



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



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: 2024-11-12

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 kilohm-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), 43-64. <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/>)



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 به عنوان 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. به منظور 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) به ترتیب 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 کیلوهم سانتی‌متر) و کمترین عمق نفوذ (۱۱ و ۱۰ میلی‌متر) به ترتیب 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

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35905.1701>

سرامیک به عنوان سنگدانه. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۴۳-۶۴

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 پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. بتن به عنوان یک ماده ی ساختمانی حدود دو قرن است که در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. بر طبق مطالعات انجام شده، میزان کل بتنی که در طول یک سال در جهان مصرف می گردد، 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 نوآوری های مهم در فناوری بتن به شمار می رود که با ویژگی های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار مهندسين قرار داده است که با استفاده از آن می توان بر مشکلات ناشی از عدم تراکم مناسب بتن معمولی در سازه های بتنی فائق آمد. آسانی دسترسی به اجزای تشکیل دهنده، شکل پذیری و پایداری نسبتاً زیاد این مخلوط نیز باعث توجه روزافزون به این بتن شده است (نتیج و همکاران، ۲۰۱۷). در مناطق زلزله خیز، کاهش وزن سازه ها از طریق استفاده از بتن سبک می تواند به بهبود رفتار لرزه ای کمک کند، که این امر یکی از انگیزه های توسعه بتن خودتراکم سبک محسوب می شود. بتن خودمتراکم با سنگدانه سبک وزن، ترکیبی از خواص مطلوب بتن با سنگدانه سبک است که نیازی به ارتعاش خارجی ندارد و می تواند به محل برسد، قالب را پر کند و آرماتور را بدون هیچ گونه آب انداختگی و جداسازی در بر گیرد (کورت و همکاران، ۲۰۱۶). لذا ترکیب خصوصیت خودتراکمی و سبکی در بتن می تواند اثرات مطلوبی بر خواص مکانیکی و رئولوژیک آن داشته باشد. رشد جمعیت و توسعه صنعتی به افزایش تقاضا برای ساخت و ساز 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 می کند. بسیاری از ضایعات ساختمانی برای مدت طولانی در محیط زیست باقی می ماند و برخی از آن ها به دلیل غیرقابل تجدید بودن و نیاز به فرآیندهای بازیافت پرمصرف انرژی و آلاینده، اثرات زیست محیطی قابل توجهی دارند (هالیکا و همکاران، ۲۰۱۳). از سوی دیگر، کاشی و سرامیک به طور گسترده در ساخت و ساز جهانی استفاده می شوند و حجم بالایی از ضایعات را تولید می کنند. در جهان، عمده تولید کنندگان این صنعت کشورهای اسپانیا، ایتالیا و ترکیه می باشند؛ ولی می توان 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 راه کارهایی که می توان به منظور استفاده مجدد از ضایعات سرامیک به کار برد، استفاده از آن ها در بتن است که این مواد می توانند جایگزین سیمان یا سنگدانه ها گردند. کمیته اروپا (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۴) که تا سال ۲۰۰۵ فقط توصیه هایی را در مورد طراحی مخلوط بتن خودمتراکم^۱ به نمایندگی از فدراسیون انجمن های ملی اروپا صادر می کرد، از سال ۲۰۰۵ توصیه هایی را برای بازنگری دستورالعمل های قبلی در حضور چندین شرکت مشهور اروپایی ارائه کرده است. با این حال، این دستورالعمل ها عمدتاً بر طبقه بندی مواد و توصیه های کلی طراحی اختلاط تمرکز دارند و کمتر به ارتباط طرح اختلاط با مقاومت و دوام پرداخته اند. به طور مشابه، توصیه نامه ژاپنی نیز پیشنهاد های 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)

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 به‌طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه و چگالی به‌ترتیب 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 به‌ترتیب 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 به عنوان 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 خودمتراکم با حذف نیاز به تراکم و تسهیل در انتقال می‌تواند وابستگی

به نیروی کار ماهر را کاهش داده و اجرای بتن‌های سبک را در پروژه‌ها بهبود بخشد. 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 خودمتراکم 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.

۲-۱. سیمان

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

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

نماد مواد شیمیایی	نام مواد	درصد موجود
Si O ₂	سیلیس	۷۲/۰۸
Al ₂ O ₃	آلومینا	۱۲/۹۲
K ₂ O	اکسید پتاسیم	۴/۳۳
Na ₂ O	اکسید سدیم	۳/۷۶
H ₂ O	آب	۳
Fe ₂ O ₃	اکسید آهن	۱/۵
Ti O ₂	دی‌اکسید تیتانیوم	۰/۹
CaO	اکسید کلسیم	۰/۸۸
MgO	اکسید منیزیم	۰/۶۳

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

سیمان	شماره استاندارد	ویژگی شیمیایی
پرتلند تیپ ۲	ملی ایران برای روش آزمون مربوطه	
حد اکثر مقدار مجاز	۸	C ₃ A درصد وزنی سیمان
حد اکثر مقدار مجاز	۳	کاهش وزن ناشی از سرخ شدن (درصد وزنی)
حد اکثر مقدار مجاز	۰/۷۵	میزان باقیمانده نامحلول (درصد وزنی)
حد اکثر مقدار مجاز	۲۰	Si O ₂ (درصد وزنی سیمان)
حد اکثر مقدار مجاز	۶	Al ₂ O ₃ (درصد وزنی سیمان)
حد اکثر مقدار مجاز	۶	Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی سیمان)
حد اکثر مقدار مجاز	۵	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 _۲ O _۵
۳/۹۶	K _۲ O
۰/۷	MgO
۰/۰۴	CaO
۰/۹	Ti O _۲
۳/۲۶	Fe _۲ O _۳
۲۰/۳۴	Al _۲ O _۳
۶۵/۱۵	Si O _۲
۴/۵۴	LOI
۰/۰۶	SO _۳

۲-۴. ماسه طبیعی

از آنجا که نوع و میزان ماسه مورد استفاده در ساخت بتن، خصوصیات مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، آیین نامه‌ها 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) ۰-۵ 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 Fe_2O_3 ، Al_2O_3 و SiO_2 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 SO_3 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) $۵/۵-۱۲$ 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 $ASTM C ۱۲۷-۸۸$ آماده شد. الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق به همراه شیکر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. الک‌های مورد استفاده به همراه 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 به عنوان 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 به عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده بتن و آبی

که برای فراآوری 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 کاهنده 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

رنگ	قهوه‌ای روشن
قابلیت انحلال	آب
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص	$1.02 \pm 1/15$ گرم بر سانتی‌متر مکعب
دما مورد نیاز	۲۰ درجه سلسیوس
میزان مصرف	۰/۳ تا ۰/۷ درصد وزن سیمان
میزان یون کلر	صفر
مواد قلیایی	کمتر از معادل ۵ گرم Na_2O در هر لیتر
میزان هوازایی	در صورت استفاده از درصد‌های فوق، حدود ۲ درصد به میزان هوا اضافه می‌گردد.

سنگدانه‌ها در آن، بر اساس دانه‌بندی فولر مجموع وزن باقی‌مانده روی الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به‌ترتیب ۳۵ و ۶۵ درصد می‌باشد؛ در حالی که بر اساس دانه‌بندی میان‌تهی مجموع وزن باقی‌مانده روی الک‌های درشت‌دانه و ریزدانه به‌ترتیب 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 به‌ترتیب شن ۵-۱۲ 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 حجمی عبوری

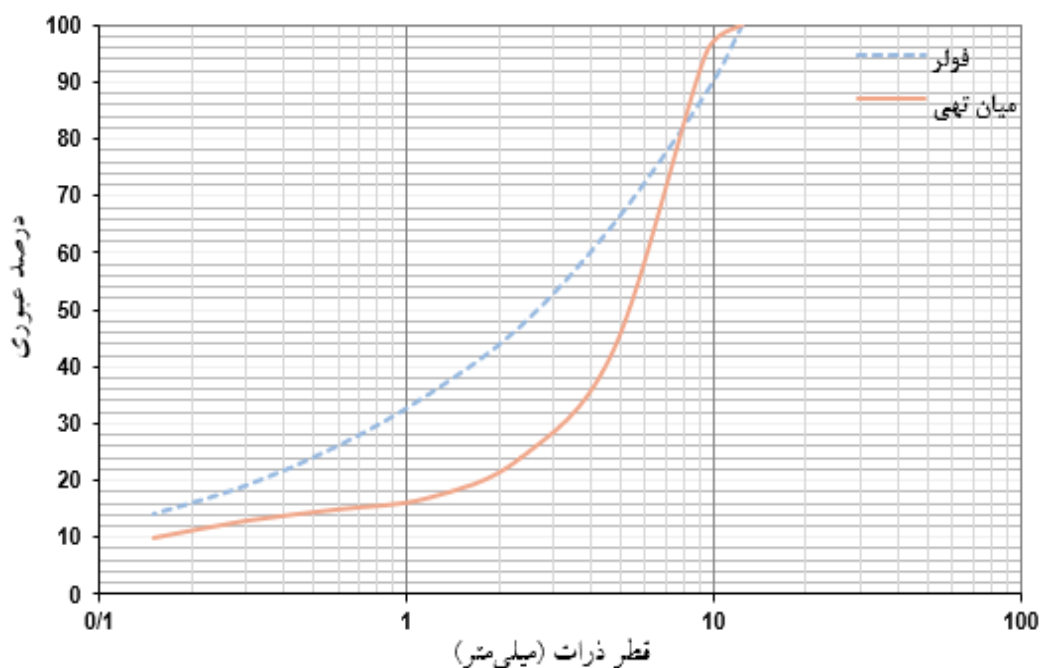
بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن سبک خودمتراکم حاوی پرلیت و ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه

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



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 به ویژه 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. 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 ۱۰ و ارتفاع ۲۰ 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.

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 ۵۰ سانتی-متر (T_{50}) نیز به عنوان معیاری از ویسکوزیته بتن می‌باشد. در این مطالعه، آزمایش اسلامپ بر طبق استاندارد (ASTM C 1611) 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 عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. در هر سری آزمایش سه نمونه جهت تعیین مقاومت فشاری جهت به‌دست آوردن میانگین نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت تا با به‌دست آوردن میانگین آن‌ها، اثر پراکندگی نتایج به‌دست 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

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

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) به‌دست 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 پراکندگی 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



شکل ۸. آزمایش مقاومت کششی



شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری

۴-۲-۳. مقاومت خمشی

به منظور انجام آزمون تعیین مقاومت خمشی، تیرهای خمشی به ابعاد $50 \times 10 \times 10$ سانتی متر در زمان عمل آوری 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 عمل آوری مورد آزمون قرار گرفتند تا هیچ گونه جمع-شدگی 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 میلی متر (mm)، b عرض متوسط نمونه در نقطه شکست بر حسب میلی متر (mm) و d عمق متوسط نمونه در نقطه شکست بر حسب میلی متر (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 خمشی به همراه نمونه‌های شکسته شده در آزمایش نشان داده شده است.

۴-۲-۲. مقاومت کششی

این آزمایش، به آزمایش برزیلی یا شکافت نیز معروف می‌باشد و برای تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن بتن براساس استاندارد ASTM C۴۹۶ انجام می‌شود. در این آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر 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 میلی متر (mm) و D قطر نمونه بر حسب میلی متر (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 تهیه شده برای آزمایش مقاومت کششی در شکل ۸ نشان داده شده است.

عمل آوری 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 شبیه سازی حالت غیرپایدار بوده و مقاومت بتن را در برابر نفوذ کلرید مورد ارزیابی قرار می دهد که بر اساس استاندارد AASHTO-TP۶۴ روی مخلوط های گوناگون انجام شده است. در این آزمایش، از نمونه هایی به قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۵۰ میلی متر که از بریدن نمونه های استوانه ای به دست آمدند، استفاده گردید. نمونه ها پس از اشباع شدن با آب، داخل غلاف لاستیکی قرار داده شده و سطح پیرامونی آن ها ایزوله شد. سپس محلول سود^۱ (سدیم هیدروکسید) با غلظت ۰/۳ نرمال داخل غلاف لاستیکی ریخته شد و با وجه بالایی آزمونه 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 آزمونه در تماس با محلول نمک بود. لذا در شکل ۱۱، روند آزمایش مهاجرت یون کلر به همراه نمونه های دو نیم شده جهت تعیین عمق نفوذ کلرید را نشان می دهد.



شکل ۹. آزمایش مقاومت کششی

۴-۲-۴. جذب آب و وزن مخصوص

جذب آب یکی از مشخصات بتن است که نشان دهنده خصوصیات ریزساختار بتن از نظر خلل و فرج و پیوستگی آن ها با هم می باشد. آزمایش جذب آب مطابق استاندارد ASTM C۹۷-۹۲ با استفاده از آون با دمای $105 \pm$ سلسیوس روی نمونه های مکعبی در زمان عمل آوری 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 روش های تعیین مقاومت الکتریکی بتن که بر اساس استاندارد AASHTO ۳۵۸-۱۷ انجام می شود، روش چهار نقطه با پروب و نر^۱ است. بر اساس نتایج این روش، هرچه مقاومت الکتریکی بیشتر باشد، نشان دهنده نفوذ کمتر املاح مضر به بتن و دوام بیشتر بتن است. بدین ترتیب، روش چهارنقطه ای با استفاده از دستگاهی انجام می شود که دارای چهار الکترود است و این چهار الکترود روی سطح نمونه بتن قرار گرفته و مقاومت الکتریکی نمونه تا عمق خاصی تعیین می گردد. لازم به ذکر است که در این آزمایش از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر استفاده شده و نمونه ها در زمان

۳- NaCl

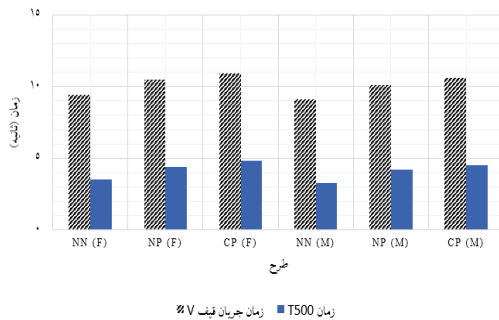
۱ - Wenner

۲- NaOH

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

۳-۵. قیف V

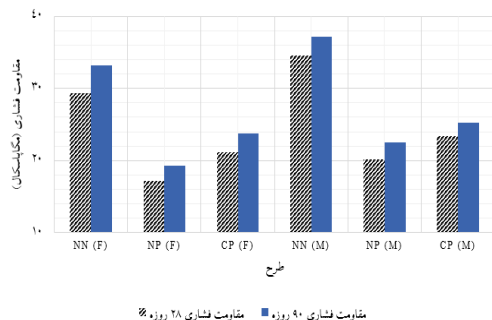
بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که بتن‌های خودمتراکم با زمان تخلیه کاملاً متفاوت در محدوده کمتر از ۶ ثانیه یا بیش از ۱۲ ثانیه نیز با موفقیت به کار برده شده‌اند. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر لزجت خمیری زیاد است. در این صورت ممکن است تأمین کارایی مورد نیاز بتن مشکل باشد. اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان‌دهنده لزجت کم و احتمال وقوع پدیده جداشدگی است. در شکل ۱۳، نتایج به‌دست 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 به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۴ آمده است.



شکل ۱۴. تغییرات مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال



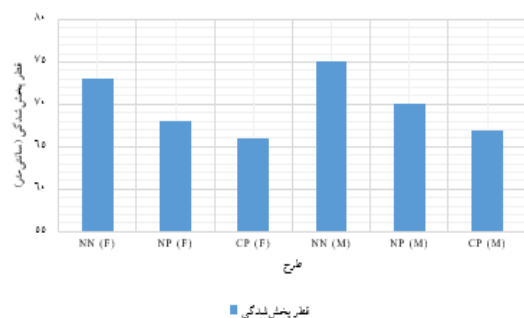
شکل ۱۱. آزمایش مهاجرت یون کلر

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

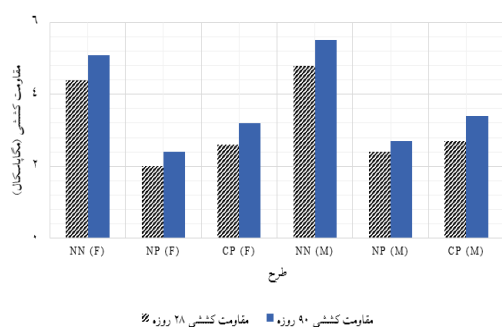
در شکل ۱۲، نتایج حاصل از این آزمایش نشان داده شده است. تمامی طرح‌ها در محدوده مجاز اسلامپ روانی (۵۵ تا ۸۵ سانتی‌متر) قرار داشته‌اند.



شکل ۱۲. آزمایش اسلامپ

۲-۵. حلقه‌ی 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 محدوده‌ی ۲۵ تا ۵۰



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 $5/5$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. همچنین، طرح NP_F که بر اساس دانه‌بندی فولر ساخته

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.

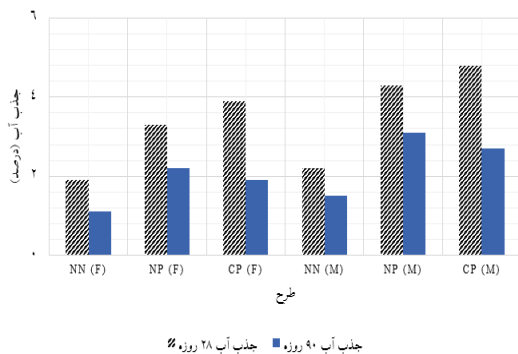
۵-۵. مقاومت کششی

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

مقایسه با یکدیگر می‌گردد. در نهایت، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_M که بر اساس دانه‌بندی میان تهی 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 $3/4$ و $2/5$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را داراست.

۵-۷. جذب آب

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



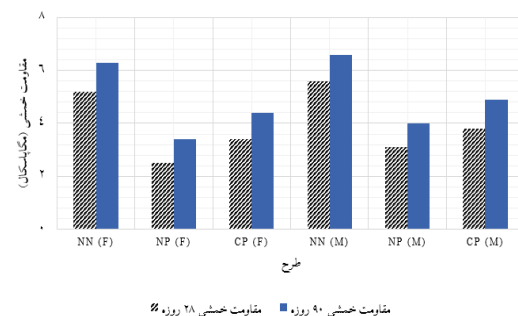
شکل ۱۷. تغییرات جذب آب بر حسب درصد

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 روز 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 روز 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

شد، کمترین مقاومت کششی به میزان ۲ و $2/4$ مگاپاسکال به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را داراست.

۵-۶. مقاومت خمشی

نتایج به دست 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 $0/35$ و $0/30$ 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 $0/52$ و $0/46$ 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 $0/32$ و $0/26$ 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 $0/45$ 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 خمشی نسبت به طرح حاوی سنگدانه‌های طبیعی و پرلیت در

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.

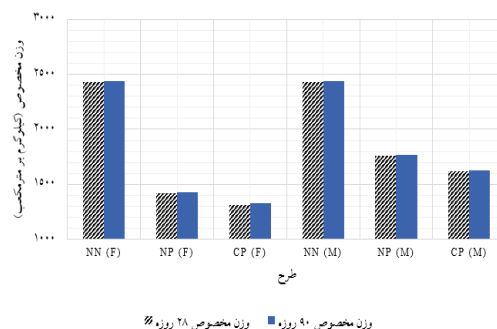
۹-۵. مقاومت الکتریکی

انجمن بتن آمریکا مقادیر مشخصی برای مقاومت الکتریکی و ارتباط آن با احتمال خوردگی بتن پیشنهاد نموده است که در جدول ۸ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹، نتایج مقاومت الکتریکی ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داده شده است.

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 $4/8$ و $4/8$ درصد در سن ۲۸ روزه و $3/1$ درصد در سن ۹۰ روزه را داراست.

۵-۸. وزن مخصوص

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

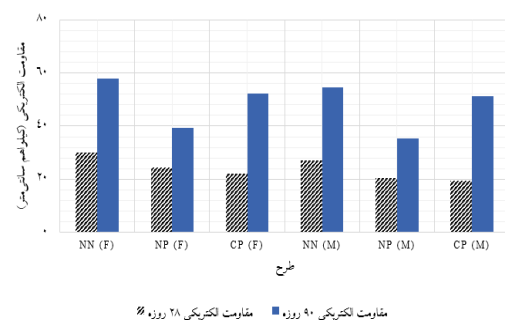


شکل ۱۸. تغییرات وزن مخصوص بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

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 - پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد

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



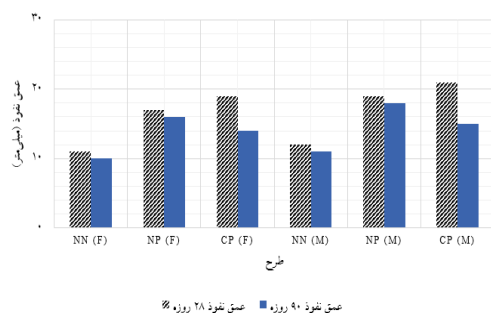
شکل ۱۹. تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب کیلو اهم سانتی متر

در دسته بندی اختلاط بر اساس دانه بندی فولر، میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه های سرامیک-پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه های 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 سنگدانه های طبیعی-پرلیت (NP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه های طبیعی-طبیعی (NN_F) با کاهش ۰/۱۹ و ۰/۳۲ برابری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بوده است. لذا طرح CP_F با توجه به جدول، از احتمال خوردگی کمتری نسبت به طرح NP_F برخوردار است. در دسته بندی اختلاط بر اساس دانه بندی میان تهی، میزان تغییرات مقاومت الکتریکی در طرح حاوی سنگدانه های سرامیک-پرلیت (CP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه های 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 سنگدانه های طبیعی-پرلیت (NP_M) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه های 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 می دهد که وجود سنگدانه های سرامیک ضایعاتی در بتن خودمتراکم سبب بهبود مقاومت الکتریکی نسبت به طرح حاوی سنگدانه های طبیعی و پرلیت در مقایسه با یکدیگر می گردد. سرانجام، با توجه به شکل مشخص گردید که طرح NN_F و NN_M که به ترتیب بر اساس دانه بندی فولر و میان تهی 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 بوده اند.

۵-۱۰. مهاجرت یون کلر

در این آزمایش، نمونه هایی به قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۵۰ میلی متر در مخزن محلول ۱۰٪ نمک طعام به عنوان محلول کاتولیت قرار داده شده و محلول ۰/۳ مول سدیم هیدروکسید به عنوان آنولیت روی آن ها ریخته شد. سرانجام، با پاشیدن محلول ۰/۱ مول نیترات نقره روی نمونه های دو نیم شده و اندازه گیری عمق ناحیه تغییر رنگ داده، عمق نفوذ کلرید تعیین گردید. عمق نفوذ در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰. تغییرات عمق نفوذ در مهاجرت یون کلر بر حسب میلی متر

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 درجه ی 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. به‌طوری 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 میان تهی 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، به‌ترتیب 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 کمترین مقاومت فشاری (۱۷/۲ و ۱۹/۳)، کششی (۲ و ۲/۴) و خمشی (۲/۵ و ۳/۴) مگاپاسکال، به‌ترتیب 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 بهتری داشته است. مشخص است که تا درصدی معین، هرچه سنگدانه‌های

در دسته‌بندی اختلاط بر اساس دانه‌بندی فولر، میزان تغییرات عمق نفوذ در طرح حاوی سنگدانه‌های سرامیک-پرلیت (CP_F) نسبت به طرح شاهد با سنگدانه-های طبیعی-طبیعی (NN_F) با افزایش $1/73$ و $1/4$ برابری به‌ترتیب 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 $1/6$ برابری به‌ترتیب 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 سنگدانه-های طبیعی-طبیعی (NN_M) با افزایش $1/75$ و $1/36$ برابری به‌ترتیب 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 $1/67$ برابری به‌ترتیب 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_F و NN_M که به ترتیب بر اساس دانه بندی فولر و میان‌تهی ساخته شدند، دارای کمترین عمق نفوذ به میزان ۱۰ و ۱۱ میلی‌متر 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 به‌منظور ارائه طرحی بهینه و پایدار جهت کاربرد در

مقاومت الکتریکی ($19/3$ و $35/4$ کیلو اهم سانتی متر) و بیشترین عمق نفوذ (21 و 18 میلی متر) به ترتیب در سنین 28 و 90 روزه را دارا بودند. لذا، می توان نتیجه گرفت که در حالت کلی، مقدار جذب آب، مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ طرح های اختلاط به روش فولر که از دانه بندی ریزتری نسبت به طرح های میان تهی برخوردار بوده اند، بهبود بهتری داشته است. مشخص است که تا درصدی معین، هرچه سنگدانه های موجود در بتن خودمتراکم از ابعاد ریزتری برخوردار باشند، تراکم بهتر، نفوذپذیری کمتر و مقاومت الکتریکی بالاتری حاصل می گردد.

۵- مقایسه طرح های NP_F با CP_F در دانه بندی فولر و NP_M با CP_M در دانه بندی میان تهی نشان داد که جذب آب نمونه های 90 روزه CP_F و CP_M که حاوی سرامیک ضایعاتی هستند، به طور معنی داری کمتر از نمونه های 28 روزه می باشد. دلیل این پدیده می تواند واکنش تأخیری پوزولان سنگدانه های سرامیک ضایعاتی با بلورهای هیدروکسید کلسیم تشکیل شده برای تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته باشد که بعد از 90 روز می تواند تقریباً کامل شود. تشکیل ثانویه این ژل می تواند منافذ را پر کند و در نتیجه نفوذپذیری را کاهش دهد. همچنین، با توجه به دلیل ذکر شده، در آزمایش های دوام طرح CP_F و CP_M در سن 90 روزه، کاهش عمق نفوذ کلر و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به سن 28 روزه مشاهده شد.

موجود در بتن خودمتراکم از ابعاد بزرگتری برخوردار باشند، مقاومت بالاتری حاصل می گردد.

۳- مقایسه طرح های NP_F با CP_F در دانه بندی فولر و NP_M با CP_M در دانه بندی میان تهی، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی (CP_F) و (CP_M) را در سنین 28 و 90 روزه نشان داد. عامل مهم در کسب این مقاومت، استفاده از سنگدانه سرامیک ضایعاتی می باشد. خاصیت پوزولانی سنگدانه سرامیک ضایعاتی هنگام مجاورت با آب و سایر سنگدانه ها تشکیل مواد پایدار داده و خاصیت چسبندگی بین سنگدانه ها را افزایش می دهد. علاوه بر این، سنگدانه های سرامیک ضایعاتی به دلیل داشتن بافت سطحی زبر، چسبندگی مناسبی با خمیر سیمان و سایر اجزا ایجاد می کنند که می تواند از عوامل دیگر در افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی این دو طرح باشد.

۴- از لحاظ دوام، طرح NN_F حاوی درشت دانه و ریزدانه ی طبیعی که بر اساس دانه بندی فولر ساخته شد، دارای کمترین مقدار جذب آب ($1/9\%$ و $1/1\%$)، بیشترین مقاومت الکتریکی ($30/1$ و $57/9$ کیلو اهم سانتی متر) و کمترین عمق نفوذ (11 و 10 میلی متر) به ترتیب در سنین 28 و 90 روزه بوده است. همچنین، طرح CP_M حاوی سرامیک ضایعاتی و پرلیت و NP_M حاوی درشت دانه طبیعی و پرلیت که بر اساس دانه بندی میان تهی ساخته شدند، بیشترین مقدار جذب آب ($4/8\%$ و $3/1\%$)، کمترین

۷. مراجع

- Aïtcin, 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.

