Iranian Concrete Society

Laboratory Evaluation of Self-Compacting Concrete Properties based on Cement and a Combination of Ceramic and Glass Powder under Different Processing Conditions

Kobra Moharrami[1], Maryam Kefayati[2]*
1. M.Sc.Student, Department of civil engineering, Bandar Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran
2. Assistant Professor, Department of civil engineering, Bandar Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran mkefayati.iau@gmail.com
Received: *23 May 2023* **Revised**: *07 November 2024* **Accepted**: *20 November 2024*
Research paper

Abstract

Cement production as a principal component of concrete releases huge amounts of co_2 leading to harmful environmental effects. Moreover, the noticeable amount of industrial waste is another environmental issue and the reuse of them as partial replacement for cement is a step forward to producing eco-friendly concrete. This paper describes the combined influence of Ceramic Powder (CP) to replace 10 percent and Glass Powder (GP) to replace 5, 10, 15 and 20 percent of the cement in Self-Compacting Concrete (SCC). This research evaluates the mechanical and durability characteristics under different conditions of curing in standard water and normal weather and Sodium Chloride Solution (SCS). In this research, 5 samples were cast to compare the results with the original sample. Results determined that CP and GP improve the properties of fresh concrete. They also enhance the mechanical properties and durability of SCC, especially in SCS. Substitutions often decrease the amount of water absorption and enhance electrical resistance. The best results are for the sample containing 10 percent CP and GP in which maximum compressive strength at 28 and 90 days in normal weather are 33 and 14 percent and in standard water are 27 and 23 percent more than ordinary concrete.

*Corresponding Author: Maryam Kefayati
Moharrami Chalgar, K., Kefayati, M. Laboratory evaluation of fresh, mechanical properties and durability in self-compacting concrete based on cement and a combination of ceramic and glass powder under different processing conditions. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-27.
http://doi.org/ 10.30478/jcsm.2024.398636.1323
2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات بتن خودتراکم مبتنی بر سیمان و ترکیبی از پودر سرامیک و پودر شیشه در شرایط عمل‌آوری متفاوت

کبری محرمی‌چالگر[1]، مریم کفایتی[*2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، واحد بندر انزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، واحد بندر انزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkefayati.iau@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تولید سیمان بعنوان یکی از اجزای اصلی بتن منجر به ایجاد حجم زیادی گاز co_2 و اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود. از طرف دیگر حجم بالای ضایعات صنعتی یکی دیگر از معضلات زیست محیطی است و جایگزینی آن‌ها با سیمان می‌تواند باعث تولید بتن دوست‌دار محیط‌زیست شود. هدف از این پژوهش ارزیابی آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی و دوام بتن خودتراکم با ترکیب پودر سرامیک و شیشه بعنوان جایگزین بخشی از سیمان تحت شرایط عمل‌آوری در آب و هوای آزاد و در برابر محلول سدیم کلرید می‌باشد. بدین ترتیب نتایج ۵ نمونه بتن ساخته شده حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۵، ۱۰، ۱۵و ۲۰ درصد پودر شیشه با نمونه شاهد مقایسه می‌گردد. نتایج حاکی از تاثیر مثبت پودر سرامیک و شیشه بر خصوصیات بتن تازه بوده و همچنین خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خودتراکم را بهبود می‌بخشد. جایگزینی‌ها غالبا سبب کاهش میزان نفوذپذیری نمونه‌ها و رفتار مناسب آن‌ها در محلول سدیم کلرید شده است. بهترین نتایج، مختص به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و شیشه است که حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه را در هوای آزاد حدود ۳۳ و ۱۴ درصد و در شرایط عمل‌آوری در آب ۲۷ و ۲۳ درصد بیشتر از بتن شاهد نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، خصوصیات مکانیکی، خصوصیات دوام، پودر سرامیک، پودر شیشه

۱- مقدمه

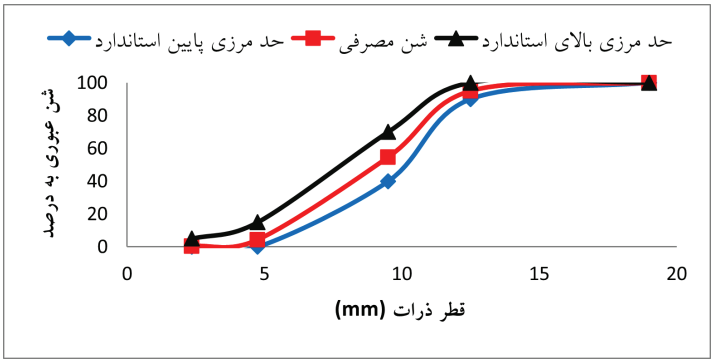
بتن که ماده اصلی آن سیمان است یکی از پرکاربردترین مواد مورد استفاده در زمین است و تولید آن نیازمند انرژی زیاد بوده که بدلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، فشار زیادی بر صنعت سیمان برای کاهش این گازها می‌باشد [۱]. در این میان بتن خود تراکم بدلیل ویژگی‌های منحصربفردی که دارد مانند کاهش نیروی کار ماهر در سایت، ساخت سریعتر، آزادی طراحی بیشتر و بسیاری ویژگی‌های دیگر می‌تواند از نظر اقتصادی بصرفه باشد ولی تولید آن به سیمان زیادی نیاز دارد که از نظر اقتصادی و زیست محیطی هزینه آن را افزایش می‌دهد [۲] [۳].

از طرف دیگر مقادیر زیاد ضایعات جامد که از صنایع، کارخانه‌ها و خانوارها نشات می‌گیرند، منبع مشکلات زیست محیطی هستند. بکارگیری این ضایعات به‌عنوان اجزای جایگزین در صنعت بتن، اتکا به مواد طبیعی غیرقابل تجدید را کاهش داده و همچنین به کاهش هزینه ساخت کمک خواهد کرد. نتایج تحقیقات نشان دادند که محصولات فرعی مختلف صنعتی به‌طور گسترده به‌عنوان جایگزین‌های ارزان‌تر از سیمان، خواص بتن تولیدی را چه از نظر خصوصیات بتن تازه و چه از نظر خصوصیات بتن سخت شده، افزایش می‌دهند [۴]. بکارگیری این ضایعات در ساخت بتن می‌تواند به رفع این چالش‌های ذکر شده کمک کند و خواص بتن را نیر بهبود بخشد برای کاهش این تاثیر منفی، محققان تلاش کرده‌اند، بدون اینکه کیفیت بتن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد، سیمان را با مواد پوزولانی یا سایر مواد سیمانی جایگزین کنند[۵] [۶]. یکی از این تلاشها مربوط به تحقیق ابراهیم (۲۰۲۱) است که برای غلبه بر این مشکل، از درصدهای ۵ تا ۲۰ پودر شیشه و با ترکیب با ضایعات دیگر به‌منظور کاهش استفاده از سیمان در بتن و حل مشکل این زباله‌های ضایعاتی استفاده نمود. نتایج از عملکرد خوب پودر شیشه در نمونه‌های ساخته شده دلالت داشت [۷]. گوکولنا و همکاران (۲۰۲۰) درآزمایشی نشان دادند در بتن خودتراکم با توجه به ویژگی‌های انعطاف‌پذیری بیشتری که نسبت به بتن معمولی دارد بکارگیری مواد افزودنی مثل پودر شیشه بررسی خواص آن‌ها را راحت‌تر می‌کند و ویژگی‌های این بتن را بهبود می‌بخشد. [۸]. از این رو مطالعات زیادی برای بررسی استفاده از ترکیبات متعدد ضایعات صنعتی در بتن های خود تراکم انجام شده است که در بسیاری موارد نشان دهنده اثرات مثبت آن‌ها در افزایش مقاومت بتن و کاهش اثرات منفی استفاده از سیمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای است. بطور مثال گاتام و همکاران (۲۰۲۳) در آزمایشی از ترکیبات پودر سرامیک و ضایعات سنگ گرانیت، از اثرات مثبت این ترکیبات در خواص مکانیکی بتن رسیدند [۹]. پودرهای ضایعات سرامیکی و شیشه ای که با اندازه ذرات ریز و ترکیب شیمیایی Al_2O_3 و SiO_2 متمایز می‌شوند، معمولاً به‌عنوان جایگزین سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. ادغام این دو ذره می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی ویژگی‌های مکانیکی، ریزساختاری و دوام بتن تولید شده را به دلیل تعامل پوزولانی و اثر پرکننده سرامیک و شیشه با CH ایجاد شده توسط هیدراتاسیون سیمان را افزایش دهد. فهمی‌و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی از ذرات نانوی شیشه و سرامیک در ترکیب با بتن خودتراکم استفاده نمودند و مقدار بهینه این ذرات برای بهبود خواص بتن خود تراکم را بدست آوردند که حدود ۳ درصد برای هر کدام از ذرات بود. آن‌ها به ضرورت تحقیق در موارد مشابه و همینطور در محیط‌هایی که تحت تاثیر اسید و سایر مواد مخرب بر بتن اشاره کردند [۱۰]. با توجه به اهمیت موضوع در استفاده از جایگزین کردن مواد بازیافتی در ساخت بتن‌های نوین و پس از بررسی مقالات متعدد در این تحقیق، بجای ذرات نانو از ذرات پودر شیشه استفاده شده است و از ترکیب ۱۰ درصد پودر سرامیک و درصدهای متغیر ۵ تا ۲۰ درصد پودر شیشه برای جایگزینی در سیمان در ساخت پنج نمونه بتن خودتراکم استفاده شد [۱۱] [۱۲] [۱۳] [۱۴]. نتایج این تحقیق می‌تواند گامی‌دیگر برای افزایش اطلاعات در زمینه ساخت بتن های سبز و توسعه پایدار با استفاده از ترکیبات بازیافتی و کاهش سیمان در ساخت بتن باشد.

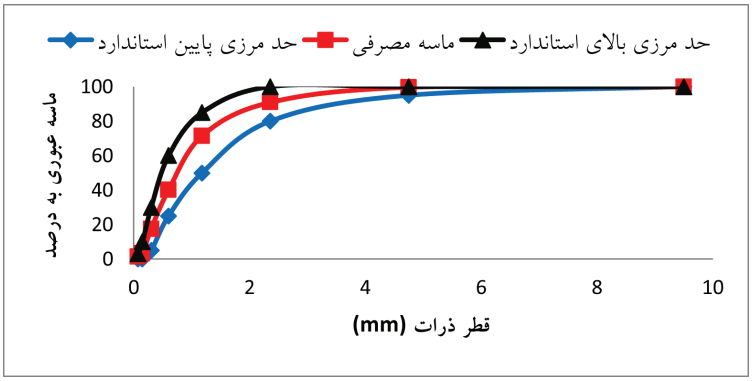
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مقاله از شن در محدوده قطر ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلیمتر استفاده شده است که دارای جذب آب حدودا ۱/۱ درصدی و چگالی در حالت اشباع با سطح خشک حدودا برابر با ۱۹۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. همچنین ماسه مورد استفاده، ماسه رودخانه‌ای و گرد گوشه بوده و تحت عنوان ماسه ۶-۰ به همراه شن مورد استفاده از کارخانه لوله‌سازی شمال واقع در استان گیلان تهیه گردیده است. چگالی ماسه مصرفی در حالت اشباع با سطح خشک، حدودا برابر با ۱۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، جذب آب آن نیز ۲/۴ درصد بوده است. دانه‌بندی ماسه مصرفی مطابق با استاندارد ASTM-C33 [۱۵] انجام شده است که در ادامه جزئیات دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده آورده شده است.



نمودار ۱- منحنی دانه‌بندی شن مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM-C33



نمودار ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM-C33

شکل ۱- شن و ماسه مورد استفاده

همچنین در کنار سیمان پرتلند تیپ ۲ که از کارخانه سیمان هگمتان همدان تهیه شد، از پودر سنگ جوشقان تولید شده توسط کارخانه آروشا پودر با اندازه چشمه ۲۰۰ الی ۴۰۰ در محدوده قطر ۳۷ تا ۷۴ میکرون، به میزان ثابت ۲۵۰ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن، در تمامی‌طرح مخلوط‌ها استفاده گردید. پودر سنگ بدلیل ارزانی و در دسترس بودن یک افزودنی رایج و مفید در بتن است که سبب افزایش مقاومت فشاری بتن و بهینه‌سازی ترکیب آن می‌شود. همچنین انعطاف پذیری بتن را زیاد کرده و پس از خشک شدن بتن مقاومت آن را در برابر آب و موارد خورنده زیاد می‌کند. طبق ویژگی فنی و ساختاری مشخص شده توسط کارخانه تولید پودر سنگ مذکور، با توجه دارا بودن خصوصیت چسبندگی بالا، پودر سنگ می‌تواند کمک شایانی برای جلوگیری از ترک خوردگی در هنگام سخت شدن بتن و همچنین افزایش مقاومت در برابر رطوبت داشته باشد. همچنین موجب افزایش کارایی و جلوگیری از ته نشین شدن سنگدانه‌های مصرفی در نمونه‌ها گردد. همچنین دارای جذب آب ۳/۱ درصد، وزن حجمی۲/۷ گرم بر سانتیمترم مکعب و مقاومت در برابر سایش تقریبا معادل ۳۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان، پودر سنگ، پودر شیشه، پودر سرامیک مورد استفاده

نماد شیمیایی	درصد تشکیل دهنده			
	سیمان	پودر سنگ	پودر شیشه	پودر سرامیک
CaO	85/62	30/56	18/18	41/2
SiO_2	32/21	86/0	32/64	57/66
Al_2O_3	81/4	08/0	90/2	60/21
Fe_2O_3	83/3	34/0	-	41/1
MgO	48/1	58/0	-	-
SO_3	32/2	06/0	-	-
K_2O	69/0	05/0	56/1	79/2
Na_2O	47/0	08/0	25/12	41/1
ZrO_2	-	-	-	49/1
LOI	04/2	65/41	49/0	45/0

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

نوع سیمان	وزن مخصوص (gr/cm^3)	سطح مخصوص (cm^2/gr)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)	انبساط اتوکلاو (درصد)
هگمتان تیپ ۲	۳/۱۵	۲۹۱۰	۱۵۰	۲۰۵	۰/۰۷

در اکثر استانداردها، آب مناسب برای ملات و بتن، آبی است که برای آشامیدن مناسب باشد. آب مورد استفاده در این تحقیق جهت ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها آب شرب شهرستان رشت می‌باشد که معیارهای توصیه شده توسط استاندارد ASTM-C1602 [۱۶] را رعایت می‌نماید. از پودر سرامیک با بسته‌بندی ۲۵ کیلویی تولید شده توسط گروه صنعتی و معدنی آریا با اندازه چشمه ۳۲۵ در محدوده قطر تا ۴۴ میکرون، به میزان ثابت ۱۰ درصد وزنی چسباننده معادل ۴۵ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن، در تمامی‌نسبت‌های مخلوط استفاده شد. طبق ویژگی فنی و ساختاری مشخص شده توسط کارخانه تولید پودر سرامیک مذکور، این ماده به صورت پودری

شکل بوده و دارای چسبندگی بالا و خاصیت ضد آب بودن می‌باشد. همچنین از پودر شیشه با بسته‌بندی ۵۰ کیلویی تولید شده توسط کارخانه ملل گلاسبید اصفهان با اندازه چشمه ۴۰۰ در محدوده قطر تا ۳۷ میکرون، به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی مواد سیمانی به ترتیب معادل ۲۲/۵، ۴۵، ۶۷/۵ و ۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن، در مخلوط‌ها استفاده شد. طبق ویژگی فنی و ساختاری مشخص شده توسط کارخانه تولید پودر شیشه مذکور، این ماده به صورت پودری شکل بوده و دارای جذب آب بسیار کم، خاصیت عایق بودن و پرکنندگی بسیار خوب می‌باشد. امروزه فوق روان‌کننده‌ها به‌طور گسترده به‌عنوان افزودنی در بتن به‌منظور رسیدن به روانی مطلوب و کمک به توزیع بهتر ذرات در مخلوط بتن استفاده می‌شوند. در این پژوهش از فوق روان کننده، بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری FARCO PLAST P10N محصول شرکت شیمی‌ساختمان استفاده شده است.

در این تحقیق با احتساب طرح مخلوط شاهد، در مجموع ۵ طرح مخلوط ساخته شد. طرح مخلوط شاهد، بدون افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه برای مقایسه با دیگر طرح‌های مخلوط ساخته شد. چهار طرح مخلوط دیگر نیز حاوی مقدار ثابت پودر سرامیک به میزان ۱۰ درصد نسبت به وزن مواد سیمانی و مقدار پودر شیشه در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نسبت به وزن مواد سیمانی به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن خودتراکم ساخته شدند که در این راستا در (جدول ۱) جزئیات نسبت‌های مخلوط نمونه‌های بتن خودتراکم قابل رویت می‌باشد. لازم به ذکر است که درصدهای مذکور طبق بررسی انجام شده بر روی تحقیقات گذشته در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل جلوگیری از تاثیر تغییرات استفاده از پودر سرامیک در نتایج نمونه‌های ساخته شده، از پودر سرامیک به صورت ثابت و به میزان ۱۰ درصد نسبت به وزن مواد سیمانی استفاده گردید.

شایان ذکر است که از پودر سنگ به میزان ثابت ۲۵۰ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن استفاده گردید. همچنین عیار مواد سیمانی در تمامی‌طرح مخلوط‌ها ثابت و برابر با ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. برای فوق روان‌کننده نیز به دلیل جلوگیری از تاثیر متغییر بودن درصد استفاده از آن بر نتایج، به میزان ۰/۹ درصد نسبت به وزن مواد سیمانی از آن استفاده گردید. در جدول ذیل، حروف G و C به ترتیب بیانگر پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد.

جدول ۳- جزئیات نسبت‌های مخلوط

شماره	نام طرح مخلوط	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	پودر سنگ (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	پودر سرامیک (kg/m^3)	پودر شیشه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	آب به‌چسباننده	فوق روان‌کننده (kg/m^3)
۱	BASE	۷۵۰	۶۱۰	۲۵۰	۴۵۰	۰	۰	۱۶۲	۰/۳۶	۴/۰۵
۲	G5-C10	۷۵۰	۶۱۰	۲۵۰	۳۸۲/۵	۴۵	۲۲/۵	۱۶۲	۰/۳۶	۴/۰۵
۳	G10-C10	۷۵۰	۶۱۰	۲۵۰	۳۶۰	۴۵	۴۵	۱۶۲	۰/۳۶	۴/۰۵
۴	G15-C10	۷۵۰	۶۱۰	۲۵۰	۳۳۷/۵	۴۵	۶۷/۵	۱۶۲	۰/۳۶	۴/۰۵
۵	G20-C10	۷۵۰	۶۱۰	۲۵۰	۳۱۵	۴۵	۹۰	۱۶۲	۰/۳۶	۴/۰۵

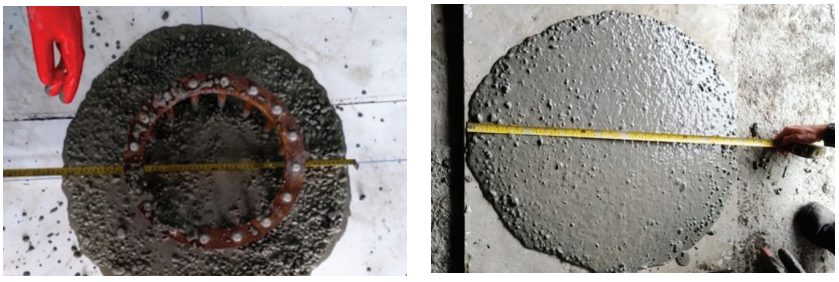
برای به دست آوردن بتن با خصوصیات و عملکرد مورد نظر، ابتدا سنگدانه‌های خشک مورد نیاز را وزن نموده سپس داخل دستگاه اختلاط قرار داده تا سه دقیقه با هم ترکیب شوند. پس از توزین سیمان، پودر سرامیک، پودر شیشه و پودر سنگ، آن‌ها را با سنگدانه‌ها مخلوط کرده و سه تا پنج دقیقه عمل اختلاط را ادامه داده و در گام بعد آب و فوق روان‌کننده را طبق طرح مخلوط، وزن کرده و

داخل دستگاه مخلوط‌کن (بتونیر) ۴۰۰ لیتری ریخته تا با مصالح درون دستگاه به مدت سه تا پنج دقیقه ترکیب گردند که این عمل بتن موردنظر را حاصل می‌کند. سپس بتن را در داخل قالب‌های از پیش چرب شده، ریخته و بر روی میز لرزان قرار داده تا هوای موجود در بتن خارج گردد. در نهایت، قالب‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده تا شرایط برای عمل‌آوری مهیا شود. پس از اینکه نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند آنگاه بتن حاصله را از قالب خارج نموده و تا رسیدن به سن مورد نظر جهت عمل‌آوری در دو شرایط متفاوت قرار می‌گیرند.

شرایط اول داخل حوضچه آب با دمای ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتیگراد و شرایط دوم در هوای آزاد بوده که نمونه‌های مختلف با توجه به سن تعیین شده در این شرایط قرار گرفتند. علت این امر مقایسه نتایج آزمایشات است تا تفاوت عمل‌آوری بتن در دو شرایط اشباع و هوای آزاد با شبیه‌سازی به عمل‌آوری بتن در محیط کارگاهی نیز مورد بررسی قرار بگیرد. به‌طوری که عمل‌آوری بتن در کارگاه از طریق پاشش آب و نگه داری در شرایط اشباع با شرایط اول و عمل‌آوری بتن بدون پاشش آب با شرایط دوم شبیه‌سازی می‌گردد. در نهایت طبق برنامه، آزمایش‌های خصوصیات تازه، مکانیکی و دوام بر روی نمونه‌ها انجام گردید.

۲-۲- آزمایشات انجام شده

در این مقاله از آزمایش جریان اسلامپ، حلقه J، جعبهL و قیفVطبق ضوابط ارائه شده توسط موسسه EFNARC [۱۷] انجام گردید. در آزمایش جریان اسلامپ قطر متوسط بتن پخش شده بر روی زمین و همچنین مدت زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر نیز تحت عنوان T50 اندازه‌گیری شد. این آزمایش قابلیت جاری شدن بتن تازه، تحت اثر وزن خود بدون هیچ قیدی جز اصطکاک صفحه ارزیابی می‌کند. آزمایش حلقه J در واقع شبیه سازی عبور بتن از میان میلگرد است و به منظور بررسی قابلیت عبور به کار برده می‌شود. آزمایش جعبه L نیز معیاری برای قابلیت پرکنندگی و عبور بتن متراکم است. از دستگاه آزمایش قیف V برای سنجش ویسکوزیته بتن و توانایی عبور بتن از مقاطع باریک استفاده شد.



شکل ۱- نمایی از آزمایش جریان اسلامپ و حلقه J

شکل ۲- نمایی از آزمایش جعبه L و قیف V

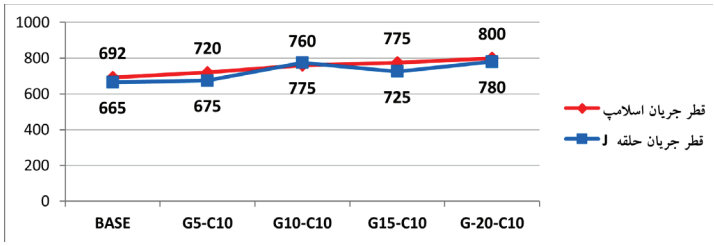
آزمایش مقاومت فشاری[1] بر اساس استاندارد ASTM-C39 [۱۸] استفاده گردید. این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر انجام شد. آزمایش مقاومت کششی[2] نیز بر اساس استاندارد ASTM-C496 [۱۹] استفاده شد. برای این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر استفاده شده است. آزمایش مقاومت خمشی[3] با بارگذاری در وسط دهانه بر اساس استاندارد ASTM-C293 [۲۰] استفاده گردید. برای این آزمایش از نمونه‌های منشوری به مقطع ۷×۷ و طول ۲۸ سانتیمتر استفاده شده است. برای آزمایش‌های مذکور، از هر طرح مخلوط سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش جذب آب[4] طبق استاندارد ASTM-C642 [۲۱] بر روی نمونه‌های عملآوری شده مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر، در سن ۲۸ روز انجام شد. این عمل برای سه نمونه از هر طرح مخلوط انجام شد تا برای هر طرح مخلوط از طریق میانگینگیری از مقدار سه نمونه، مقدار درصد جذب آب ۲۴ ساعته بدست آید. آزمایش مقاومت الکتریکی که به‌عنوان یک آزمایش غیرمخرب شناخته می‌شود بر روی نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه مطابق با استاندارد AASHTO5 TP95 [۲۲] و همچنین آزمایش نفوذپذیری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه مطابق با استاندارد ASTM-C642 انجام شد. در انتها برای بررسی تاثیر محیط محلول سدیم کلرید بر روی وزن مخصوص و خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب، نمونه‌های بتنی مجددا بهمدت زمان ۲۸ روز، درون حوضچه محلول سدیم کلرید با نسبت ۵ درصد وزن آب قرار داده شدند. در نهایت وزن مخصوص نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و آزمایش مقاومت فشاری نیز بر روی آن‌ها انجام و ارزیابی لازم صورت گرفت.

۳- ارائه و تفسیر نتایج به‌دست‌آمده

۳-۱- آزمایشات مشخصات تازه بتن

۳-۱-۱- آزمایش جریان اسلامپ و حلقه J

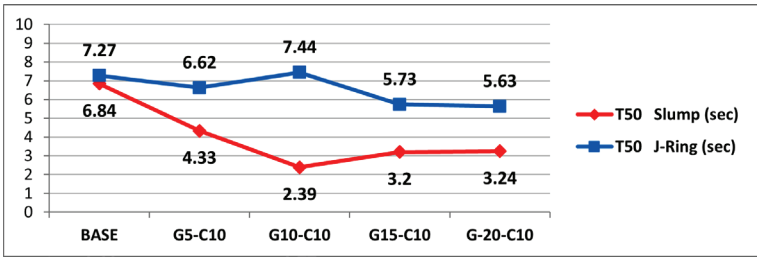
همانطور که از (نمودار ۳) مشاهده می‌گردد، قطر جریان بتن در آزمایش حلقه J با شرایط عبور از بین میلگردها، به جز بتن حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه، کمتر از شرایط بدون میلگرد در آزمایش جریان اسلامپ به دست آمده است که مهمترین دلیل اتفاق افتادن این موضوع، وجود میلگرد در مسیر پخش بتن است. همچنین میزان تفاوت قطر جریان بتن در دو آزمایش از ۱۵ تا ۵۰ میلیمتر متغییر بود. در حالت کلی افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه سبب افزایش روانی بتن گردید و در نهایت قطر جریان بتن در هر دو آزمایش افزایش یافت.



نمودار ۳- قطر جریان آزمایش اسلامپ و حلقه J

[1] Compressive strength
[2] Split tensile strength
[3] Flexural strength
[4] Water absorption
[5] American Association of State Highway and Transportation Officials

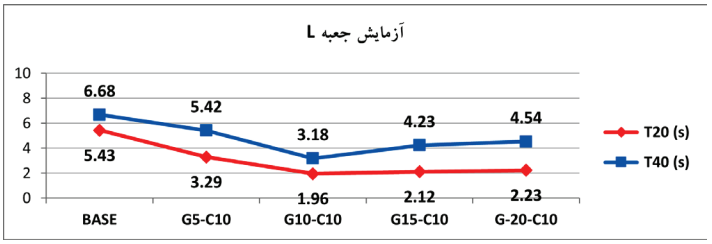
با توجه به (نمودار ۴) مشاهده می‌گردد که مقدار زمان T50 در آزمایش حلقه J با شرایط عبور از بین میلگردها، بالاتر از شرایط بدون میلگرد در آزمایش جریان اسلامپ به دست آمده که دلیل آن وجود میلگرد در مسیر پخش بتن می‌باشد. همچنین میزان تفاوت زمان T50 در دو آزمایش از ۰/۴۳ تا ۵/۰۵ ثانیه متغییر بود. در حالت کلی افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه سبب افزایش روانی بتن گردید و در نهایت تمامی‌مخلوط‌ها با سرعت بیشتری نسبت به بتن شاهد به قطر ۵۰ سانتیمتر رسیدند.



نمودار ۴- زمان T50 آزمایش جریان اسلامپ و حلقه J

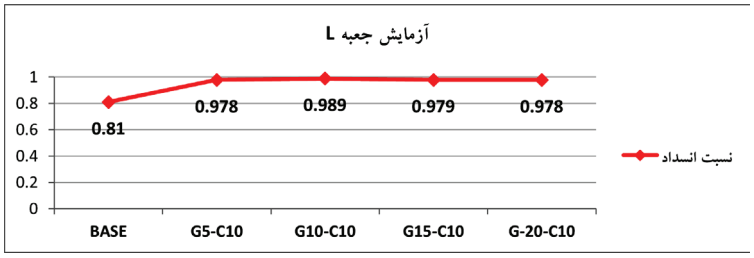
۳-۱-۲- آزمایش جعبه L

با توجه به (نمودار ۵) مشاهده می‌گردد که با افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه به بتن، زمان جریان و عبور بتن از جعبه L کاهش یافته است. به‌طوری که زمان رسیدن به طول ۲۰ سانتیمتری (T20) به ترتیب ۲/۱۴، ۳/۴۷، ۳/۳۱ و ۳/۲۰ ثانیه زودتر از بتن شاهد اتفاق افتاد و این کاهش زمان برای رسیدن به طول ۴۰ سانتیمتری (T40) به ترتیب ۱/۲۶، ۳/۵۰، ۲/۴۵ و ۲/۱۴ ثانیه رقم خورد. طبق گزارش این آزمایش، بهترین بتن از نظر سرعت عبور و قابلیت پرکنندگی، بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه بود.



نمودار ۵- زمان T20 و T40 آزمایش جعبه L

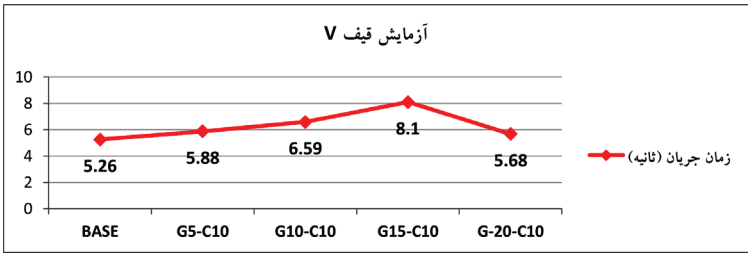
با توجه به (نمودار ۶) مشاهده می‌گردد که با افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه به بتن، قابلیت عبور و پرکنندگی بتن خودتراکم بهبود پیدا کرده است. به‌طوری که با افزودن ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۵ تا ۲۰ درصد پودر شیشه میزان نسبت انسداد بتن خودتراکم نزدیک به عدد ۱ رسید که این عدد طبق پیشنهاد موسسه EFNARC مقدار مناسبی برای بتن خودتراکم می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده روان شدن نمونه‌های حاوی پودر شیشه و سرامیک در مقایسه با نمونه شاهد است.



نمودار ۶- نسبت انسداد (H1/H2) آزمایش جعبه L

۳-۱-۳- آزمایش قیف V

با توجه به (نمودار ۷) نتایج بیانگر این است که با افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه به بتن، زمان جریان و عبور بتن از قیف افزایش یافته است. به‌طوری که به ترتیب ۰/۶۲، ۱/۳۳، ۲/۸۴ و ۰/۴۲ ثانیه دیرتر از بتن شاهد از قیف عبور نمودند. در نهایت با توجه به زمان پیشنهادی توسط موسسه EFNARC که در محدوده ۶ تا ۱۲ ثانیه است، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدت زمان تخلیه بتن خودتراکم این پژوهش مناسب بوده است. اما این نتایج نشان می‌دهد که افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه به میزان بسیار کم حدود ۰٫۵ تا ۳ ثانیه زمان قابلیت عبور بتن خودتراکم از فضای باریک را نسبت به نمونه شاهد زیاد می‌کند اما در نهایت در محدوده مجاز قرار دارد.



نمودار ۷- زمان جریان آزمایش جعبه L

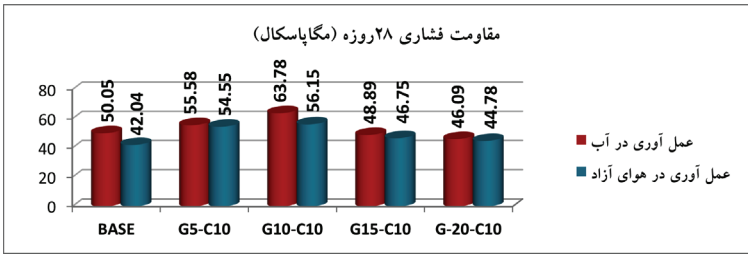
با توجه به نتایج مربوط به آزمایشات بتن تازه از جمله جریان اسلامپ، حلقه J، جعبه L و قیف V مشخص گردید که استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه می‌تواند تاثیر مثبتی بر خصوصیات جریان، پرکنندگی و قابلیت عبور از بین میلگردها و فضای باریک داشته باشد و عملکرد بتن خودتراکم را بهبود ببخشد. به‌طوری که تمامی‌بتن‌های حاوی پودر سرامیک و پودر شیشه عملکرد بهتری نسبت به بتن شاهد از خود نشان دادند. همچنین همخوانی مطلوبی بین نتایج آزمایش‌های بتن تازه نیز وجود دارد.

۳-۲- آزمایشات مشخصات مکانیکی

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

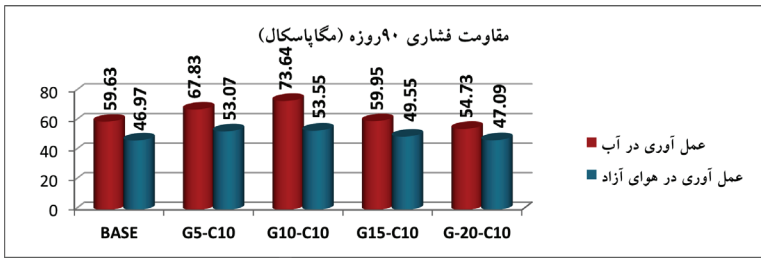
با توجه به (نمودار۸)، مشخص می‌گردد که بالاترین میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه مختص به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد. روند صعودی میزان مقاومت فشاری برای نمونه‌های تحت شرایط عمل‌آوری در آب تا نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه ادامه داشت اما پس از افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه این روند نزولی گردید و

مقدار آن‌ها نیز از نمونه شاهد کمتر شد. میزان کسب مقاومت نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه به ترتیب حدود ۱۱ و ۲۷/۴ درصد افزایش و نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه به ترتیب حدود ۲/۳ و ۷/۹ درصد کاهش را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. اما میزان مقاومت فشاری تمامی‌نمونه‌های حاوی پودر سرامیک و پودر شیشه تحت شرایط عمل‌آوری در هوای آزاد، از میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد بالاتر بود. به‌طوری که مقاومت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه به ترتیب حدود ۲۹/۷، ۳۳/۵، ۱۱/۲ و ۶/۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد بود.



نمودار ۸- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها

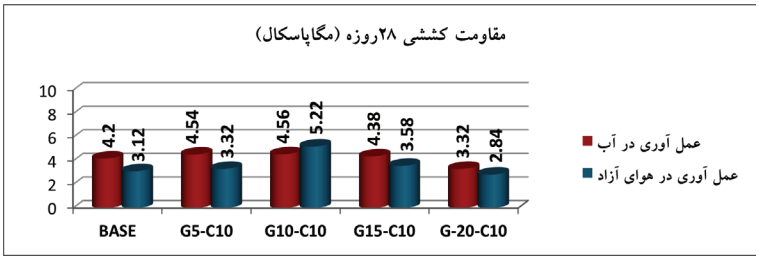
با توجه به (نمودار۹) مشخص می‌شود که همانند نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه، بالاترین میزان مقاومت فشاری ۹۰روزه نیز مختص به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد. همچنین روند صعودی میزان مقاومت فشاری برای نمونه‌های تحت شرایط عمل‌آوری در آب تا نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه ادامه داشت اما پس از افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه این روند نزولی گردید و مقدار آن‌ها نیز از نمونه شاهد کمتر شد. این میزان کسب مقاومت برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه دارای به ترتیب حدود ۱۳/۷ و ۲۳/۴ درصد افزایش و نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه دارای به ترتیب حدود ۰/۱ و ۸/۲ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد بود. اما میزان مقاومت فشاری تمامی‌نمونه‌های حاوی پودر سرامیک و پودر شیشه تحت شرایط عمل‌آوری در هوای آزاد، از میزان مقاومت فشاری نمونه شاهد بالاتر بود. به‌طوری که مقاومت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه به ترتیب حدود ۱۲/۹، ۱۴ و ۵/۴ درصد بالاتر از نمونه شاهد بود و نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه نیز مقاومت تقریبا برابری با نمونه شاهد کسب نمود. در نهایت با توجه به نتایج مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه و ۹۰ روزه، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین نمونه از نظر مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد.



نمودار ۹- مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی

با توجه به (نمودار ۱۰)، بالاترین میزان مقاومت کششی ۲۸ روزه مختص به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد. روند صعودی میزان مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد، تا نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه ادامه داشت اما پس از افزودن ۲۰ درصد پودر شیشه این روند نزولی گردید و مقدار آن‌ها نیز از نمونه شاهد کمتر شد. به‌طوری که میزان کسب مقاومت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه تحت شرایط عمل‌آوری در آب به ترتیب حدود ۸، ۸/۵ و ۴/۲ درصد افزایش و نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه حدود ۲۰/۹ درصد کاهش را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. این روند افزایش و کاهش مقاومت برای نمونه‌های تحت شرایط عمل‌آوری در هوای آزاد به ترتیب حدود ۶/۴، ۶۷/۳ و ۱۴/۷ درصد افزایش و حدود ۸/۹ درصد کاهش رقم خورد.

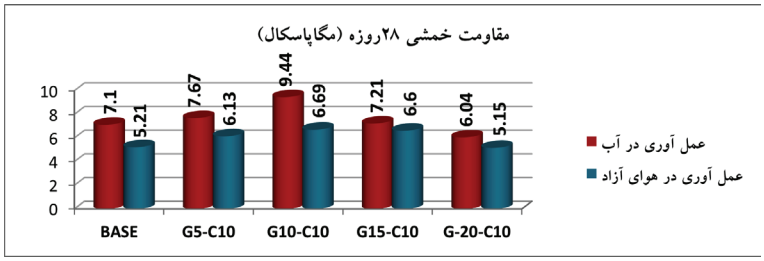


نمودار ۱۰- مقاومت کششی نمونه‌ها

۳-۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی

طبق (نمودار ۱۱)، همانند نتایج مربوط به مقاومت کششی، بالاترین میزان مقاومت خمشی ۲۸ روزه مختص به نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه می‌باشد. روند صعودی میزان مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد، تا نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه ادامه داشت اما پس از افزودن ۲۰ درصد پودر شیشه این روند نزولی گردید و مقدار آن‌ها نیز از نمونه شاهد کمتر شد. به‌طوری که میزان کسب مقاومت نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه تحت شرایط عمل‌آوری در آب به‌ترتیب حدود ۸، ۳۲/۹ و ۱/۵ درصد افزایش و نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه حدود ۱۴/۹ درصد کاهش را نسبت به نمونه شاهد نشان داد. این روند برای نمونه‌های تحت شرایط عمل‌آوری در هوای آزاد به ترتیب حدود ۱۷/۶، ۲۸/۴ و ۲۶/۶ درصد افزایش نشان داده شد اما برای نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه نتیجه تقریبا یکسانی نسبه به نمونه شاهد اتفاق افتاد و حدود ۱/۱ درصد کاهش رقم خورد.

با توجه به نتایج بدست آمده بنظر می‌آید ترکیب خاصیت پوزولانی پودر سرامیک و پرکنندگی پودر شیشه در نمونه‌های ساخته شده بدلیل کاهش نفوذپذیری، باعث چسبندگی و استحکام بهتر در ماتریس سیمانی بتن و ساختار آن شده است که در نتیجه مقاومت‌های مکانیکی بتن افزایش یافتند. . هر چند برای بررسی دقیق‌تر باید عکس SEM از بتن شکسته شده گرفته شود تا اثبات شود

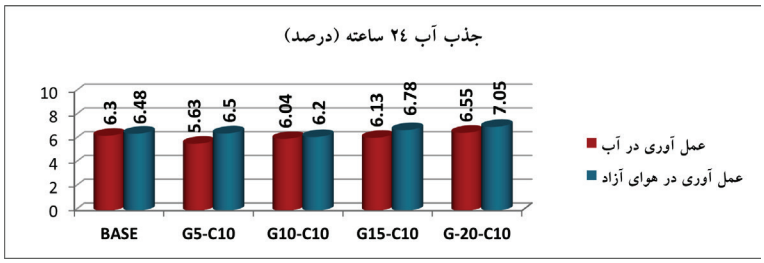


نمودار ۱۱- مقاومت خمشی نمونه‌ها

۳-۳- خصوصیات دوام نمونه‌ها

۳-۳-۱- جذب آب

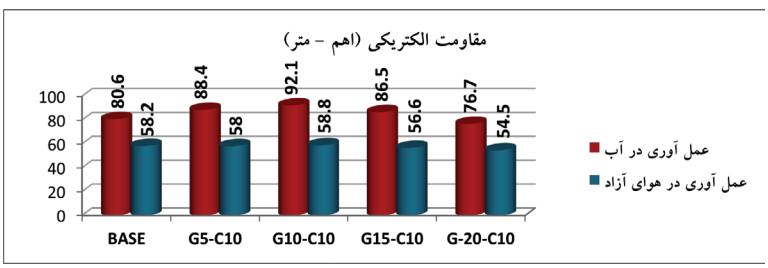
با توجه به (نمودار ۱۲)، نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد بالاتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب است. این موضوع نشان می‌دهد که نحوه عمل‌آوری بر میزان جذب آب تاثیر مستقیم دارد. اما با بررسی دقیقتر مشخص می‌شود که با استفاده از پودر سرامیک و افزایش درصد پودر شیشه تفاوت چندانی در میزان جذب آب نمونه‌ها مشاهده نمی‌گردد. به‌طوری که بالاترین افزایش و کاهش درصد جذب آب نسبت به نمونه شاهد برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب، به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۶۷ درصد و برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد، به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۲۸ درصد می‌باشد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که خاصیت جذب آب انواع بتن‌های خودتراکم ساخته شده تقریبا مشابه یکدیگر بوده و با استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه در درصدهای مختلف، تفاوت چندانی در میزان جذب آب مشاهده نگردید.



نمودار ۱۲- جذب آب نمونه‌ها

۳-۳-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی

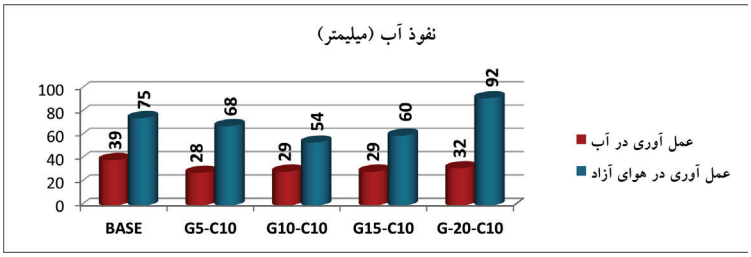
با توجه به (نمودار ۱۳)، نتایج بیانگر این است، بر خلاف نتایج مربوط به جذب آب نمونه‌ها، میزان مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد کمتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب است. این موضوع نشان می‌دهد که نحوه عمل‌آوری تاثیر مستقیمی‌بر میزان مقاومت الکتریکی دارد. بالاترین میزان مقاومت الکتریکی به دست آمده مختص نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و پودر شیشه بود. البته میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد تغییرات چندانی نداشت اما میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب در نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه نسبت به نمونه شاهد بالاتر بود و پس از افزودن ۲۰ درصد پودر شیشه این میزان مقاومت، دچار کاهش ۴/۸ درصدی شد. افزایش مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب به ترتیب حدود ۹/۶، ۱۴/۲ و ۷/۳ درصد بودند.



نمودار ۱۳- مقاومت الکتریکی نمونه‌ها

۳-۳-۳- آزمایش نفوذپذیری آب

با توجه به (نمودار ۱۴)، نتایج نشان می‌دهد که میزان نفوذپذیری نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب است. اما با بررسی نمودار می‌توان دریافت که استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه غالبا سبب کاهش میزان نفوذپذیری بتن‌ها گردیده است و فقط نمونه عمل‌آوری شده در هوای آزاد و حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه توانست به میزان حدود ۲۲/۶ درصد نفوذ آب بالاتری نسبت به نمونه شاهد داشته باشد. همچنین میزان کاهش نفوذ آب در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب از حدود ۱۷/۹ تا ۲۸/۲ درصد و نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد از حدود ۹/۳ تا ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد دچار کاهش شدند. پس در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه گرچه مقدار جذب آب را به مقدار کمی‌کاهش داده ولی همین مقدار تاثیر خوبی بر کاهش نفوذپذیری بتن داشته است و می‌تواند نقش خوبی را برای کاهش ایجاد منافذ در ساختار بتن ایفا کند.این نتایج نشان می‌دهند که پودر شیشه بدلیل خاصیت پرکنندگی تاثیر مثبتی در این مساله داشته است.

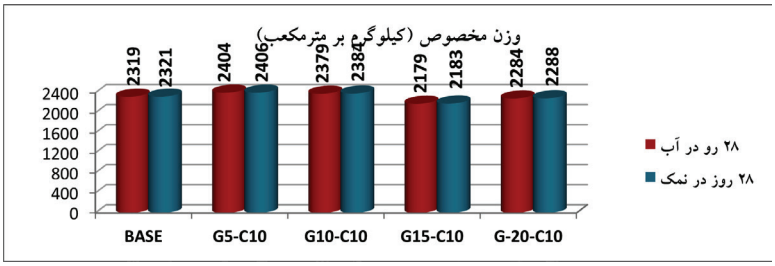


نمودار ۱۴- میزان نفوذپذیری نمونه‌ها

۳-۳-۴- مشخصات نمونه‌ها در محلول سدیم کلرید

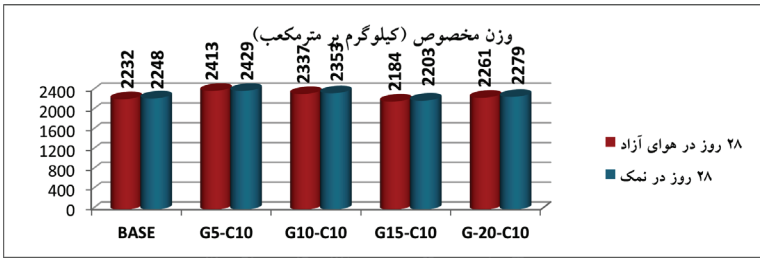
۳-۳-۴-۱- وزن مخصوص نمونه‌ها

با توجه به (نمودار ۱۵)، مشاهده می‌گردد با اینکه میزان وزن مخصوص نمونه‌ها پس از خروج از محلول سدیم کلرید دچار افزایش گردید اما در هر دو شرایط ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و ۲۸ روز تحت محلول سدیم کلرید وزن مخصوص نمونه‌ها تقریبا یکسان و نزدیک به یکدیگر به دست آمد، به‌طوری که این افزایش در حدود ۲ تا ۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود.



نمودار ۱۵- تاثیر محلول سدیم کلرید بر وزن مخصوص نمونه‌های عمل‌آوری شده در حوضچه آب

با توجه به (نمودار ۱۶) همانند نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب، با اینکه میزان وزن مخصوص نمونه‌ها پس از خروج از محلول سدیم کلرید دچار افزایش گردید اما در هر دو شرایط ۲۸ روز عمل‌آوری در هوای آزاد و ۲۸ روز تحت محلول سدیم کلرید وزن مخصوص نمونه‌ها تقریبا یکسان و نزدیک به یکدیگر به دست آمد، به‌طوری که این افزایش در حدود ۲ تا ۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

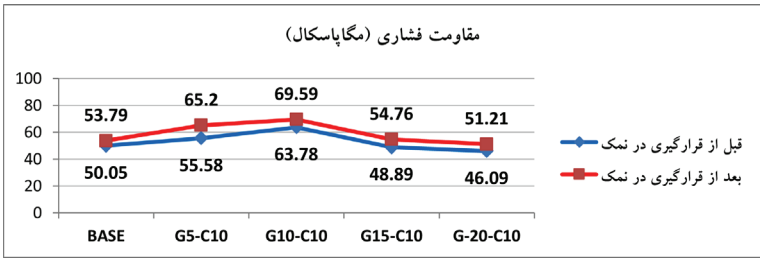


نمودار ۱۶- تاثیر محلول سدیم کلرید بر وزن مخصوص نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که محلول سدیم کلرید تاثیر چندانی بر وزن مخصوص نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی پودر سرامیک و پودر شیشه نمی‌تواند داشته باشد. اگرچه می‌توان گفت که افزایش ناچیز وزن مخصوص در نمونه‌های قرار گرفته در محلول سدیم کلرید، به دلیل وجود بلورهای سدیم کلرید بوده که درون ساختار بتن به وجود آمد.

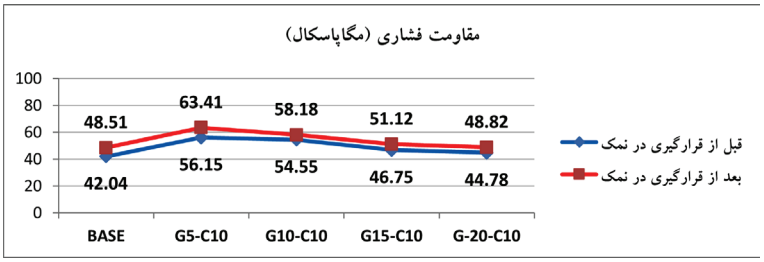
۳-۳-۴-۲- مقاومت فشاری باقیمانده

طبق (نمودار ۱۷)، نتایج بیانگر این است که پس از قرارگیری نمونه‌ها در محلول سدیم کلرید ، مقاومت فشاری آن‌ها افزایش یافت و از تمامی‌نمونه‌های ۲۸ روزه در شرایط عمل‌آوری در آب بالاتر به دست آمد. لازم به ذکر است که این میزان افزایش مقاومت از حدود ۳/۷ تا ۹/۶۲ مگاپاسکال متغییر بود.



نمودار ۱۷- تاثیر محلول سدیم کلرید (نمک) بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در حوضچه آب

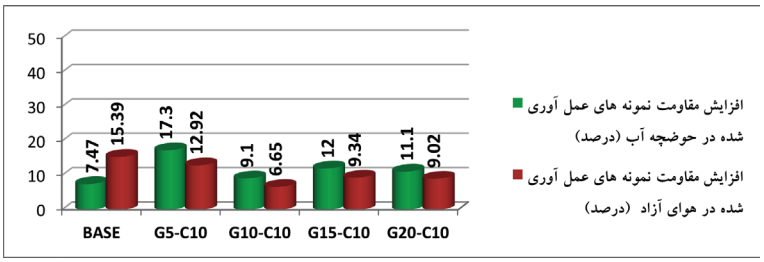
با توجه به (نمودار ۱۸)، همانند نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب نتایج نشان می‌دهد که پس از قرارگیری نمونه‌ها در محلول سدیم کلرید ، مقاومت فشاری آن‌ها افزایش یافت و از تمامی‌نمونه‌های ۲۸ روزه در شرایط عمل‌آوری در هوای آزاد بالاتر به دست آمد. لازم به ذکر است که این میزان افزایش مقاومت از حدود ۳/۶ تا ۷/۲ مگاپاسکال متغییر بود.



نمودار ۱۸- تاثیر محلول سدیم کلرید (نمک) بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد

۳-۳-۴-۳- افزایش مقاومت فشاری باقیمانده

با توجه (نمودار ۱۹)، می‌توان نتیجه گرفت که بتن خودتراکم ساخته شده با پودر سرامیک و پودر شیشه در این مقاله، دارای رفتار مناسبی در برابر محلول سدیم کلرید بوده به‌طوری که در تمامی‌طرح مخلوط‌ها سبب بهبود مقاومت فشاری گردید. بیشترین و کمترین افزایش مقاومت به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه رقم خورد. همچنین تاثیر محلول سدیم کلرید بر میزان مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه تقریبا یکسان بود. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب پودر شیشه و سرامیک در ساختار بتن تاثیر مثبتی می‌گذارد بنحوی که باعث مقاومت آن در برابر محلول سدیم کلراید شده است. با توجه به تحقیقات گذشته توسط سایر محققین، معمولا محیط نمکی باعث ایجاد بلورهای سدیم کلرید در ساختار بتن می‌شود که این موضوع باعث یکپارچگی بهتر و در نتیجه افزایش مقاومت بتن می‌شود.



نمودار ۱۹- درصد افزایش مقاومت نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول سدیم کلرید

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های متعددی بر روی نمونه‌ها صورت گرفت که خلاصه نتایج به‌دست‌آمده جهت جمع‌بندی به شرح ذیل شرح داده می‌شود:

۱. با اینکه میزان وزن مخصوص نمونه‌ها پس از خروج از محلول سدیم کلرید دچار افزایش در حدود ۲ تا ۵ کیلوگرم بر مترمکعب گردید اما در هر دو شرایط ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و ۲۸ روز تحت محلول سدیم کلرید وزن مخصوص نمونه‌ها تقریبا یکسان و نزدیک به یکدیگر به دست آمد. اگرچه می‌توان گفت که افزایش ناچیز وزن مخصوص به دلیل وجود بلورهای نمک بوده که درون ساختار بتن به وجود آمد.

۲. با توجه به نتایج مربوط به آزمایشات بتن تازه از جمله جریان اسلامپ، حلقه J، جعبه L و قیف V مشخص گردید

که استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه می‌تواند تاثیر مثبتی بر خصوصیات جریان، پرکنندگی و قابلیت عبور از بین میلگردها و فضای باریک داشته باشد و عملکرد بتن خودتراکم را بهبود ببخشد. به‌طوری که تمامی‌بتن‌های حاوی پودر سرامیک و پودر شیشه عملکرد بهتری نسبت به بتن شاهد از خود نشان دادند.

۳. بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مختص به بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۱۰ درصد پودر شیشه بود که در شرایط عمل‌آوری در آب و هوای آزاد به ترتیب مقاومت ۶۳/۷۸ و ۵۶/۱۵ مگاپاسکالی را به دست آوردند. این میزان کسب مقاومت به ترتیب حدود ۲۷/۴ و ۳۳/۵ درصد بالاتر از مقاومت بتن شاهد رقم خورد.

۴. بالاترین مقاومت فشاری ۹۰ روزه نیز توسط بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۱۰ درصد پودر شیشه رقم خورد که در شرایط عمل‌آوری در آب و هوای آزاد به ترتیب مقاومت ۷۳/۶۴ و ۵۳/۵۵ مگاپاسکالی را به دست آوردند که توانستند به ترتیب حدود ۲۳/۴ و ۱۴ درصد بالاتر از مقاومت بتن شاهد را کسب کنند.

۵. بهترین مقاومت کششی ۲۸ روزه مختص به بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۱۰ درصد پودر شیشه بود که در شرایط عمل‌آوری در آب و هوای آزاد به ترتیب مقاومت ۴/۵۶ و ۵/۲۲ مگاپاسکالی را به دست آوردند. این میزان کسب مقاومت به ترتیب حدود ۸/۵ و ۶۷/۳ درصد بالاتر از مقاومت بتن شاهد رقم خورد.

۶. بالاترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه نیز توسط بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۱۰ درصد پودر شیشه رقم خورد که در شرایط عمل‌آوری در آب و هوای آزاد به ترتیب مقاومت ۹/۴۴ و ۶/۶۹ مگاپاسکالی را به دست آوردند که توانستند به ترتیب حدود ۳۲/۹ و ۲۸/۴ درصد بالاتر از مقاومت بتن شاهد را کسب کنند.

۷. افزودن پودر سرامیک تا ۱۰ درصد و پودر شیشه تا ۱۵ درصد می‌تواند سبب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم گردد. همچنین مشخص گردید که غالبا میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب بالاتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد بوده است.

۸. بر خلاف میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی، مشخص گردید که میزان جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب پایین‌تر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد بوده است. اما با افزودن پودر سرامیک و پودر شیشه تفاوت چندانی در میزان جذب آب نمونه‌ها مشاهده نگردید.

۹. همانطور که انتظار می‌رفت میزان جذب آب با مقاومت الکتریکی رابطه معکوس داشته به‌طوری که با افزایش جذب آب، میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافت. همچنین این موضوع برای هر دو شرایط عمل‌آوری صدق می‌کند.

۱۰. استفاده از پودر سرامیک و پودر شیشه غالبا سبب کاهش میزان نفوذپذیری بتن‌ها گردید. این میزان کاهش برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب از حدود ۱۷/۹ تا ۲۸/۲ درصد و نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد از حدود ۹/۳ تا ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد رقم خورد. در انتها مشخص گردید که استفاده از آن‌ها می‌تواند تاثیر خوبی بر کاهش نفوذپذیری بتن داشته باشد و نقش خوبی را برای کاهش ایجاد منافذ در بتن ایفا کند.

۱۱. مشخص گردید که بتن خودتراکم ساخته شده با پودر سرامیک و پودر شیشه در این پژوهش، دارای رفتار مناسبی در برابر محلول سدیم کلرید بوده به‌طوری که در تمامی‌طرح مخلوط‌ها سبب بهبود مقاومت فشاری گردید. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت باقیمانده نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب بالاتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوای آزاد می‌باشد. همچنین در هر دو شرایط عمل‌آوری، بیشترین و کمترین افزایش مقاومت به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه رقم خورد و تاثیر محیط نمکی بر مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه تقریبا یکسان بود.

۱۲. در نهایت مشخص گردید که بهترین خصوصیات را بتن حاوی ۱۰ درصد پودر سرامیک و ۱۰ درصد پودر شیشه از خود نشان داده و نتایج قابل قبولی را نسبت به بتن خودتراکم شاهد کسب نموده است.

قدردانی:

از آزمایشگاه سنجش بنیان سازه که آزمایش‌های مربوطه در آن انجام شد تشکر و قدردانی می‌شود.

۵- مراجع

[1] Balsara S. Kumar Jain P and Ramesh A. (2019). An integrated approach using AHP and DE-MATEL for evaluating climate change mitigation strategies of the Indian cement manufacturing industry. Journal of Environmental Pollution. 252(Part A) :863-878.

[2] Rafat S. (2019). Self-comacting Concrete: Materials, Properties and Applications. 1st edition. Woodhead Publishing. No. of pages: 411.

[3] Abouhussien AA. Hassan AAA. (2015).Optimizing the durability and service life of self-consolidating concrete containing metakaoline using statistical analysis. Journal of Costruction and Building Materials.76: 297-306.

[4] Tangadagi RB. Manjunatha M. Seth D and Preethi S. (2021). Role of mineral admixtures on strength and durability of high strength self compacting concrete: An experimental study. Journal of Materialia. 18: 101144.

[5] Amin M. Tayeh BA and Saad AGWA I. (2020). Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. Journal of Cleaner Production. 210: 123073.

[6] Ibrahim SA.Omar MO. Bassam AT and Bassam AA.(2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. Journal of *Construction and Building Materials. 235: 117541.*

[7] Ibrahim KIM. (2021). Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash Case studies. Journal of construction material. 15.e00630.

[8] Gokulnath V. Ramesh B and Suvesha S. (2020). Influence on flexural properties of glass powder in self compacting concrete.Journal of Materialstody: PROCEEDING. 22(3):788-792

[9] Gautam L. Bansal S. Sharma V and Kalla P. (2023). Bone-china ceramic powder and granite industrial by-product waste in self-compacting concrete: A durability assessment with statistical validation. Journal of Structures. 54:837-856.

[10] Fahmy NG. Hussien R.M. Abd el-Hafez LM. Mohamed RAS and Faried AS. (2022). Comparative study on fresh, mechanical, microstructures properties and corrosion resistance of self compacted concrete incorporating nanoparticles extracted from industrial wastes under various curing conditions. Journal of Building Engineering. 57: 104874.

[11] Abdo El-kassem, M.H.Mahmoud,O.M. and Abd El-Hamid , M.Z. (2020). " Effect of using glass powder as a partial replacement of cement on concrete properties", Journal of Al-Azhar University Engineering Sector. Vol.17,No 62, pp 219-236.

[12] Arum C. Akande SP. and Alabi SA. (2020). Strength evaluation of pozzolanic concrete con-

taining ceramic waste and glass waste powder . Journal of Engineering and Engineering Technology. 16(1): 113-119.

[13] Boukhelkhal A. fhshoon I and Firoozjaei Z. (2020). Some engineering properties of sustainable self- compacting mortar made with ceramic and glass powder. Journal of Silicate Based and Composite Materials. 74(1): 21-26.

[14] Rajathi A and Portchejian G. (2014). Experimental study on self compacting concrete using glass powder. International Journal of Structural and Civil Engineering Research. 3(3): 73-79.

ASTM Standard C33. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International. West Conshohocken. PA.

[15] ASTM C1602. (2006). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. ASTM International. West Conshohocken. PA.

[16] EFNARC. (2002). Spevification and guidelines foe self-compacting concrete. Free pdf copy downloadable from http://www.efnarc.org, pp. 29-35.

[17] ASTM C39 / C39M-20. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. West Conshohocken. PA.

[18] ASTM C496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society of Testing and Materials. West Conshohocken. Pennsylvania. USA.

[19] ASTM C293. (2014). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). American Society of Testing and Materials. West Conshohocken. Pennsylvania. USA.

[20] ASTM C642. (2013). Standard Test Method for Density. Absorption and Voids in Hardened Concrete, ASTM International West Conshohocken. PA.

[21] AASHTO TP 95. Standard Test Method for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Association of State Highway and Transportation Offcials. Washington. DC.