



Semnan University



Research Article

Evaluation of Mechanical Properties and Durability of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Perlite and Waste Ceramic as Aggregate

Danial Nasr^{a*}, Rezvan Babagoli^b, Peyman Nazaripour^c

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Mazandaran, Iran.

^c Master Graduate, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-11-12

Revised: 2025-04-07

Accepted: 2025-04-08

Keywords:

Self-compacting,
Lightweight concrete,
Perlite,
Waste ceramic,
Mechanical properties,
Durability.

ABSTRACT

Designing self-compacting lightweight concrete allows for simultaneous utilization of the benefits of lightweight aggregates and the properties of self-compacting concrete. Rapid growth of construction industry has led to an increased demand for building materials such as cement and natural aggregates, highlighting the necessity of utilizing industrial waste materials, such as ceramic and tile waste, as sustainable alternatives. Therefore, in this research, by altering the aggregates and incorporating lightweight perlite and waste ceramics, an effort was made to evaluate the physical, mechanical, and durability properties of lightweight self-compacting concrete. The mix design for these tests was based on both Fuller and gap grading. Results showed that all mix designs fell within the acceptable range of slump flow (55 to 85 cm). In terms of mechanical properties, the NNM mix, containing both coarse and fine natural aggregates based on gap grading, exhibited the highest compressive (34.6 and 37.2 MPa), tensile (4.8 and 5.5 MPa), and flexural (5.6 and 6.6 MPa) strengths at 28 and 90 days, respectively. Regarding durability, the NNF mix, based on the Fuller grading, displayed the lowest water absorption at 1.9% and 1.1%, the highest electrical resistivity at 30.1 and 57.9 kiloohm-centimeter, and the lowest penetration depth at 11 and 10 millimeters at 28 and 90 days, respectively. In conclusion, when comparing mix designs based on Fuller and gap grading at 28 and 90 days, it was evident that, in terms of mechanical properties, the coarser gap grading performed better. However, in terms of durability, the finer Fuller grading exhibited better performance compared to the gap grading.

* Corresponding author.

E-mail address: dani1361@gmail.com

How to cite this article: Nasr, D. , Babagoli, R. and nazaripour, P. (2025). Evaluation of Mechanical Properties and Durability of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Perlite and Waste Ceramic as Aggregate. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(2), 43-63. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35905.1701>

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



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک خودمتراکم حاوی پرلیت و ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه

دانیال نصر^{۱*}، رضوان باباگلی^۲، پیمان نظری پور^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده

ساخت بتن سبک خودمتراکم، امکان استفاده‌ی هم‌زمان از مزایای بتن‌های سبک‌دانه و خصوصیات خمیری بتن خودمتراکم را امکان‌پذیر می‌کند. رشد روزافزون صنعت ساخت‌وساز منجر به افزایش تقاضای مصالح ساختمانی نظیر سیمان و سنگدانه‌های طبیعی شده است، که این امر ضرورت استفاده از مواد ضایعاتی صنعتی مانند سرامیک و کاشی را به‌عنوان جایگزین‌های پایدار برجسته می‌کند. لذا در این پژوهش، با تغییر در سنگدانه‌ها و استفاده از سبک‌دانه‌ی پرلیت و سرامیک ضایعاتی، اقدام به ارزیابی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم سبک شده است. به‌منظور انجام آزمایش‌ها و دستیابی به نتایج، طرح اختلاط بر اساس طرح دانه‌بندی فولر و میان‌تهی استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی طرح‌ها در محدوده‌ی مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند. از لحاظ مشخصات مکانیکی، طرحی که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، دارای بیشترین مقاومت فشاری (۳۴/۶ و ۳۷/۲ مگاپاسکال)، کششی (۴/۸ و ۵/۵ مگاپاسکال) و خمشی (۵/۶ و ۶/۶ مگاپاسکال) به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، از لحاظ دوام، طرحی که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، دارای کمترین مقدار جذب آب (۱/۹٪ و ۱/۱٪)، بیشترین مقاومت الکتریکی (۳۰/۱ و ۵۷/۹ کیلوآمپ سانتی‌متر) و کمترین عمق نفوذ (۱۱ و ۱۰ میلی‌متر) به‌ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. در مجموع، با مقایسه‌ی طرح‌های ساخته شده بر اساس دانه‌بندی فولر متناظر با همان طرح بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، مشخص شد که از لحاظ مشخصات مکانیکی، دانه‌بندی میان‌تهی که درشت‌دانه‌تر است عملکرد بهتری نسبت به دانه‌بندی فولر دارد. البته از لحاظ دوام، دانه‌بندی فولر که ریزدانه‌تر بود عملکرد بهتری نسبت به دانه‌بندی میان‌تهی داشت.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

واژه‌های کلیدی:

بتن سبک خودمتراکم، پرلیت، سرامیک ضایعاتی، مشخصات مکانیکی، دوام.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: dani1361@gmail.com

استناد به این مقاله: نصر، دانیال، باباگلی، رضوان و نظری پور، پیمان. (۱۴۰۴). بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک خودمتراکم حاوی پرلیت و ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۴۳-۶۳. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35905.1701>

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

۱. مقدمه

امروزه، بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. بتن به عنوان یک ماده‌ی ساختمانی حدود دو قرن است که در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر طبق مطالعات انجام شده، میزان کل بتنی که در طول یک‌سال در جهان مصرف می‌گردد، بیشتر از یک تن به ازای هر نفر است (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷؛ پرتاس و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاچکو تورگال و جلالی، ۲۰۱۰). بتن خودمتراکم (SCC)، که برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ در ژاپن توسط اوکامورا و همکارانش توسعه یافت، یکی از نوآوری‌های مهم در فناوری بتن به شمار می‌رود که با ویژگی‌های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار مهندسين قرار داده است که با استفاده از آن می‌توان بر مشکلات ناشی از عدم تراکم مناسب بتن معمولی در سازه‌های بتنی فائق آمد. آسانی دسترسی به اجزای تشکیل‌دهنده، شکل‌پذیری و پایداری نسبتاً زیاد این مخلوط نیز باعث توجه روزافزون به این بتن شده است (تبیج و همکاران، ۲۰۱۷). در مناطق زلزله‌خیز، کاهش وزن سازه‌ها از طریق استفاده از بتن سبک می‌تواند به بهبود رفتار لرزه‌ای کمک کند، که این امر یکی از انگیزه‌های توسعه بتن خودتراکم سبک محسوب می‌شود. بتن خودمتراکم با سنگدانه سبک وزن، ترکیبی از خواص مطلوب بتن با سنگدانه سبک است که نیازی به ارتعاش خارجی ندارد و می‌تواند به محل برسد، قالب را پر کند و آرماتور را بدون هیچ‌گونه آب‌انداختگی و جداسدگی در بر گیرد (کورت و همکاران، ۲۰۱۶). لذا ترکیب خصوصیت خودتراکمی و سبکی در بتن می‌تواند اثرات مطلوبی بر خواص مکانیکی و رئولوژیک آن داشته باشد. رشد جمعیت و توسعه صنعتی به افزایش تقاضا برای ساخت‌وساز منجر شده است، که این امر تولید قابل توجه ضایعات ساختمانی، از جمله سرامیک و کاشی، را به

دنبال داشته و ضرورت بازیافت این مواد را در صنعت بتن برجسته می‌کند. بسیاری از ضایعات ساختمانی برای مدت طولانی در محیط‌زیست باقی می‌مانند و برخی از آن‌ها به دلیل غیرقابل تجدید بودن و نیاز به فرآیندهای بازیافت پرمصرف انرژی و آلاینده، اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارند (هالیکا و همکاران، ۲۰۱۳). از سوی دیگر، کاشی و سرامیک به طور گسترده در ساخت‌وساز جهانی استفاده می‌شوند و حجم بالایی از ضایعات را تولید می‌کنند. در جهان، عمده تولید کنندگان این صنعت کشورهای اسپانیا، ایتالیا و ترکیه می‌باشند؛ ولی می‌توان ادعا نمود که توان تکنولوژی کشور ما در این صنعت با اروپا برابر است. با توجه به استفاده از مواد اولیه با کیفیت بالا در تولید کاشی و سرامیک، این مواد حاوی ترکیباتی مانند سیلیس و آلومینا هستند که برای کاربرد به عنوان پوزولان یا سنگدانه در بتن مناسب‌اند (گونزالس کورومیناس و اچبریا، ۲۰۱۴). لذا یکی از راه‌کارهایی که می‌توان به منظور استفاده مجدد از ضایعات سرامیک به کار برد، استفاده از آن‌ها در بتن است که این مواد می‌توانند جایگزین سیمان یا سنگدانه‌ها گردند. کمیته اروپا (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۴) که تا سال ۲۰۰۵ فقط توصیه‌هایی را در مورد طراحی مخلوط بتن خودمتراکم^۱ به نمایندگی از فدراسیون انجمن‌های ملی اروپا صادر می‌کرد، از سال ۲۰۰۵ توصیه‌هایی را برای بازنگری دستورالعمل‌های قبلی در حضور چندین شرکت مشهور اروپایی ارائه کرده است. با این حال، این دستورالعمل‌ها عمدتاً بر طبقه‌بندی مواد و توصیه‌های کلی طراحی اختلاط تمرکز دارند و کمتر به ارتباط طرح اختلاط با مقاومت و دوام پرداخته‌اند. به طور مشابه، توصیه‌نامه ژاپنی نیز پیشنهادهای محدودی برای طراحی مخلوط بتن خودمتراکم ارائه کرده است (قدوسی و شیرزادی جاوید، ۲۰۱۹).

تاسو و لوبل (۲۰۱۲) به بررسی خواص رئولوژیک و

^۱ Self-Compacting Concrete(SCC)

به نیروی کار ماهر را کاهش داده و اجرای بتن‌های سبک را در پروژه‌ها بهبود بخشید. همچنین، استفاده از سنگدانه‌های سبک مانند پرلیت یکی از روش‌های متداول برای تولید بتن سبک است و با توجه به تأثیر آن‌ها بر کاهش مقاومت فشاری، ارائه طرح اختلاط بهینه برای بتن‌های سبک‌دانه ضروری است. از سوی دیگر، افزایش تقاضا برای ساخت‌وساز، نیاز به سیمان و سنگدانه‌های طبیعی را تشدید کرده و استفاده از ضایعات صنعتی مانند سرامیک و کاشی را به‌عنوان جایگزین ضروری ساخته است. با توجه به دشواری استفاده مجدد از ضایعات سرامیک در تولید محصولات جدید و اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع آن‌ها، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های طبیعی با این ضایعات می‌تواند مقاومت و دوام بتن را با طراحی مناسب حفظ کند. در نتیجه، این پژوهش علاوه بر کاهش ضایعات زیست‌محیطی و مصرف مصالح طبیعی، پتانسیل صرفه‌جویی اقتصادی را نیز از طریق استفاده از مواد ضایعاتی بررسی می‌کند.

بنابراین، این پژوهش با جایگزینی سنگدانه‌ها با پرلیت و ضایعات سرامیک، خواص مکانیکی و دوام بتن خودمترکم سبک را به‌منظور ارائه طرحی بهینه و پایدار جهت کاربرد در ابنیه راه، از جمله دیوارهای حائل و پایه‌های پل، ارزیابی کرده است.

۲. مواد و مصالح مصرفی

سیمان پرتلند تیپ ۲، سبک‌دانه پرلیت، سرامیک ضایعاتی، مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه (شن و ماسه طبیعی)، آب و فوق روان‌کننده از مصالح مورد استفاده در این پژوهش است که در ادامه به شرح هر یک از این مواد پرداخته شده است.

۱-۲. سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، تیپ ۲-۴۲۵ کارخانه

مکانیکی بتن سرامیکی سبک با استفاده از فسفات منیزیم که می‌تواند افزایش استحکام سریع‌تری داشته باشد و منجر به اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به بتن‌های تولید شده با سیمان پرتلند شود، پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که مقاومت فشاری و چگالی با افزایش جرم سبک‌دانه و نسبت آب به سیمان، صرف‌نظر از نوع سنگدانه‌های سبک، کاهش می‌یابند به طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه و چگالی به ترتیب از ۱۷ تا ۳۶ مگاپاسکال و ۱۶۰۰ تا ۱۸۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بوده است. همچنین، صرف‌نظر از نوع سنگدانه، افزایش نسبت آب به سیمان، مدول الاستیک، مدول گسیختگی و مقاومت برشی مستقیم را کاهش داد. ابراهیم و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خصوصیات و دوام بتن سبک سازه‌ای حاوی پرلیت پرداخته‌اند. بدین منظور، بتن با نسبت آب به سیمان کم ساخته شده و سیمان پرتلند معمولی را به ترتیب با ۵ و ۷ درصد سرباره و فوم سیلیکا جایگزین نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که وزن مخصوص بتن در مقایسه با بتن معمولی ۲۰٪ تا ۳۰٪ کاهش یافته است و نیز مقاومت فشاری برای بتن سبک سازه‌ای، به ویژه آن طرح‌هایی که حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ سنگدانه‌های پرلیت بودند، به حد مطلوب رسید. همچنین، این بتن از لحاظ عایق حرارتی نسبت به بتن معمولی برتری داشت. چینو و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی استفاده مجدد از ضایعات صنعتی و کشاورزی به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌های درشت در بتن پرداخته‌اند. بر اساس نتایج مطالعات آن‌ها، با توجه به اینکه کارایی بتن عمدتاً به جذب آب سنگدانه‌های جایگزین مورد استفاده بستگی داشت، سنگدانه‌های بتن بازیافتی، پوسته نخل روغنی و پلی‌استایرن انبساطی باعث افزایش کارایی شدند؛ در حالی که افزودن ضایعات سرامیکی و سرباره فولاد به‌عنوان سنگدانه‌های درشت باعث کاهش کارایی بتن شد. همچنین، افزایش سطح جایگزینی سنگدانه‌های درشتی که مقاومت کمتری داشتند، کاهش مقاومت فشاری را به همراه داشت.

ارائه طرح اختلاط مناسب برای بتن خودمترکم با حذف نیاز به تراکم و تسهیل در انتقال می‌تواند وابستگی

۲-۲. سبکدانه پرلیت

پرلیت یک نوع سنگ آتشفشانی از نوع سیلیکات بوده و در صورت حرارت دیدن به مقدار کافی، حدود ۴ تا ۳۰ برابر حجم اولیه خود منبسط می‌شود. انبساط پرلیت بر اثر حرارت، به دلیل وجود ۳٪ تا ۶٪ آب در ساختار سنگ پرلیت خام می‌باشد. با حرارت دادن پرلیت، آب موجود در ساختار و تخلخل‌های سنگ خام پرلیت تبخیر شده و میلیون‌ها حباب خیلی ریز در ساختار پرلیت تشکیل می‌شود. جدول ۲، بیانگر ترکیبات شیمیایی پرلیت بوده که سیلیس بیشترین درصد را بین سایر مواد تشکیل‌دهنده دارد.

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سبکدانه‌ی پرلیت

درصد موجود	نام مواد	نماد مواد شیمیایی
۷۲/۰۸	سیلیس	SiO _۲
۱۲/۹۲	آلومینا	Al _۲ O _۳
۴/۳۳	اکسید پتاسیم	K _۲ O
۳/۷۶	اکسید سدیم	Na _۲ O
۳	آب	H _۲ O
۱/۵	اکسید آهن	Fe _۲ O _۳
۰/۹	دی‌اکسید تیتانیوم	TiO _۲
۰/۸۸	اکسید کلسیم	CaO
۰/۶۳	اکسید منیزیم	MgO

سنگ پرلیت خام دارای وزن مخصوص حدود ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که پس از انبساط، وزن مخصوص آن حدوداً کمتر از یک دهم، یعنی حدود ۳۰ الی ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌شود (به‌طور میانگین، در اکثر موارد، وزن مخصوص این ماده حدود ۱۰۰ الی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد). در این پژوهش، از پرلیت کارخانه آبتین نجف‌آباد که دارای وزن

اردستان می‌باشد، که بر طبق استاندارد ملی ایران^۱ به شماره ۳۸۹ (ISIRI) تولید می‌گردد. سیمان پرتلند نوع ۲ برای ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراتاسیون متوسط در آن‌ها ضروری بوده و نیز حمله سولفات‌ها به آن‌ها در حد متوسط باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۱، ویژگی‌های شیمیایی سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق با استاندارد ملی ایران ۱۶۹۲

شماره استاندارد	سیمان پرتلند تیپ ۲	ویژگی شیمیایی
۱۶۹۲	۸	حداکثر مقدار مجاز C _۳ A درصد وزنی سیمان
۱۶۹۲	۳	حداکثر مقدار مجاز ناشی از سرخ شدن (درصد وزنی)
۱۶۹۲	۰/۷۵	حداکثر مقدار مجاز میزان باقیمانده نامحلول (درصد وزنی)
۱۶۹۲	۲۰	حداکثر مقدار مجاز SiO _۲ (درصد وزنی سیمان)
۱۶۹۲	۶	حداکثر مقدار مجاز Al _۲ O _۳ (درصد وزنی سیمان)
۱۶۹۲	۶	حداکثر مقدار مجاز Fe _۲ O _۳ (درصد وزنی سیمان)
۱۶۹۲	۵	حداکثر مقدار مجاز MgO (درصد وزنی سیمان)

^۱ Institute of Standards and Industrial Research of Iran

گرفت که بدین ترتیب درصد سرامیک ضایعاتی باقی-مانده روی هر الک به دست آمد.

جدول ۳. مشخصات و درصد ترکیبات شیمیایی سرامیک ضایعاتی

درصد	مشخصات شیمیایی
۰/۰۰۲	MnO
۰/۱	P ₂ O ₅
۳/۹۶	K ₂ O
۰/۷	MgO
۰/۰۴	CaO
۰/۹	TiO ₂
۳/۲۶	Fe ₂ O ₃
۲۰/۳۴	Al ₂ O ₃
۶۵/۱۵	SiO ₂
۴/۵۴	LOI
۰/۰۶	SO ₃

۲-۴. ماسه طبیعی

از آنجا که نوع و میزان ماسه مورد استفاده در ساخت بتن، خصوصیات مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، آیین‌نامه‌ها و استانداردها حدود دقیقی را برای ماسه مصرفی در نظر گرفته‌اند. دانه‌های گردگوشه به دلیل آن که سطح آن‌ها صیقلی می‌باشد، دارای اصطکاک داخلی کمتری بوده و بهتر روی هم می‌لغزند. لذا، در این تحقیق از ماسه طبیعی (گردگوشه) ۵-۰ میلی‌متر استفاده شد و با توجه به خودمتراکم بودن بتن مورد تحقیق، در بتن‌ریزی نیز روی همدیگر لغزیده و تمام فضای قالب را پر می‌کنند. ماسه مصرفی طبق دانه‌بندی فولر و میان‌تهی بنا بر طرح اختلاط، دانه‌بندی شد. بدین ترتیب که درصد وزن باقیمانده روی هر کدام از الک‌های ریزدانه طرح بر اساس دو دانه‌بندی ذکر شده محاسبه شد و مطابق با استاندارد (ASTM C۷۷۸) در بتن مورد استفاده قرار گرفت.

مخصوص ۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود، استفاده گردید. این کارخانه با سرندهای مخصوص، پرلیت را در چهار اندازه متفاوت ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ و ۵-۸ میلی‌متر تولید می‌کند. بدین ترتیب، از هر چهار نمونه پرلیت تولیدی تهیه گردید و سرانجام بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی، طرح اختلاط به‌عنوان ریزدانه مصرفی جایگزین ماسه، دانه‌بندی شد. قابل ذکر است که پرلیت عامل سبکی بتن سبک خودمتراکم در این تحقیق بود.

۲-۳. سبکدانه پرلیت

استفاده از ضایعات سرامیکی با توجه به ساختار مقاوم این ماده در مقابل هر گونه فرآیند بازیافت و با توجه به تولید بالای این ماده و همچنین ضایعات زیاد به علت ماهیت فیزیکی، گزینه مناسبی جهت استفاده در بتن می‌باشد. از جمله ویژگی‌های آن می‌توان به ساختار فیزیکی سخت و همچنین ساختار شیمیایی آمورف که در اثر حرارت پخت ایجاد می‌شود اشاره نمود. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، مجموع درصد سه اکسید SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ در این ماده حدود ۸۸/۷۵ درصد می‌باشد که حداقل میزان این ماده در استاندارد ASTM C۶۱۸ برابر ۷۳٪ در نظر گرفته شده است. همچنین، میزان SO₃ در این ماده برابر با ۰/۰۶ می‌باشد که حداکثر این میزان در استاندارد ۳٪ در نظر گرفته شده است.

لذا، یکی از راهکارهای ارائه شده جهت استفاده‌ی دوباره از سرامیک، استفاده از آن در بتن بوده است. این مواد به صورت ریزدانه، درشت‌دانه و یا پودر به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، سرامیک ضایعاتی به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه (شن) خواهد بود. قابل ذکر است که برای خرد نمودن سرامیک ضایعاتی جهت دانه‌بندی از دستگاه لس‌آنجلس استفاده گردید و بر طبق طرح اختلاط و دانه‌بندی‌های مورد نظر فولر و میان‌تهی، دانه‌بندی صورت

۲-۵. شن طبیعی

همانند ماسه، نوع و میزان شن مصرفی نیز در خصوصیات مکانیکی بتن حائز اهمیت است. شن مصرفی در این تحقیق، شکسته (تیز گوشه) ۱۲/۵-۵ میلی متر بوده، چگالی در حالت خشک آن برابر ۲/۵۱۸، چگالی اشباع با سطح خشک آن برابر ۲/۵۴۵ و چگالی ظاهری آن برابر ۲/۵۸۷

بود. شن مورد استفاده نیز همانند ماسه در قسمت قبل، البته با الک‌های درشت‌دانه بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی طرح اختلاط دانه‌بندی گردید و جهت استفاده در بتن مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۷-۸۸ آماده شد. الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق به‌همراه شیکر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. الک‌های مورد استفاده به‌همراه دستگاه شیکر، (الف) الک‌های ریزدانه و (ب) الک‌های درشت‌دانه

جهت تعیین آب اختلاط بتن بایستی مقدار آب لازم جهت عمل هیدراتاسیون و همچنین میزان جذب آب توسط سنگدانه‌ها، محاسبه شود. جذب آب یعنی افزایش وزن سنگدانه‌ها بر اثر آبی که در منافذ آن‌ها موجود است و به‌عنوان درصدی از وزن خشک سنگدانه‌ها بیان می‌شود. بدین ترتیب، پرلیت ۱۰۷، سرامیک ۴/۹، ماسه ۱/۶ و شن ۱/۲ درصد جذب آب داشتند.

۲-۶. آب

آب در بتن سه کاربرد دارد: آب برای شستشوی سنگدانه‌ها، آب به‌عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده بتن

و آبی که برای فرآوری بتن استفاده می‌شود. کیفیت آب مهم است؛ زیرا ناخالصی‌ها می‌توانند در گیرش سیمان اختلال ایجاد کنند. مناسب‌ترین آب برای بتن، آب آشامیدنی است. آب مورد استفاده در این تحقیق، آب شرب شهر اصفهان می‌باشد.

۲-۷. فوق روان‌کننده

بتن ایده‌آل بتنی است که میزان آب آن در حدی باشد که حداکثر مقاومت سیمان را تأمین کند و همچنین روانی لازم برای قالب‌گیری بتن را نیز تأمین نماید (پاچکو تورگال و جلالی، ۲۰۱۰). در این تحقیق، از یک فوق روان‌کننده بتن بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. این

گردید و به منظور تولید بتن روان، فاقد کلراید با سرعت بالای انتشار در آب و کاهش آب مصرفی که در نتیجه باعث بالا بردن مقاومت اولیه و نهایی بتن می‌گردد، استفاده شد. جدول ۴، مشخصات فنی فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

فوق روان‌کننده با دارا بودن خاصیت دافعه ذرات سیمان موجب پخش مناسب و یکنواختی در بتن می‌شود. علاوه بر این، مانع از نزدیک شدن مجدد ذرات به یکدیگر می‌گردد. این ویژگی باعث تأثیر روانی بیشتر، کاهش قابل توجه نسبت آب به سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت اولیه و نهایی بتن می‌شود. این فوق روان‌کننده که محصول ساختمان شیمی با کد ساشیمی ۹۱۳ است، تهیه

جدول ۴. مشخصات فنی فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات مورد استفاده در مطالعه

قهوه‌ای روشن	رنگ
آب	قابلیت انحلال
مابع	حالت فیزیکی
$0.02 \pm 1/15$ گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن مخصوص
۲۰ درجه سلسیوس	دما مورد نیاز
۰/۳ تا ۰/۷ درصد وزن سیمان	میزان مصرف
صفر	میزان یون کلر
کمتر از معادل ۵ گرم Na_2O در هر لیتر	مواد قلیایی
در صورت استفاده از درصد‌های فوق، حدود ۲ درصد به میزان هوا اضافه می‌گردد.	میزان هوازایی

حجمی عبوری سنگدانه‌ها در آن، بر اساس دانه‌بندی فولر مجموع وزن باقی‌مانده روی الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۳۵ و ۶۵ درصد می‌باشد؛ در حالی که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی مجموع وزن باقی‌مانده روی الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۵۷٪ و ۴۳٪ است. از این جهت می‌توان گفت دانه‌بندی فولر ریزدانه‌تر و دانه‌بندی میان‌تهی درشت‌دانه‌تر است. برای هر طرح اختلاط، حداقل سه نمونه استاندارد (به‌عنوان مثال، مکعب‌های $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متری برای مقاومت فشاری) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند، که این تعداد با استانداردهای متداول در تحقیقات بتن (مانند ASTM C۳۹) هم‌راستا است.

۳. طرح اختلاط مورد استفاده

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش براساس طرح دانه‌بندی فولر و میان‌تهی در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این جداول، حرف N به معنای طبیعی بودن سنگدانه‌ها (Natural)، پرلیت با حرف P، سرامیک با حرف C، دانه‌بندی فولر با حرف F و دانه‌بندی میان‌تهی با حرف M نام‌گذاری شده است. لازم به ذکر است که مصالح طبیعی درشت‌دانه و طبیعی ریزدانه به ترتیب شن ۱۲-۵ و ماسه ۵-۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، طرح ۱ و ۴ برای هر دانه‌بندی به‌عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد. نمودار دانه‌بندی فولر و میان‌تهی در شکل ۲ قابل مشاهده است و جداول ۵ و ۶، میزان درصد حجمی عبوری سنگدانه‌های متناظر با آن را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار دانه‌بندی و میزان درصد

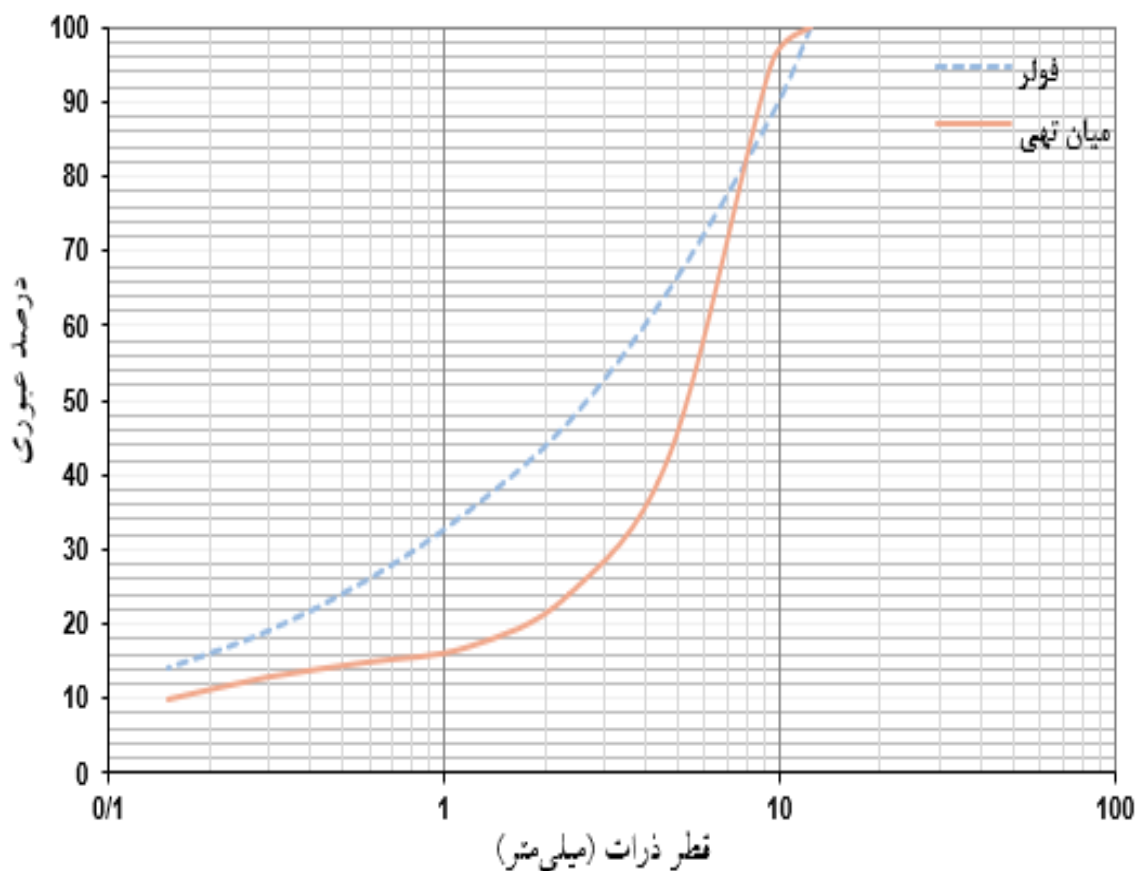
بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک خودمتراکم حاوی پرلیت و ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه

جدول ۵. طرح اختلاط مورد استفاده بر اساس دانه بندی فولر

ردیف	نام طرح	درشت دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	آب به سیمان	فوق روان کننده (kg/m ³)
۱	NN _F	طبیعی ۶۴۷	طبیعی ۱۲۰۱	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۲	NP _F	طبیعی ۶۴۷	پرلیت ۱۱۴	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۳	CP _F	سرامیک ۵۴۷	پرلیت ۱۱۴	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵

جدول ۶. طرح اختلاط مورد استفاده بر اساس دانه بندی میان تهی

ردیف	نام طرح	درشت دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	آب به سیمان	فوق روان کننده (kg/m ³)
۴	NN _M	طبیعی ۱۰۵۴	طبیعی ۷۹۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۵	NP _M	طبیعی ۱۰۵۴	پرلیت ۷۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵
۶	CP _M	سرامیک ۸۹۱	پرلیت ۷۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۴/۵



شکل ۲. نمودار دانه بندی فولر و میان تهی طرح های اختلاط

۴. روش انجام آزمایش‌ها

۴-۱. آزمایش‌های بتن خودمتراکم سبک در حالت تازه

در ابتدا، به منظور بررسی کارایی و روانی، آزمایش‌های بتن خودمتراکم سبک در حالت تازه و سپس به منظور بررسی مشخصات مکانیکی و دوام در حالت سخت شده آورده شده است. قابل ذکر است که آزمایش‌ها در حالت بتن تازه شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش حلقه J و آزمایش مخروط جریان با قیف V شکل و آزمایش‌ها در حالت بتن سخت شده شامل آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت الکتریکی و مهاجرت یون کلر بودند. شایان ذکر است که در این تحقیق از قالب‌های فولادی مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر، استوانه‌ای به قطر 10 و ارتفاع 20 سانتی‌متر و تیر خمشی با ابعاد $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر به ترتیب جهت ساخت آزمون‌هایی که آزمایش‌های کنترل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی روی آن‌ها انجام می‌شود، استفاده شد.



شکل ۳. آزمایش جریان اسلامپ

۴-۱-۲. آزمایش حلقه J

حلقه J یکی از کاراترین و راحت‌ترین آزمایش‌های بررسی قابلیت عبور بتن خودمتراکم در آزمایشگاه و به‌ویژه کارگاه است. این حلقه می‌تواند با آزمایش جریان اسلامپ و قیف V شکل مورد استفاده قرار گیرد تا ترکیبی از خاصیت پرکنندگی و عبور را ایجاد نماید. روش انجام آزمایش مشابه روشی است که در آزمایش جریان اسلامپ برقرار است. در شکل ۴، آزمایش حلقه J نشان داده شده است.



شکل ۴. آزمایش حلقه J

۴-۱-۱. آزمایش جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ از متداول‌ترین آزمایش‌های بتن خودمتراکم است. در آزمایش جریان اسلامپ، قطر دایره ایجاد شده بعد از بلند کردن مخروط که به جریان اسلامپ معروف است، به عنوان معیاری برای روانی بتن اندازه‌گیری می‌شود و زمان رسیدن بتن به قطر 50 سانتی‌متر (T_{50}) نیز به عنوان معیاری از ویسکوزیته بتن می‌باشد. در این مطالعه، آزمایش اسلامپ بر طبق استاندارد (ASTM C1611) انجام شد. در شکل ۳، آزمایش جریان اسلامپ نشان داده شده است.

شکل ۶. حوضچه‌های عمل آوری نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۵. نمونه‌های مکعبی، استوانه‌ای و تیر خمشی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۶. حوضچه‌های عمل آوری نمونه‌های مورد مطالعه

۴-۲-۱. مقاومت فشاری

در این مطالعه، نمونه‌های مکعبی جهت تعیین مقاومت مشخصه بتن‌های مکعبی با طرح‌های مختلف در نظر گرفته شد و سپس در زمان عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. در هر سری آزمایش سه نمونه جهت تعیین مقاومت فشاری جهت به دست آوردن میانگین نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت تا با به دست آوردن میانگین آن‌ها، اثر پراکندگی نتایج به دست آمده کاهش یابد. در شکل ۷، نمونه‌های مکعبی مورد استفاده در این مطالعه به همراه نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است.

همچنین، جهت تفسیر بتن با کمک حلقه J از جدول ۷ استفاده می‌شود.

جدول ۷. تفسیر بتن با کمک حلقه J

ملاحظات	درجه عبور	تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقیمد (میلی‌متر)
توانایی عبور زیاد	۰	۲۵-۰
توانایی عبور متوسط	۱	۵۰-۲۵
توانایی عبور کم	۲	۵۰<

۴-۱-۳. آزمایش مخروط جریان با قیف V شکل

در این آزمایش از یک قیف V شکل استفاده می‌گردد و با تعیین زمان خروج بتن پر شده در آن قابلیت پر کردن (روانی) به دست می‌آید. حجم قیف ۱۲ لیتر است و این وسیله برای بتن‌هایی با حداکثر اندازه سنگدانه ۲۰ میلی‌متر کاربرد دارد. این آزمایش روشی برای سنجش توانایی پرکنندگی بتن خودتراکم است. در این آزمایش، زمان از عوامل مهمی است که باید به دقت به آن توجه داشت. پخش‌شدگی در این آزمایش درجه وابستگی تا چسبناکی مخلوط بتن را نشان می‌دهد.

۴-۲. آزمایش‌های بتن خودمتراکم در حالت سخت شده

در این مرحله، آزمایش‌های گوناگونی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت الکتریکی و مهاجرت یون کلر انجام شد؛ که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است. در شکل ۵، نمونه‌های مکعبی، استوانه‌ای و تیر خمشی مورد استفاده در این تحقیق و همچنین در

تهیه شده برای آزمایش مقاومت کششی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. آزمایش مقاومت کششی



شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری

۲-۲-۴. مقاومت کششی

این آزمایش، به آزمایش برزیلی یا شکافت نیز معروف می‌باشد و برای تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن بتن براساس استاندارد ASTM C496 انجام می‌شود. در این آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نمونه استوانه‌ای پس از قرار گرفتن در گیره نگهدارنده، به گونه‌ای در زیر جک دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود که نیروی اعمالی از سوی جک در امتداد ارتفاع نمونه و بر سطح جانبی آن وارد شود. نحوه محاسبه مقاومت کششی براساس رابطه (۱) می‌باشد.

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

در این رابطه، T مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال (MPa)، P بار اعمال شده بر حسب نیوتن (N)، L طول نمونه بر حسب میلی‌متر (mm) و D قطر نمونه بر حسب میلی‌متر (mm) است. به منظور انجام آزمایش مقاومت کششی در این مطالعه، نمونه‌های استوانه‌ای با طرح‌های مختلف ساخته شد. سپس در زمان عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. قابل ذکر است که در هر سری از آزمایش، سه نمونه جهت به دست آوردن میانگین نمونه‌ها برای تعیین مقاومت کششی مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های

۲-۲-۴. مقاومت خمشی

به منظور انجام آزمون تعیین مقاومت خمشی، تیرهای خمشی به ابعاد $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه، مطابق با استاندارد INSO ۱۷۳۳۱ که مبتنی بر استاندارد ASTM C۲۹۳ است، تحت آزمون قرار گرفتند. لذا نمونه‌ها بلافاصله پس از خارج کردن از عمل‌آوری مورد آزمون قرار گرفتند تا هیچ‌گونه جمع‌شدگی در سطح بتن رخ ندهد. مقاومت خمشی به عنوان مدول گسیختگی به کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، R مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال (MPa)، P حداکثر بار اعمال شده توسط جک بر حسب نیوتن (N)، L طول دهانه بر حسب میلی‌متر (mm)، b عرض متوسط نمونه در نقطه شکست بر حسب میلی‌متر (mm) و d عمق متوسط نمونه در نقطه شکست بر حسب میلی‌متر (mm) است. قابل ذکر است که در هر سری از آزمایش برای تعیین مقاومت خمشی نیز سه نمونه جهت به دست آوردن میانگین نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۹، نمونه تیر خمشی در محفظه جک جهت آزمایش مقاومت

که در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده و نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۱۰، آزمایش مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه نشان داده شده است.



شکل ۱۰. آزمایش مقاومت الکتریکی

۴-۲-۶. مهاجرت یون کلر

این آزمایش شبیه‌سازی حالت غیرپایدار بوده و مقاومت بتن را در برابر نفوذ کلرید مورد ارزیابی قرار می‌دهد که بر اساس استاندارد AASHTO-TP۶۴ روی مخلوط‌های گوناگون انجام شده است. در این آزمایش، از نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر که از بریدن نمونه‌های استوانه‌ای به دست آمدند، استفاده گردید. نمونه‌ها پس از اشباع شدن با آب، داخل غلاف لاستیکی قرار داده شده و سطح پیرامونی آن‌ها ایزوله شد. سپس محلول سود^۱(سدیم هیدروکسید) با غلظت ۰/۳ نرمال داخل غلاف لاستیکی ریخته شد و با وجه بالایی آزمون بتنی در تماس قرار گرفت. مجموعه آماده شده داخل ظرف حاوی محلول نمک^۲(سدیم کلرید) با غلظت ۱۰٪ قرار داده شد، به نحوی که وجه پایینی آزمون در تماس با محلول نمک بود. لذا در شکل ۱۱، روند آزمایش مهاجرت یون کلر به همراه نمونه‌های دو نیم شده جهت تعیین عمق نفوذ کلرید را نشان می‌دهد.

خمش به همراه نمونه‌های شکسته شده در آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۹. آزمایش مقاومت کششی

۴-۲-۴. جذب آب و وزن مخصوص

جذب آب یکی از مشخصات بتن است که نشان‌دهنده خصوصیات ریزساختار بتن از نظر خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها با هم می‌باشد. آزمایش جذب آب مطابق استاندارد ASTM C۶۴۲-۹۷ با استفاده از آون با دمای 105 ± 5 سلسیوس روی نمونه‌های مکعبی در زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گردید.

۴-۲-۵. مقاومت الکتریکی

خواص الکتریکی بتن، ویژگی کاربردی برای نمایش نفوذپذیری و میزان جذب آب بتن است. یکی از روش‌های تعیین مقاومت الکتریکی بتن که بر اساس استاندارد AASHTO ۳۵۸-۱۷ انجام می‌شود، روش چهار نقطه با پروب و نر^۱ است. بر اساس نتایج این روش، هرچه مقاومت الکتریکی بیشتر باشد، نشان‌دهنده نفوذ کمتر املاح مضر به بتن و دوام بیشتر بتن است. بدین ترتیب، روش چهارنقطه‌ای با استفاده از دستگاهی انجام می‌شود که دارای چهار الکتروود است و این چهار الکتروود روی سطح نمونه بتن قرار گرفته و مقاومت الکتریکی نمونه تا عمق خاصی تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است

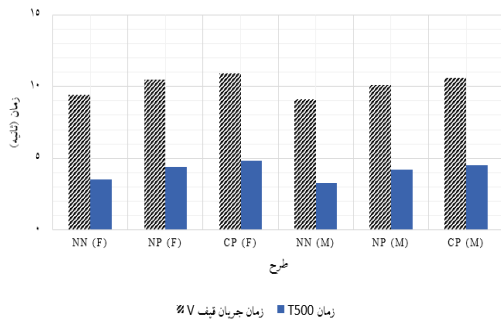
2- NaOH
3- NaCl

1 - Wenner

میلی‌متر با درجه ۱ و توانایی عبور متوسط برای هر ۶ طرح حاضر قرار گرفت.

۳-۵. قیف V

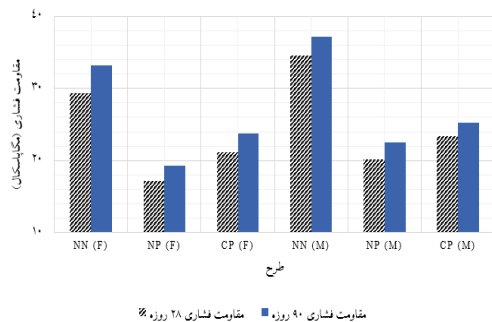
بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که بتن‌های خودمتراکم با زمان تخلیه کاملاً متفاوت در محدوده کمتر از ۶ ثانیه یا بیش از ۱۲ ثانیه نیز با موفقیت به کار برده شده‌اند. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر لزجت خمیری زیاد است. در این صورت ممکن است تأمین کارایی مورد نیاز بتن مشکل باشد. اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان‌دهنده لزجت کم و احتمال وقوع پدیده جداشدگی است. در شکل ۱۳، نتایج به دست آمده از این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۳. آزمایش قیف V

۴-۵. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۴ آمده است.



شکل ۱۴. تغییرات مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال



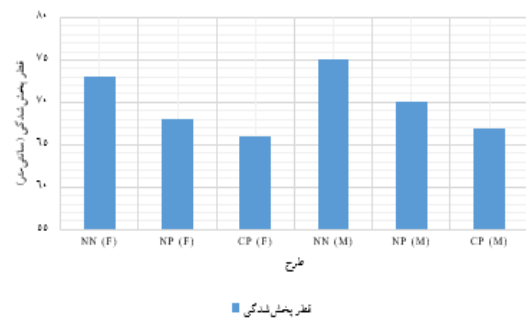
شکل ۱۱. آزمایش مهاجرت یون کلر

۵. نتایج

در این قسمت، نتایج مربوط به هر آزمایش در جداول مربوطه آورده شده است و در برخی از موارد نیز از نمودارها برای درک بهتر واقعیت‌ها کمک گرفته شده است. ابتدا خصوصیات مکانیکی و سپس دوام نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۵. اسلامپ

در شکل ۱۲، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داده شده است. تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند.

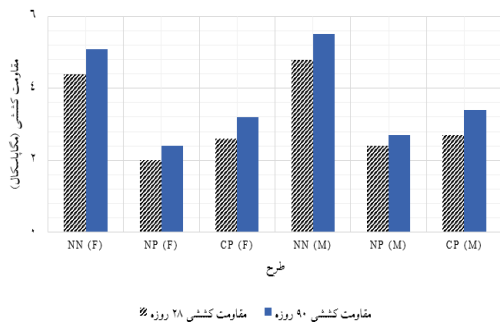


شکل ۱۲. آزمایش اسلامپ

۲-۵. حلقه J

همان‌طور که گفته شد، تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقید می‌تواند نشان‌دهنده درجه عبور بتن از بین آرماتورها باشد. لذا در این تحقیق، با توجه به جدول ۷، تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقید در محدوده ۲۵ تا ۵۰

گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۵ آمده است.



شکل ۱۵. تغییرات مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) برابر $0/41$ و $0/37$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) برابر $0/55$ و $0/53$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) برابر $0/44$ و $0/38$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) برابر $0/5$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود مقاومت کششی نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح (NN_M) که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، دارای بیشترین مقاومت کششی به میزان $4/8$ و $5/5$

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر (ریزدانه‌ی بیشتر)، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) برابر $0/28$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) برابر $0/41$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی (درشت‌دانه‌ی بیشتر)، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) برابر $0/32$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) برابر $0/42$ و $0/40$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود مقاومت فشاری نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_M که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، دارای بالاترین مقاومت فشاری به میزان $34/6$ و $37/2$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، طرح (NP_F) که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، کمترین مقاومت فشاری به میزان $17/2$ و $19/3$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را داراست.

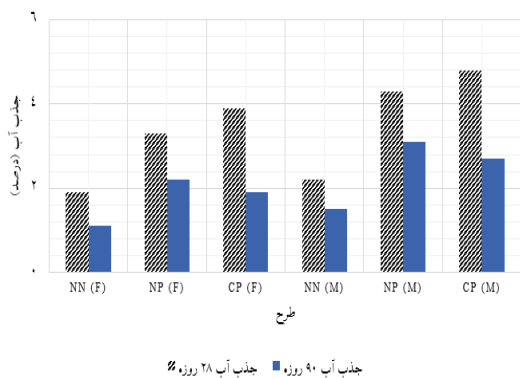
۵-۵. مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت $0/02$ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار

لذا، نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمترکم سبب بهبود مقاومت خمشی نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_M که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، دارای بالاترین مقاومت خمشی به میزان $5/6$ و $6/6$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین طرح NP_F که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، کمترین مقاومت خمشی به میزان $2/5$ و $3/4$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را داراست.

۷-۵. جذب آب

نتایج به‌دست آمده از آزمایش جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۷ آمده است.



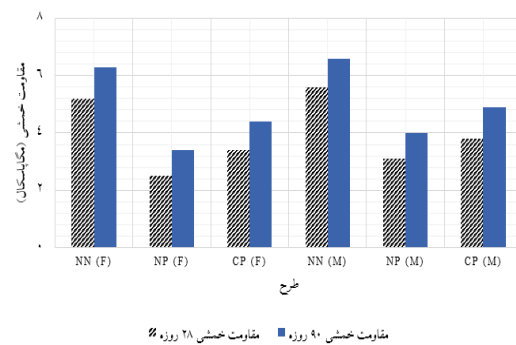
شکل ۱۷. تغییرات جذب آب بر حسب درصد

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $2/05$ و $1/73$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $1/74$ و 2 به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، طرح NP_F که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، کمترین مقاومت کششی به میزان ۲ و $2/4$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را داراست.

۶-۵. مقاومت خمشی

نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۶ آمده است.



شکل ۱۶. تغییرات مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $0/30$ و $0/35$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $0/52$ و $0/46$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $0/26$ و $0/32$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و میزان کاهش مقاومت در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $0/45$ و $0/40$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است.

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان کاهش وزن مخصوص در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $0/46$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش وزن مخصوص در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_F) برابر $0/42$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان کاهش وزن مخصوص در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $0/33$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان کاهش وزن مخصوص در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $0/27$ در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های پرلیت و سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبک سبب کاهش وزن مخصوص نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_F و NN_M که به ترتیب بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، دارای بالاترین وزن مخصوص به میزان 2430 و 2440 کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده‌اند. همچنین، طرح CP_F که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، کمترین وزن مخصوص به میزان 1310 و 1325 کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را به دلیل مقادیر بالای سنگدانه‌ی سبک (پرلیت) داراست.

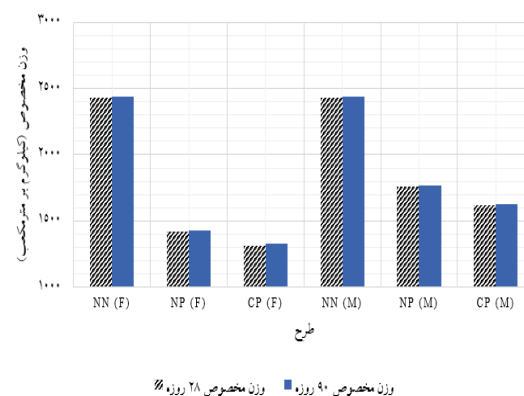
۹-۵. مقاومت الکتریکی

انجمن بتن آمریکا مقادیر مشخصی برای مقاومت الکتریکی و ارتباط آن با احتمال خوردگی بتن پیشنهاد

بوده است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک- پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $2/18$ و $1/8$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان افزایش جذب آب در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی- پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی- طبیعی (NN_M) برابر $1/95$ و $2/06$ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، نتایج نشان می‌دهد که وجود سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود جذب آب نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_F که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، دارای کمترین مقدار جذب آب به میزان $1/9\%$ و $1/1\%$ درصد به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، طرح CP_M و NP_M که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، به ترتیب بیشترین جذب آب به میزان $4/8\%$ در سن ۲۸ روزه و $3/1\%$ در سن ۹۰ روزه را داراست.

۸-۵. وزن مخصوص

نتایج به‌دست آمده از آزمایش وزن مخصوص طرح‌های موجود در شکل ۱۸ آمده است.



شکل ۱۸. تغییرات وزن مخصوص بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) با کاهش ۰/۲۹ و ۰/۰۶ برابری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) با کاهش ۰/۲۵ و ۰/۳۵ برابری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا طرح CP_M با توجه به جدول، از احتمال خوردگی کمتری نسبت به طرح NP_M برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمترکم سبب بهبود مقاومت الکتریکی نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. سرانجام، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_F و NN_M که به ترتیب بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، دارای بالاترین مقاومت الکتریکی به میزان ۵۷/۹ و ۵۴/۶ کیلو اهم سانتی متر و کمترین احتمال خوردگی در سن ۹۰ روزه بوده‌اند.

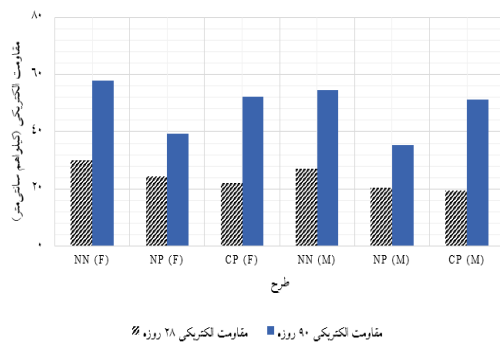
۵-۱۰. مهاجرت یون کلر

در این آزمایش، نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در مخزن محلول ۱۰٪ نمک طعام به‌عنوان محلول کاتولیت قرار داده شده و محلول ۰/۳ مول سدیم هیدروکسید به‌عنوان آنولیت روی آن‌ها ریخته شد. سرانجام، با پاشیدن محلول ۰/۱ مول نیترات نقره روی نمونه‌های دو نیم شده و اندازه‌گیری عمق ناحیه تغییر رنگ داده، عمق نفوذ کلرید تعیین گردید. عمق نفوذ در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

نموده است که در جدول ۸ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹، نتایج مقاومت الکتریکی ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داده شده است.

جدول ۸. ارتباط مقاومت الکتریکی بتن و احتمال خوردگی

مقاومت الکتریکی ویژه (کیلو اهم سانتی متر)	بزرگتر یا مساوی ۱۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰ تا ۵۰	کوچک تر یا مساوی ۱۰
احتمال خوردگی	ناچیز	کم	متوسط	زیاد



شکل ۱۹. تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب کیلو اهم سانتی متر

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (GP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) با کاهش ۰/۲۶ و ۰/۱ برابری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) با کاهش ۰/۱۹ و ۰/۳۲ برابری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا طرح GP_F با توجه به جدول، از احتمال خوردگی کمتری نسبت به طرح NP_F برخوردار است. در دسته‌بندی اختلاط بر

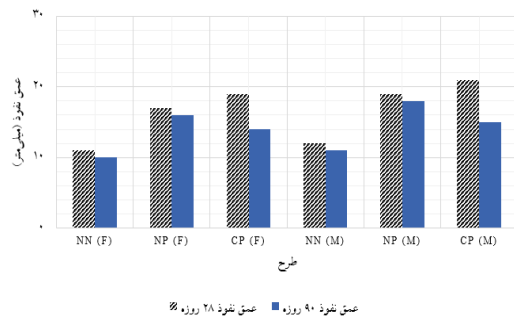
که به ترتیب بر اساس دانه‌بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، دارای کمترین عمق نفوذ به میزان ۱۰ و ۱۱ میلی-متر در سن ۹۰ روزه بوده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش با جایگزینی سنگدانه‌ها با پرلیت و ضایعات سرامیک، خواص مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم سبک را به منظور ارائه طرحی بهینه و پایدار جهت کاربرد در ابنیه راه، از جمله دیوارهای حائل و پایه‌های پل، ارزیابی کرده است.

۱- تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند. همچنین، در این تحقیق، تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقید در محدوده‌ی ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر با درجه‌ی ۱ و توانایی عبور متوسط برای هر شش طرح حاضر قرار گرفت و در رده‌ی لزجت VS_2/VF_2 طبقه‌بندی شد. البته تمامی طرح‌ها در هر دانه‌بندی نسبت به طرح شاهد خود، به دلیل تعداد زیاد منافذ در ساختار و جذب آب زیاد پرلیت، همچنین خاصیت سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی که باعث ایجاد چسبندگی بیشتر در نمونه‌های بتن خودمتراکم می‌شوند، کاهش قطر جریان اسلامپ (روانی) و به تبع آن افزایش زمان جریان قیف V (لزجت) را در پی داشت. به طوری که مقدار بیشتر پرلیت در دانه‌بندی فولر و مقدار بیشتر سنگدانه سرامیک ضایعاتی در دانه‌بندی میان‌تهی این موضوع را بهتر نشان داد.

۲- از لحاظ مشخصات مکانیکی، طرح NN_M حاوی درشت‌دانه و ریزدانه‌ی طبیعی که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شد، دارای بیشترین مقاومت فشاری (۳۴/۶ و ۳۷/۲)، کششی (۴/۸ و ۵/۵) و خمشی (۵/۶ و ۶/۶) مگاپاسکال، به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، طرح NP_F حاوی درشت‌دانه طبیعی و پرلیت که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، دارای



شکل ۲۰. تغییرات عمق نفوذ در مهاجرت یون کلر

برحسب میلی‌متر

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) با افزایش $1/73$ و $1/4$ برای به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_F) با افزایش $1/55$ و $1/6$ برای به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، طرح CP_F در سن بالا از عمق نفوذ کمتری نسبت به طرح NP_F برخوردار است. در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی، میزان تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) با افزایش $1/75$ و $1/36$ برای به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و میزان تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی-پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه‌های طبیعی-طبیعی (NN_M) با افزایش $1/58$ و $1/67$ برای به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا، طرح CP_M در سن بالا از عمق نفوذ کمتری نسبت به طرح NP_M برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود عمق نفوذ نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می‌گردد. سرانجام با توجه به شکل، مشخص گردید که طرح NN_M و NN_F

۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین، طرح CP_M حاوی سرامیک ضایعاتی و پرلیت و NP_M حاوی درشت‌دانه طبیعی و پرلیت که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی ساخته شدند، بیشترین مقدار جذب آب ($۰.۴/۸\%$ و $۰.۳/۱\%$)، کمترین مقاومت الکتریکی ($۱۹/۳$ و $۳۵/۴$ کیلو اهم سانتی‌متر) و بیشترین عمق نفوذ (۲۱ و ۱۸ میلی‌متر) به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را دارا بودند. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، مقدار جذب آب، مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ طرح‌های اختلاط به روش فولر که از دانه‌بندی ریزتری نسبت به طرح‌های میان‌تهی برخوردار بوده‌اند، بهبود بیشتری داشته است. مشخص است که تا درصدی معین، هرچه سنگدانه‌های موجود در بتن خودمتراکم از ابعاد ریزتری برخوردار باشند، تراکم بهتر، نفوذپذیری کمتر و مقاومت الکتریکی بالاتری حاصل می‌گردد.

۵- مقایسه طرح‌های NP_F با CP_F در دانه‌بندی فولر و NP_M با CP_M در دانه‌بندی میان‌تهی نشان داد که جذب آب نمونه‌های ۹۰ روزه CP_M و CP_F که حاوی سرامیک ضایعاتی هستند، به طور معنی‌داری کمتر از نمونه‌های ۲۸ روزه می‌باشد. دلیل این پدیده می‌تواند واکنش تأخیری پوزولان سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی با بلورهای هیدروکسید کلسیم تشکیل شده برای تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته باشد که بعد از ۹۰ روز می‌تواند تقریباً کامل شود. تشکیل ثانویه این ژل می‌تواند منافذ را پر کند و در نتیجه نفوذپذیری را کاهش دهد. همچنین، با توجه به دلیل ذکر شده، در آزمایش‌های دوام طرح CP_F و CP_M در سن ۹۰ روزه، کاهش عمق نفوذ کلر و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به سن ۲۸ روزه مشاهده شد.

کمترین مقاومت فشاری ($۱۷/۲$ و $۱۹/۳$)، کششی (۲ و $۲/۴$) و خمشی ($۲/۵$ و $۳/۴$) مگاپاسکال، به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، مقاومت مکانیکی طرح‌های اختلاط به روش میان‌تهی که از دانه‌بندی درشت‌تری نسبت به طرح‌های فولر برخوردار بوده‌اند، بهبود بیشتری داشته است. مشخص است که تا درصدی معین، هرچه سنگدانه‌های موجود در بتن خودمتراکم از ابعاد بزرگتری برخوردار باشند، مقاومت بالاتری حاصل می‌گردد.

۳- مقایسه طرح‌های NP_F با CP_F در دانه‌بندی فولر و NP_M با CP_M در دانه‌بندی میان‌تهی، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی (CP_F) و (CP_M) را در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد. عامل مهم در کسب این مقاومت، استفاده از سنگدانه سرامیک ضایعاتی می‌باشد. خاصیت پوزولانی سنگدانه سرامیک ضایعاتی هنگام مجاورت با آب و سایر سنگدانه‌ها تشکیل مواد پایدار داده و خاصیت چسبندگی بین سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، سنگدانه‌های سرامیک ضایعاتی به دلیل داشتن بافت سطحی زبر، چسبندگی مناسبی با خمیر سیمان و سایر اجزا ایجاد می‌کنند که می‌تواند از عوامل دیگر در افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی این دو طرح باشد.

۴- از لحاظ دوام، طرح NN_F حاوی درشت‌دانه و ریزدانه‌ی طبیعی که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته شد، دارای کمترین مقدار جذب آب ($۰.۱/۹\%$ و $۰.۱/۱\%$)، بیشترین مقاومت الکتریکی ($۳۰/۱$ و $۵۷/۹$ کیلو اهم سانتی‌متر) و کمترین عمق نفوذ (۱۱ و ۱۰ میلی‌متر) به ترتیب در سنین

۷. مراجع

- Aitcin, P. C. 1998. "High performance concrete". CRC Press.
- Chinnu, S. N., Minnu, S. N., Bahurudeen, A. and Senthilkumar, R. 2021. "Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: A step towards cleaner production of concrete". Constr. Build. Mater. 287: 123056.
- Gonzalez-Corominas, A. and Etxeberria, M. 2014. "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates". Constr. Build. Mater., 68: 618-626.

- Halicka, A., Ogrodnik, P. and Zegardlo, B. 2013. "Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 48: 295-305.
- Hosseini, Z. 2019. "Investigation of the effect of perlite powder and recycled sand on the changes in weight and compressive strength of concrete". Fifth International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Green City, Hamadan. [In Persian]
- Ibrahim, M., et al. 2020. "Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate". *Int. J. Concrete Struct. Mater.*, 14: 1-15.
- Iranian National Standard 1692. 1976. Chemical analysis of cement - Measurement of the main elements of Portland cement. [In Persian]
- Kurt, M., et al. 2016. "The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete". *Constr. Build. Mater.*, 103: 36-46.
- Lane, D. S., Detwiler, R. J. and Douglas Hooton, R. 2010. "Testing transport properties of concrete". *Concrete Int.*, 32(11): 33-38.
- Lopez, V., et al. 2007. "Eco-efficient concretes: Impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete". *Biosyst. Eng.*, 96: 559-564.
- Okamura, H. and Ouchi, M. 1998. "Self-compacting high performance concrete". *Progress Struct. Eng. Mater.*, 1(4): 378-383.
- Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. 2010. "Reusing ceramic wastes in concrete". *Constr. Build. Mater.*, 24(5): 832-838.
- Puertas, F., et al. 2008. "Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production". *Cement Concrete Compos.*, 30(9): 798-805.
- Qudousi, P. and Shirzadi Javid, A. 2019. "Effect of constraint on shrinkage and paste settlement of repair materials based on self-compacting concrete". *Omran Modares*, 10(4): 25-32.
- Schmidt, W., et al. 2014. "Effects of the characteristics of high range water reducing agents and the water to powder ratio on rheological and setting behavior of self-consolidating concrete". *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 3(2): 127-141.
- Tassew, S. T. and Lubell, A. S. 2012. "Mechanical properties of lightweight ceramic concrete". *Mater. Struct.*, 45: 561-574.
- Tennich, M., Ben Ouezdou, M. and Kallel, A. 2017. "Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack". *Constr. Build. Mater.*, 135: 335-342.