

Impact of slag replacement with cement on durability and workability of self-compacting concrete

Saeed Rahmati¹, Emad Tavakoli², Mansor Fakhri^{3*}

1- M.Sc, Civil Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc, Civil Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Professor, Civil Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent decades, the use of mass concrete in various infrastructure projects has significantly increased. Due to the larger dimensions of these sections and the higher volume of Portland cement, a decrease in the strength and durability of the core is often observed in these concrete sections. Industrial by-products such as blast furnace slag have increasingly been used as additives to produce mass self-compacting concrete. The aim of this research is to control and reduce the peak temperature of mass concrete by replacing blast furnace slag with cement. Considering the relevant regulations, the study investigates the reduction or prevention of delayed ettringite formation and the reduction of concrete heat. Additionally, the enhancement of the durability, strength, and performance of self-consolidating concrete for large sections is evaluated. In this manner, four concrete mix designs with replacement percentages of 35%, 45%, and 55% blast furnace slag with cement, and one control mix design (with zero percent blast furnace slag replacement) were employed. To achieve a more detailed analysis of the impact of adding this material to mass self-consolidating concrete, various tests were conducted on fresh and hardened concrete as well as cement. The results indicate that with an increase in blast furnace slag replacement up to 55%, the cement heat has decreased by 28.79%. The workability of self-consolidating concrete using this cement has increased by 7.9% and 5.5% in slump flow and L-box tests, respectively, and good improvements in other performance tests have been observed. In mechanical tests, the concrete strength decreased at early ages with an increase in blast furnace slag but increased at later ages. In durability tests, the concrete's durability increased with up to 55% blast furnace slag replacement, and the increase in electrical resistivity was 14%. Consequently, the addition of blast furnace slag to concrete can lead to a reduction in heat and a significant increase in resistance, performance, and durability of the concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2023

Revise Date: 18 February 2024

Accept Date: 14 March 2024

Keywords:

Self-compacting concrete

Slag concrete

Mass concrete

Concrete durability

Concrete workability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.431045.3300>

*Corresponding author: Mansor Fakhri.

Email address: fakhri@kntu.ac.ir

تأثیر جایگزینی سرباره با سیمان بر دوام و کارایی بتن خودتراکم

سعید رحمتی^۱، عماد توکلی^۲، منصور فخری^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی علم و صنعت، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در دهه اخیر، استفاده از بتن حجیم برای ساخت پروژه‌های مختلف زیرساختی افزایش یافته است. به دلیل ابعاد بزرگ‌تر این مقاطع و حجم بیشتر سیمان پرتلند، کاهش مقاومت و دوام هسته، اغلب در این مقاطع بتنی مشاهده می‌شود. محصولات فرعی صنعتی مانند سرباره کوره ذوب‌آهن به‌عنوان مواد افزودنی برای تولید بتن خود تراکم حجیم به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافته است. هدف از این تحقیق، کنترل و کاهش پیک دمای بتن حجیم با استفاده از جایگزین کردن سرباره با سیمان است که با در نظر گرفتن پیشنهاد آیین‌نامه، این مهم که کاهش و یا عدم تشکیل اترینگایت تأخیری و همچنین کاهش حرارت بتن می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در کنار آن ارتقاء دوام، مقاومت و کارایی بتن خودتراکم برای مقاطع حجیم ارزیابی شد. به این ترتیب چهار طرح مخلوط با درصد‌های جایگزینی ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره با سیمان و یک طرح مخلوط شاهد (با صفر درصد جایگزینی سرباره) استفاده شده است که به منظور تجزیه و تحلیل دقیق‌تر تأثیر افزودن این ماده در بتن خودتراکم حجیم، آزمایش‌های متعدد بر روی بتن تازه و سخت شده و سیمان صورت گرفت. ارزیابی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرباره تا ۵۵٪ حرارت سیمان ۲۸/۷۹٪ کاهش پیدا کرده است. کارپذیری بتن خودتراکم با استفاده از این سیمان به میزان ۷/۹٪ و ۵/۵٪ به ترتیب در آزمایش‌های جریان اسلامپ و جعبه L افزایش یافت و در دیگر آزمایش‌های کارایی بهبود خوبی مشاهده شد. در آزمایش‌های مکانیکی، بتن سخت شده با افزایش سرباره در سنین پایین، کاهش مقاومت و در سنین بالا افزایش مقاومت داشته است و در آزمایش‌های دوام با افزایش نسبت جایگزینی سرباره تا ۵۵٪ دوام نیز افزایش یافته است، این افزایش در آزمایش مقاومت الکتریکی ۱۴٪ بوده است. در نتیجه افزودن سرباره به بتن می‌تواند منجر به کاهش حرارت و افزایش قابل توجهی در مقاومت، کارایی و دوام بتن ایجاد نماید.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، بتن حجیم، بتن حاوی سرباره، دوام بتن، کارایی بتن.

شناخته دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.431045.3300	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.431045.3300	۱۴۰۳/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۱/۲۹	۱۴۰۲/۱۰/۰۹
منصور فخری fakhri@kntu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی ساخت و ساز، بتن خود تراکم به عنوان یک نوآوری مهم در عرصه مصالح ساختمانی مطرح گردیده است. بتن خود تراکم به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که ارائه می‌دهد، از جمله کاهش نیاز به وسایل و ابزارهای دستی برای ریخته‌گری و تراکم بتن، کاهش هزینه‌های نیروی کار و زمان، افزایش سرعت اجرا و بهبود کیفیت سطح بتن، به عنوان یک مصالح مورد توجه در صنعت ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳].

بیشتر وزن بتن را مصالح درشت‌دانه و ریزدانه آن تشکیل می‌دهد و معمولاً حدود ۶۰ درصد از حجم بتن خود تراکم را شامل می‌شود [۴-۷]. استفاده از حجم بزرگ سیمان در ترکیب بتن خود تراکم، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مطلوب نیست [۸]. علاوه بر این، عیار زیاد سیمان باعث افزایش دمای هیدراتاسیون می‌شود که منجر به ترک خوردگی بتن می‌شود [۹]. به منظور کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و کاهش عیار سیمان، از مواد پوزولانی به عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان استفاده می‌شود [۱۰]. سرباره‌ها به عنوان مواد ثانویه تولید فلزات و یا مواد پسماندهای صنعتی، از موادی هستند که می‌توانند به عنوان یک ماده جایگزین برای سیمان پرتلند در تولید بتن استفاده شوند [۱۱، ۱۲]. این مواد معمولاً حاوی ترکیبات فعالیست پذیرنده مانند سیلیس و آلومینا هستند که با تعامل با هیدروکسید کلسیم در معرض تشکیل ژل هیدراته می‌شوند و سبب افزایش دوام مکانیکی بتن می‌شوند [۱۳].

در تحقیقی که توسط شکرچی زاده و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، تأثیر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند آمیخته با سرباره کوره آهن‌گدازی بر خصوصیات مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان دادند که در سنین ۳ و ۷ روزه، نمونه حاوی سرباره اختلاف مقاومت زیادی با نمونه شاهد داشته است. این اختلاف در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه به میزان چشمگیری جبران شد [۱۴]. در سال ۲۰۱۵، تحقیقی توسط دبوچا^۱ و همکاران انجام شد که به مطالعه تأثیرات استفاده از پوزولان طبیعی و خاکستر کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزینی برای سیمان در ترکیب بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با این مواد، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، توانایی بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن را داراست [۱۵]. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط گنزالس^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در زمینه بتن‌های خود تراکم حاوی سرباره، نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی سرباره نسبت به بتن خود تراکم معمولی، دارای عمق نفوذ آب بیشتر، انبساط حجمی بیشتر و عمق کرناسیون بالاتری هستند [۱۶]. پاچیده و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب به نسبت ۷۳، ۴۵ و ۱۰۶ درصد افزایش یافته‌اند [۱۷، ۱۸]. مظلوم و همکاران (۲۰۲۱) ویژگی‌های تازه و سخت شده بتن خود تراکم را با استفاده از ترکیبی از سرباره مس و میکرو سیلیس بررسی کردند. در این تحقیق طرح اختلاط با ۱۰ درصد میکرو سیلیس و سرباره با درصد‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد جایگزین سیمان طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سرباره باعث افزایش کارایی بتن شده است و حالت بهینه جایگزینی سرباره، ۱۵ درصد بوده که باعث افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی به ترتیب ۱۷، ۱۱ و ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است [۱۹]. در مطالعه دیگر پاچیده و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر افزودن فنرهای فولاد کم‌کربن گالوانیزه با قطر‌ها، تعداد پیچ‌ها و درصد‌های مختلف بر خواص مکانیکی بتن خود تراکم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از یک فنر با قطر ۱۲ میلی‌متر، مقاومت فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب ۲۹، ۵۲ و ۳۶ درصد افزایش داده، اما به طور متعجب کننده، افزودن فنر با قطر ۱۶ میلی‌متر بر خواص مکانیکی تأثیری نداشته است. علاوه بر این، مشخص شد که قطر فنرها مؤثرترین پارامتر بر مقاومت بتن بوده و تعداد پیچ‌های فنر به تنهایی قادر به افزایش یا کاهش مقاومت نمی‌باشد [۲۰]. موکال^۳ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای تأثیر جایگزینی سیمان پرتلند با خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی بر دمای پیک، مقاومت فشاری و دوام بتن حجیم مقاومت بالا را بررسی کردند. آن‌ها از درصد‌های بالای مختلف خاکستر بادی و سرباره استفاده کردند. با تجزیه و تحلیل نتایج، مشاهده شد که استفاده از سرباره و خاکستر بادی با حجم بالا، پیک دما ۱۱

¹ Deboucha

² González

³ Mokal

تا ۱۳ درجه سانتی گراد کاهش و مقاومت فشاری را ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش یافت؛ همچنین افزایش دوام بتن نیز مشاهده شد [۲۱]. لو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از سرباره فولاد و خاکستر بادی به عنوان کنترل کننده حرارت هیدراتاسیون و همچنین تأثیر آن بر کارایی، دوام و مقاومت در بتن حجیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرباره فولاد در مقایسه با خاکستر بادی کاهش گرمایی بهتر، تخلخل کمتر، کاهش روانی کمتر و مقاومت فشاری بهتری را نشان می دهد [۲۲].

هدف از این تحقیق، کنترل و کاهش پیک دمای بتن حجیم با استفاده از جایگزین کردن سرباره با سیمان است که با در نظر گرفتن پیشنهاد آیین نامه، این مهم که کاهش و یا عدم تشکیل اترینگایت تأخیری و همچنین کاهش حرارت بتن می باشد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در کنار آن ارتقاء دوام، مقاومت و کارایی بتن خودتراکم برای مقاطع حجیم ارزیابی شده است. ACI 201.2R-16 به صراحت بیان کرده است که در صورت رعایت بعضی موارد خاص می توان امکان تشکیل اترینگایت تأخیری را که یکی از عوامل مخرب و تأثیرگذار بر عملکرد سازه بتنی حجیم و طول عمر آن می باشد به شدت کاهش داد [۲۳] و یکی از این شرایط مصرف سیمان حاوی ۳۵ درصد (یا بیشتر) سرباره کوره ذوب آهن است. همچنین در ACI 207.1R به صراحت بیان شده با توجه به ماهیت پوزولان ها، خصوصاً سرباره کوره ذوب آهن در صورت استفاده در بتن امکان بروز مشکلاتی چون انقباض شدیداً کاهش می یابد [۲۴]. از طرف دیگر به سه دلیل "بومی و در دسترس بودن"، "درصد شاخص فعالیت" که باعث کاهش چشمگیر حرارت زایی ناشی از واکنش هیدراسیون می شود و "ریزی" آن به این دلیل که نوع مورفولوژی دانه های سرباره در صورت آسیاب شدن با آسیاب گلوله ای به شکلی است که به رئولوژی و کارپذیری بتن خود تراکم کمک می کند از سرباره استفاده می شود. به دلیل شرط آیین نامه ACI 201.2R-16 نمی توان از ۳۵ درصد کمتر جایگزینی سرباره با سیمان استفاده کرد. بر این اساس طرح مخلوط های مورد تحقیق این مقاله با چهار طرح صورت گرفته است که از سرباره با درصدهای جایگزینی ۰، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد استفاده شده است. برای سنجش مقاومت از آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی (غیرمستقیم) و مدول الاستیسیته استفاده شده است. برای سنجش کارایی این تحقیق از آزمایش های بتن تازه شامل جریان اسلامپ، T50، جعبه L، حلقه J، قیف V و چگالی استفاده شده است و برای سنجش دوام از آزمایش های مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید با روش الکتریکی^۵ (RCPT)، مهاجرت یون کلرید^۶ (RCMT) و مقاومت الکتریکی استفاده شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه تولید سیمان سپاهان انتخاب شد. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ سپاهان اصفهان در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین وزن مخصوص این سیمان ۳۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cl	SO ₃	L.O.I	I.R	Free CaO	Total Alkalis	C ₃ A	Cr ⁶⁺	ترکیب
۲۱/۲	۴/۸	۴	۶۴	۲/۱	۰/۰۲۵	۲/۱	۱	۰/۳	۱/۳	۰/۶۵	۵/۵	<۰/۰۰۹	مقدار (درصد)

⁴ Luo

⁵ Rapid Chloride Permeability Test

⁶ Reverse Chloride Migration Test

۲-۱-۲- سرباره کوره ذوب آهن

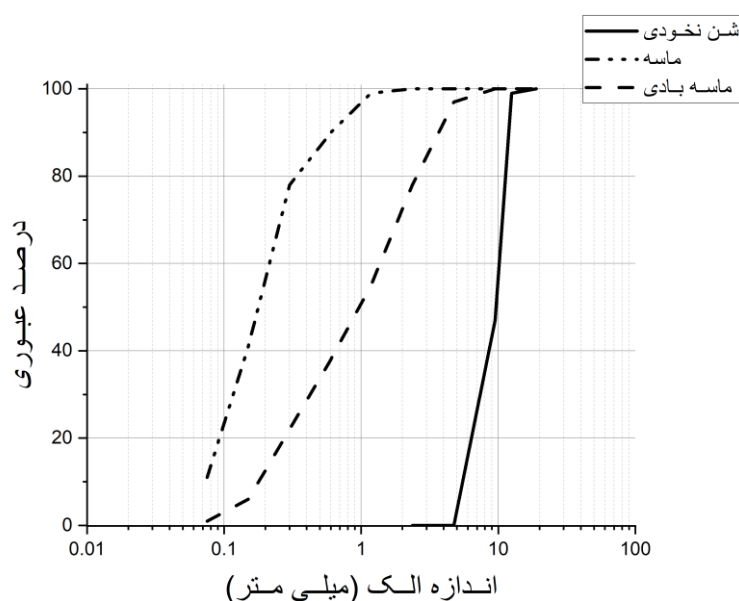
سرباره مورد استفاده از خط ۳ ذوب آهن اصفهان تأمین شد. پوزولان سرباره اصفهان دارای سطح ویژه در محدوده ۴۵۰۰ سانتی متر مربع بر گرم است. این پوزولان دارای وزن مخصوص ۲۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. مشخصات شیمیایی سرباره کوره ذوب آهن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات سرباره کوره ذوب آهن

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cl	SO ₃	L.O.I	I.R	K ₂ O	Na ₂ O	S--	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	ترکیب
۳۶	۱۱	۱	۳۸/۵	۷/۵	۰/۰۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۱	۱/۵	۱/۴	مقدار (درصد)

۲-۱-۳- سنگ دانه

شن، ماسه رودخانه‌ای و ماسه بادی مورد استفاده در این تحقیق دارای توده‌های ویژه (چگالی اشباع با سطح خشک) به ترتیب ۲/۵۸، ۲/۵۲ و ۲/۴۳ بر اساس ASTM C127 [۲۵] محاسبه شد. آزمایش دانه بندی آن مطابق استاندارد ASTM C 136 [۲۶] در جدول ۳ و شکل ۱ نشان داده شده است. درصد جذب آب شن، ماسه رودخانه‌ای و ماسه بادی نیز به ترتیب برابر ۲/۳٪، ۳/۵٪ و ۵/۹٪ محاسبه شد.



شکل ۱: منحنی دانه بندی

جدول ۳: دانه بندی مصالح سنگی

الک	۳/۴	۱/۲	۳/۸	۴	۸	۱۶	۳۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
درصد عبوری نخودی	۱۰۰	۹۹	۴۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
درصد عبوری ماسه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۷	۷۸	۵۵	۳۸	۲۲	۶	۱
درصد عبوری ماسه بادی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹	۹۰	۷۸	۴۱	۱۱

۲-۱-۴- آب و ماده افزودنی

آب مورد استفاده در این تحقیق برای تولید بتن با رعایت استاندارد ASTM D1129 [۲۷] مورد استفاده قرار گرفته شد. همچنین یک کاهنده آب بر پایه پلی کربوکسیلات نیز برای افزایش جریان پذیری مخلوطها با وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد.

۲-۲- طرح های مخلوط

از آنجاکه بتن خود تراکم باید نیازهای جریان پذیری، قابلیت عبوری و مقاومت در برابر جدایش را فراهم کند، طرح های مخلوط نشان داده شده در جدول ۴ انتخاب شد. بر این اساس طرح مخلوط های مورد تحقیق این مقاله با چهار طرح مخلوط، طرح مخلوط نمونه شاهد بدون سرباره (C0)، سیمان دوجزئی ۳۵ درصد سرباره و ۶۵ درصد سیمان (CS35)، سیمان دوجزئی ۴۰ درصد سرباره و ۶۰ درصد سیمان (CS40) و سیمان دوجزئی ۴۵ درصد سرباره و ۵۵ درصد سیمان (CS45) استفاده شده است. در این پژوهش، نسبت اختلاط بر اساس ACI 237R-07 [۲۸] محاسبه شد.

جدول ۴: طرح مخلوط های بتن خود تراکم

طرح مخلوط	مواد سیمانی (kg/m ³)		مواد سیمانی کل (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	ماسه بادی (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان (kg/m ³)
	سیمان	سرباره						
C0	۵۰۰	۰	۵۰۰	۵۰۵	۹۹۵	۱۷۵	۶	۰/۳۵
CS35	۳۲۵	۱۷۵	۵۰۰	۵۰۵	۹۹۵	۱۷۵	۵/۷۵	۰/۳۵
CS45	۲۷۵	۲۲۵	۵۰۰	۵۰۵	۹۹۵	۱۷۵	۵/۵	۰/۳۵
CS55	۲۲۵	۲۷۵	۵۰۰	۵۰۵	۹۹۵	۱۷۵	۵/۷۵	۰/۳۵

۲-۳- آزمایش تعیین گرمای هیدراته شدن سیمان

همانند هر واکنش شیمیایی، هیدراسیون ترکیبات سیمان نیز حرارت زا است و به میزان حرارتی که در هر گرم از سیمان هیدراته در اثر هیدراسیون در دمای معینی تولید می گردد، حرارت هیدراسیون گفته می شود و به روش های مختلفی قابل اندازه گیری است. درجه حرارت و دمایی که در آن عمل هیدراسیون انجام می شود، تأثیر قابل ملاحظه ای در نرخ حرارت تولید شده است دارد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C186 [۲۹] انجام شد.

۲-۴- آزمايش‌های بتن تازه

۲-۴-۱- آزمايش‌های کارایی

برای بررسی کارایی بتن آزمايش‌های جریان اسلامپ، T50، جعبه L، قیف V و حلقه J انجام گرفت. آزمايش جریان اسلامپ که نشان‌دهنده قابلیت جریان بتن به صورت خودکار و تغيير شکل آن در طی زمان است، مطابق با استاندارد ASTM C 1611 [۳۰] انجام گرفت (شکل ۲). توصیه‌نامه بتن‌های خود تراکم اروپا (EFNARC)، مقدار مجاز آزمايش جریان اسلامپ را در محدوده ۵۵۰-۸۵۰ میلی‌متر قرار داده است. آزمايش T50 با استفاده از استاندارد EN 12350 [۳۱] انجام شد تا بتوان خواص روانایی بتن را ارزیابی کرد. شرایط و روش آزمون جعبه L و V به ترتیب مطابق با استاندارد EN 12350-10 [۳۲] و EN 12350-9 [۳۳] انجام شد. EFNARC محدوده مجاز آزمايش جعبه L را بالاتر از ۰/۸ و حداکثر زمان تخلیه از قیف V را ۱۰ ثانیه گزارش کرده است. آزمايش حلقه J به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی بتن، مرتبط با خصوصیت چسبندگی و اندازه‌گیری نیروهای کششی بین لایه‌های مختلف بتن، استفاده می‌شود. استاندارد ASTM C 1621 [۳۴] شرایط و روش آزمون جعبه J را تعیین می‌کند و در شکل ۳ این آزمايش نشان داده شده است. مطابق با پیشنهاد EFNARC، اختلاف جریان اسلامپ حلقه J و جریان اسلامپ غیرمفید آن برای درجه عبوری ۰ بین صفر تا ۲۵ میلی‌متر، برای درجه عبوری ۱ بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متری و برای درجه عبوری ۲ بیشتر از ۵۰ میلی‌متر و حداکثر اختلاف ارتفاع ۱۰ میلی‌متر گزارش شده است.



شکل ۳: آزمايش حلقه J



شکل ۲: آزمايش جریان اسلامپ

۲-۴-۲- آزمايش جرم مخصوص

استاندارد ASTM C 138 [۳۵] شرایط و روش‌های آزمون جرم مخصوص بتن را تعیین می‌کند تا اطلاعات مرتبط با چگالی و ترکیب بتن به دست آید. این آزمايش معمولاً در کنار سایر آزمايش‌های مختلف برای ارزیابی کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۵- آزمایش‌های بتن سخت شده

۲-۵-۱- آزمایش‌های مکانیکی

بعد از انجام آزمایش‌های بتن تازه، برای بررسی خواص مکانیکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته انجام شد. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از استاندارد ASTM C 39 [۳۶]، سه نمونه با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر برای هر یک از سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شد (شکل ۴). اعداد مربوط به مقاومت فشاری در بخش نتایج ارائه شده است. آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 40$ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM C 78 [۳۷] صورت گرفت (شکل ۵). آزمایش‌های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM C 496 [۳۸] و ASTM C 469 [۳۹] انجام شد (شکل ۶). نمونه‌های مورد بررسی برای این آزمایش‌ها ۳ استوانه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و سن عمل‌آوری ۲۸ روزه برای هر یک بوده است. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش‌های مکانیکی و دوام در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵: نمونه منشوری تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای



شکل ۴: نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۷: نمونه‌های آزمایش‌های بتن سخت شده



شکل ۶: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت کششی

۲-۵-۲- آزمایش‌های دوام

دوام بتن با انجام آزمایش‌های مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید با روش الکتریکی، مهاجرت یون کلرید، جذب آب حجمی، عمق نفوذ آب تحت فشار، نرخ جذب آب موئینه و مقاومت الکتریکی بررسی شد. هدف از انجام آزمایش RCPT، تعیین هدایت الکتریکی بتن است که به عنوان روشی سریع در برآورد میزان مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر طراحی گردیده است. استاندارد ASTM C1202 [۴۰] شرایط و روش‌های دقیق آزمایش RCPT را مشخص کرده است و دستگاه مورد استفاده در شکل ۸ نمایش داده شده است. آزمایش RCMT با استفاده از استاندارد NT BUILD 492 [۴۱] به منظور ارزیابی نرخ و میزان مهاجرت یون‌های کلریدی در بتن انجام شد. با اندازه‌گیری نرخ مهاجرت و مقدار یون‌های کلریدی مهاجرت کرده، خصوصیات نفوذپذیری بتن به یون‌های کلریدی ارزیابی می‌شود. آزمایش مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از استاندارد AASHTO T358-15 [۴۲] به منظور اندازه‌گیری خصوصیات مقاومت الکتریکی بتن در محیط مرطوب انجام گرفت (شکل ۹). آزمایش‌های دوام بر روی ۳ نمونه از هر طرح مخلوط صورت گرفت.



شکل ۸: نمونه تحت آزمایش RCPT

شکل ۹: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت الکتریکی

۳- نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش تعیین گرمای هیدراته شدن سیمان

بر اساس متن استاندارد ملی سیمان ایران (INSO 17518) گرمای هیدراته شدن سیمان‌های با گرمای کم، در سن ۷ روزه نباید بیشتر از 270 j/g (حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد) باشد. مطابق با جدول ۵ پایین‌ترین گرمای هیدراته متعلق به سیمان CS55 است و سیمان C0 بیشترین گرما هیدراسیون را ایجاد می‌کند. این روند کاهش دما در مطالعات دیگری نیز مشاهده شد [۲۱، ۲۲].

جدول ۵: نتایج آزمایش گرمای هیدراته شدن سیمان

طرح مخلوط	گرمای هیدراسیون ۷ روزه (Cal/gr)	گرمای هیدراسیون ۲۸ روزه (Cal/gr)
C0	۶۰/۱۸	۷۰/۷۱
CS35	۵۱/۲۹	۵۸/۴۳
CS45	۴۷/۵۱	۵۲/۳۳
CS55	۴۳/۶۲	۵۰/۳۵

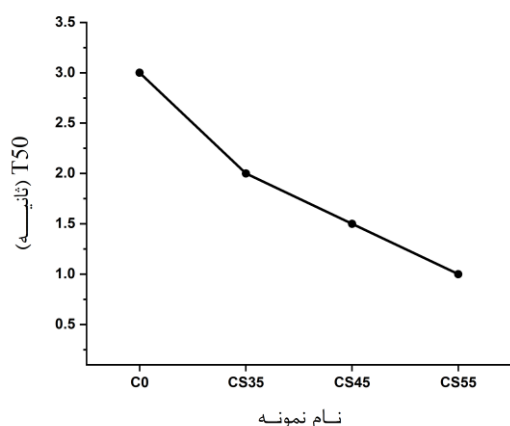
۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول ۶ و شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ آورده شده است.

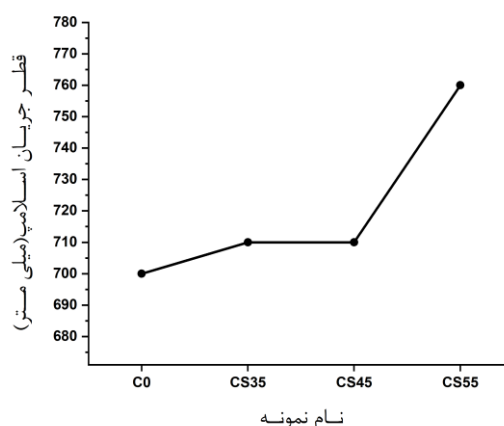
جدول ۶: نتایج آزمایش‌های بتن تازه

محدوده مجاز	CS55	CS45	CS35	C0	آزمایش‌ها
۵۵۰-۸۵۰	۷۶۰	۷۱۰	۷۱۰	۷۰۰	جریان اسلامپ (میلی‌متر)
۲> VS1	۱	۱/۵	۲	۳	T50 (ثانیه)
۲< VS2					
-	۲۳۴۲	۲۳۵۶	۲۳۶۰	۲۳۷۵	چگالی (kg/m ³)
۰/۸-۱	۰/۹۹۱	۰/۹۸۹	۰/۹۴۴	۰/۹۳۷	نسبت جعبه L
	۶/۷	۸	۸/۷	۹/۲	قیف V
۶-۱۲					۵ دقیقه
	۵/۷	۷	۷/۱	۷/۹	۱۰ دقیقه
-	۳	۵	۷	۸	اختلاف جریان اسلامپ (Cm)
-	۰/۵	۰/۷	۰/۷	۰/۸	انسداد (%)
۰-۱۰	۰/۸۵	۱	۱/۵	۲	اختلاف ارتفاع داخل و خارج (حلقه J)
					(mm)

مطابق با استاندارد EFNARC که پیش‌تر گفته شد، جریان اسلامپ تمامی نمونه‌ها در محدوده ۵۵۰-۸۵۰ mm قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد سرباره، مقدار جریان اسلامپ افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهنده افزایش کارایی است و بهترین جریان اسلامپ را CS55 داشته است. افزایش جریان اسلامپ می‌تواند به بزرگ‌تر بودن اندازه ذرات سرباره نسبت به سیمان مربوط باشد؛ افزایش اندازه ذرات باعث کاهش سطح کل می‌شود که می‌تواند واکنش شیمیایی را کاهش دهد و جریان پذیری را افزایش دهد. طبق نتایج آزمایش T50 که نشان‌دهنده لزجت خمیری بتن تازه است، مدت‌زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر نمونه‌ها در محدوده EFNARC است و با افزایش درصد سرباره، این مقدار کاهش می‌یابد که به عبارتی نشان‌دهنده افزایش جریان پذیری نمونه‌هاست (شکل ۱۱). سرباره به دلیل اندازه ذرات آن که بزرگ‌تر از سیمان است، جریان پذیری را با کوتاه کردن زمان لازم برای رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر، افزایش می‌دهد. علاوه بر آن سرباره در مقایسه با سیمان تنش تسلیم کمتری دارد که به دلیل کاهش نیروی داخلی به زمان کمتری برای شروع جریان نیاز دارند [۴۷-۴۳].

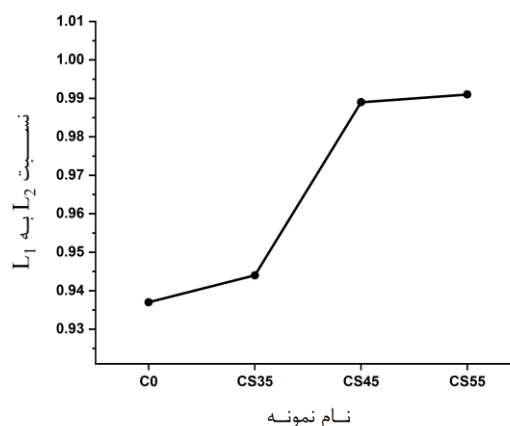
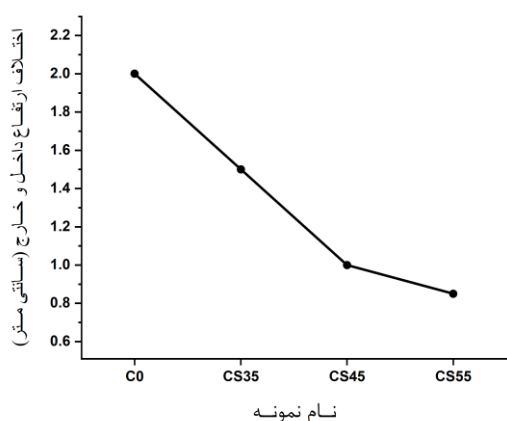


شکل ۱۱: زمان جریان اسلامپ T50

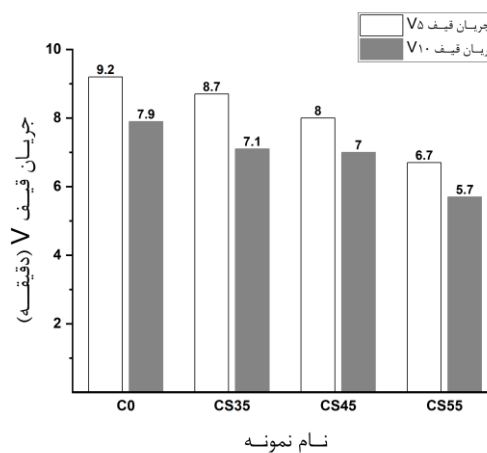
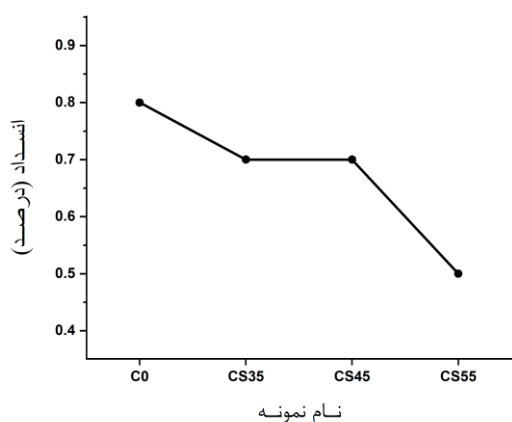


شکل ۱۰: قطر جریان اسلامپ

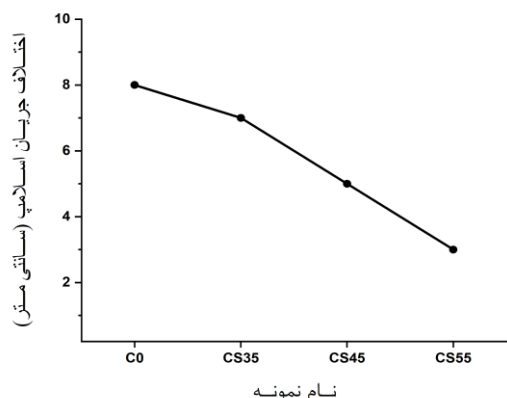
بر اساس محدوده قابل قبول EFNARC برای آزمایش‌های جعبه L و قیف V، تمامی مخلوط‌های ساخته شده دارای شرایط مطلوبی هستند (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). هرچه نسبت جعبه L به عدد ۱ نزدیک‌تر شود و مدت زمان تخلیه کوتاه‌تر باشد، شرایط بتن مطلوب‌تر و احتمال عدم پر نشدن قسمت‌هایی در مقطع توسط بتن کمتر خواهد شد؛ بنابراین مخلوط‌هایی که دارای نسبت‌های L بیشتر و مدت زمان تخلیه کمتر هستند در اولویت خواهند بود. بر این اساس و مطابق با جدول ۷ بالاترین نسبت جعبه L و بهترین زمان تخلیه را CS55 داشته است. سرباره دارای اندازه ذرات بزرگ‌تر از سیمان است که به کاهش سطح، کاهش واکنش پذیری و سهولت حرکت بتن (قابلیت پر شدن) کمک می‌کند. علاوه بر این، سرباره به دلیل کاهش نیروی داخلی در مخلوط، تنش تسلیم کمتری دارد که به بتن برای افزایش روانی کمک می‌کند [۴۸، ۴۹]. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش حلقه J مشاهده می‌گردد که میزان عبور پذیری بتن در حد متوسط با درجه عبور ۱ قرار دارد (شکل ۱۵). با افزایش مقدار سرباره مقادیر اختلاف جریان اسلامپ، انسداد و اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه J کاهش یافته است که نشان‌دهنده روانی بالا نمونه‌ها و کم بودن احتمال انسداد است. با توجه به چگالی کمتر پوزولان‌ها نسبت به سیمان، به هر میزان جایگزینی این پوزولان‌ها به جای سیمان بیشتر شود، انتظار می‌رود چگالی بتن تازه نیز کاهش یابد (شکل ۱۴). استفاده از افزودنی شیمیایی با فرمول متناسب با مصالح مصرفی در طرح مخلوط‌ها یکی از موارد مهم در به دست آوردن چگالی بتن با مشخصات مورد هدف تحقیق بوده است.



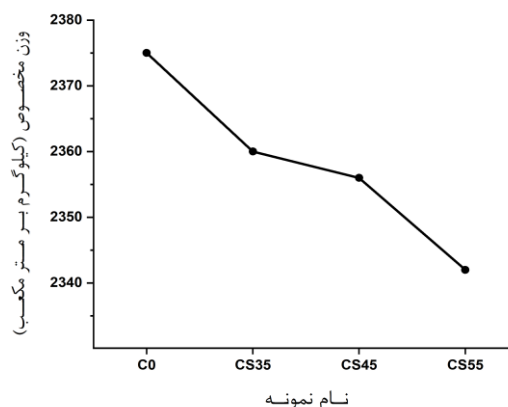
شکل ۱۲: نتایج آزمایش جعبه L



شکل ۱۳: نتایج آزمایش قیف V



شکل ۱۵: نتایج آزمایش حلقه J.



شکل ۱۴: نتایج آزمایش وزن مخصوص

۳-۳- نتایج آزمایش های بتن سخت شده

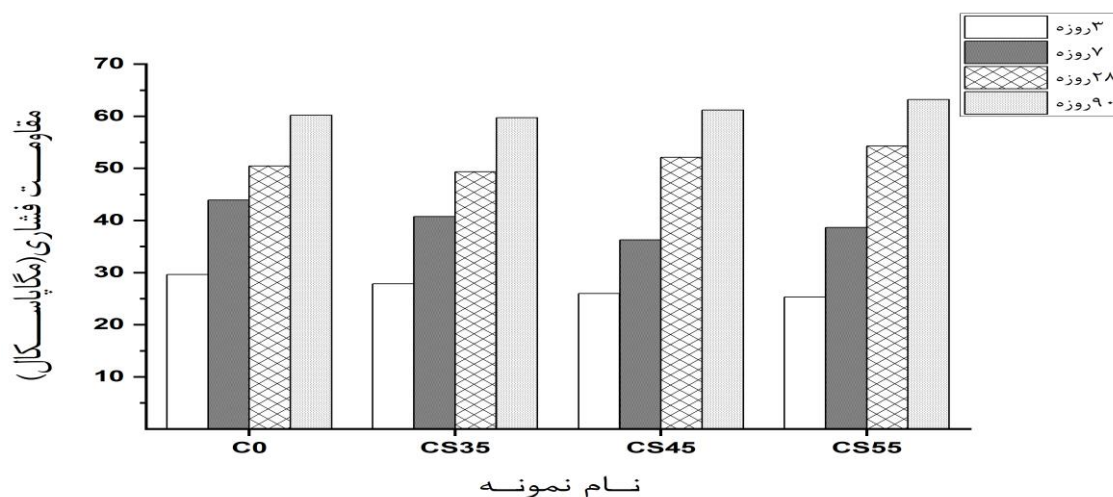
۳-۳-۱- آزمایش های مکانیکی

هر چهار مخلوط مقاومت فشاری هدف که ۵۰ مگاپاسکال برای مقاطع سازه‌ای هستند را کسب کرده‌اند. مطابق شکل ۱۶ و جدول ۷ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره در سنین عمل‌آوری پایین نسبت به نمونه‌ی شاهد کمتر است و باگذشت زمان این اختلاف کاهش می‌یابد و در نهایت تقریباً تمامی نمونه‌های دارای سرباره مقاومتی بیشتر نسبت به طرح مخلوط نمونه شاهد داشته‌اند. همچنین با افزایش درصد سرباره در سنین پایین مقاومت کاهش می‌یابد ولی در سنین عمل‌آوری بالا کاملاً برعکس است. سرباره اندازه ذرات بزرگی نسبت به سیمان دارد که منجر به کاهش سطح کل و افزایش زمان گیرش در سنین پایین می‌شود. با این حال، باگذشت زمان، هیدراتاسیون افزایش یافته که به افزایش مقاومت کمک می‌کند [۵۰]. سایر محققین نیز به یافته‌هایی موازی با نتایج به دست آمده در این مطالعه در مورد اثرات سرباره بر مقاومت فشاری بتن دست یافتند. بوکندکجی^۷ و همکاران بیان کردند که با افزایش درصد جایگزینی سرباره، مقاومت فشاری بتن‌ها به‌ویژه در سنین اولیه نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد، اما مقادیر مقاومت حاوی سرباره با نمونه شاهد در سنین بعدی (۵۶ و ۹۰ روزه) قابل مقایسه می‌شود [۴۸]. ژائو^۸ و همکاران بیان کرد که هیدروکسید کلسیم (CH)، که از هیدراتاسیون سیمان اولیه در سنین بعدی منشأ می‌گیرد، با سرباره واکنش می‌دهد تا محصول هیدراتاسیون ثانویه را تشکیل دهد که در نتیجه نتایج قابل مقایسه‌تری با بتن شاهد دارد [۵۱]. جلول^۹ و همکاران استدلال کردند که کاهش مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد سرباره را می‌توان به فعالیت پوزولانی کم سرباره در سنین اولیه نسبت داد [۵۲]. مقاومت خمشی نمونه‌های CS35 و CS45 نسبت به نمونه شاهد افزایش نداشته‌اند ولی نمونه‌ی CS55 مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته است (شکل ۱۷). همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی با افزودن سرباره در تمامی درصدها نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. مطابق شکل ۱۸ با افزودن سرباره، مدول الاستیسیته نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است ولی با افزایش درصد سرباره کاهش مدول الاستیسیته مشاهده شده است.

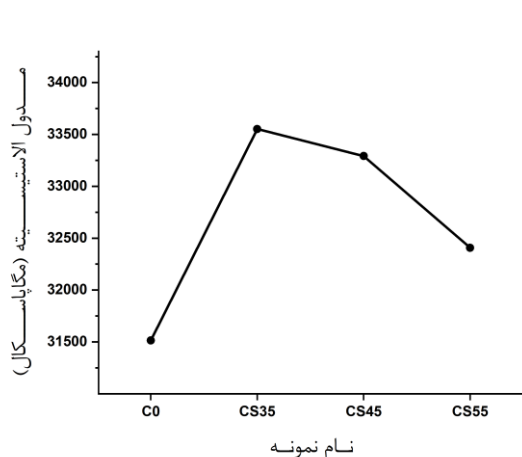
⁷ Boukendakdji

⁸ Zhao

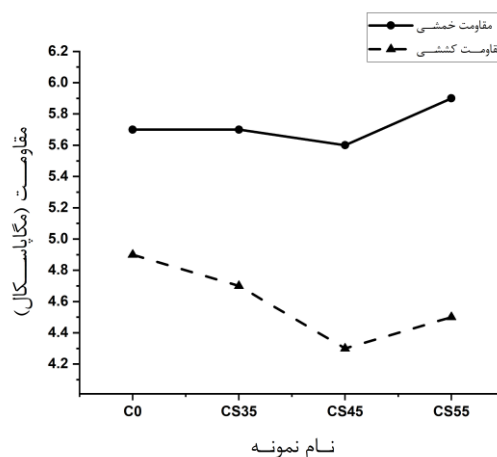
⁹ Djelloul



شکل ۱۶: نتایج مقاومت فشاری



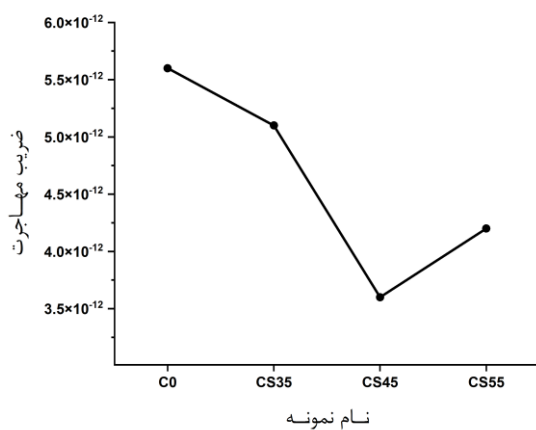
شکل ۱۸: نتایج آزمایش مدول الاستیسیته



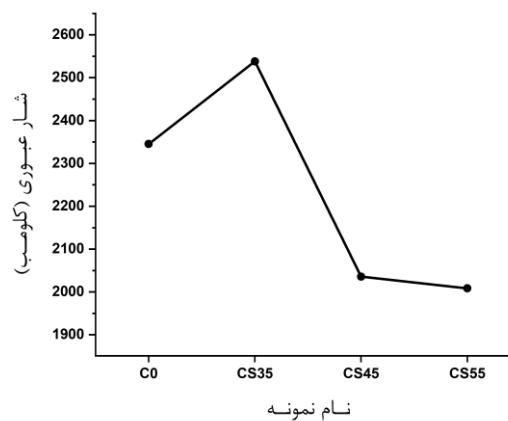
شکل ۱۷: نتایج مقاومت کششی و خمشی

۳-۳-۲- آزمایش های دوام

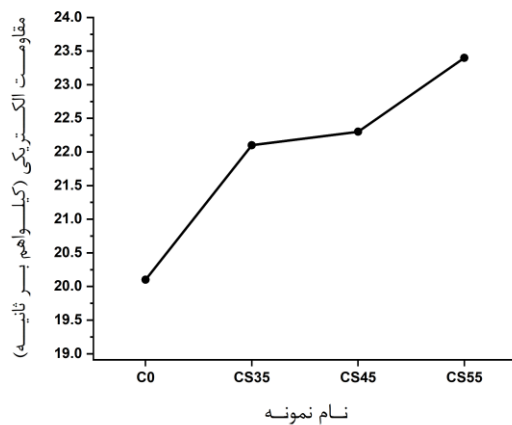
با توجه به شکل های ۱۹ تا ۲۱ و جدول ۷، مشاهده می گردد که با افزودن سرباره مقدار شار عبوری و ضریب مهاجرت یون کلرید کاهش و مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. این تغییرات نشان دهنده افزایش تراکم بتن و بسته شدن منافذ و در نتیجه بهبود دوام بتن است.



شکل ۲۰: نتایج آزمایش RCMT



شکل ۱۹: نتایج آزمایش RCPT



شکل ۲۱: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

جدول ۷: نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

نام آزمایش	واحد	C0	CS35	CS45	CS55
مقاومت فشاری	۳	۲۹/۶۲	۲۷/۸۳	۲۵/۹۸	۲۵/۳۳
	۷	۴۳/۹۱	۴۰/۷۴	۳۶/۳۰	۳۸/۶۵
	۲۸	۵۰/۴۵	۴۹/۳۴	۵۲/۱۲	۵۴/۳
	۹۰	۶۰/۲	۵۹/۷	۶۱/۱۷	۶۳/۲
مقاومت کششی	۲۸	۴/۹	۴/۷	۴/۳	۴/۵
	۲۸	۵/۷	۵/۷	۵/۶	۵/۹
مقاومت خمشی	۲۸	۵/۷	۵/۷	۵/۶	۵/۹
RCPT	کلمب	۲۳۴۵/۳	۲۵۳۸	۲۰۳۵/۶۷	۲۰۰۸/۲۵
RCMT	10°(-12)	۵/۶	۵/۱	۳/۶	۴/۲
مقاومت الکتریکی	KΩ/cm	۲۰/۱	۲۲/۱	۲۲/۳	۲۳/۴
مدول الاستیسیته	Mpa	۳۱۵۱۴	۳۳۵۵۲	۳۳۲۹۲	۳۲۴۰۷

۴- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی تأثیر سرباره به بتن خودتراکم برای مقاطع حجیم در چهار طرح مخلوط با درصد‌های جایگزینی ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد سرباره با سیمان و یک طرح مخلوط شاهد (با صفر درصد جایگزینی سرباره) صورت گرفته است که نتایج کلی آن در زیر شرح داده می‌شود:

۱. نتایج سیمان

• نتایج سیمان نشان می‌دهد با افزایش سرباره تا ۵۵ درصد جایگزینی با سیمان، دمای بتن را به شکل قابل توجهی کاهش داده و به وجود آمدن اترینگایت تأخیری را به حداقل می‌رساند که در بتن با مقاطع حجیم بسیار حائز اهمیت است.

۲. نتایج بتن تازه

- بر اساس نتایج به دست آمده هرچه مقدار جایگزینی سرباره با سیمان بیشتر می‌شود جریان اسلامپ بیشتر و T50 کمتر می‌شود. طرح مخلوط CS55 با دارا بودن جریان اسلامپ حدود ۷/۹ درصد بیشتر از طرح شاهد و کاهش حدود ۶۷ درصد مقدار T50 نسبت به طرح شاهد توانسته بهترین خصوصیات خودتراکمی را داشته باشد.
- هرچه مقدار سرباره بیشتر می‌شود نسبت جعبه L افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه مقدار جایگزینی سرباره باعث افزایش حدود ۵/۵ درصد نسبت جعبه L طرح مخلوط CS55 نسبت به طرح مخلوط شاهد شده است.
- به طور کلی افزایش نسبت جایگزینی سرباره با سیمان در بتن باعث روانی بیشتر و خودتراکمی بیشتر بتن می‌شود. همان طور که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است طرح مخلوط‌ها کارایی بسیار خوبی داشته‌اند و در کنار آن هیچ‌گونه جداسازی و آب انداختگی وجود ندارد.

۳. نتایج بتن سخت شده

- افزایش نسبت جایگزینی سرباره با سیمان در کوتاه مدت باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود، ولی در بلندمدت مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد.

- با افزایش نسبت جایگزینی سرباره با سیمان میزان شار عبوری آزمایش RCPT و ضریب مهاجرت یون کلرید (RCMT) کاهش یافت.
- با افزایش مقدار سرباره در طرح مخلوط CS55 نسبت به طرح مخلوط شاهد، حدود ۱۴ درصد افزایش مقاومت الکتریکی مشاهده شد.

به طور کلی افزایش سرباره تا ۵۵ درصد می تواند باعث کاهش پیک دمایی بتن در مقاطع حجیم باشد و تا حد چشمگیری از تشکیل اترینگایت تأخیری جلوگیری کند و همچنین باعث کاهش حرارت بتن شود. آزمایش های دوام نشان می دهد افزایش نسبت سرباره تا ۵۵ درصد جایگزینی با سیمان باعث افزایش دوام بتن می شود. همچنین طرح مخلوط CS55، بهبودهای قابل توجهی در مقاومت های مختلف بتن به دست آورده و می توان آن را به عنوان یک گزینه مناسب در کاهش خوردگی و افزایش دوام بتن در برابر تأثیرات مختلف در نظر گرفت. همچنین، طراحی مخلوطها با توجه به نتایج آزمایش ها می تواند بهبودهای دیگری در خصوص عملکرد و دوام بتن به همراه داشته باشد.

مراجع

- Khayat, K. H. (1999). Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *Materials Journal*, 96(3), 346-353.
- Alyhya, W. S. (2016). Self-compacting concrete: mix proportioning, properties and its flow simulation in the V-funnel (Doctoral dissertation, Cardiff University).
- Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P. M., Coutinho, J. S., & Figueiras, J. (2006). A methodology to assess robustness of SCC mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(12), 2115-2122.
- Oh, B. H., Kim, J. C., & Choi, Y. C. (2007). Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers. *Engineering fracture mechanics*, 74(1-2), 243-257.
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., & Swamy, R. N. (2010). Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. *Composites Part B: Engineering*, 41(1), 17-24.
- Caggiano, A., Cremona, M., Faella, C., Lima, C., & Martinelli, E. (2012). Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Construction and Building Materials*, 37, 832-840.
- Tavakoli, E., & Fakhri, M. (2024). Durability and Performance Evaluation of Lightweight Self-Compacting Concrete Using Artificial and Natural Lightweight Aggregates in Sulfuric Acid Environment: An Experimental and Analytical Study. *Journal of Concrete Structures and Materials*, doi: 10.30478/jcsm.2024.375958.1307
- Topçu, İ. B., & Uygunoğlu, T. (2010). Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction and Building Materials*, 24(7), 1286-1295.
- Saeed Rahmati, Emad Tavakoli, and Mansor Fakhri. (2023). Cement Design for Making high-Strength Self-Compacting Bulk Concrete (C50), *Journal of Concrete Structures and Materials*, <https://doi.org/10.30478/jcsm.2023.403141.1329>
- Pachideh, G., & Gholhaki, M., & Ketabdari, H. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*, 29, 101178.
- Moodi, F., Norouzi, S., & Dashti, P. (2021). Mechanical properties and durability of alkali-activated slag repair mortars containing silica fume against freeze-thaw cycles and salt scaling attack. *Advances in concrete construction*, 11(6), 493-505.
- Moodi, F., Ramezaniapor, A., Farhadian, F., & Dashti, P. (2021). Durability of cementitious and geopolymer coating mortars against sulfuric acid attack. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(9), 3693-3708.

- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., ... & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104679.
- Shokrchizadeh, M., Chini, M., Azari Jafari, H., & Gorji, S. (2013). The effect of chemical and physical properties of iron-smelting slag on blended Portland cement. In *Proceedings of the 5th National Concrete Conference of Iran*. Tehran.
- Deboucha, W., Oudjit, M. N., Bouzid, A., & Belagraa, L. (2015). Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. *Procedia Engineering*, 108, 254-261.
- González-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P., de Sensale, G. R., & Aguado, A. (2019). Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 217, 543-556.
- Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag. *Journal of Building Engineering*, 24, 100757.
- Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(2), 221-246.
- Mazloom, M., Akbari Jamkarani, M., & Afzali, F. (2021). Investigating the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete containing copper slag. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9), 289-305.
- Pachideh, G., & Ketabdari, H. (2023). Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-20.
- Mokal, M. P., Mandal, R., Nayak, S., & Panda, S. K. (2023). Efficacy of high-volume fly ash and slag on the physicochemical, durability, and analytical characteristics of high-strength mass concrete. *Journal of Building Engineering*, 76, 107295.
- Luo, T., Wang, X., & Zhuang, S. (2023). Value-added utilization of steel slag as a hydration heat controlling material to prepare sustainable and green mass concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02619.
- Butler, W. B., Janssen, D. J., Schell, H. C., Cabrera, J. G., Keck, R. H., Schmitt, J. W., ... & Hill, R. L. (2001). *Guide to Durable Concrete*. ACI: Montreal, QC, Canada.
- ACI Committee. (2005). *ACI 207.1 R-05—Guide to Mass Concrete*. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 30.
- ASTM C127: ASTM International. (2021). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM C127-21. Retrieved from.
- ASTM C136: ASTM International. (2021). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM C136-21. Retrieved from.
- ASTM D1129: ASTM International. (2021). Standard Test Method for Moisture Content of Soil by Oven-Drying Method. ASTM D1129-21. Retrieved from.
- ACI 237R-07: American Concrete Institute. (2007). *ACI 237R-07: Design, Construction, and Maintenance of Concrete Insulated Systems*. Retrieved from.
- ASTM C186: ASTM International. (2019). Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement. ASTM C186-2019
- ASTM C1611: ASTM International. (2021). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611-2021.
- EN 12350: European Committee for Standardization. (2019). *Testing Fresh Concrete - Part XX: Self-Compacting Concrete - Slump Test*. EN 12350-2019.
- EN 12350-10: European Committee for Standardization. (2021). *Testing Fresh Concrete - Part X: Self-Compacting Concrete - Workability - V-funnel Test*. EN 12350-10-2021.

- EN 12350-9: European Committee for Standardization. (2021). Testing Fresh Concrete - Part IX: Self-Compacting Concrete - Workability - L-box Test. EN 12350-9-2021.
- ASTM C1621: ASTM International. (2017). Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring. ASTM C1621-2017.
- ASTM C138: ASTM International. (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138-2017.
- ASTM C39: ASTM International. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39-2021.
- ASTM C78: ASTM International. (2022). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM C78-2022.
- ASTM C496: ASTM International. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C496-2017.
- ASTM C469: ASTM International. (2022). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM C469/C469M-22
- ASTM C1202: ASTM International. (2022). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C1202-2022.
- NT BUILD 492: Nordic Innovation Centre. (2019). Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. NT BUILD 492-2019.
- AASHTO T358-15: American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). Standard Method of Test for Surface-Drying Characteristics of Concrete Pavement Puddles Using the Puddlemaster. AASHTO T358-15.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., & Özbay, E. (2011). Permeation Properties of Self-Consolidating Concretes with Mineral Admixtures. *ACI Materials Journal*, 108(2).
- Madandoust, R., & Mousavi, S. Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and building materials*, 35, 752-760.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., & Venkatasubramani, R. (2013). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *KSCE journal of Civil Engineering*, 17(2), 465-472.
- Uysal, M., & Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building materials*, 25(11), 4112-4120.
- Boukendakdji, O., Kadri, E. H., & Kenai, S. (2012). Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, 34(4), 583-590.
- Dadsetan, S., & Bai, J. (2017). Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 146, 658-667.
- Al-Oran, A. A. A., Safiee, N. A., & Nasir, N. A. M. (2022). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete using metakaolin and GGBS as cement replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(1), 379-392.
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66-74.
- Djelloul, O. K., Menadi, B., Wardeh, G., & Kenai, S. (2018). Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag. *Advances in concrete construction*, 6(2), 103.