

Experimental Study of the Iron slag Effect on Fluidity and Strength Characteristics of Self-Compacting Concrete

Fadi Aioush¹, Mohammad Kazem Sharbatdar^{2*}

1- Ph.D. Graduated, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. msharbatdar@semnan.ac.ir

Received: 28 June 2023 Revised: 07 February 2024 Accepted: 12 February 2024

Research paper

Abstract:

The rheological properties of self-compacting concrete (SCC) play a key role in saving both time and cost during construction. This research aimed to examine the impact of incorporating iron slag with two different specific surface areas on the rheological and strength characteristics of SCC. The first type of iron slag had a specific surface area of 3800 square centimeters per gram (Blaine) (standard iron slag), while the second type had a finer surface of 6000 Blaine. Ten concrete mixes were developed, including a control mix and nine mixes with three iron slag compositions, replacing 20, 30, and 40% of the cement by weight. The first composition consisted of 100% standard slag, the second of 75% standard and 25% fine slag, and the third of 50% standard and 50% fine slag. Fresh concrete was evaluated using the J-ring and V-funnel tests. The J-ring test measured flow diameter, T50 time to reach a 500 mm flow diameter, and the height difference (Δh) between the center and perimeter of the concrete. The V-funnel test measured flow time. The strength properties of the hardened concrete were assessed through compressive and tensile splitting strength tests. The J-ring test results showed a reduction in flow diameter for all slag-containing mixes. Mixes with the third composition containing 30% and 40% slag showed a reduction of 2.5 and 3.1%, respectively. T50 times improved for the mixes containing the first composition, with 20% and 30% slag yielding a reduction of 53 and 47%, respectively, compared to the control mix. The Δh results indicated an increase in height for all slag compositions, with the third composition at 30 and 40% slag yielding increases of 76% and 69%, respectively. In the V-funnel test, 20 and 40% slag in the first composition reduced flow time by 12 and 11%, respectively. The two slag types affected flow diameter, T50, Δh , and V-funnel time differently. At 28 days, compressive strength increased by 12 and 15% with the addition of 30 and 40% of the third slag composition, respectively. The 28-day tensile split strength test showed an 8% increase with the addition of 30% of the third composition. The second and third compositions, containing 25 and 50% fine slag with a specific surface area of 6000 Blaine, led to an increased rate of hydration, which enhanced both compressive and tensile strength compared to the first composition.

Keywords: Self-compacting concrete, Iron slag, Fluidity indicators, Compressive strength, Tensile split strength.

*Corresponding Author: Mohammad Kazem Sharbatdar

Aioush, F., Sharbatdar, M. K. Experimental Study of the Iron slag Effect on Fluidity and Strength Characteristics of Self-Compacting Concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(2): 1-18.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.403119.1328>

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/>).

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر سرباره آهن بر خصوصیات مقاومتی و روانی بتن خودتراکم

فادی عیوش^۱، محمد کاظم شربتدار^{۲*}

۱- فارغ التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msharbatdar@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف این تحقیق بررسی تاثیر افزودن سرباره آهن بر خواص رئولوژیکی و مقاومتی بتن خودتراکم بود. سرباره آهن با دو نوع سطح مخصوص متفاوت معمولی با ۳۸۰۰ بلین و نرم با ۶۰۰۰ بلین استفاده شدند. ده مخلوط بتن شامل بتن مرجع و ۹ مخلوط حاوی سه ترکیب سرباره با نسبت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد از وزن سیمان طراحی و ساخته شدند. ترکیب اول سرباره از ۱۰۰ درصد سرباره معمولی ترکیب دوم ۷۵ درصد سرباره معمولی و ۲۵ درصد سرباره نرم و ترکیب سوم ۵۰ درصد سرباره معمولی و ۵۰ درصد سرباره نرم تشکیل شدند. آزمایشات حلقه L (برای اندازه گیری قطر جریان و زمان T50 و اختلاف ارتفاع بتن در وسط و بیرون حلقه) و جعبه V شکل (برای اندازه گیری زمان تخلیه) برای بتن تازه و آزمایشات مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن برای اندازه گیری خواص مقاومتی بتن سخت شده انجام شدند. نتایج آزمایش حلقه نشان داد که افزودن هر یک از انواع سرباره منجر به کاهش بسیار جزئی قطر جریان شد در حالی که نتایج T50 نسبت به بتن مرجع بهبود یافتند و مخلوط های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره ترکیب اول به ترتیب ۵۳ و ۴۷ درصد کاهش داشتند. در مورد اختلاف ارتفاع بتن بین وسط و بیرون حلقه نتایج حاکی از افزایش ارتفاع در هنگام افزودن هر ترکیب سرباره بود و مخلوط های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره ترکیب سوم به ترتیب ۷۶ و ۶۹ درصد افزایش نشان دادند. آزمایش جعبه V شکل تنوع نتایج را نشان داد که افزودن ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره ترکیب اول منجر به کاهش زمان تخلیه به ترتیب ۱۲ و ۱۱ درصد شد. بنابراین سرباره ها با دو نرمی مختلف دارای اثرات متفاوت بر قطر جریان، زمان جریان T50 و زمان تخلیه بتن داشتند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه با افزودن ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره ترکیب سوم به ترتیب ۱۲ و ۱۵ درصد افزایش داشت و مقاومت کششی دو نیم شدن نیز با افزودن ۳۰ درصد سرباره ترکیب سوم تا ۸ درصد افزایش داشت. لذا در ترکیب دوم و سوم بتن حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سرباره با نرمی ۶۰۰۰ بلین افزایش سرعت واکنش هیدراسیون و مقاومت های فشاری و کششی نسبت به ترکیب اول مشاهده شد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، سرباره آهن، شاخص های روانی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن.

بتن یکی از مهمترین مصالح ساختمانی است که مصرف زیادی در سراسر جهان دارد و بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی از قابلیت جریان بالایی برخوردار است. محققین زیادی با استفاده از مواد مکمل سیمانی به دنبال بهبود خواص بتن تازه و سخت شده بودند. بتن خودتراکم (SCC=Self-Compacted Concrete) جایگزین مناسبی با بتن معمولی برای رفع مشکلات خوردگی فولاد آسیب ناشی از سیکل‌های آب شدن و یخ زدن حمله سولفات و غیره است و دارای سه ویژگی اصلی قابلیت جریان توانایی عبور و مقاومت در برابر جداسازی است که می‌تواند نوآوری در طراحی و سهولت در ساخت سازه‌های بتنی را فراهم کند [۱]. این بتن بدون نیاز به ویبره تحت وزن خود جریان می‌کند و قالب‌ها هم را بدون فضاهای خالی پر می‌کند و این امر باعث می‌شود فرآیند پمپاژ برای بتن ریزی در پل‌های با طول زیاد ساختمان‌های بلند پایه‌های عمیق دال‌ها و غیره امکان‌پذیر باشد [۲]. علاوه بر این قابلیت جریان زیاد این بتن امکان ایجاد سازه‌های جدید با فرم‌های پیچیده را فراهم می‌کند که نه تنها از نظر زیبایی از سازه‌های بتنی معمولی جذاب‌تر هستند [۳] و به دلیل وزن سبک‌تر مصالح کمتر مصرف شده از دوام بیشتر و معایب داخلی و خارجی کمتر برخوردارند [۴]. ضمناً منجر به کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز به دلیل بهبود بهره‌وری کاهش تعداد کارگران مورد نیاز برای فرآیند تراکم صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه تجهیزات تراکم کاهش برخی مصالح کاهش کارگران برای تکمیل سطح خارجی بتن تازه و سخت شده کاهش زمان ساخت به دلیل پمپاژ سریع بتن استفاده کارآمدتر تجهیزات اختلاط و حمل زمان کمتر برای بتن ریزی و آماده شدن برای عمل‌آوری افزایش ایمنی و پایداری ساختمان به دلیل حذف نیاز به ویبراتورها حذف خطرات محل مورد نیاز برای فرآیند تراکم کاهش آلودگی‌های صوتی می‌شوند [۴].

از انواع مواد مکمل سیمانی برای بهبود خواص بتن خودتراکم می‌توان استفاده کرد. شریبتدار و همکاران تحقیق آزمایشگاهی را تحت عنوان بهبود خواص بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس و متاکائولین برای حفظ روانی بتن با استفاده از مواد پوزولانی انجام دادند. در این تحقیق از ترکیب متاکائولین و میکروسیلیس با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ جایگزین سیمان با ۱۷ طرح اختلاط استفاده شد و مشخصات مکانیکی و روانی آن بررسی گردید و نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که استفاده از پوزولان‌های فوق تا ۱۵ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری و تا ۲۷ درصد بهبود مقاومت کششی بتن خودتراکم شدند [۵]. زیاد و همکاران روانی و خواص مکانیکی بتن خودتراکم با میکروسیلیس و انواع مختلف الیاف میکروسیلیس سنگدانه‌های درشت سنگ آهک خرد شده با شش مخلوط بتن بررسی کردند و حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۷ میلی‌متر سنگدانه‌های ریز ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر فوق‌روان‌کننده و انواع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و الیاف سنگ بازالت به‌کار بردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف قطر جریان اسلامپ نمونه‌ها را کاهش داد و تأثیر منفی بر اسلامپ داشت. کمترین قطر جریان اسلامپ (۶۱۰ میلی‌متر) با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن به‌دست آمد که ممکن است به حجم زیاد الیاف بستگی داشت و حجم زیاد الیاف بر خواص بتن تازه و رئولوژیکی آن تأثیر منفی می‌گذارد و مانع حرکت بتن تازه می‌شود [۶]. برخی از محققین اثر سرباره را بر روی بتن خودتراکم ساخته شده با سنگدانه‌های باز یافتی را ارزیابی کردند. سنگدانه‌های باز یافتی از تخریب ساختمان‌ها تهیه می‌شوند و منجر به کاهش مصرف منابع طبیعی تجدیدناپذیر می‌شود که به حفظ محیط‌زیست و منابع کمک می‌کند و در راستای توسعه پایدار صنعت بتن است [۷]. خواص مکانیکی و دوام بتن‌های باز یافتی و عملکرد ساختاری عناصر آن در بیست سال گذشته به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته است [۸، ۹]. بر اساس نتایج اثبات شده توسط ژانگن‌گو و همکاران استفاده از ترکیب خاکستریادی سرباره و دوده سیلیسی ضررهای ناشی از افزودن سنگدانه‌های بتن باز یافتی را جبران کمک می‌کند بدین ترتیب خواص بتن خودتراکم با کاهش سیمان و منابع طبیعی موجود بهبود می‌یابد [۱۰]. سرباره همچنین می‌تواند هم به‌عنوان مواد ریز به‌عنوان سنگدانه‌های بتن برای بهبود خواص بتن استفاده شود. خواص

مقاومتی و دوام و عملکرد بالای بتن با افزایش مقدار سرباره مس به‌عنوان جایگزین با سیمان یا سنگدانه‌های ریز افزایش می‌یابد [۱۱، ۱۲]. الجابری و همکاران جایگزینی ۴۰ تا ۵۰ درصد از سرباره مس با ماسه معمولی را در بتن معمولی توصیه کردند [۱۳]. پرم و همکاران نیز مخلوط‌های بتنی متشکل از ۱۰۰٪ سرباره مس را به‌عنوان جایگزین شن و ماسه به‌عنوان یک گزینه مناسب در نظر گرفتند [۱۴]. جلول و همکاران اثبات کردند که جریان‌پذیری و قابلیت عبور مخلوط‌های بتن خودتراکم با افزایش محتوای سرباره مس در نسبت آب سیمان ثابت و مقدار ثابت فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار سرباره مس مقاومت فشاری و مقاومت کششی افزایش یافت [۱۵]. نتایج به‌دست‌آمده توسط گوبتا و همکاران نیز نشان داد که مقاومت فشاری و دوام به‌طور قابل توجه در مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی حداکثر ۳۰ درصد سرباره مس افزایش می‌یابد و سرباره مس به‌عنوان یک ماده پایدار پیشنهاد شده است که می‌تواند در مخلوط بتن خودتراکم استفاده شود [۱۶].

مطالعات قبلی گزارش کردند که وجود مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی سرباره دوده سیلیس پسته برنج در مخلوط‌های بتن خودتراکم به‌طور موثر یک یا چند ویژگی خاص بتن را در حالت تازه یا سخت‌شده بهبود می‌بخشد [۱۷، ۱۸]. نتایج آزمایش در تحقیق دوک و همکاران نشان داد که افزودن خاکستر نیشکر و یا سرباره کوره بلند به جای سیمان پرتلند در مخلوط‌ها منجر به کاهش جریان‌پذیری می‌شود. مقاومت فشاری نمونه متشکل از ۳۰٪ خاکستر نیشکر و ۳۰٪ سرباره کوره بلند جایگزین سیمان پرتلند پس از ۹۱ روز مشابه بتن مرجع بود. علاوه بر این هر دو خاکستر نیشکر و سرباره کوره بلند به شدت مقاومت بتن در برابر حملات سولفات را افزایش دادند و نمونه‌های بتن خودتراکم تقریباً خوردگی ناچیزی پس از سن ۲۸ روزه داشتند [۱۹]. مطالعات موجود نشان داد که سرباره فولاد تا حدودی دارای ترکیب شیمیایی مشابهی با سیمان است و بتن ساخته شده از سرباره فولاد می‌تواند حفره‌های داخلی را پر کند و پیوند سطحی را بهبود بخشد و گرمای هیدراسیون را کاهش دهد [۲۰، ۲۱]. نتایج تحقیق شی هونگ و همکاران نشان داد که پودر سرباره فولاد قابلیت پر کردن و عبور بتن خودتراکم را بهبود می‌بخشد اما بر مقاومت جداسازی تأثیر منفی می‌گذارد و نسبت جایگزینی ۱۰٪ پودر سرباره فولاد در بتن خودتراکم حاوی سنگدانه بازیافتی خواص مکانیکی و عملکرد دوام بهتری در برابر کلر و کربنات را نشان می‌دهد [۲۲]. نتایج تحقیقات انجام شده توسط قنبری و همکاران ثابت کرد که سرباره مس به بهبود شرایط رئولوژی بتن کمک زیادی کرد [۲۳]. اما تحقیقات انجام شده توسط حیدری و همکاران نشان داده است که استفاده از تا ۲۰ درصد سرباره جایگزین سیمان در بتن خودتراکم با مقاومت بالا باعث کاهش مقاومت بتن نمی‌شود [۲۴]. افشون و شریفی ویژگی‌های مقاومت و دوام مخلوط‌های بتن خودتراکم دارای سرباره مس را به‌عنوان جایگزین سیمان از ۰ تا ۳۰ درصد را آزمایش کردند که جایگزینی سیمان تا ۱۵ درصد سرباره مس نتایج بهتری را نشان داد [۲۵، ۲۶]. البته تحقیقات محدودی در مورد بتن خودتراکم که سرباره مس به‌عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های ریز باشد گزارش شده است [۲۷، ۲۸]. وجود اکسید آهن در سرباره مس منجر به کاهش عمق کربناته‌شدن شد [۲۹] و جایگزینی ماسه با ۱۰۰ درصد سرباره مس در بهبود کارایی مقاومت و دوام مخلوط بتن خودتراکم موثر بود [۳۰].

در تحقیقات گذشته اثر سرباره با دانه‌بندی معمولی یکسان بر روی خواص بتن معمولی یا خودتراکم بررسی گردید ولی اثر نرمی و ریزی سرباره آهن به‌طور هم‌زمان بر خواص بتن تازه و سخت‌شده بررسی نشده است لذا هدف این تحقیق بررسی تاثیر سرباره با دو نوع متفاوت نرمی معمولی و بسیار نرم بر خواص رئولوژیکی جریان‌پذیری بتن تازه و همچنین مقاومت‌های فشاری و کششی بتن خودتراکم است.

۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان شاهرود تیپ ۲ با سطح مخصوص ۳۲۰۰ سانتی‌مترمربع بر گرم (بلین) در این تحقیق استفاده شد که جدول ۱ آنالیز شیمیایی XRF آن را که توسط تولید کننده تهیه شده است را نشان می‌دهد. سنگدانه‌های مورد استفاده نیز شامل شن نخودی ماسه شسته و پودر سنگ بودند که شکل ۱ دانه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد. از سرباره آهن اصفهان با دو نوع نرمی متفاوت استفاده شد که نوع اول دارای سطح مخصوص ۳۸۰۰ و نوع دوم ۶۰۰۰ سانتی‌مترمربع بر گرم (بلین) بودند که به ترتیب سرباره معمولی و سرباره نرم محسوب می‌شوند. آنالیز شیمیایی XRF سرباره آهن که توسط نویسندگان تهیه شده است و در تحقیق دیگری هم گزارش شده است در جدول ۲ داده شده که هر دو نوع سرباره دارای ترکیب شیمیایی یکسان هستند. همچنین از فوق کاهنده بسیار قوی آب تولید شرکت شیمی سازی آرمانی (ARMA PX-MIX800) استفاده شده است که جدول ۳ مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن داده شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان [۳۱]

ترکیبات	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O	K ₂ O
مقدار (%)	۲۱/۱۱	۶۳/۳۶	۴/۴۲	۳/۹۶	۱/۵۱	۲/۷۰	۰/۳۲	۰/۵۱

جدول ۲: آنالیز شیمیایی سرباره آهن [۳۲]

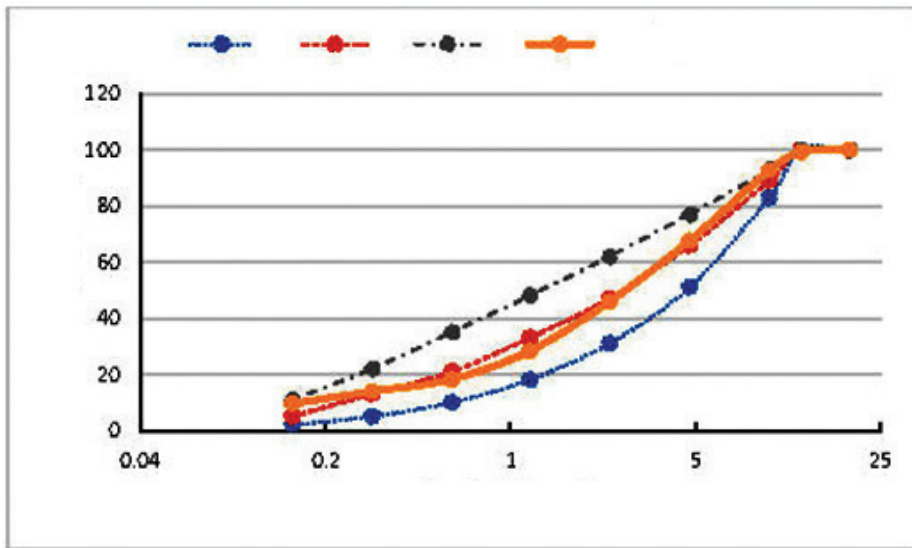
ترکیبات	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Cl	MgO	So ₃	Na ₂ O	K ₂ O
مقدار (%)	۳۷/۶۰	۴۱/۳۵	۹/۶۷	۰/۰۰۶	۸/۶۰	۲/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۴

۲-۲- طرح اختلاط

مجموعاً ده طرح مخلوط بتن شامل یک بتن مرجع و نه طرح حاوی سرباره در نظر گرفته شدند. بتن مرجع با مقاومت فشاری ۲۸ روز معادل استوانه برابر ۴۰ مگاپاسکال مدنظر بود که از روش طرح ملی اختلاط مولفه های آن شامل مقدار ثابت ۵۰۰ کیلوگرم سیمان و ۱۷۰ کیلو آب (بر اساس سنگدانه اشباع) در یک متر مکعب به دست آمدند که بدلیل استفاده از سنگدانه خشک مقدار آب تا ۲۰۰ کیلو افزایش یافت. در طرح های مورد نظر وزن کل سرباره (S) هم به میزان ۲۰ ۳۰ ۴۰ درصد از وزن سیمان در نظر گرفته شدند بنابراین مجموع مواد سیمانی همواره ثابت هستند. هر مقدار سرباره مورد نظر با سه ترکیب متفاوت استفاده شدند که در ترکیب اول از ۱۰۰ درصد سرباره معمولی (M100-F0) در ترکیب دوم از ۷۵ درصد سرباره معمولی و ۲۵ درصد سرباره نرم (M75-F25) و در ترکیب سوم از ۵۰ درصد سرباره معمولی و ۵۰ درصد سرباره نرم (M50-F50) استفاده شدند. M و F مخفف سرباره معمولی و سرباره نرم هستند. سعی شده است روان کننده هم بصورت یک درصد وزن سیمان در همه طرح‌ها استفاده شود تا شرایط یکسان برای همه در اندازه گیری شاخص‌های روانی حاصل شود. جدول ۴ ترکیب انواع سرباره و جدول ۵ طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی و فیزیکی فوق کاهنده بسیار قوی آب

پایه شیمیایی	پلی کربوکسیلات اتر
حالت فیزیکی	مایع ویسکوز
وزن مخصوص	$1.09 \pm 0.02 \text{ gr/cm}^3$
محدوده قلیایی (PH)	۵ - ۷
مقدار کلراید	کمتر از ۱٪
رنگ	زرد روشن و یا قهوه‌ای تیره



شکل ۱: دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده

جدول ۴: ترکیب انواع سرباره

درصد سرباره نرم (۶۰۰۰ بلین)	درصد سرباره معمولی (۳۸۰۰ بلین)	ترکیب سرباره
۰	۱۰۰	M100-F0
۲۵	۷۵	M75-F25
۵۰	۵۰	M50-F50

جدول ۵: طرح های اختلاط

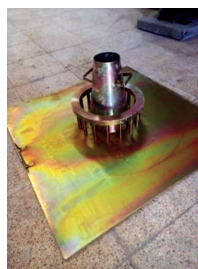
ردیف	نام طرح	سیمان (kg)	سرباره (%)	وزن کل سرباره (kg)	سرباره معمولی (kg)	سرباره نرم (kg)	ماسه خشک (kg)	شن خشک (kg)	پودر سنگ (kg)	آب لازم (kg)	آب کل (kg)	W/C
۱	S00M00-F0	۵۰۰	۰	۰	۰	۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۲	S20M100-F0	۴۰۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۳	S30M100-F0	۳۵۰	۳۰	۱۵۰	۱۵۰	۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۴	S40M100-F0	۳۰۰	۴۰	۲۰۰	۲۰۰	۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۵	S20M75-F25	۴۰۰	۲۰	۱۰۰	۷۵	۲۵	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۶	S30M75-F25	۳۵۰	۳۰	۱۵۰	۱۱۲	۳۷	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۷	S40M75-F25	۳۰۰	۴۰	۲۰۰	۱۵۰	۵۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۸	S20M50-F50	۴۰۰	۲۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۹	S30M50-F50	۳۵۰	۳۰	۱۵۰	۷۵	۷۵	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰
۱۰	S40M50-F50	۳۰۰	۴۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸۰	۴۷۰	۳۰۰	۱۷۰	۲۰۰	۳۴/۰

۲-۳- آزمایشات لازم

آزمایشات لازم در دو قسمت بتن تازه و بتن سخت شده انجام شدند. آزمایشات بتن تازه شامل آزمایش اسلامپ حلقه J، آزمایش قیف V شکل بودند که آزمایش حلقه J (شکل ۲-الف) عبور مخلوط بتنی از میان آرماتورها را شبیه سازی می کند و قابلیت عبور بتن خودتراکم را می سنجد. میزان بازشدگی بیشتر بتن خودتراکم در این آزمایش به این معنی است که مخلوط می تواند مسافت بیشتری را تحت اثر وزن خود از بین آرماتورها عبور کند و سریع تر قالب با آرماتورهای متراکم را پر کند. در آزمایش قیف V شکل (شکل ۲-ب) مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه گیری شده و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پر کنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می گیرد. آزمایشات بتن سخت شده نیز شامل آزمایشات مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن بودند. به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری دو نمونه مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی متر ساخته شدند و در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایش مربوطه مطابق استاندارد ASTM C39 با دستگاه جک فشاری (شکل ۳-الف) انجام شد. آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه نیز بر روی نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر انجام شد که دو نمونه برای هر طرح اختلاط ساخته شدند و آزمایش مربوطه مطابق استاندارد ASTM C293-79 (شکل ۳-ب) انجام شد.



ب: آزمایش قیف V شکل



الف: آزمایش اسلامپ حلقه J

شکل ۲: آزمایشات بتن تازه



ب- مقاومت کششی دو نیم شدن



الف: مقاومت فشاری

شکل ۳: آزمایشات بتن سخت شده

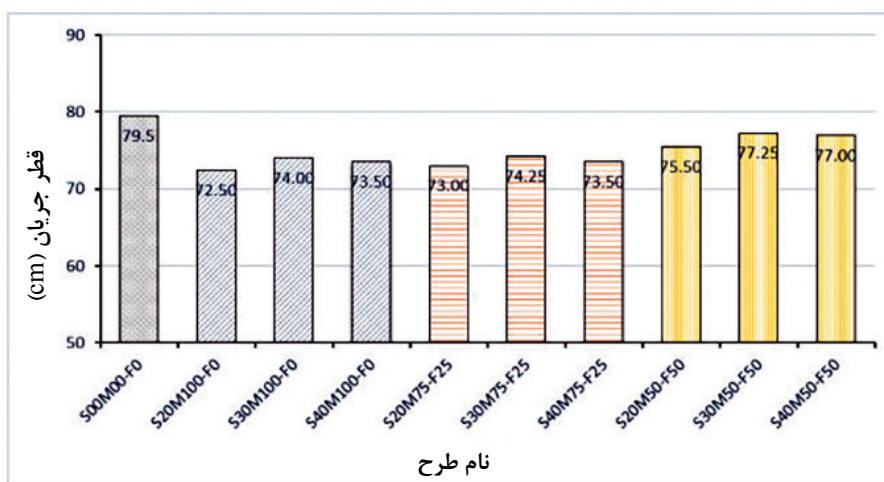
۳- نتایج آزمایشات

۳-۱- نتایج آزمایشات روانی بتن تازه

نتایج قطر جریان در شکل ۴ و جدول ۶ نشان می‌دهد که هر چه درصد سرباره در سه ترکیب بیشتر شده است قطر جریان نسبت به بتن مرجع کاهش یافته است.

جدول ۶: نتایج قطر جریان بتن‌های خودتراکم

نسبت قطر جریان به بتن مرجع	قطر جریان (cm)	نام طرح
۱/۰	۷۹/۵	S00M00-F0
۰/۹۱۲	۷۲/۵	S20M100-F0
۰/۹۳۱	۷۴	S30M100-F0
۰/۹۲۵	۷۳/۵	S40M100-F0
۰/۹۱۸	۷۳	S20M75-F25
۰/۹۳۴	۷۴/۲۵	S30M75-F25
۰/۹۲۵	۷۳/۵	S40M75-F25
۰/۹۵۰	۷۵/۵	S20M50-F50
۰/۹۷۲	۷۷/۲۵	S30M50-F50
۰/۹۶۹	۷۷	S40M50-F50



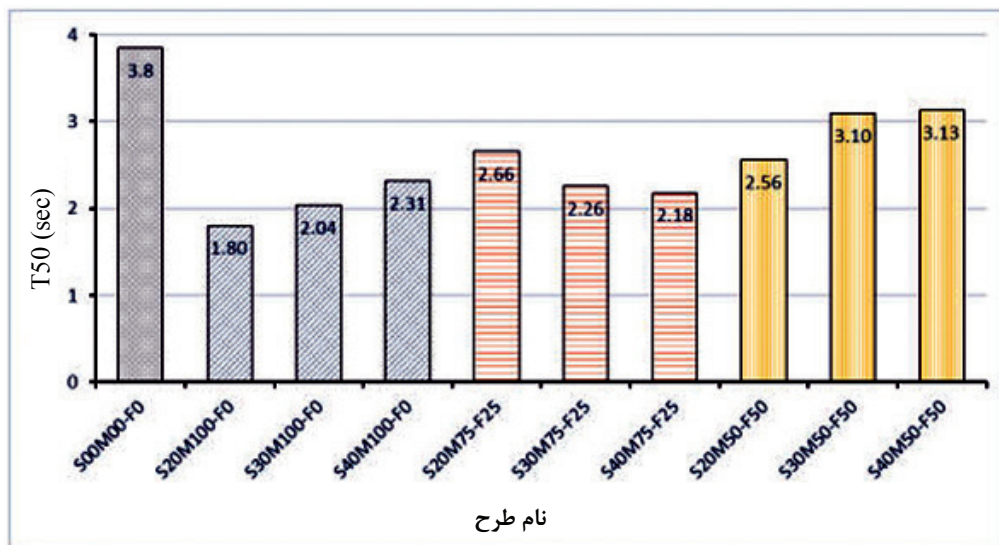
شکل ۴: نتایج قطر جریان بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

نتایج ترکیب اول و دوم تقریباً مشابه هستند زیرا نسبت قطر جریان ترکیب‌های ۲۰-۳۰-۴۰ درصد نسبت به قطر جریان بتن مرجع در ترکیب اول با ۱۰۰٪ سرباره معمولی برابر (۰/۹۱۲-۰/۹۳۱-۰/۹۲۵) ولی همین نسبت در ترکیب دوم با ۲۵٪ سرباره نرم برابر (۰/۹۱۸-۰/۹۳۴-۰/۹۲۵) بودند. در مورد ترکیب سوم با نسبت ۵۰-۵۰ سرباره معمولی و نرم نسبت قطر جریان ترکیب‌های ۲۰-۳۰-۴۰ درصد به قطر جریان بتن مرجع برابر (۰/۹۵۰-۰/۹۷۲-۰/۹۶۹) بودند. با توجه به نتایج به دست آمده قابلیت عبور بتن خودتراکم با استفاده از ۳۰ درصد سرباره در مقایسه با ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره در سه ترکیب بیشتر بود و استفاده از سرباره ترکیب سوم با ۵۰ درصد سرباره معمولی و ۵۰ درصد سرباره نرم بهترین قابلیت عبور نسبت به ترکیب اول و دوم بود که نشان از تاثیر مثبت سرباره نرم در افزایش روانی بتن خودتراکم دارد.

نتایج زمان جریان T50 در شکل ۵ و جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد سرباره در سه ترکیب زمان جریان T50 نسبت به بتن مرجع کاهش می‌یابد به طوری که نسبت زمان جریان برای ترکیب‌های ۲۰-۳۰-۴۰ درصد نسبت به زمان جریان بتن T50 مرجع به ترتیب در ترکیب اول با ۱۰۰٪ سرباره معمولی برابر (۰/۴۶۸-۰/۵۳۰-۰/۶۰۱) در ترکیب دوم با ۲۵٪ سرباره نرم برابر (۰/۶۹۲-۰/۵۸۶-۰/۵۶۶) و در ترکیب سوم با ۵۰٪ سرباره نرم برابر (۰/۶۶۶-۰/۸۰۵-۰/۸۱۳) بودند. مشخص است که ترکیب سرباره در زمان جریان تاثیر دارد به طوری که با استفاده از ترکیب اول با افزایش درصد سرباره زمان جریان T50 افزایش می‌یابد ولی با استفاده از ترکیب دوم کاهش می‌یابد و با افزایش درصد سرباره زمان جریان T50 کاهش می‌یابد. برای ترکیب سوم زمان جریان T50 مخلوط برای کل ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره بسیار نزدیک است و زمان جریان T50 مخلوط ۲۰ درصد از ۳۰ و ۴۰ درصد است.

جدول ۷: نتایج زمان جریان T50 بتن‌های خودتراکم

نسبت زمان جریان به بتن مرجع	زمان T_{50}	نام طرح
1/000	3/85	S00M00-F0
0/468	1/80	S20M100-F0
0/530	2/04	S30M100-F0
0/601	2/31	S40M100-F0
0/692	2/66	S20M75-F25
0/586	2/26	S30M75-F25
0/566	2/18	S40M75-F25
0/666	2/56	S20M50-F50
0/805	3/10	S30M50-F50
0.813	3/13	S40M50-F50

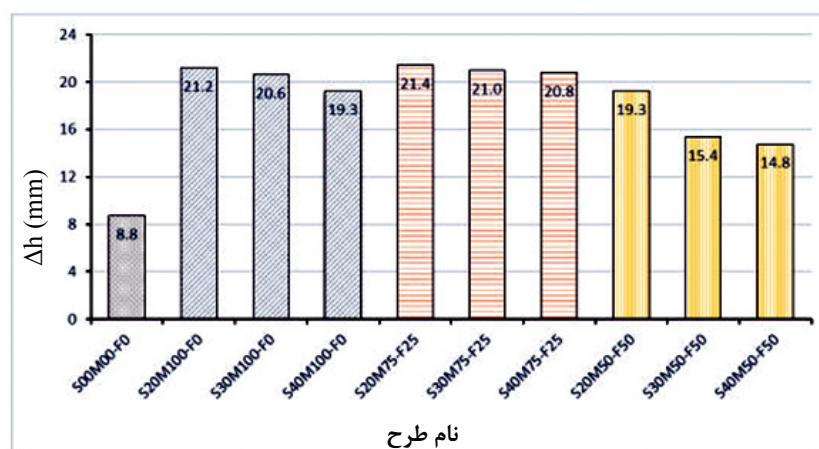


شکل ۵: نتایج زمان جریان T50 بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

نتایج Δh در شکل ۶ و جدول ۸ نشان می‌دهد که با افزایش درصد سرباره در سه ترکیب Δh نسبت به بتن مرجع افزایش می‌یابد. به طوری که Δh بتن‌ها برای ترکیب‌ها با سرباره ۲۰-۳۰-۴۰ درصد نسبت به بتن مرجع به ترتیب در ترکیب اول برابر (۲/۴۲ - ۲/۳۵ - ۲/۲) و در ترکیب دوم برابر (۲/۴۵ - ۲/۴ - ۲/۳۷) و در ترکیب سوم برابر (۲/۲ - ۱/۷۶ - ۱/۶۹) می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است نتایج ترکیب اول و دوم با کمی تفاوت مشابه است ولی در مورد ترکیب سوم Δh در مخلوط با سرباره کل ۲۰ درصد و ترکیب سوم با ۵۰-۵۰ سرباره معمولی و نرم بیشتر از مخلوط‌ها با ترکیب مشابه ولی با درصد کل ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره ۴۰ است ضمناً Δh مخلوط‌های ترکیب با ۵۰-۵۰ سرباره معمولی و نرم و درصد کل ۳۰ و ۴۰ نزدیک است.

جدول ۸: نتایج Δh بتن‌های خودتراکم

نسبت Dh به بتن مرجع	Δh (mm)	نام طرح
1/00	8/8	S00M00-F0
2/42	21/2	S20M100-F0
2/35	20/6	S30M100-F0
2/20	19/3	S40M100-F0
2/45	21/4	S20M75-F25
2/40	21/0	S30M75-F25
2/37	20/8	S40M75-F25
2/20	19/3	S20M50-F50
1/76	15/4	S30M50-F50
1/69	14/8	S40M50-F50

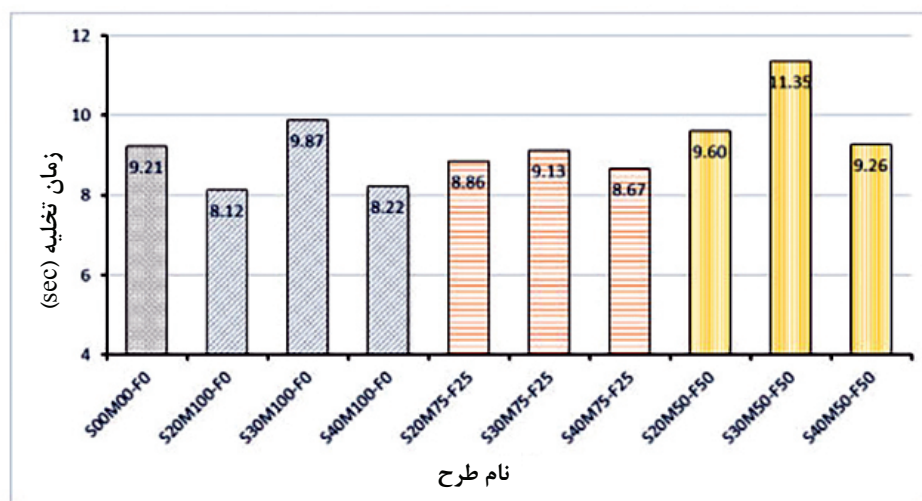


شکل ۶: نتایج Δh بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

نتایج زمان تخلیه در شکل ۷ و جدول ۹ نشان می‌دهد که زمان تخلیه با ترکیب سرباره و درصد کل آن ارتباط زیادی دارد. نسبت زمان تخلیه ترکیب‌ها با سرباره ۲۰-۳۰-۴۰ درصد به بتن مرجع به ترتیب در ترکیب اول برابر (۰/۸۸-۱/۰۷-۰/۸۹) در ترکیب دوم برابر (۰/۹۶-۰/۹۹-۰/۹۴) و در ترکیب سوم برابر (۱/۰۴-۱/۲۳-۱/۰۱) می‌باشد. نتایج حاصل از سرباره ترکیب اول نشان می‌دهد که زمان تخلیه کمتر از بتن مرجع در هنگام استفاده از ۲۰ و ۴۰ درصد کل سرباره است اما در ۳۰ درصد بیشتر از بتن مرجع است. در مورد ترکیب دوم نتایج حاکی از آن است که زمان تخلیه در هنگام استفاده از (۲۰-۳۰-۴۰) درصد کل با کمی تفاوت به زمان تخلیه بتن مرجع بسیار نزدیک است. برای ترکیب سوم نتایج نشان می‌دهد که زمان تخلیه در هنگام استفاده از (۲۰-۳۰-۴۰) درصد کل بیشتر از بتن مرجع است و حداکثر زمان تخلیه معادل ۳۰ درصد می‌باشد.

جدول ۹: نتایج زمان تخلیه بتن‌های خودتراکم

نام طرح	زمان تخلیه (ثانیه)	نسبت زمان تخلیه به بتن مرجع
S00M00-F0	9/21	1/00
S20M100-F0	8/12	0/88
S30M100-F0	9/87	1/07
S40M100-F0	8/22	0/89
S20M75-F25	8/86	0/96
S30M75-F25	9/13	0/99
S40M75-F25	8/67	0/94
S20M50-F50	9/60	1/04
S30M50-F50	11/35	1/23
S40M50-F50	9/26	1/01



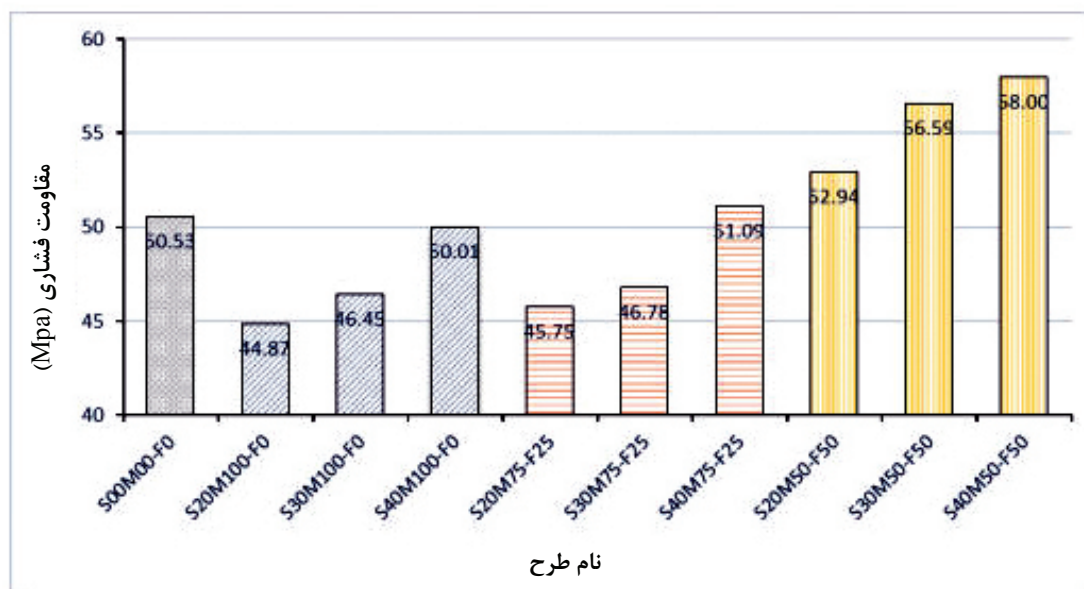
شکل ۷: نتایج زمان تخلیه بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

۲-۳- نتایج آزمایشات مقاومت بتن سخت شده

نتایج مقاومت فشاری در شکل ۸ و جدول ۱۰ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری با ترکیب سرباره و درصد کل مرتبط است. نسبت مقاومت فشاری ترکیب‌ها با سرباره کل ۲۰-۳۰-۴۰ درصد به بتن مرجع به ترتیب در ترکیب اول با ۱۰۰٪ سرباره معمولی برابر (۰/۸۹-۰/۹۲-۰/۹۹) در ترکیب دوم با ۷۵٪ سرباره معمولی برابر (۰/۹۱-۰/۹۳-۰/۱۰۱) و در ترکیب سوم با ۵۰٪ سرباره معمولی برابر (۰/۰۵-۰/۱۲-۰/۱۵) می‌باشد. نتایج ترکیب اول و دوم مشابه یکدیگر است به طوری که با استفاده از (۲۰-۳۰) درصد کل مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتر از بتن مرجع است اما هنگام استفاده از ۴۰ درصد مقاومت فشاری نزدیک به مقاومت فشاری بتن مرجع است. نتایج ترکیب سوم هم نشان می‌دهد که مقاومت فشاری در هنگام استفاده از ۲۰-۳۰-۴۰ درصد کل بیشتر از مقاومت فشاری بتن مرجع است و مشخص شده که با افزایش درصد سرباره مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

جدول ۱۰: نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های خودتراکم

نام طرح	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	نسبت مقاومت فشاری به بتن مرجع
S00M00-F0	50/53	1/00
S20M100-F0	44/87	0/89
S30M100-F0	46/45	0/92
S40M100-F0	50/01	0/99
S20M75-F25	45/75	0/91
S30M75-F25	46/78	0/93
S40M75-F25	51/09	1/01
S20M50-F50	52/94	1/05
S30M50-F50	56/59	1/12
S40M50-F50	58/00	1/15

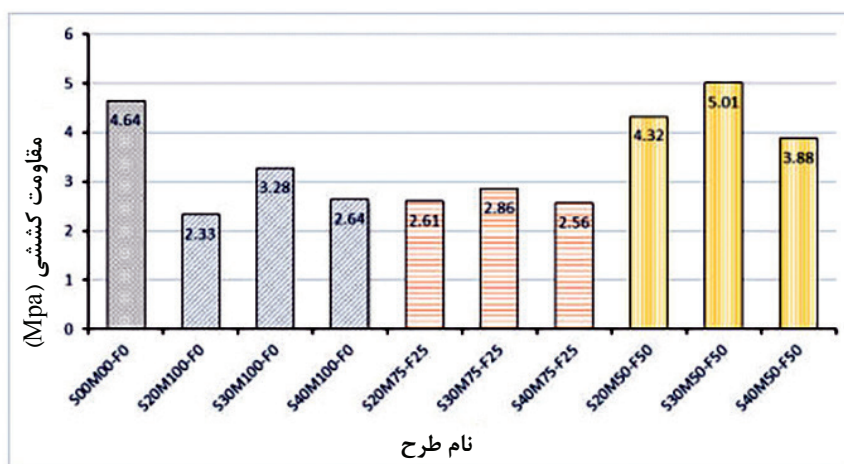


شکل ۸: نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

نتایج مقاومت کششی در شکل ۹ و جدول ۱۱ نشان می‌دهد که مقاومت کششی با ترکیب سرباره و درصد کل مرتبط است. نسبت مقاومت کششی ترکیب‌ها با سرباره کل ۲۰-۳۰-۴۰ درصد به بتن مرجع به ترتیب در ترکیب اول برابر (۰/۸۹-۰/۹۲-۰/۹۹) در ترکیب دوم برابر (۰/۹۱-۰/۹۳-۱/۰۱) و در ترکیب سوم برابر (۱/۰۵-۱/۱۲-۱/۱۵) می‌باشد. مقاومت کششی ترکیب‌های اول و دوم کمتر از مقاومت کششی بتن مرجع هستند در حالی که نتایج مقاومت کششی ترکیب سوم در هنگام استفاده از ۲۰-۴۰ درصد کمتر از مقاومت کششی بتن مرجع بود ولی اما با افزودن ۳۰ درصد مقاومت کششی بیشتر از مقاومت کششی بتن مرجع است.

جدول ۱۱: مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه بتن‌های خودتراکم

نام طرح	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)	نسبت مقاومت کششی به بتن مرجع
S00M00-F0	4/64	1/00
S20M100-F0	2/33	0/50
S30M100-F0	3/28	0/71
S40M100-F0	2/64	0/57
S20M75-F25	2/61	0/56
S30M75-F25	2/86	0/62
S40M75-F25	2/56	0/55
S20M50-F50	4/32	0/93
S30M50-F50	5/01	1/08
S40M50-F50	3/88	0/84



شکل ۹: نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه بتن‌های خودتراکم سرباره ای در مقایسه با بتن بدون سرباره

۴- تاثیر پارامترها

اگرچه تحقیقات گذشته نشان داده است که افزودن هر ماده پوزولانی بر خواص بتن تازه و سخت شده بتن خودتراکم تأثیر می‌گذارد ولی نرمی و اندازه دانه های این مواد می‌تواند دارای تاثیرات متفاوت باشد که باید بررسی بیشتری انجام شود. لذا در این تحقیق از سرباره آهن با دو نرمی مختلف بصورت سرباره معمولی با بلین ۳۸۰۰ و سرباره نرم با بلین ۶۰۰۰ با سه ترکیب به‌عنوان افزودنی بصورت درصد کل از وزن سیمان معادل ۲۰-۳۰-۴۰ درصد استفاده شد. ترکیب اول شامل ۱۰۰ درصد سرباره معمولی ترکیب دوم شامل ۷۵ درصد سرباره معمولی و ۲۵ درصد سرباره نرم و ترکیب سوم شامل ۵۰ درصد سرباره معمولی و ۵۰ درصد سرباره نرم بودند. بنابراین ۱۰ مخلوط با در نظر گرفتن مخلوط بتن مرجع در نظر گرفته شدند و آزمایش های حلقه J و جعبه V شکل برای بتن تازه و آزمایش فشاری و کششی دو و نیم شدن ۲۸ روزه برای بتن سخت شده انجام شد.

نتایج ترکیب ۱۰۰ درصد سرباره معمولی نشان داد که که قطر جریان (قابلیت عبور) آزمایش حلقه J ترکیب‌ها با جایگزینی ۲۰ ۳۰ و ۴۰ درصد کل سرباره به ترتیب ۸/۸ ۶/۹ و ۷/۵ درصد نسبت به بتن مرجع کاهش یافت. همچنین زمان جریان نیز ۵۳ ۴۷ و ۴۰

درصد کاهش و Δh نیز ۱۴۲ و ۱۳۵ و ۱۲۰ درصد افزایش یافتند. ضمناً زمان تخلیه آزمایش جعبه V شکل با افزودن سرباره ترکیب اول (۲۰-۴۰) درصد منجر به کاهش تا ۱۲ درصد بودند درحالی که اضافه شدن سرباره به میزان ۳۰ درصد منجر به افزایش زمان تخلیه ۷ درصد شد. ضمناً در ترکیب اول با ۱۰۰٪ سرباره معمولی و با اضافه کردن ۲۰ و ۳۰ و ۴۰٪ سرباره مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۱ و ۸ و ۱ درصد و مقاومت کششی دو نیم شدن هم به میزان ۵۰ و ۲۹ و ۴۳ درصد کاهش یافتند.

در ترکیب دوم با ۷۵ درصد سرباره معمولی و ۲۵ درصد نرم با درصد کل ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ درصد در مقایسه با بتن مرجع قطر جریان (قابلیت عبور) حلقه J به ترتیب ۸/۲ و ۶/۶ و ۷/۵ درصد کاهش زمان جریان هم ۳۱ و ۴۱ و ۴۳ درصد کاهش و Δh هم ۱۴۵ و ۱۴۰ و ۱۳۷ درصد افزایش یافتند. همچنین زمان تخلیه آزمایش جعبه V به میزان ۱۴ و ۶ درصد مقاومت فشاری هم تا ۹٪ کاهش یافتند. همچنین مقاومت کششی دو نیم شدن تا ۴۵ درصد کاهش یافتند.

در ترکیب سوم با ۵۰ درصد سرباره معمولی و ۵۰ درصد نرم با به کارگیری ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ درصد کل و نسبت به بتن مرجع قطر جریان (قابلیت عبور) به ترتیب ۵ و ۲/۸ و ۳/۱ درصد کاهش زمان جریان تا ۳۳ و ۲۰ و ۱۹ درصد کاهش و Δh به میزان ۱۲۰ و ۷۶ و ۶۹ درصد افزایش یافتند درحالی که زمان تخلیه به ترتیب تا ۴ و ۳ و ۱ درصد افزایش یافتند. مقاومت فشاری هم به ترتیب در این ترکیب تا ۱۲ و ۱۵ درصد افزایش و مقاومت کششی هم با استفاده از (۲۰-۴۰) درصد تا ۱۶ درصد کاهش و در هنگام استفاده از ۳۰ درصد تا ۸ درصد افزایش داشتند. بنابراین به طور کلی می توان نتیجه گرفت که بهترین قابلیت جریان (با کاهش ۲/۸ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۳۰ درصد و ترکیب سوم با ۵۰-۵۰ درصد سرباره معمولی و نرم و بهترین زمان جریان (کاهش ۵۳ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۲۰ درصد و ترکیب اول با ۱۰۰ درصد سرباره معمولی حاصل شدند. همچنین بهترین مقدار Δh (افزایش ۶۹ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۴۰ درصد و ترکیب سوم با ۵۰-۵۰ درصد سرباره معمولی و نرم و بهترین زمان تخلیه (کاهش ۱۲ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۲۰ درصد و ترکیب اول با ۱۰۰ درصد سرباره معمولی حاصل شدند. ضمناً بیشترین مقاومت فشاری (افزایش ۱۵ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۴۰ درصد و ترکیب سوم با ۵۰-۵۰ درصد سرباره معمولی و نرم و بیشترین مقاومت کششی (افزایش ۸ درصد نسبت به بتن مرجع) با استفاده از سرباره کل ۳۰ درصد و ترکیب سوم با ۵۰-۵۰ درصد سرباره معمولی و نرم به دست آمدند.

۵- نتیجه گیری

از سرباره آهن با درصد کل ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و با سه ترکیب مجزا ۱۰۰٪ سرباره معمولی ۷۵٪ معمولی با ۲۵٪ نرم و همچنین ۵۰٪ معمولی با ۵۰٪ نرم در ساخت بتن های مختلف خودمتراکم برای بررسی اثر آن ها بر بتن تازه و سخت شده در این تحقیق استفاده شد که نتایج زیر حاصل گردید.

استفاده از سرباره با دو نرمی و طبیعتاً دانه بندی مختلف تأثیر مستقیم بر خواص روانی بتن خودتراکم شامل قطر جریان زمان جریان Δh T_{50} و زمان تخلیه داشت.

گرچه استفاده از مواد ریز در بتن منجر به کاهش روانی بتن (جریان پذیری و قطر جریان) خواهد شد اما افزودن ترکیب سوم نسبت به ترکیب اول و دوم منجر به بهبود جزئی شد.

زمان جریان T_{50} با استفاده از ترکیب های سرباره در بتن خودتراکم کاهش یافت ولی Δh افزایش یافت که نشان دهنده کاهش قابلیت عبور است. زمان تخلیه در ۳۰ درصد از وزن سیمان افزایش و در ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش یافت.

مقاومت فشاری بتن های خودمتراکم ترکیب اول بیش از مقادیر ترکیب دوم و سوم بودند. مقاومت فشاری ترکیب های اول و دوم با

۲۰ و ۳۰ درصد وزن سیمان کمتر از مقادیر بتن مرجع بودند ولی با ۴۰ درصد سرباره مقاومت فشاری در مقایسه با بتن مرجع تقریباً برابر بود. ترکیب سوم با ۴۰٪ سرباره مقاومت فشاری بیشتری از مقاومت فشاری بتن مرجع نشان داد. مقاومت کششی ترکیب اول و دوم تقریباً برابر هم ولی کمتر از نتایج بتن مرجع بودند هنگام استفاده از ۳۰ درصد کل با ترکیب سوم سرباره منجر به افزایش مقاومت کششی شد که بدلیل افزایش سرعت واکنش هیدراسیون بوده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهشی و آقای رستمزاده کارشناس محترم آزمایشگاه بتن دانشگاه سمنان بابت حمایت مالی و کمک در انجام آزمایشات تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع

- [1] M. Ouchi, S. Nakamura, T. Osterson, M. Lwin, *Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States*. 2003.
- [2] A. Hassan, *Possibility of Producing Self-compacting Concrete in Sudan*. 2007, Sudan University of Science and Technology.
- [3] D. Rich, J. Glass, A.G.F. Gibb, C. Goodier, *UK contractors' views on self-compacting concrete in construction*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials* 2012. 165(4): p. 201-210.
- [4] W.D.A. Jalil, A.J. Haider, A.M. Hasan. *Self-compacting concrete in digital fabrication and architectural construction: A review*. in *AIP Conference Proceedings*. 2018. AIP Publishing LLC.
- [5] M.K. Sharbatdar, M. Abbasi, P. Fakharian, *Improving the properties of self-compacted concrete with using combined silica fume and metakaolin*. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020. 64(2): p. 535-544
- [6] A.M. Zeyad, *Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. 9(3): p. 4147-4158.
- [7] C.J. Shi, Y.K. Li, J.K. Zhang, W.G. Li, L.L. Chong, Z.B. Xie, *Performance enhancement of recycled concrete aggregate - a review*, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 466–472.
- [8] F.L. Gayarre, J.G. Perez, C.L.-C. Perez, M.S. Lopez, A.L. Martínez, *Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregate*, *J. Cleaner Prod.* 113 (2016) 41–53.
- [9] B. Wu, Z. Li, *Mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps after freeze-thaw cycles*, *Constr. Build. Mater.* 155 (2017) 187–199.
- [10] G. Zhanggen, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, D.E. Lehman, *Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume*. *Construction Building Materials*, 2020. 231: p. 117115.
- [11] K.S. Al-Jabri, R.A. Taha, A. Al-Hashmi, A.S. Al-Harthy, *Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete*, *Constr. Build. Mater.* 20 (5) (2006) 322–331.
- [12] R.K.D. Obe, D.J. Brito, R. Mangabhai, C.Q. Lye, *Sustainable Construction Materials: Copper Slag*, Woodhead Publishing, 2016.
- [13] K.S. Al-Jabri, A.H. Al-Saidy, R. Taha, *Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete*, *Constr. Build. Mater.* 25 (2) (2011) 933–938.
- [14] P.R. Prem, M. Verma, P.S. Ambily, *Sustainable cleaner production of concrete with high vol-*

ume copper slag, *J. Clean. Prod.* 193 (2018) 43–58.

[15] D. Omar Kouider, B. Menadi, G. Wardeh, S. Kenai, Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag. *J. Advances in concrete construction*, 2018. 6(2): p. 103.

[16] G. Nikita, and S. Rafat, Durability characteristics of self-compacting concrete made with copper slag. *Construction and Building Materials*, 2020. 247: p. 118580.

[17] P. Dinakar, K.P. Sethy, U.C. Sahoo, Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, *Mater. Des.* 43 (2013) 161–169.

[18] J.M. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Constr. Build. Mater.* 22 (9) (2008) 1963–1971.

[19] L. Duc-Hien, S. Yeong-Nain, L. My Ngoc-Tra, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 2018. 185: p. 138-147

[20] S. Kourounis, S. Tsivilis, P. Tsakiridis, et al., Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 815–822.

[21] Y. Huang, G.P. Xu, H.G. Cheng, et al., An overview of utilization of steel slag, *Procedia Environ. Sci.* 16 (2012) 791–801.

[22] Z. Pan, J. Zhou, X. Jiang, Y. Xu, R. Jin, J. Ma, Y. Zhuang, Z. Diao, S. Zhang, Q. Si, W. Chen, Investigating the effects of steel slag powder on the properties of selfcompacting concrete with recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 200 (2019) 570–577.

[23] A. Ghanbari, M. Lakzadeh, and O. QasemKhani, Investigation of effect of copper slag and microsilica on the properties of self-compacting concrete, *The 5 th National conference of self-compacting concrete*, Iran, Tehran, 2016. (in Persian).

[24] A. Heydari, and M. Taheri Sarteshnizi, Investigating of effect of Isfahan blast furnace and iron smelting converter slag on the compressive strength of high strength self-compacting concrete, *8th National Civil Engineering Congress*, Babol. 2013. (in Persian).

[25] I. Afshoon, Y. Sharifi, Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete, *ACI Mater. J.* 114 (5) (2017) 691–699.

[26] I. Afshoon, Y. Sharifi, “The IES Journal Part A : Civil & Structural Engineering Ground copper slag as a supplementary cementing material and its influence on the fresh properties of self-consolidating concrete, *IES J. Part A Civ. Struct. Eng.* 7 (2014) 37–41.

[27] N. Gupta, R. Siddique, Strength and micro-structural properties of selfcompacting concrete incorporating copper slag, *Constr. Build. Mater.* 224(2019) 894–908.

[28] R. Sharma, R.A. Khan, Fresh and mechanical properties of self compacting concrete containing copper slag as fine aggregates, *J. Mater. Eng. Struct.* 4(2017) 25–36.

[29] R. Sharma, R.A. Khan, Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates, *Constr. Build. Mater.* 155 (2017) 617-629.

[30] R. Sharma, R.A. Khan, Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete, *J. Clean. Prod.* 171 (2018) 1171–1186.

[31] M.N. Wahedy, M.K. Sharbatdar, and O. Rezaifar, Evaluation of Sustainable Development Indicators of Infrastructures by Replacing Natural Pozzolans with High Silicate and Alumina in Cement-Based Mortar, *Civil Infrastructure Researches*. 2023. 9(1): p. 13-27. (in Persian).

[32] M.K. Sharbatdar, and M. Babaei, Experimental Comparison of Effect of Isfahan and Esfarayen Slags on Strength and Durability Properties of Sulfate-Exposed Concretes and Flexural Behavior of RC Beams, *Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023. 8(1): p. 14-32. (in Persian).