جایگزینی، عملکرد بتن خودتراکم را بهبود بخشد. این نتایج نشان می‌دهد که اثر ولاستونیت بر خواص تازه بتن ناشی از برهم‌کنش هم‌زمان پدیده‌های رئولوژیکی، ریزساختاری و هندسی ذرات است و انتخاب درصد بهینه آن نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد تعادل میان روانی، پایداری و قابلیت اجرا دارد.

۳-۲- نتایج L-Box

نتایج نسبت قابلیت عبور در بتن خود متراکم با افزودن درصد ولاستونیت جایگزین سیمان مطابق شکل ۴



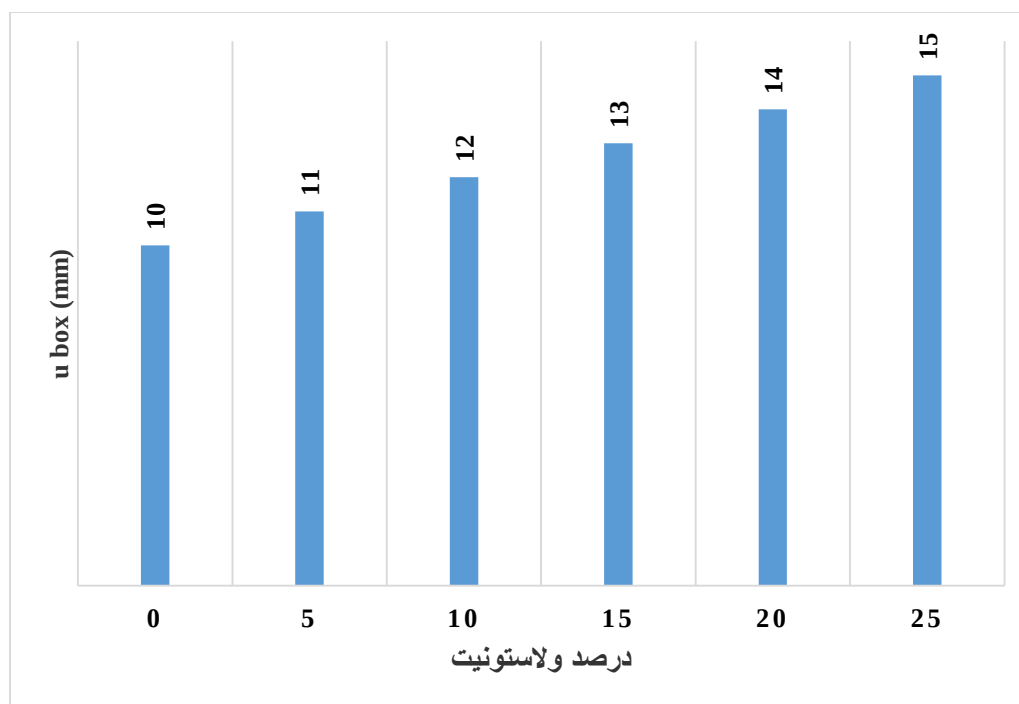
شکل ۴: نمودار نتایج L-Box(mm) با افزودن درصد های مختلف ولاستونیت

بررسی نتایج آزمون قابلیت عبور (L-Box) نشان می‌دهد که نسبت H_2/H_1 از ۰/۹ در نمونه شاهد به ۰/۸ در نمونه V25 کاهش یافته است. کاهش این نسبت بیانگر افت تدریجی قابلیت عبور بتن خودتراکم در اثر افزایش درصد جایگزینی سیمان با ولاستونیت است. در آزمون L-Box، نسبت H_2/H_1 شاخصی از توانایی بتن برای حفظ پیوستگی جریان هنگام عبور از میان موانع شبیه‌سازی شده (میلگردها) محسوب می‌شود؛ از این رو، کاهش این نسبت نشان‌دهنده افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییر

شکل و کاهش توانایی آن در عبور از فواصل محدود بدون ایجاد انسداد است. از دیدگاه رئولوژیکی، این رفتار را می‌توان به افزایش تنش تسلیم و تا حدودی ویسکوزیته پلاستیک نسبت داد. افزایش مقدار ولاستونیت موجب تغییر در تعادل نیروهای بین‌ذره‌ای شده و مقاومت شبکه ذرات در برابر اعمال تنش برشی را افزایش می‌دهد. در نتیجه، بتن برای آغاز حرکت و حفظ جریان یکنواخت در میان میلگردها به انرژی بیشتری نیاز خواهد داشت. این افزایش مقاومت رئولوژیکی سبب می‌شود سرعت بازآرایی ذرات در حین جریان کاهش یافته و مخلوط نتواند به سهولت از میان فواصل محدود عبور کند. از منظر ریزساختاری، مورفولوژی سوزنی‌شکل ذرات ولاستونیت، نسبت طول به قطر زیاد و سطح ویژه بالای آن، موجب افزایش تعداد نقاط تماس بین ذرات جامد و تقویت برهم‌کنش‌های مکانیکی در خمیر سیمان می‌شود. این ویژگی علاوه بر افزایش اصطکاک داخلی، احتمال تشکیل قوس ذره‌ای در مقابل موانع را افزایش می‌دهد. در این شرایط، ذرات ریز و درشت به‌جای حرکت مستقل، تمایل بیشتری به تشکیل ساختارهای موقت و پایدار دارند که مانع عبور روان مخلوط از میان میلگردها می‌شود. علاوه بر این، افزایش سطح ویژه ولاستونیت باعث کاهش ضخامت لایه آب آزاد پیرامون ذرات سیمان و سنگدانه‌ها شده و در نتیجه قابلیت لغزش ذرات روی یکدیگر کاهش می‌یابد. این پدیده مقاومت داخلی مخلوط را افزایش داده و عبور بتن از میان موانع را دشوارتر می‌سازد. از سوی دیگر، افزایش درصد ولاستونیت موجب تغییر در تراکم بسته‌بندی ذرات نیز می‌شود. اگرچه حضور ذرات ریز ولاستونیت در مقادیر بهینه می‌تواند با ایجاد اثر فیلری موجب پر شدن حفرات و افزایش تراکم خمیر سیمان شود، اما در درصدهای بالاتر، افزایش سطح ویژه و برهم‌کنش‌های ذره‌ای بر این اثر غلبه کرده و مقاومت رئولوژیکی سیستم را افزایش می‌دهد. در نتیجه، مخلوط بخشی از قابلیت تغییر آرایش داخلی خود را از دست داده و هنگام عبور از میان میلگردها با محدودیت بیشتری مواجه می‌شود. با وجود روند نزولی نسبت H_2/H_1 ، تمامی مقادیر به‌دست‌آمده در محدوده 0.8 تا 1 قرار دارند که مطابق دستورالعمل نشان‌دهنده برخورداری مخلوط‌ها از قابلیت عبور مناسب است. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه افزایش درصد جایگزینی ولاستونیت موجب افزایش مقاومت در برابر جریان و کاهش نسبی عبورپذیری بتن شده است، اما این تغییرات هنوز به حدی نرسیده‌اند که موجب انسداد کامل، جداسازی یا اختلال در فرآیند پر شدن قالب شوند. بنابراین، تمامی مخلوط‌های مورد مطالعه همچنان توانایی عبور از میان شبکه‌های متراکم آرماتور را بدون نیاز به ارتعاش مکانیکی حفظ کرده‌اند. در مجموع، کاهش نسبت $L-Box$ را می‌توان نتیجه برهم‌کنش هم‌زمان افزایش تنش تسلیم، افزایش ویسکوزیته پلاستیک، کاهش ضخامت لایه آب آزاد، افزایش اصطکاک بین‌ذره‌ای، مورفولوژی سوزنی ولاستونیت و تشکیل قوس‌های ذره‌ای دانست. این نتایج نشان می‌دهد که هرچند ولاستونیت موجب بهبود انسجام و پایداری رئولوژیکی بتن خودتراکم می‌شود، اما افزایش بیش از حد مقدار آن می‌تواند تعادل میان روانی، قابلیت عبور و پایداری را بر هم زده و در نهایت احتمال انسداد موضعی در اعضای با تراکم زیاد آرماتور را افزایش دهد. از این‌رو، انتخاب درصد بهینه جایگزینی ولاستونیت برای دستیابی هم‌زمان به خواص مناسب بتن تازه و ریزساختار متراکم، از اهمیت اساسی برخوردار است.

۲-۳- نتایج U-Box

نتایج نسبت قابلیت عبور در بتن خود متراکم با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان مطابق شکل ۵



شکل ۵: نمودار نتایج U-Box با افزودن درصد های مختلف ولاستونیت

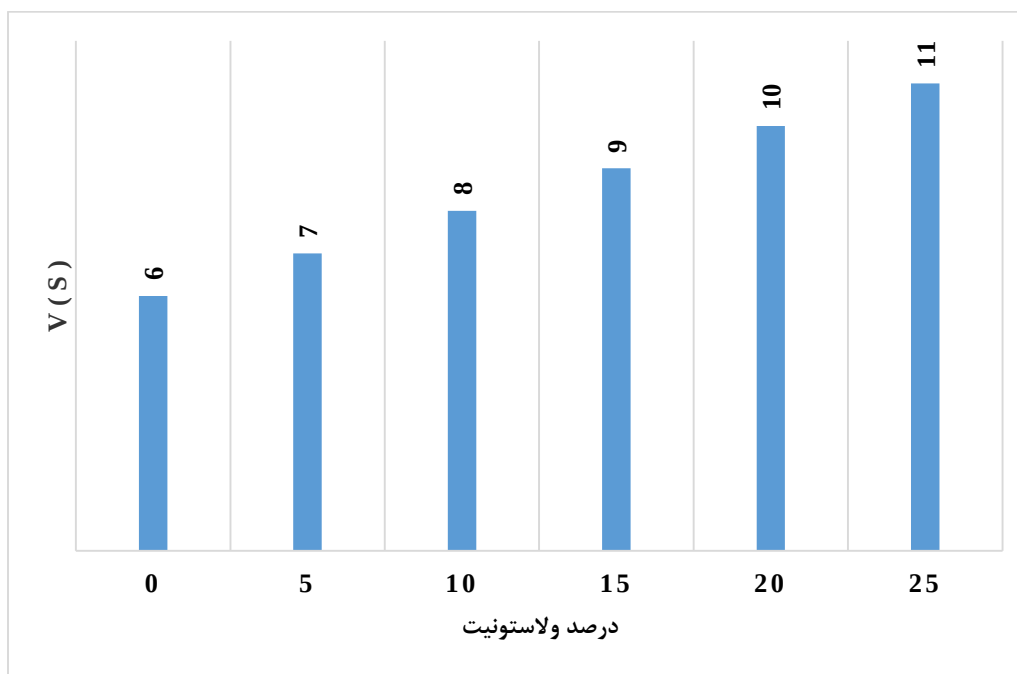
نتایج آزمون U-Box ارزیابی قابلیت پرکنندگی بتن خودتراکم نشان می‌دهد که اختلاف ارتفاع بتن (ΔH) از ۱۰ میلی‌متر در نمونه شاهد به ۱۵ میلی‌متر در نمونه حاوی ۲۵ درصد ولاستونیت (V25) افزایش یافته است. افزایش مقدار ΔH بیانگر کاهش تدریجی قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم با افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط ولاستونیت است. در این آزمون، توانایی بتن در انتقال از بخش عمودی به بخش افقی U-Box و رسیدن به تعادل ارتفاعی در دو طرف مانع، تابعی از ویژگی‌های رئولوژیکی مخلوط، به‌ویژه تنش تسلیم، ویسکوزیته پلاستیک و مقاومت داخلی در برابر جریان است. بنابراین، افزایش اختلاف ارتفاع نشان می‌دهد که مخلوط برای عبور از میان شبکه میلگردهای شبیه‌سازی‌شده، با محدودیت بیشتری مواجه شده و انرژی بیشتری برای غلبه بر مقاومت جریان نیاز دارد. از دیدگاه رئولوژیکی، افزایش ΔH را می‌توان ناشی از افزایش تنش تسلیم و افزایش نسبی ویسکوزیته پلاستیک دانست. بتن خودتراکم باید بتواند تحت اثر وزن خود و بدون اعمال انرژی خارجی تغییر شکل داده و تمامی فضای قالب را پر کند؛ بنابراین، افزایش مقاومت داخلی مخلوط موجب کاهش سرعت حرکت، کاهش قابلیت بازآرایی ذرات و در نهایت ایجاد اختلاف ارتفاع بیشتر در دو طرف جعبه U می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ولاستونیت، ساختار داخلی مخلوط منسجم‌تر شده و مقاومت آن در برابر تغییر شکل افزایش یافته است. این تغییرات عمدتاً به ویژگی‌های فیزیکی ولاستونیت، شامل سطح ویژه بالا، شکل سوزنی، نسبت طول به قطر زیاد و زبری سطح ذرات مرتبط است. ذرات سوزنی‌شکل ولاستونیت با افزایش تعداد نقاط تماس بین اجزای جامد، موجب تقویت برهم‌کنش ذره-ذره و افزایش اصطکاک داخلی سیستم می‌شوند. همچنین، افزایش سطح ویژه ذرات سبب افزایش نیاز آبی مخلوط و کاهش ضخامت لایه آب آزاد در اطراف ذرات سیمان و سنگدانه‌ها می‌شود. کاهش آب آزاد مؤثر، توانایی روان‌سازی خمیر سیمان را محدود کرده و موجب

کاهش لغزش ذرات نسبت به یکدیگر می‌شود؛ در نتیجه، جریان بتن در مسیرهای باریک و میان موانع با مقاومت بیشتری همراه خواهد بود. از سوی دیگر، حضور ذرات ولاستونیت می‌تواند موجب تغییر در ساختار بسته‌بندی ذرات شود. در مقادیر بهینه، ذرات ریز ولاستونیت با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان، موجب افزایش تراکم ماتریس سیمانی و بهبود انسجام مخلوط می‌شوند. با این حال، افزایش بیش از حد مقدار آن باعث غالب شدن اثرات ناشی از افزایش سطح تماس، اصطکاک داخلی و کاهش تحرک ذرات شده و در نهایت قابلیت جریان‌یابی بتن کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، اثر فیلری ولاستونیت در درصدهای بالاتر تحت تأثیر افزایش مقاومت رئولوژیکی سیستم قرار گرفته و موجب افزایش ΔH می‌شود. با وجود افزایش اختلاف ارتفاع از ۱۰ به ۱۵ میلی‌متر، مقدار ΔH در نمونه V25 همچنان کمتر از مقدار بحرانی توصیه‌شده (حدود ۳۰ میلی‌متر برای بتن خودتراکم) است. بنابراین، تمامی مخلوط‌های مورد بررسی همچنان دارای قابلیت پرکنندگی و عبور قابل قبول بوده و افزایش ولاستونیت منجر به انسداد کامل یا کاهش شدید عملکرد اجرایی بتن نشده است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه افزایش درصد ولاستونیت باعث افزایش مقاومت جریان و کاهش نسبی قابلیت تغییر شکل شده، اما ساختار رئولوژیکی مخلوط همچنان در محدوده مناسب بتن خودتراکم باقی مانده است. در مجموع، افزایش ΔH در آزمون U-Box را می‌توان نتیجه اثر هم‌زمان افزایش تنش تسلیم، افزایش ویسکوزیته پلاستیک، کاهش آب آزاد مؤثر، افزایش اصطکاک بین ذرات، درهم‌قفل‌شدگی مکانیکی ذرات ولاستونیت و تغییر در آرایش ذرات جامد دانست. این نتایج بیانگر آن است که ولاستونیت در درصد بهینه ضمن افزایش انسجام و پایداری بتن خودتراکم، موجب افزایش کنترل‌شده مقاومت در برابر جریان شده است؛ بنابراین، انتخاب مقدار مناسب جایگزینی ولاستونیت برای دستیابی به تعادل میان روانی، قابلیت پرکنندگی، عبورپذیری و پایداری رئولوژیکی ضروری است.

۳-۳- نتایج V-Box

آزمون قابلیت عبور بتن خودتراکم با افزودن با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان

مطابق شکل ۶



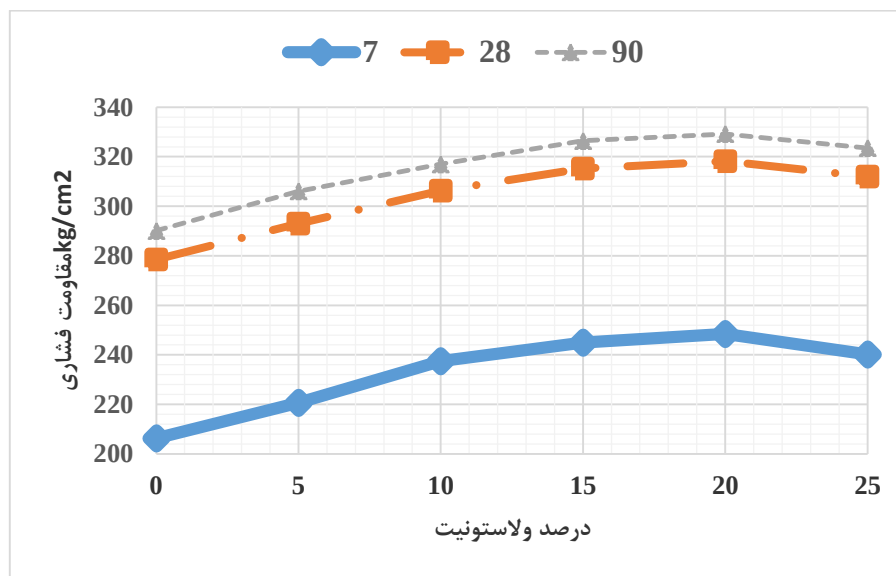
شکل ۶: نمودار نتایج V-Funnel(s) با افزودن درصد های مختلف ولاستونیت

نتایج آزمون V-Funnel نشان می‌دهد که زمان عبور بتن از قیف از ۶ ثانیه در نمونه شاهد به ۱۱ ثانیه در نمونه V25 افزایش یافته است. افزایش زمان خروج از قیف، بیانگر افزایش مقاومت مخلوط در برابر جریان و کاهش قابلیت تغییر شکل آن تحت نیروی وزن خود است. از آنجا که آزمون V-Funnel شاخص مناسبی برای ارزیابی ویسکوزیته ظاهری و قابلیت جریان‌یابی بتن

خودتراکم محسوب می‌شود، افزایش زمان عبور نشان‌دهنده افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش سرعت جریان مخلوط در حین عبور از مقطع محدود کیف است. از دیدگاه رئولوژیکی، این رفتار را می‌توان به تغییر در ساختار ریزدانه‌ای خمیر سیمان در اثر افزایش درصد جایگزینی ولاستونیت نسبت داد. ذرات ولاستونیت، به دلیل سطح ویژه بالا، مورفولوژی سوزنی و نسبت طول به قطر زیاد، سطح تماس بیشتری با فاز خمیر ایجاد کرده و بخشی از آب آزاد مخلوط را جذب یا در اطراف خود محصور می‌کنند. در نتیجه، ضخامت لایه روان‌کننده آب پیرامون ذرات سیمان و سنگدانه‌ها کاهش یافته و اصطکاک بین ذرات افزایش می‌یابد. این پدیده موجب افزایش ویسکوزیته پلاستیک و در برخی موارد افزایش تنش تسلیم شده و در نهایت، مقاومت داخلی مخلوط در برابر جریان را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، حضور ذرات سوزنی شکل ولاستونیت سبب ایجاد نوعی درهم‌تنیدگی و قفل‌شدگی مکانیکی در مقیاس ریزساختاری می‌شود که حرکت نسبی ذرات را محدود کرده و انرژی بیشتری برای ادامه جریان بتن مورد نیاز خواهد بود. در نتیجه، سرعت عبور بتن از کیف کاهش یافته و زمان تخلیه افزایش می‌یابد. این رفتار بیانگر آن است که با افزایش مقدار ولاستونیت، مخلوط از حالت بسیار روان به سمت مخلوطی با ویسکوزیته بالاتر و جریان کنترل‌شده‌تر حرکت می‌کند. با وجود افزایش زمان عبور از ۶ به ۱۱ ثانیه، تمامی مقادیر به‌دست‌آمده همچنان در محدوده توصیه‌شده دستورالعمل برای بتن خودتراکم (تقریباً ۶ تا ۱۲ ثانیه برای اغلب کاربردها) قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه افزایش درصد ولاستونیت موجب کاهش روانی و افزایش مقاومت در برابر جریان شده است، اما مخلوط‌ها همچنان از قابلیت جریان مناسب و پایداری کافی برخوردار هستند و خطر جداسازی یا آب‌انداختگی نیز کاهش یافته است. بنابراین، افزایش زمان V-Funnel را می‌توان نشانه‌ای از بهبود پایداری رئولوژیکی مخلوط دانست، مشروط بر آنکه این افزایش از محدوده استاندارد فراتر نرود؛ زیرا در مقادیر بالاتر، افزایش بیش از حد ویسکوزیته می‌تواند موجب کاهش قابلیت پرکنندگی، افت قابلیت عبور از میان میلگردها و دشواری در بتن‌ریزی اعضای با آرماتور متراکم شود.

۳-۴- نتایج مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بتن خود تراکم با ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان در بازه زمانی ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۷



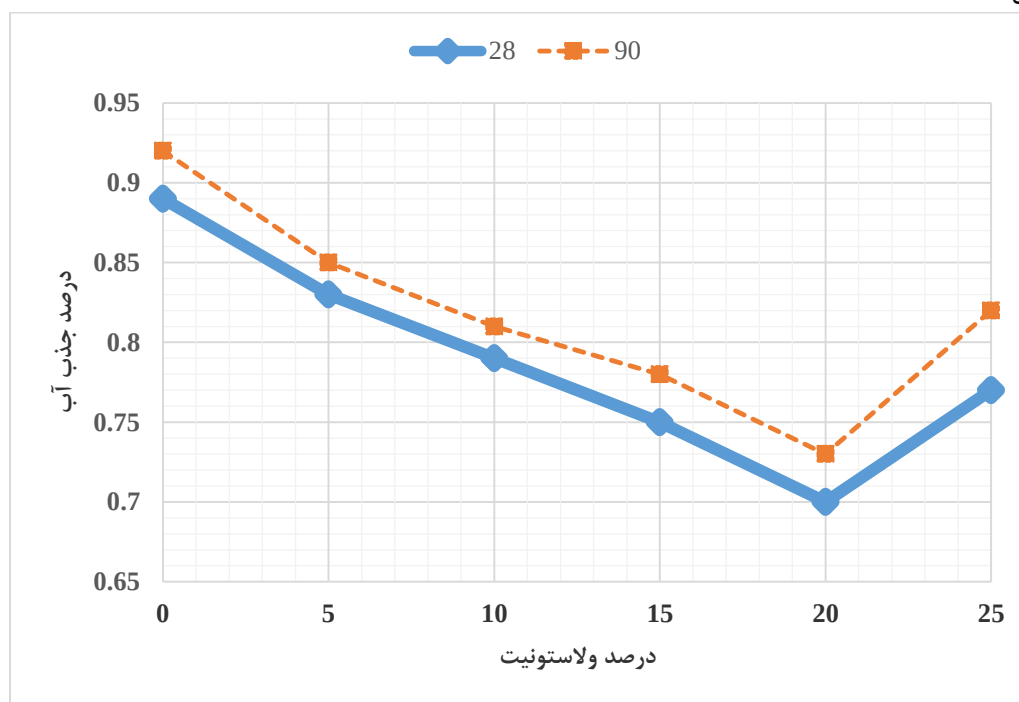
شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری

با افزایش درصد ولاستونیت از صفر تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری ۷ روزه از ۲۰۶/۳ به ۲۴۸/۵ kg/cm^2 افزایش یافته است که ۲۰/۴۵ درصد رشد را نشان می‌دهد. این افزایش را می‌توان به اثر پرکنندگی ذرات ریز ولاستونیت نسبت داد که موجب کاهش تخلخل، افزایش تراکم خمیر سیمان و تسریع تشکیل محصولات هیدراتاسیون در سنین اولیه می‌شود. در ۲۵ درصد جایگزینی،

مقاومت به $240/2 \text{ kg/cm}^2$ کاهش یافته که بیانگر کاهش مقدار سیمان فعال و غلبه اثر رقیق‌شدگی است. در سن ۲۸ روز نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. مقاومت از $278/5 \text{ kg/cm}^2$ در نمونه شاهد به $318/2 \text{ kg/cm}^2$ در نمونه حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت افزایش یافته که معادل $14/25$ درصد بهبود است. این نتایج نشان می‌دهد ولاستونیت علاوه بر بهبود ساختار فیزیکی، موجب متراکم‌تر شدن ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه شده و در نتیجه مقاومت نهایی بتن افزایش یافته است. در ۲۵ درصد جایگزینی مقاومت اندکی کاهش یافته و به 312 kg/cm^2 رسیده است. در سن ۹۰ روزه نیز بیشترین مقاومت مربوط به نمونه دارای ۲۰ درصد ولاستونیت است که نسبت به نمونه شاهد $13/8$ درصد افزایش نشان می‌دهد. ادامه افزایش مقاومت در سنین بالا نشان‌دهنده تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و تراکم بیشتر ریزساختار بتن است. با این حال، در ۲۵ درصد جایگزینی مقاومت به $317/3 \text{ kg/cm}^2$ کاهش یافته که ناشی از حد مقدار سیمان و محدود شدن تشکیل ژل است. نتایج نشان می‌دهد جایگزینی بخشی از سیمان با ولاستونیت موجب بهبود مقاومت فشاری بتن خودتراکم در تمامی سنین مورد بررسی شده است. افزایش مقاومت تا سطح ۲۰ درصد جایگزینی عمدتاً ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ولاستونیت، بهبود تراکم ریزساختار، کاهش تخلخل و تقویت ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه است. با افزایش میزان جایگزینی به ۲۵ درصد، به دلیل کاهش مقدار سیمان فعال و غالب شدن اثر رقیق‌شدگی، روند افزایشی مقاومت متوقف شده و کاهش نسبی مشاهده می‌شود. بنابراین، بر اساس نتایج این پژوهش، ۲۰ درصد ولاستونیت به‌عنوان مقدار بهینه جایگزینی سیمان از نظر مقاومت فشاری بتن خودتراکم پیشنهاد می‌شود.

۳-۵- نتایج درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب بتن خود تراکم با ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۸



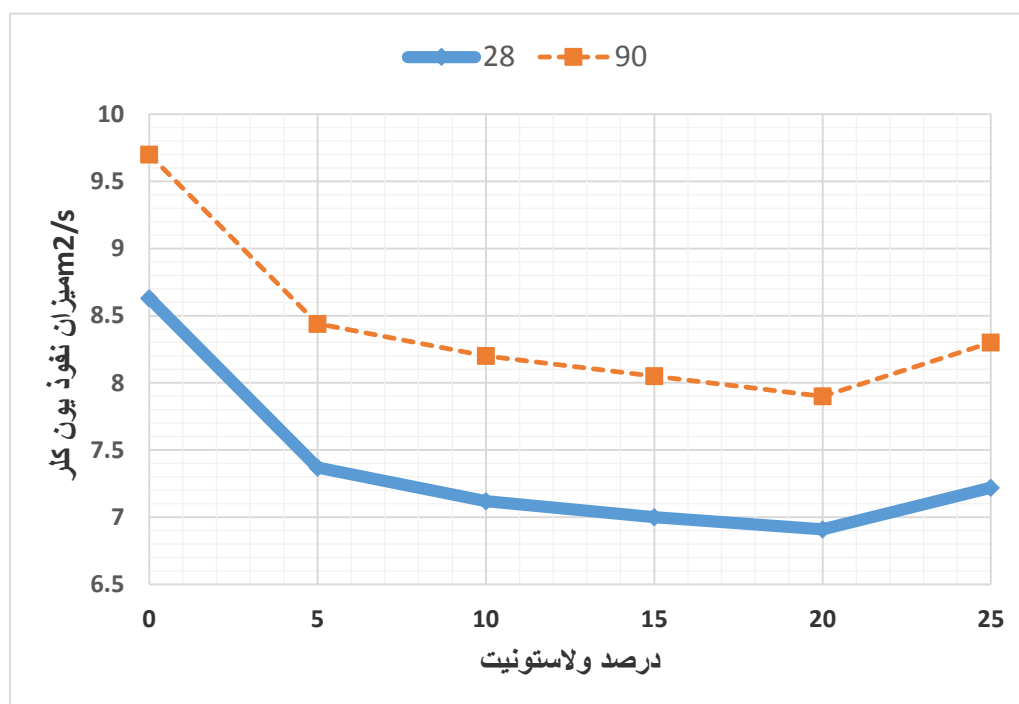
شکل ۸: نتایج درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب نشان می‌دهد با افزایش میزان ولاستونیت از صفر تا ۲۰ درصد، درصد جذب آب از $0/89$ درصد در نمونه شاهد به $0/70$ درصد کاهش یافته است که معادل $21/34$ درصد کاهش جذب آب است. این کاهش بیانگر متراکم‌تر شدن ساختار داخلی بتن و کاهش حجم و پیوستگی منافذ مؤئینه است. ذرات بسیار ریز ولاستونیت با پر کردن فضاهای خالی میان ذرات سیمان و محصولات هیدراتاسیون، موجب افزایش تراکم خمیر سیمان و کاهش قابلیت نفوذ آب می‌شوند. با افزایش میزان

جایگزینی به ۲۵ درصد، جذب آب به ۰/۷۷ درصد افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که در مقادیر بالاتر، کاهش مقدار سیمان فعال موجب محدود شدن تشکیل ژل شده و اثر مثبت پرکنندگی و لاستونیت تا حدودی خنثی می‌شود. در سن ۹۰ روزه نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. جذب آب از ۰/۹۲ درصد در نمونه شاهد به ۰/۷۳ درصد در نمونه دارای ۲۰ درصد و لاستونیت کاهش یافته است که ۲۰/۶۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. کاهش بیشتر جذب آب در این سن نسبت به سنین اولیه نشان‌دهنده ادامه فرآیند هیدراتاسیون، تکمیل ریزساختار و کاهش بیشتر تخلخل بتن است. در نمونه دارای ۲۵ درصد و لاستونیت، جذب آب به ۰/۸۲ درصد افزایش یافته است، اما همچنان کمتر از نمونه شاهد باقی مانده است. این نتیجه بیانگر آن است که اگرچه و لاستونیت باعث بهبود دوام بتن می‌شود، اما جایگزینی بیش از مقدار بهینه موجب کاهش کارایی آن در کاهش نفوذپذیری خواهد شد. نتایج آزمون جذب آب نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از سیمان با و لاستونیت موجب بهبود قابل توجه دوام بتن خودتراکم از طریق کاهش میزان جذب آب شده است. کاهش جذب آب تا سطح ۲۰ درصد جایگزینی ناشی از افزایش تراکم ریزساختار، کاهش تخلخل موئینه، بهبود ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه و اثر پرکنندگی ذرات ریز و لاستونیت است. با افزایش میزان جایگزینی به ۲۵ درصد، به دلیل کاهش مقدار سیمان و غالب شدن اثر رقیق‌شدگی، درصد جذب آب اندکی افزایش یافته است. با این وجود، جذب آب این نمونه همچنان کمتر از بتن شاهد است.

۳-۶- نتایج میزان نفوذ یون کلر

نتایج میزان نفوذ یون کلر در بتن خود متراکم با ۱۰۵ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ درصد و لاستونیت جایگزین سیمان در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق شکل ۹



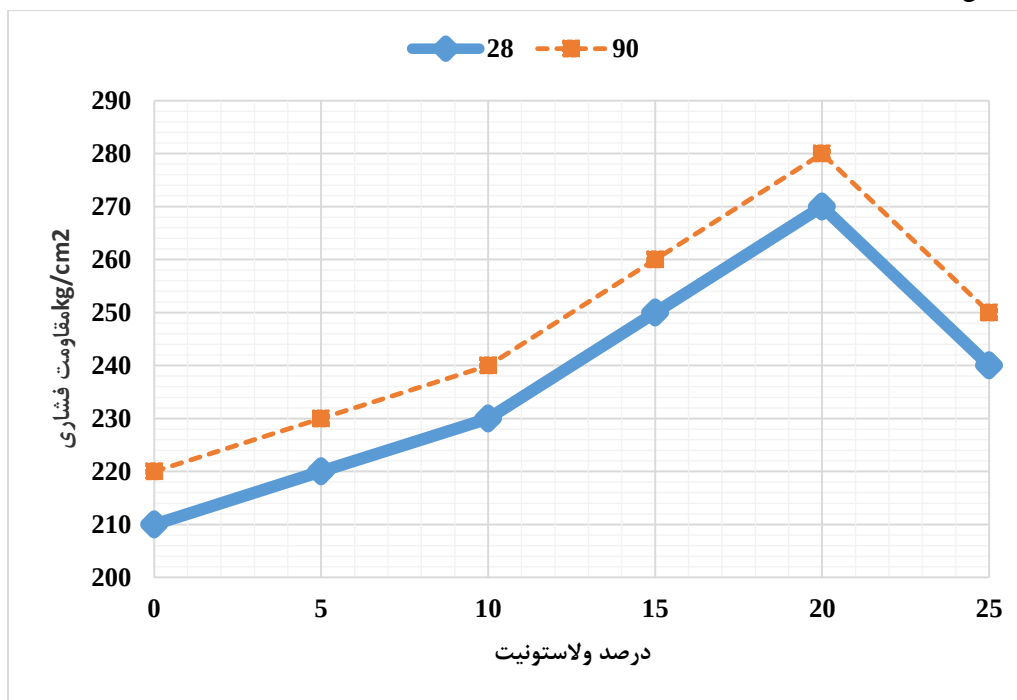
شکل ۹- نمودار میزان نفوذ یون کلر با افزودن و لاستونیت

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان و لاستونیت از صفر تا ۲۰ درصد، ضریب نفوذ یون کلر از $8.63 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ به $6.91 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ کاهش یافته است که معادل حدود ۱۹/۹ درصد کاهش است. این کاهش بیانگر بهبود قابل توجه مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل مهاجم است. علت این رفتار را می‌توان در اثر پرکنندگی ذرات ریز و لاستونیت، کاهش حجم و پیوستگی منافذ موئینه، افزایش تراکم خمیر سیمان و بهبود ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه دانست. در نتیجه، مسیرهای انتقال یون کلر محدود شده و نفوذپذیری بتن کاهش یافته است. در نمونه حاوی ۲۵ درصد و لاستونیت، ضریب نفوذ به $7.22 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که در مقادیر بالاتر جایگزینی، کاهش سیمان فعال موجب کاهش تشکیل

محصولات هیدراتاسیون و افزایش نسبی مسیرهای نفوذ یون کلر می‌شود. در سن ۹۰ روزه نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. ضریب نفوذ از $8.70 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ در بتن شاهد به $6.98 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ در نمونه دارای ۲۰ درصد ولاستونیت کاهش یافته است که ۲۴/۶۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این کاهش ناشی از ادامه فرآیند هیدراتاسیون، تکامل ریزساختار بتن و کاهش بیشتر تخلخل و نفوذپذیری در سنین بالاتر است. در نمونه دارای ۲۵ درصد ولاستونیت، ضریب نفوذ به $7.30 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافته است، اما همچنان کمتر از نمونه شاهد باقی مانده است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه جایگزینی بیش از مقدار بهینه باعث کاهش نسبی عملکرد می‌شود، ولی دوام بتن همچنان نسبت به بتن فاقد ولاستونیت بهبود یافته است. نتایج آزمون نفوذ یون کلر نشان داد که جایگزینی بخشی از سیمان با ولاستونیت موجب بهبود قابل توجه دوام بتن خودتراکم در برابر نفوذ یون‌های مهاجم شده است. کاهش ضریب نفوذ یون کلر تا سطح ۲۰ درصد جایگزینی ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ریز ولاستونیت، افزایش تراکم خمیر سیمان، کاهش تخلخل موئینه و بهبود ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه است که مسیرهای انتقال یون کلر را محدود می‌کند. با افزایش میزان جایگزینی به ۲۵ درصد، ضریب نفوذ اندکی افزایش یافته که به کاهش مقدار سیمان و غالب شدن اثر رقیق‌شدگی نسبت داده می‌شود. با این وجود، عملکرد این نمونه همچنان بهتر از بتن شاهد است.

۳-۷- نتایج تست ذوب و یخبندان

نتایج تست ذوب و یخبندان بتن خود متراکم با ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ درصد ولاستونیت جایگزین سیمان در بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ مطابق شکل ۱۰



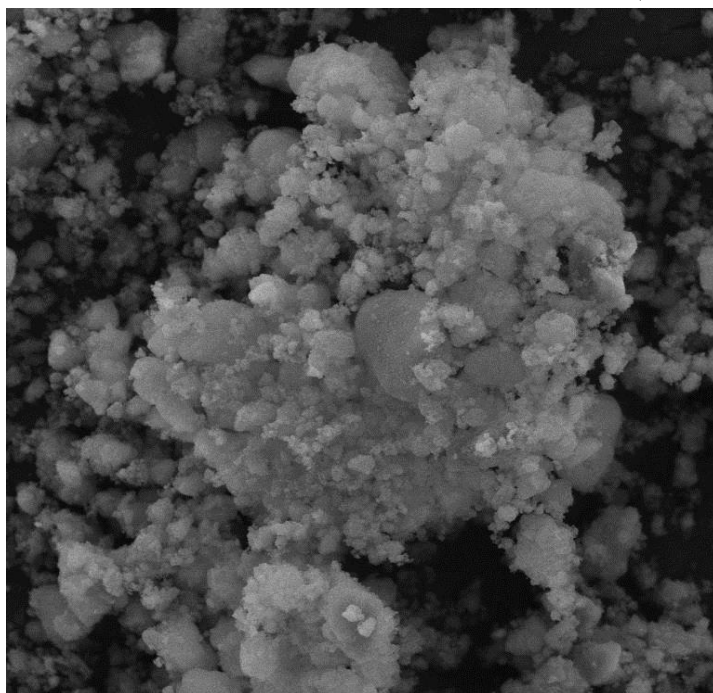
شکل ۱۰: مقاومت تست ذوب و یخبندان با افزودن ولاستونیت

نتایج تست ذوب و یخبندان نشان داد در سن ۲۸ روزه، با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ولاستونیت تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری روندی افزایشی دارد. مقاومت نمونه شاهد برابر 210 kg/cm^2 بوده و با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد ولاستونیت به ترتیب به ۲۲۰، ۲۳۰، ۲۵۰ و 270 kg/cm^2 افزایش یافته است. این افزایش نشان می‌دهد که ولاستونیت در مقادیر متوسط باعث بهبود ریزساختار خمیر سیمان، پر شدن فضاهای خالی و افزایش تراکم بتن شده است. بیشترین مقاومت در نمونه حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت مشاهده شد که حدود ۲۸/۶ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. با این حال، افزایش میزان جایگزینی به ۲۵ درصد موجب کاهش مقاومت به 240 kg/cm^2 شده است که بیانگر کاهش مقدار سیمان فعال و ناکافی بودن محصولات هیدراتاسیون برای حفظ روند افزایشی مقاومت است. در سن ۹۰ روزه نیز همان روند مشاهده می‌شود. مقاومت نمونه شاهد

220 kg/cm^2 بوده و با افزایش درصد ولاستونیت تا ۲۰ درصد به ترتیب به ۲۳۰، ۲۴۰، ۲۶۰ و 280 kg/cm^2 رسیده است. نمونه حاوی ۲۰ درصد ولاستونیت بیشترین مقاومت را داشته و حدود $27/3$ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت نشان می‌دهد. در نمونه دارای ۲۵ درصد ولاستونیت مقاومت به 250 kg/cm^2 کاهش یافته است، هرچند همچنان از نمونه شاهد بیشتر است. این رفتار نشان می‌دهد که مقدار بهینه جایگزینی سیمان با ولاستونیت حدود ۲۰ درصد است و مقادیر بالاتر موجب کاهش تدریجی مقاومت می‌شوند. در تمامی نمونه‌ها، مقاومت فشاری از ۲۸ تا ۹۰ روز حدود 10 kg/cm^2 افزایش یافته است که نشان‌دهنده ادامه فرآیند هیدراتاسیون سیمان و تکمیل ساختار داخلی بتن در طول زمان است. همچنین حفظ ترتیب عملکرد نمونه‌ها در هر دو سن نشان می‌دهد که اثر مثبت ولاستونیت بر مقاومت فشاری پایدار بوده و مقدار ۲۰ درصد به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان در این پژوهش قابل معرفی است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ولاستونیت در بتن خودتراکم تا ۲۰ درصد جایگزینی سیمان موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه می‌شود. این بهبود ناشی از اثر پرکنندگی ذرات ریز، افزایش تراکم ریزساختار و بهبود ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه است. با این حال، جایگزینی ۲۵ درصد باعث کاهش مقاومت نسبت به مقدار بهینه می‌شود که می‌تواند ناشی از کاهش مقدار سیمان و محدود شدن تشکیل محصولات هیدراتاسیون باشد. بنابراین، بر اساس این نتایج، ۲۰ درصد ولاستونیت به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری در بتن خودتراکم پیشنهاد می‌شود.

۳-۸- بررسی ریز ساختار

عکس ریز ساختار بتن خود تراکم با افزودن درصد بهینه ولاستونیت مطابق شکل ۱۱



شکل ۱۱: عکس ریز ساختار بتن خود تراکم با درصد بهینه ولاستونیت

تصویر SEM نشان‌دهنده ریزساختاری متراکم، نسبتاً همگن و با تخلخل محدود است که بیانگر بهبود ساختار خمیر سیمان در حضور درصد بهینه ولاستونیت است. در این تصویر، تجمع ذرات هیدراتاسیون به صورت خوشه‌های متراکم مشاهده می‌شود که فضای خالی میان ذرات را تا حد زیادی پر کرده‌اند. این ویژگی نشان می‌دهد که محصولات هیدراتاسیون به شکل پیوسته در اطراف ذرات سیمان و فیلر تشکیل شده و شبکه‌ای متراکم ایجاد کرده‌اند. در بخش عمده تصویر، فاز غالب احتمالاً ژل C-S-H است که به صورت توده‌های متراکم و نسبتاً نامنظم دیده می‌شود. این ژل مهم‌ترین عامل تأمین مقاومت مکانیکی بتن بوده و افزایش تراکم آن نشان‌دهنده توسعه مناسب فرآیند هیدراتاسیون است. در این نمونه، توزیع یکنواخت محصولات هیدراتاسیون بیانگر آن است که ولاستونیت علاوه بر نقش فیلری، موجب بهبود آرایش ذرات و کاهش فضاهای خالی بین آن‌ها شده است.

همچنین، در تصویر حفرات بزرگ یا ترک‌های پیوسته به‌وضوح مشاهده نمی‌شود و بیشتر منافذ موجود در ابعاد ریز و به‌صورت پراکنده هستند. این موضوع بیانگر کاهش تخلخل مؤثر و افزایش پیوستگی ماتریس سیمانی است. کاهش حجم و اندازه منافذ، مسیرهای نفوذ عوامل مخرب نظیر یون کلرید، سولفات و دی‌اکسیدکربن را محدود کرده و در نتیجه انتظار می‌رود دوام بتن در برابر عوامل محیطی افزایش یابد. از دیدگاه ریزساختاری، حضور درصد بهینه ولاستونیت باعث افزایش اثر پرکنندگی شده است. ذرات ریز ولاستونیت فضاهای بین ذرات سیمان را پر کرده و موجب بهبود دانه‌بندی خمیر سیمان می‌شوند. این پدیده موجب افزایش تراکم بسته‌بندی ذرات، کاهش نسبت فضای خالی و ایجاد بستر مناسب‌تری برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون می‌شود. علاوه بر این، مورفولوژی سوزنی ولاستونیت می‌تواند در مقیاس میکروسکوپی به ایجاد نوعی تقویت فیزیکی در ماتریس سیمانی کمک کرده و انتقال تنش را در فصل مشترک خمیر و سنگدانه بهبود بخشد. عدم مشاهده بلورهای درشت و فراوان هیدروکسید کلسیم (CH) در این بزرگنمایی نیز می‌تواند نشان‌دهنده توزیع مناسب محصولات هیدراتاسیون و غالب بودن ژل C-S-H باشد، به‌طور کلی، غلبه ساختار ژلی متراکم بر بلورهای درشت CH معمولاً با افزایش مقاومت فشاری و بهبود خواص مکانیکی بتن همراه است. در مجموع، ریزساختار مشاهده‌شده نشان می‌دهد که استفاده از درصد بهینه ولاستونیت موجب تشکیل ماتریسی متراکم‌تر، کاهش تخلخل، بهبود پیوستگی محصولات هیدراتاسیون و افزایش کیفیت ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه (ITZ) شده است. این تغییرات ریزساختاری می‌تواند دلیل افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن خودتراکم در مقایسه با نمونه شاهد باشد و با نتایج مطلوب آزمون‌های بتن تازه نیز همخوانی دارد، به‌طوری‌که حفظ کارایی همراه با افزایش تراکم ریزساختار، عملکرد کلی بتن را بهبود می‌بخشد.

۴- نتیجه‌گیری کلی

برآیند نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از سیمان با ولاستونیت در بتن خودتراکم، موجب تغییر هم‌زمان در رفتار رئولوژیکی، عملکرد مکانیکی و ویژگی‌های انتقالی بتن شده است. شدت و جهت این تغییرات تابع مقدار ولاستونیت بوده و وجود یک محدوده بهینه جایگزینی را نشان می‌دهد. در طرح‌های مورد بررسی، افزایش مقدار ولاستونیت از صفر تا ۲۰ درصد، اگرچه موجب افزایش مقاومت در برابر جریان و کاهش نسبی قابلیت تغییرشکل و عبور شد، اما شاخص‌های بتن تازه همچنان در محدوده قابل قبول بتن خودتراکم باقی ماندند. بنابراین، افزودن ولاستونیت در این دامنه را می‌توان عاملی مؤثر بر افزایش انسجام و کنترل جریان دانست، مشروط بر آنکه افزایش مقاومت رئولوژیکی از حد مورد نیاز برای حفظ قابلیت پرکنندگی و عبور تجاوز نکند.

کاهش تدریجی قطر اسلامپ فلو، نسبت L-Box و افزایش زمان V-Funnel و اختلاف ارتفاع U-Box، بیانگر افزایش مقاومت داخلی مخلوط در برابر جریان با افزایش مقدار ولاستونیت است. این رفتار را می‌توان به تغییر در ذرات، افزایش سطح ویژه جامدات، افزایش برهم‌کنش‌های ذره و کاهش آب آزاد مؤثر نسبت داد. با این حال، باید توجه داشت که آزمون‌های متداول بتن خودتراکم، تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک را به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کنند؛ بنابراین، نسبت دادن تغییرات مشاهده‌شده به افزایش کمی این پارامترهای رئولوژیکی، در چارچوب این پژوهش باید به‌عنوان تفسیر مکانیزمی تلقی شود، نه اندازه‌گیری مستقیم. بر اساس نتایج موجود، می‌توان گفت که حضور ولاستونیت موجب افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل و جریان شده است، در حالی که خودتراکم‌شوندگی مخلوط‌ها در دامنه بررسی‌شده حفظ شده است.

از نظر مقاومت فشاری، روند افزایشی مقاومت تا سطح ۲۰ درصد جایگزینی و کاهش آن در ۲۵ درصد نشان‌دهنده وجود رقابت میان دو سازوکار اصلی است. از یک سو، اثر فیزیکی پرکنندگی و بهبود آرایش ذرات که می‌تواند موجب کاهش فضاهای خالی و افزایش تراکم ماتریس شود و از سوی دیگر، اثر رقیق‌شدگی ناشی از کاهش مقدار سیمان که در مقادیر بالاتر جایگزینی می‌تواند ظرفیت تشکیل محصولات هیدراتاسیون را محدود کند. بر اساس داده‌های این پژوهش، اثر نخست تا سطح ۲۰ درصد غالب بوده، در حالی که در ۲۵ درصد، اثر کاهش ماده سیمانی مؤثر موجب افت نسبی مقاومت شده است. بنابراین، افزایش مقدار ولاستونیت به‌تنهایی عامل افزایش مقاومت نیست، بلکه عملکرد نهایی تابع تعادل میان ویژگی‌های فیزیکی ولاستونیت، مقدار سیمان، آب مؤثر و ساختار ایجادشده در ماتریس سیمانی است.

کاهش جذب آب در نمونه‌های حاوی ولاستونیت تا سطح ۲۰ درصد نیز مؤید تغییر در ویژگی‌های انتقالی ماتریس است. کاهش جذب آب را می‌توان با کاهش حجم یا پیوستگی منافذ قابل دسترس برای انتقال آب و افزایش تراکم ساختار خمیر سیمان مرتبط دانست. افزایش مجدد جذب آب در سطح ۲۵ درصد نشان می‌دهد که افزایش مقدار ولاستونیت پس از یک محدوده مشخص الزاماً به بهبود بیشتر ساختار منافذ منجر نمی‌شود. از این‌رو، رفتار جذب آب نیز وجود یک مقدار بهینه جایگزینی را تأیید می‌کند. مهم‌ترین یافته مرتبط با دوام، کاهش ضریب مهاجرت غیریای یون کلراید حاصل از آزمون مهاجرت تسریع شده مطابق NT BUILD 492 تا سطح ۲۰ درصد ولاستونیت است. کاهش این پارامتر نشان‌دهنده کاهش قابلیت انتقال یون کلراید تحت شرایط اعمال شده در آزمون بوده و با کاهش جذب آب و افزایش مقاومت فشاری هم‌راستا است. این هم‌جهتی می‌تواند بیانگر کاهش پیوستگی مسیرهای انتقالی در ماتریس سیمانی و افزایش تراکم ساختار داخلی باشد.

روند افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی ولاستونیت در آزمون ذوب و یخبندان تا سطح ۲۰ درصد نیز با کاهش جذب آب و متراکم‌تر شدن ماتریس سازگاری کیفی دارد. زیرا کاهش آب قابل دسترس در ساختار بتن می‌تواند از میزان آب مستعد یخ‌زدگی در منافذ بکاهد. با وجود این، ارزیابی جامع دوام در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب مستلزم بررسی شاخص‌های اختصاصی این پدیده، از جمله کاهش مدول دینامیکی نسبی و میزان افت عملکرد پس از چرخه‌های متوالی است. بنابراین، بر اساس داده‌های ارائه شده، می‌توان از بهبود عملکرد مکانیکی پس از شرایط آزمون سخن گفت، اما تعمیم آن به دوام واقعی در برابر یخ‌زدگی و ذوب باید با احتیاط صورت گیرد.

نتایج SEM نیز شواهد کیفی از تشکیل یک ماتریس نسبتاً متراکم و کاهش فضاهای خالی در نمونه دارای مقدار بهینه ولاستونیت فراهم کرد. این مشاهده با کاهش جذب آب و نفوذیون و کلر و افزایش مقاومت فشاری هم‌راستا است و از فرضیه ارتباط میان تغییر ریزساختار و بهبود خواص انتقالی و مکانیکی حمایت می‌کند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ولاستونیت در بتن خودتراکم دارای یک اثر وابسته به مقدار جایگزینی است و افزایش آن فراتر از مقدار بهینه، الزاماً به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود. در شرایط آزمایشگاهی این پژوهش، سطح ۲۰ درصد جایگزینی مناسب‌ترین عملکرد متوازن را میان شاخص‌های بتن تازه، مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت در برابر مهاجرت یون کلراید نشان داد. در این سطح، بهبود عملکرد را می‌توان حاصل برهم‌کنش میان بهبود بسته‌بندی ذرات، افزایش تراکم ماتریس سیمانی، کاهش مسیرهای انتقالی و حفظ قابلیت خودتراکم‌شوندگی دانست. در مقابل، افزایش جایگزینی به ۲۵ درصد با کاهش نسبی عملکرد برخی شاخص‌ها همراه شد که احتمالاً ناشی از افزایش سهم فاز غیرسیمانی و کاهش مقدار سیمان قابل هیدراته‌شدن است. از دیدگاه عملکرد چندمقیاسی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهند که تغییر در مقیاس ذرات و رئولوژی بتن تازه با تغییر در ریزساختار ماتریس و در نهایت با تغییر در خواص مکانیکی و انتقالی بتن سخت‌شده همراه است. به بیان دیگر، ولاستونیت در مقدار مناسب می‌تواند از طریق اصلاح ساختار ذرات و ماتریس سیمانی، هم‌زمان بر قابلیت اجرای بتن خودتراکم و مقاومت آن در برابر انتقال عوامل مهاجم اثرگذار باشد. با این حال، مقدار ۲۰ درصد باید به‌عنوان مقدار بهینه در محدوده و شرایط آزمایشگاهی این پژوهش تلقی شود و تعمیم آن به سایر سیستم‌های بتن خودتراکم مستلزم بررسی مستقل ویژگی‌های مواد اولیه، طرح اختلاط، شرایط عمل‌آوری و شرایط محیطی است.

نتایج این پژوهش در مجموع با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد. افزایش مقدار ولاستونیت موجب افزایش انسجام و مقاومت مخلوط در برابر جریان و در نتیجه کاهش نسبی کارایی بتن تازه شد که با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مرتبط مطابقت دارد. همچنین، افزایش مقاومت فشاری تا ۲۰ درصد و کاهش آن در ۲۵ درصد، بیانگر وجود یک مقدار بهینه است که در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده و به تعادل میان اثر پرکنندگی ولاستونیت و کاهش مقدار سیمان نسبت داده شده است. کاهش جذب آب و ضریب مهاجرت یون کلراید و همچنین بهبود نسبی عملکرد در برابر ذوب و یخبندان نیز با نتایج مطالعات قبلی درباره افزایش تراکم و کاهش پیوستگی منافذ در بتن‌های حاوی ولاستونیت سازگار است. مشاهدات SEM نیز تشکیل ماتریس متراکم‌تر را تأیید می‌کند. در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر ضمن تأیید روندهای گزارش شده در پیشینه، نشان می‌دهد که در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی، ۲۰ درصد جایگزینی ولاستونیت مناسب‌ترین تعادل میان کارایی بتن تازه، مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت در برابر انتقال کلراید را ایجاد کرده است؛ با این حال، تفاوت در نوع مصالح و شرایط آزمایش می‌تواند مقدار بهینه را در سایر پژوهش‌ها تغییر دهد.

محدودیت‌های پژوهش

مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش شامل محدود بودن درصد جایگزینی ولاستونیت به ۰ تا ۲۵ درصد و استفاده از یک نوع ولاستونیت است که تعمیم نتایج را محدود می‌کند. همچنین، محدود بودن تعداد بچ‌های آزمایشگاهی و نبود اطلاعات کامل آماری، ارزیابی دقیق تکرارپذیری و معناداری نتایج را دشوار می‌سازد. نتایج آزمون RCMT نیز بیانگر رفتار کلراید در شرایط تسریع‌شده آزمایشگاهی بوده و مستقیماً معادل شرایط واقعی محیطی نیست. علاوه بر این، تفسیر تصاویر SEM عمدتاً کیفی بوده و برای شناسایی دقیق فازهای هیدراتاسیون به آزمون‌های مکمل نیاز است. در ارزیابی ذوب‌ویخبندان نیز اتکا به مقاومت فشاری به‌تنهایی کافی نیست. بنابراین، تعمیم یافته‌ها به مصالح و شرایط اجرایی متفاوت، نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و میدانی تکمیلی است.

دامنه تعمیم نتایج

نتایج این پژوهش با اطمینان بیشتری به بتن‌های خودتراکم دارای مصالح، طرح اختلاط و شرایط عمل‌آوری مشابه قابل تعمیم است. مقدار ۲۰ درصد ولاستونیت به‌عنوان مقدار بهینه، صرفاً برای شرایط و محدوده متغیرهای بررسی‌شده در این پژوهش معتبر بوده و نمی‌توان آن را به‌عنوان مقدار بهینه عمومی در نظر گرفت؛ زیرا عواملی مانند نوع سیمان، ویژگی‌های ولاستونیت، نسبت آب به مواد سیمانی، فوق‌روان‌کننده، فیلر و شرایط محیطی می‌توانند بر مقدار بهینه تأثیرگذار باشند. همچنین، نتایج آزمون RCMT بیانگر رفتار انتقال کلراید در شرایط تسریع‌شده آزمایشگاهی است و به‌تنهایی نمی‌تواند مبنای پیش‌بینی قطعی دوام یا عمر خدمت بتن در شرایط واقعی باشد. بنابراین، تعمیم نتایج نیازمند مطالعات بلندمدت و بررسی شرایط محیطی مختلف است.

پیشنهادهای

برای توسعه نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده درصدهای جایگزینی ولاستونیت در محدوده ۱۵ تا ۲۵ درصد با فواصل کمتر بررسی و اثر ویژگی‌هایی مانند اندازه ذرات، سطح ویژه، خلوص و مورفولوژی آن بر رفتار رئولوژیکی و دوام بتن ارزیابی شود. همچنین، انجام آزمون‌های رئولوژیکی مستقیم، آزمون‌های تکمیلی انتقال کلراید و بررسی‌های ریزساختاری با روش‌هایی مانند MIP، XRD، TGA/DTG و SEM-EDS می‌تواند درک دقیق‌تری از سازوکار عملکرد ولاستونیت فراهم کند. بررسی اثر ولاستونیت بر ناحیه ITZ و دوام بتن در شرایط محیطی واقعی و بلندمدت نیز توصیه می‌شود. علاوه بر این، انجام آزمایش‌ها در چند بچ مستقل و استفاده از تحلیل‌های آماری مانند ANOVA برای افزایش اعتبار نتایج ضروری است. در نهایت، بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن هم‌زمان مقاومت، کارایی، جذب آب و مقاومت در برابر کلراید و همچنین مطالعات نیمه‌صنعتی، می‌تواند زمینه استفاده گسترده‌تر از بتن خودتراکم حاوی ولاستونیت را فراهم کند.

مراجع

- 1-Sharma, A., Garia, S., & Kale, R. C. ,(2025) Performance of self-compacting concrete modified with wollastonite fibre and silica fume Construction and Building Materials, 497, 143932.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143932
- 2-Li, G., Liu, D., Liu, Y., Wang, J., Xu, S., Xia, H., et al. ,(2025) Effect of replacement of silica fume by wollastonite microfibers on ultrahigh performance concrete International Journal of Applied Ceramic Technology, 22, e14990.
DOI: 10.1111/ijac.14990
- 3-Sangeetha, P., & Avudaiappan, S. ,(2025). Partial cement replacement with wollastonite in concrete: strength & durability. Proceedings of the Institution of Civil Engineers –Construction Materials, 178(5), 217–230
DOI: 10.1680/jcoma.24.00141
- 4- Deqi Zhu, Dianrui Mu, Aiping Tang, Shuxu Liu, Yulin Wu & Yongjun Duan .(2024) Mechanical Performances, Chloride Permeability, and Microstructure of Wollastonite Microfiber Reinforced Cement-Based Composite Incorporated with Zeolite Powder Journal of Building Engineering, 86, 108925.
DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.108925
- 5-Tong, L.-Y., Liu, Q.-F., Xiong, Q., Meng, Z., Amiri, O., & Zhang, M. (2024/2025). Modeling the chloride transport in concrete from microstructure generation to chloride diffusivity prediction. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 40(9), 1129–1149
DOI: 10.1111/mice.13331
- 6-Peixoto, L. K. S., dos Anjos, M. A. S., de Farias, E. C., & Branco, F. G. (2024) Evaluation of Chloride Ion Attack in Self-Compacting Concrete Using Recycled Construction and Demolition Waste Aggregates Buildings, 14(2), 319
DOI: 10.3390/buildings14020319
- 7- Li, L., Su, L., Guo, B., Cai, R., Wang, X., & Zhang, T. (2024) Prediction and prevention of concrete chloride penetration: machine learning and MICP techniques Frontiers in Materials, 11, Article 1445547
DOI: 10.3389/fmats.2024.1445547
- 8-Degani, I., Maddalena, R., & Kulasegaram, S. (2024) The Effect of Curing Temperature and Supplementary Cementitious Materials on Chloride Permeability of Self-Compacting Concrete Proceedings of the Cardiff University School of Engineering Research Conference 2024, Cardiff, UK, pp. 38–41.
DOI: 10.18573/conf3.j
- 9-Silva, Y. F., Izquierdo, S., Delvasto, S., & Araya-Letelier, G. (2024). arbonation and chloride penetration performance of self-compacting concrete with masonry and concrete wastes. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 29(4), 744–758.
DOI: 10.1080/19648189.2024.2414221
- 10-Haripraba, R., & Ganesan, R. (2024), Strength and Reliability Performance of Wollastonite in Concrete as Part Replace of Cement with Metakaolin as Admixture. SSRG International Journal of Civil Engineering, 11(6), 10–17
DOI: 10.14445/23488352/IJCE-V11I6P102
- 11- Lotfollahi, S., Jaidari, A., Bakhtiari, P., Hosseini, M., & Ghorbani, M. (2023) Effect of Wollastonite Microfibers and Waste Tire Rubber on Mechanical Properties of Concrete. nternational Journal of Concrete Structures and Materials, 17, Article 33, 811–824
DOI: 10.1186/s40069-023-00595-3
- 12- Jin, H., Liu, J., Zhong, D., & Tang, L. (2023) Experimental study on chloride ion diffusion behavior and microstructure in concrete under alternating ambient humidity conditions. Construction and Building Materials, 401, 132886.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132886

- 13- Suthankumar, N., Thanka Jebarsan, V., & Phani Manoj, A. V. (2023) Effect of Wollastonite and Lime Sludge on Strength, Durability and ASR of Ternary Blended Cement Concrete. *Romanian Journal of Materials*, 53(2), 130–139
- 14-Gao, Y., Wang, M., Guo, B., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2023). Stable time for microstructural parameters of fly-ash concrete and its influence on chloride-diffusion stability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(1), 04022366.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004546)
- 15- Liu, M., Qiao, P., & Sun, L. (2021). Dependence of chloride ion diffusivity on evolution of pore-structures in freeze-thawed shotcrete: Multiscale characterization and modeling. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104222.
DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104222
- 16- Zhang, J., Dai, Y., Xu, J., Feng, J., & Ma, K. (2022). The Influence of the Different Cementitious Material on Self-Healing of Microcracks in Shotcrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article ID 3031048, 13 pages.
DOI: 10.1155/2022/3031048
- 17-ACI Committee 237. (2007). *Self-Consolidating Concrete*. ACI 237R-07. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute
- 18- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM C136/C136M-14. West Conshohocken, PA: ASTM International.
DOI: 10.1520/C0136_C0136M-14
- 19- ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM C39/C39M-23. West Conshohocken, PA: ASTM International
DOI: 10.1520/C0039_C0039M-23
- 20-ASTM International. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM C642-13. West Conshohocken, PA: ASTM International
DOI: 10.1520/C0642-13
- 21-NORDTEST. (1999). NT BUILD 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. NORDTEST Method, Approved November 1999
- 22-ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. ASTM C666/C666M-15. West Conshohocken, PA: ASTM International
DOI: 10.1520/C0666_C0666M-15
- 22-ASTM International. (2021). *ASTM C1611/C1611M-21: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
https://doi.org/10.1520/C1611_C1611M-21.
- 23-European Committee for Standardization (CEN). (2010). *EN 12350-10:2010: Testing Fresh Concrete—Part 10: Self-Compacting Concrete—L Box Test*. Brussels, Belgium: CEN.
- 24-Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2002). *Standard Test Methods for Self-Compacting Concrete: Test Method for Passability through Spaces Using U-Shaped or Box-Shaped Apparatus*. Tokyo, Japan: JSCE.
- 25-European Committee for Standardization (CEN). (2010). *EN 12350-9:2010: Testing fresh concrete—Part 9: Self-compacting concrete—V-funnel test*. Brussels, Belgium: CEN.

