



Research paper

(Received 8 Dec. 2026

Accepted 8 Aug. 2026)

Effect of Coffee Waste on the Rheological Properties and Compressive Strength of SCC Concrete

Ashkan Khodabandehlou^{*1}, Sadra Mehrani²

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

² Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

Abstract

The increasing consumption of coffee in recent years has led to a significant rise in the volume of its waste, highlighting the need to investigate its engineering applicability in construction materials. In this study, coffee waste was added to SCC concrete at volumetric replacement levels of 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% of fine aggregates to evaluate its effects on rheological behavior and compressive strength at various curing ages. The mix design was prepared according to EFNARC guidelines, and slump-flow, T50, V-funnel, J-ring, L-box, U-box, and compressive strength tests were conducted at 7, 28, and 90 days. The results showed that increasing coffee waste reduced the slump-flow from 720 mm in the control mix to 560 mm in the C-10% mix, corresponding to a 22.2% decrease. The T50 time increased from 2.8 to 5.2 seconds (an 85.7% rise). The V-funnel time increased by up to 130%, and the U-box height difference increased by up to 83%. The L-box height ratio decreased by approximately 70% in the C-10% mix. However, using 2.5% coffee waste still kept the SCC concrete mix within the acceptable EFNARC limits. The compressive strength results further indicated that coffee waste reduces strength, delays setting, and promotes the formation of weak zones in the concrete. Specifically, replacement levels of 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% reduced compressive strength by approximately 9%, 21%, 36%, and 55%, respectively.

Keywords: Coffee Waste, SCC Concrete, Rheological Properties, Compressive Strength, Viscosity-Modifying Filler.

* Corresponding Author: Ashkan Khodabandehlou
Email: a.khodabandehlou@iau.ac.ir
Phone: 09141479738



اثر پسماند قهوه بر روی مشخصات رئولوژی و مقاومت فشاری بتن خودتراکم

اشکان خدابنده‌لو^{۱*}، صدرا مهرانی^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه

چکیده

افزایش مصرف قهوه در سال‌های اخیر موجب رشد قابل توجه حجم پسماند این ماده شده است و این امر ضرورت بررسی امکان استفاده مهندسی از آن را در مصالح ساختمانی برجسته کرده است. در این تحقیق، پسماند قهوه به میزان ۰/۵٪، ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ به صورت جایگزین حجمی ریزدانه به بتن خودتراکم افزوده شده است تا اثر آن بر رفتار رئولوژیکی و مقاومت فشاری در سنین مختلف بررسی شود. طرح اختلاط براساس الزامات EFNARC صورت گرفته و آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان T₅₀، قیف V، حلقه J، جعبه L، جعبه U و مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. نتایج نشان داده است که افزایش پسماند قهوه موجب کاهش جریان اسلامپ از ۷۲۰ میلیمتر در طرح کنترل به ۵۶۰ میلیمتر در طرح C-10% شده و این مقدار آفتی برابر با ۲۲/۲٪ داشته است. زمان T₅₀ نیز از ۲/۸ به ۵/۲ ثانیه افزایش یافته و حدود ۸۵/۷٪ رشد داشته است. زمان قیف V تا ۱۳۰٪ و اختلاف ارتفاع جعبه U تا ۸۳٪ افزایش یافته است. نسبت اختلاف ارتفاع در جعبه L در طرح C-10% حدود ۷۰٪ کاهش یافته است. اما استفاده از ۲/۵٪ پسماند قهوه همچنان مخلوط را در محدوده قابل قبول استاندارد EFNARC نگه می‌دارد. همچنین نتایج مقاومت فشاری نشان داد که پسماند قهوه موجب کاهش مقاومت فشاری و دیرگیر شدن بتن و تشکیل نواحی ضعف در بتن می‌شود. بطوریکه استفاده از ۰/۵٪، ۲/۵٪، ۵٪ و ۱۰٪ پسماند قهوه در بتن به ترتیب مقاومت فشاری را به میزان حدود ۹٪، ۲۱٪، ۳۶٪ و ۵۵٪ کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: پسماند قهوه، بتن خودتراکم، مشخصات رئولوژی، مقاومت فشاری، قوام دهنده بتن.

۱- مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و افزایش الگوی مصرف در سال‌های اخیر موجب افزایش تولید پسماند و تشدید تخریب محیط‌زیست شده است و این وضعیت ضرورت به‌کارگیری رویکردهای جامع در مدیریت پایدار پسماند را برجسته کرده است. افزایش حجم زباله، محدودیت ظرفیت دفن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تهدید منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد که روش‌های سنتی دفع پسماند دیگر توان پاسخگویی به نیاز شهرها را ندارند [۱]. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، کمبود منابع طبیعی و هزینه‌های بالای دفن زباله سبب شده است بازیافت و استفاده مجدد از مواد به‌عنوان یک راهبرد اساسی در سیاست‌های محیط‌زیستی و برنامه‌های توسعه پایدار مورد توجه قرار گیرد [۲]. این رویکرد علاوه بر کاهش فشارهای زیست‌محیطی، بستر ایجاد اشتغال، جذب سرمایه خصوصی و تقویت اقتصاد چرخشی را فراهم کرده است. در ایران سالانه حدود ۲۰ میلیون تن پسماند تولید می‌شود، اما تنها حدود ۲۰٪ آن وارد چرخه بازیافت می‌شود، در حالی که میانگین جهانی نزدیک به ۷۰٪ است و این اختلاف ظرفیت قابل توجهی را برای توسعه فناوری‌های بازیافت نشان می‌دهد [۳].

قهوه یکی از پرمصرف‌ترین نوشیدنی‌های جهان است و روزانه نزدیک به دو میلیارد فنجان از آن مصرف می‌شود و روند مصرف آن در ایران نیز طی سال‌های اخیر رو به افزایش بوده است. رشد واردات قهوه از ۶۷۰۰ کیلوگرم در سال ۱۳۹۶ به بیش از ۳۰ هزار تن در سال ۱۴۰۰ همراه با افزایش سرانه مصرف، موجب افزایش تولید پسماند قهوه شده است. تنها ۳۵٪ از این ضایعات به کمپوست تبدیل می‌شود و بخش عمده آن در اطراف شهرها دفن می‌گردد که به دلیل تولید متان و نفوذ شیرابه، خطرات زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کند [۴]. در مقابل، برخی کشورهای اروپایی با ایجاد مراکز جمع‌آوری و خرید پسماند قهوه، این ماده را در صنایعی مانند کشاورزی، تولید محصولات آرایشی و مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌دهند [۵]. این پسماند به‌سادگی از کافی‌شاپ‌ها و مراکز عرضه نوشیدنی جمع‌آوری می‌شود و به دلیل تمرکز مصرف در کلان‌شهرها، نیاز به شبکه گسترده برای تفکیک و انتقال ندارد.

در صنعت ساخت‌وساز، بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی سهم عمده‌ای از منابع طبیعی را به مصرف می‌رساند و افزایش فعالیت‌های عمرانی و رشد تقاضا برای تولید آن نگرانی‌هایی نظیر تخریب منابع سنگی و افزایش انتشار کربن ناشی از فرایند تولید سیمان به همراه داشته است [۶]. در واکنش به این چالش‌ها، تولید بتن‌های سبز مبتنی بر استفاده از مواد دورریز و انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، زیرا می‌تواند علاوه بر کاهش بار زیست‌محیطی، هزینه‌های ساخت را نیز کاهش دهند. استفاده از پسماندهایی مانند ضایعات کشاورزی، خاکستر مواد آلی و پسماندهای شهری در تولید بتن، راهکاری سازگار با اصول اقتصاد چرخشی به شمار می‌آید [۷]. در این میان، استفاده از پسماند قهوه به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح ریزدانه مطرح شده است و به‌کارگیری آن می‌تواند مصرف ماسه یا سیمان را کاهش داده و حجم پسماند دفنی را کم کند.

بتن خودتراکم^۱ یکی از انواع بتن است که برای جریان‌پذیری، عبور از نواحی دارای تراکم زیاد آرماتور و جلوگیری از جدایش سگدانه، به استفاده از مواد پودری نیاز دارد تا گرانروی و قوام مخلوط را به‌طور موثر تنظیم کنند [۸]. فیلرها با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات ماسه و سیمان، رئولوژی بتن را پایدار می‌کنند و اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهند و قابلیت پخش شدن مخلوط را بهبود می‌بخشند. در این کاربرد، واکنش‌پذیری پوزولانی ضرورت ندارد و آنچه اهمیت دارد رفتار فیزیکی و نقش پرکنندگی ماده است [۹]. پسماند قهوه به دلیل اندازه ریزدانه، چگالی پایین و ساختار سلولی متخلخل خود، بخشی از آب مخلوط را جذب می‌کند و به‌صورت یک پرکننده نیمه‌جاذب عمل می‌کند و این رفتار در کنترل جریان، افزایش قوام و جلوگیری از آب‌انداختگی موثر است. خشک‌سازی پسماند قهوه موجب پایدار شدن ترکیب آلی آن شده و باعث می‌شود نقش یک فیلر غیر واکنش‌زا را ایفا کند و عملکرد آن مشابه فیلرهای طبیعی کم‌فعالیت باشد [۱۰]. به‌کارگیری پسماند قهوه در بتن خودتراکم علاوه بر مزایای فنی، از نظر زیست‌محیطی نیز توجیه‌پذیر است. زیرا تولید پوزولان‌های طبیعی یا صنعتی مستلزم استخراج، فرآوری و مصرف انرژی است. در حالیکه پسماند قهوه یک ماده آماده، در دسترس و کم‌هزینه است و استفاده از آن موجب کاهش مصرف منابع طبیعی و کاهش حجم زباله دفنی می‌شود. در ایران نیز با توجه به رشد مصرف قهوه و افزایش واردات، حجم این پسماند رو به افزایش است و اغلب بدون مدیریت موثر دفع می‌شود، بنابراین استفاده از آن در بتن خودتراکم از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجیه است [۱۱].

بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، استفاده از پسماند قهوه در بتن در سال‌های اخیر رو به افزایش بوده است و پیش‌بینی می‌شود در آینده نیز کاربرد این نوع بتن گسترش یابد. این ایده نخستین بار در سال ۲۰۱۵ در ژاپن مطرح شد و از پسماند قهوه در ملات سیمانی

^۱ SCC Concrete

استفاده گردید [۱۲]. جویندوز و همکاران (۲۰۲۳) پسماند قهوه مصرف شده را در مقادیر ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ وزنی ماسه جایگزین کردند و گزارش دادند که با افزایش نسبت پسماند قهوه، اسلامپ بین ۱۲٪ تا ۳۸٪ کاهش یافته و قابلیت عایق حرارتی بتن تا ۴۰٪ افزایش می‌یابد [۱۳]. زین و همکاران (۲۰۲۳) با جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان با خاکستر پسته قهوه دریافتند که افزایش مقدار خاکستر پسته قهوه باعث کاهش خطی مقاومت فشاری بین ۷٪ تا ۲۸٪ می‌شود. آن‌ها بهترین عملکرد را در محدوده ۵٪ تا ۱۰٪ گزارش کردند [۱۴]. تسیما و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که استفاده از خاکستر پسته قهوه به میزان ۳٪ تا ۷٪ وزنی قیر در مخلوط‌های آسفالت گرم، موجب افزایش ۱۰٪ مقاومت مارشال و بهبود پایداری حرارتی می‌شود [۱۵]. گیدفاو (۲۰۲۲) و اسفاو (۲۰۲۲) با جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان با خاکستر پسته قهوه نتیجه گرفتند که مقادیر بیش از ۱۰٪ منجر به کاهش ۱۲٪ تا ۲۵٪ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز می‌شود. مقادیر ۵٪ تا ۱۰٪ بیشترین تعادل بین مقاومت و کارایی را داشتند [۱۶، ۱۷]. انیسا و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد بتن حاوی ۵٪ وزنی سیمان پسماند قهوه را در دماهای ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه بررسی کردند و گزارش دادند که این مقدار موجب افزایش ۱۵٪ مقاومت باقی‌مانده پس از آتش‌سوزی می‌شود [۱۸]. المديا (۲۰۱۹) جایگزینی ۲٪، ۴٪ و ۶٪ وزنی ماسه با پسته قهوه را بررسی کرد و نشان داد که تا ۴٪ جایگزینی، اُفت مقاومت فشاری کمتر از ۵٪ است اما در ۶٪ میزان اُفت به ۱۲٪ می‌رسد. همچنین جذب آب نمونه‌ها با افزایش درصد پسته قهوه بین ۸٪ تا ۲۰٪ افزایش یافت [۱۹]. خدابنده‌لو و همکاران (۱۴۰۴) از پسماند قهوه با نسبت‌های مختلف ۰٪، ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ وزنی سیمان استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که پسماند قهوه حاوی ترکیباتی است که دوام آن را در برابر اسیدها افزایش می‌دهد. بطوریکه هرچه میزان پسماند قهوه در بتن افزایش یابد، دوام اسیدی بیشتر شده و میزان خرابی ایجاد شده توسط اسید کاهش پیدا می‌کند [۲۰]. علی‌زاده و همکاران (۱۴۰۴) از پسماند قهوه در سطوح مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۳۰٪ وزنی در ملات ژئوپلیمری استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار پسماند قهوه، مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت، اما در سنین بالاتر برخی ترکیبات عملکرد مناسبی در مقاومت‌های کششی و خمشی از خود نشان دادند. بیشترین مقاومت کششی و خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ و ۲۰٪ پسماند قهوه بود که به ترتیب در سن ۵۶ روز حدود ۱۹٪ و ۷٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع نشان دادند [۲۱].

این نتایج نشان می‌دهد که پسماند و پسته قهوه قابلیت استفاده در بتن را دارند [۱۲-۲۱]. در ایران به دلیل محدودیت تولید دانه قهوه، بازیافت پسته قهوه دشوار است، اما افزایش واردات دانه و پودر قهوه امکان بازیافت پسماند آن را ضروری کرده است. این تحقیق با هدف استفاده از پسماند قهوه در بتن خودتراکم در جهت کاهش آلودگی زیست‌محیطی و توسعه مصالح ساختمانی سازگار با محیط‌زیست به شمار می‌آید. از آنجا که پسماند قهوه فاقد فعالیت پوزولانی قابل توجه است، استفاده از آن در کاربردهایی که تمرکز اصلی بر رفتار رئولوژیکی می‌باشد، توجیه‌پذیر است [۲۱]. در مجموع، ترکیب ویژگی‌هایی مانند ریزدانی مناسب، جذب آب کنترل‌پذیر، توان پر کردن فضاهای خالی، افزایش قوام و کاهش آب‌انداختگی، به همراه دسترس‌پذیری بالا، هزینه کم و مزایای زیست‌محیطی، موجب می‌شود پسماند قهوه به عنوان یک فیلر کارآمد و جایگزینی مناسب برای پوزولان‌های طبیعی در بتن خودتراکم قابل استفاده باشد.

۲- مواد و روش‌ها

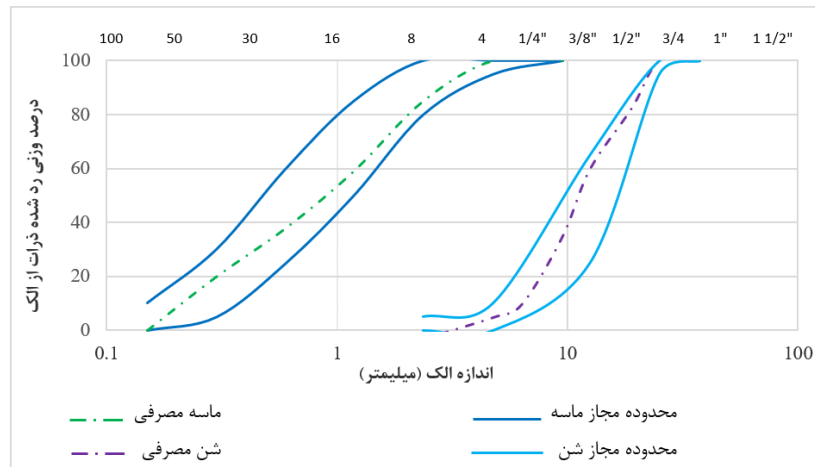
۲-۱- مصالح

در این تحقیق، سنگدانه‌های مورد استفاده شامل مخلوطی از شن و ماسه حاصل از ترکیب مصالح شکسته و رودخانه‌ای بود که از معدن واقع در منطقه بومهن استان تهران تامین گردیده است. ویژگی‌های فیزیکی این سنگدانه‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است. میزان جذب آب سنگدانه‌ها طبق الزامات ASTM-C136 اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱- مشخصات شن و ماسه مصرفی

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک	جذب آب
	mm		kg/m ³	%
ماسه	۴/۷۵	۳	۲۶۰۰	۲/۳
شن	۱۹	-	۲۶۳۰	۱/۵

آزمایش دانه‌بندی و طبقه‌بندی الک‌های شماره‌گذاری شده بر اساس الزامات ASTM-C136 انجام شد که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. همچنین وزن و اندازه سنگدانه‌ها با محدوده‌های تعیین‌شده در استاندارد ASTM-C33 مورد مقایسه و تطبیق قرار گرفت. در شکل شماره ۱، الگوی دانه‌بندی ماسه با رنگ سبز، الگوی دانه‌بندی شن با رنگ بنفش و منحنی آبی رنگ نشان دهنده حدود حداقل و حداکثر مجاز دانه‌بندی شن و ماسه مطابق با استاندارد ASTM-C33 می‌باشد.



شکل ۱- دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد

دانه‌های قهوه بسته به نوع نوشیدنی دارای میزان آسیاب متفاوتی هستند و اندازه ذرات آن‌ها در محدوده‌ای بین ۳۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر قرار دارد. در این تحقیق، پسماند قهوه مورد استفاده در این تحقیق از مصرف روزانه چندین کافه مختلف جمع‌آوری گردید. پسماندهای جمع‌آوری شده ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به‌طور کامل حذف گردد. سپس این مواد به مدت ۲۴ ساعت دیگر در دمای محیط (حدود ۲۵ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد) در فضای باز نگهداری شدند تا به دمای تعادل برسند. پس از آماده‌سازی، پسماند قهوه در مقادیر وزنی مختلف در فرآیند ساخت بتن به کار گرفته شد. ترکیب شیمیایی این ماده با استفاده از آزمون XRD و XRF مورد شناسایی قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند قهوه در جداول شماره ۲ و ۳ ارائه شده‌اند و شکل شماره ۲ و ۳ نمونه پسماند قهوه مصرفی و نمودار حاصل از تحلیل شیمیایی آن را نشان می‌دهد.

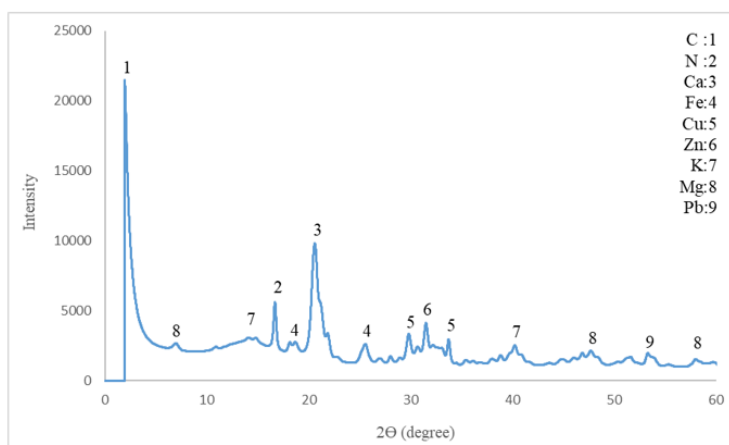
سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان دماوند بوده است. چگالی این سیمان برابر با ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش شده است. همچنین آنالیز شیمیایی سیمان، مطابق با شناسه فنی ارائه شده توسط شرکت سازنده [۲۵]، در جدول شماره ۳ ضمیمه شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی پسماند قهوه مصرفی

نام لاتین	Coffee
شکل ظاهری	پودر جامد
میزان ناخالصی	> ۱٪
حداکثر اندازه	۰/۳ mm
چگالی	۰/۳۵ gr/cm ³
pH	۴/۵ - ۵
میزان جذب آب	۲۳٪

جدول ۳- مشخصات شیمیایی پسماند قهوه و سیمان مصرفی [۲۵]

پسماند قهوه	عنصر	سیمان	عنصر
%		%	
۴۳	C	۴/۲	Al ₂ O ₃
۱۵/۶	N	۳/۲	Fe ₂ O ₃
۱/۵	K	۲/۵	MgO
۳/۷	Fe	۲۰/۳	SiO ₂
۲۰/۷	Ca	۶۱/۵	CaO
۰/۷	Mg	۰/۶۵	Na ₂ O
۵/۹	Cu	۲/۴	SO ₃
۸/۱	Zn	۱/۴۵	L.O.I
۰/۷	Pb	۳/۸	C ₂ A



شکل ۲- گراف XRD جهت شناسایی فازهای پسماند قهوه مصرفی



شکل ۳- پسماند قهوه مصرفی جهت انجام آزمایش

از آنجا که پسماند قهوه دارای قابلیت بالای جذب آب است [۲۰]، برای حفظ اسلامپ بتن استفاده از آبروان کننده ضروری است. استفاده از محصولات روان کننده یا کاهنده آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم

بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تامین روانی مدنظر از آبر روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات، استفاده گردید.

۲-۲- طرح مخلوط و برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، متغیر اصلی شامل نسبت‌های مختلف پسماند قهوه به‌عنوان جایگزین حجمی بخشی از ریزدانه‌های ماسه در نظر گرفته شده است. بر این اساس، چهار طرح اختلاط با درصدهای ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ جایگزینی حجمی ماسه با پسماند قهوه طراحی گردیده و یک طرح شاهد بدون افزودنی نیز برای مقایسه ساخته شده است. در این تحقیق، هدف بررسی اثر جایگزینی پسماند قهوه به جای پودر سنگ بر خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم بود. از آنجا که استفاده از پودر سنگ در بتن خودتراکم شاهد برای تامین قوام و پایداری مخلوط ضروری است، طرح شاهد به عنوان مرجع بتن خودتراکم معمولی حاوی پودر سنگ در نظر گرفته شد و سایر مخلوط‌ها نسبت به آن ارزیابی شدند.

فرایند طراحی اختلاط ابتدا بر پایه روش حجمی و مطابق با الزامات بتن خودتراکم بر اساس راهنمای EFNARC اصلاح شده است [۲۷]. مقدار سیمان مصرفی برای هر مترمکعب برابر ۴۵۰ کیلوگرم و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۵ انتخاب شده است. با توجه به جذب بالای آب توسط پسماند قهوه، از ابروان کننده پایه پلی کریوکسیلاتی به میزان ۳٪ وزنی سیمان استفاده شده است.

• برای جلوگیری از ورود آب اضافی به مخلوط، سنگدانه‌ها و پسماند قهوه پیش از اختلاط به طور کامل خشک شدند. بدین منظور، شن، ماسه و پسماند قهوه به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار گرفتند تا به دمای محیط برسند. پس از آماده‌سازی مصالح، سنگدانه‌ها به همراه سیمان و نیمی از آب اختلاط به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. در ادامه، پسماند قهوه و ابروان‌کننده به صورت همزمان افزوده شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه ادامه یافته است. سپس باقیمانده آب به تدریج اضافه شده و اختلاط نهایی به مدت ۲ دقیقه انجام شده است. پس از ساخت بتن، برای هر طرح اختلاط، آزمایش‌های رئولوژی و وزن مخصوص انجام شده است. در نهایت نمونه‌های بتن پس از قالب‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در دمای 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از طی این مدت و گیرش نسبی، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به حوضچه آب منتقل گردیده است تا به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری شوند. جدول شماره ۴ طرح اختلاط، مقدار مصالح مصرفی، استاندارد هر آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۴- طرح اختلاط و مقادیر وزنی مصالح برای ساخت هر متر مکعب بتن به همراه برنامه و استاندارد آزمایش‌های انجام شده

ردیف	شرح آزمایش	استاندارد آزمایش	نوع / ابعاد بتن
۱	جریان اسلامپ	BS-EN-12350-8	بتن تازه
۲	زمان T_0	BS-EN-12350-9	
۳	آزمایش قیف V	BS-EN 12350-10	
۴	آزمایش جعبه L	BS-EN 12350-11	
۵	آزمایش جعبه U	BS-EN 12350-12	
۶	آزمایش حلقه J		
۷	مقاومت فشاری ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه	BS-EN 12390-3	بتن سخت شده/مکعبی ۱۵ سانتیمتری

۳- بحث و نتایج

۳-۱- جریان اسلامپ

جدول شماره ۵ نتایج بدست آمده از آزمایش جریان اسلامپ را نشان می‌دهد. آزمایش جریان اسلامپ در این تحقیق به عنوان شاخص اصلی ارزیابی رفتار رئولوژی بتن خودتراکم انجام شده است و روانی مخلوط را بدون استفاده از ارتعاش مکانیکی نشان داده است. در این آزمایش، مخروط اسلامپ پس از مرطوب شدن با بتن تازه پر شده و بلافاصله پس از برداشتن مخروط، قطر پخش‌شدگی مخلوط اندازه‌گیری شده است [۲۷]. این مقدار بیانگر توان پخش‌شونده مخلوط بوده و وضعیت روانی را مشخص کرده است. مقدار ۷۲۰ میلیمتر برای طرح C-0% به دست آمده و این مقدار رفتار یک بتن خودتراکم بدون افزودنی را نشان داده است. در طرح C-2.5% مقدار جریان به ۶۹۰ میلیمتر رسیده و اُفتی برابر با ۹/۲٪ نسبت به طرح کنترل ایجاد شده است. در این حالت، حضور محدود پسماند قهوه موجب افزایش تنش جاری شدن و کاهش مقدار آب آزاد شده و روانی مخلوط را اندکی کاهش داده است. در طرح C-5% مقدار جریان به ۶۵۰ میلیمتر رسیده و اُفت اسلامپ برابر با ۹/۷٪ نسبت به نمونه شاهد ثبت شده است. افزایش مقدار پسماند قهوه در این طرح موجب افزایش اصطکاک داخلی و کاهش توان حرکت آزادانه ذرات شده است. در طرح C-7.5% مقدار جریان ۶۰۰ میلیمتر اندازه‌گیری شده و اُفت ۱۶٪ نسبت به طرح کنترل به دست آمده است. در این مرحله، نقش پسماند قهوه در ایجاد شبکه ذرات ریز و افزایش چسبندگی محسوس‌تر شده و کاهش روانی شدت بیشتری پیدا کرده است. در نهایت، طرح C-10% مقدار ۵۶۰ میلیمتر را ثبت کرده و اُفت ۲۲/۲٪ نسبت به طرح کنترل مشاهده شده است. در این طرح، مخلوط به دلیل کاهش قابل توجه آب آزاد و افزایش تماس بین‌ذره‌ای رفتار غلیظ‌تری پیدا کرده و جریان‌یابی آن دشوارتر شده است.

افزایش درصد پسماند قهوه باعث کاهش آب آزاد مخلوط و افزایش تنش تسلیم اولیه می‌شود و این رفتار موجب کاهش توان پخش‌شدگی سطحی در لحظه آغاز حرکت می‌گردد. ساختار متخلخل پسماند قهوه بخشی از رطوبت خمیر را جذب کرده و سطح زبر و شکل نامنظم ذرات نیز موجب افزایش اصطکاک داخلی و کاهش انرژی جریان آزاد می‌شود. این شرایط باعث کاهش شعاع پخش‌شدگی، کند شدن بازشدگی اولیه و کاهش یکدستی حرکت شعاعی بتن می‌گردد [۲۱].

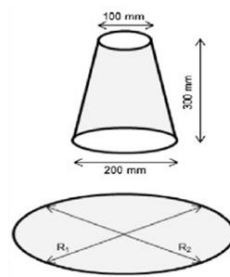
جدول ۵- مقایسه نتایج جریان اسلامپ و زمان T_{50} و تغییرات نسبی آن

ردیف	نام طرح	جریان اسلامپ (mm)	تغییرات اسلامپ (%)	زمان T_{50} (ثانیه)	تغییرات T_{50} (%)	ارزیابی طبق EFNARC
۱	C-0%	۷۲۰	-	۲/۸	-	قابل قبول
۲	C-2.5%	۶۹۰	-۴/۲	۳/۱	۱۰/۷	قابل قبول
۳	C-5%	۶۵۰	-۹/۷	۳/۶	۲۸/۶	قابل قبول
۴	C-7.5%	۶۰۰	-۱۶/۰	۴/۳	۵۳/۶	مردود
۵	C-10%	۵۶۰	-۲۲/۲	۵/۲	۸۵/۷	مردود

در آزمایش T_{50} زمان لازم برای رسیدن جریان بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر اندازه‌گیری می‌شود و این زمان نشان‌دهنده سرعت پخش شدن بتن و وضعیت رئولوژی آن است. هرچه این زمان کمتر باشد، بتن روان‌تر و دارای گرانروی پایین‌تر است و هرچه این زمان بیشتر شود، بتن چسبنده‌تر و غلیظ‌تر خواهد بود [۲۷]. تغییرات زمان T_{50} معمولاً بیانگر تغییر رفتار بتن در برابر جریان است و به‌صورت مستقیم تحت تاثیر مقدار آب آزاد، گرانروی پلاستیک، تنش تسلیم و اصطکاک داخلی مخلوط قرار دارد.

در طرح کنترل C-0% زمان T_{50} برابر با ۲/۸ ثانیه اندازه‌گیری شده است و این مقدار نشان داده است که بتن دارای روانی مناسب و توان پخش‌شوندگی بالا بوده است. در طرح C-2.5% زمان T_{50} به ۳/۱ ثانیه رسیده است و این مقدار افزایش ۱۰/۷٪ را نسبت به طرح شاهد نشان داده است. این افزایش زمان بیان کرده است که با افزودن مقدار کمی پسماند قهوه، بخشی از آب آزاد مخلوط جذب شده و گرانروی بتن بیشتر شده است. در طرح C-5% مقدار T_{50} به ۳/۶ ثانیه رسیده است و افزایش ۲۸/۶٪ نسبت به طرح شاهد ثبت شده است. این مقدار نشان داده است که اثر جذب آب و افزایش چسبندگی ذرات پسماند قهوه در این مرحله محسوس‌تر شده و حرکت خمیر سیمان نسبت به سنگدانه‌ها کندتر شده است. در طرح C-7.5% زمان T_{50} برابر ۴/۳ ثانیه به دست آمده است و این مقدار افزایش

۵۳٪/۶ را نشان داده است. این روند بیان کرده است که افزایش درصد پسماند قهوه موجب کاهش قابل توجه سرعت جریان بتن شده است و رفتار مخلوط به سمت حالت غلیظ و چسبنده تر حرکت کرده است. در نهایت، در طرح C-10% مقدار T50 به ۵/۲ ثانیه رسیده است که این مقدار افزایش ۸۵/۷٪ نسبت به طرح کنترل را نشان داده است و بیان کرده است که جریان یابی بتن به طور محسوس کند شده و مخلوط در حال ورود به محدوده بتن هایی با گرانیوی بالا است. افزایش درصد پسماند قهوه موجب افزایش گرانیوی پلاستیک و کاهش سیالیت بتن می شود و این موضوع سرعت رسیدن مخلوط به قطر مشخص را به طور محسوس کاهش می دهد. جذب رطوبت توسط ذرات پسماند قهوه، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل و نیاز بیشتر به انرژی برشی برای گسترش اولیه، سبب طولانی تر شدن زمان رسیدن بتن به حالت پایدار در آزمون T50 می گردد. شکل شماره ۴ تصویری از آزمایش جریان اسلامپ را نشان می دهد که در آن پهن شدگی و عدم آب انداختگی بتن در این آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۴- شماتیک و تصویری از آزمایش جریان اسلامپ و اندازه گیری قطر پهن شدگی [۲۷]

۳-۲- کیف V

جدول شماره ۶ نتایج بدست آمده از آزمایش کیف V را نشان می دهد. آزمایش کیف V به منظور سنجش لزجت خمیری و ارزیابی توان عبور بتن خودتراکم از مقاطع باریک انجام شده است و زمان تخلیه بتن از کیف معیار اصلی برای تشخیص وضعیت رئولوژی مخلوط است. در این روش، بتن همگن بدون ارتعاش در کیف ریخته می شود و پس از گذشت سی ثانیه، مجرای تحتانی باز می شود و زمان عبور بتن تا زمان دیده شدن ظرف زیر کیف اندازه گیری می شود. زمان های بین ۶ تا ۱۲ ثانیه نشان دهنده وضعیت مناسب بتن است و افزایش بیش از ۱۲ ثانیه بیان کننده لزجت بالا و غلظت زیاد مخلوط است. همچنین زمان کمتر از ۶ ثانیه نشان دهنده لزجت بسیار پایین و احتمال جداسازی است [۲۷].

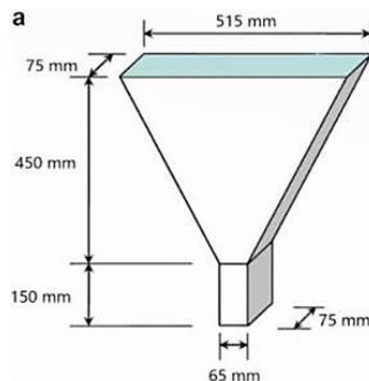
نتایج این تحقیق نشان داده است که با افزایش مقدار پسماند قهوه، مدت زمان عبور بتن از کیف به صورت تدریجی و قابل توجه افزایش یافته است. طرح کنترل C-0% زمان ۸ ثانیه را ثبت کرده و این مقدار بیان کرده است که بتن بدون پسماند قهوه دارای لزجت متعادل و توان عبور مناسب است. در طرح C-2.5% زمان تخلیه برابر با ۹ ثانیه و تغییرات نسبی ۱۱٪ گزارش شده است و این مقدار نشان داده است که وجود مقدار کمی پسماند قهوه موجب افزایش محدود لزجت شده اما مخلوط همچنان در محدوده قابل قبول قرار داشته است. در طرح C-5% زمان کیف V برابر با ۱۱ ثانیه و تغییرات ۳۹٪ ثبت شده است و این مقدار بیان کرده است که اثر پسماند قهوه بر افزایش چسبندگی و کاهش سرعت جریان بتن نسبت به طرح شاهد محسوس تر شده است، اما مقدار حاصل هنوز با محدوده استاندارد سازگار است. در طرح C-7.5% زمان برابر با ۱۵ ثانیه اندازه گیری شده است و این مقدار معادل افزایش ۷۹٪ نسبت به طرح کنترل بوده است و نشان داده است که مخلوط به دلیل غلظت زیاد و افزایش لزجت از محدوده مناسب خارج شده است و عبور بتن از

مقاطع باریک با دشواری همراه خواهد بود. در نهایت، طرح C-10% زمان ۱۹ ثانیه و تغییرات نسبی ۱۳۰٪ را نشان داده است و این مقدار به وضوح بیان کرده است که مقدار زیاد پسماند قهوه موجب غلیظ شدن مخلوط و کاهش شدید توان عبوری بتن شده است و این طرح از نظر رئولوژی قابل قبول نیست.

افزایش درصد پسماند قهوه موجب بالا رفتن گرانش و مقاومت برشی بتن می‌شود و زمان تخلیه از دهانه باریک قیف را افزایش می‌دهد. جذب آب توسط پسماند قهوه و زبری سطح آن موجب افزایش چسبندگی داخلی و کاهش سرعت جریان در مقطع تنگ خروجی می‌شود و این روند احتمال ایجاد پل مواد و رفتار تاخیردار در حین تخلیه را افزایش می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که افزایش درصد پسماند قهوه در مقادیر بالاتر از ۵٪ می‌تواند قابلیت پخش شدن و عبور بتن را به طور قابل توجهی کاهش دهد. شکل شماره ۵ آزمایش و دستگاه قیف V را در این تحقیق نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقایسه نتایج آزمایش قیف V و تغییرات نسبی آن

ردیف	نام طرح	زمان قیف V (ثانیه)	تغییرات نسبی (%)	ارزیابی طبق EFNARC
۱	C-0%	۸	-	قابل قبول
۲	C-2.5%	۹	۱۱	قابل قبول
۳	C-5%	۱۱	۳۹	قابل قبول
۴	C-7.5%	۱۵	۷۹	مردود
۵	C-10%	۱۹	۱۳۰	مردود



شکل ۵- شماتیک و تصویری از آزمایش قیف V بتن خودتراکم [۲۷]

۳-۳- حلقه J

جدول شماره ۷ نتایج بدست آمده از آزمایش حلقه J را نشان می‌دهد. آزمایش حلقه J برای ارزیابی توان عبور بتن خودتراکم از میان موانع شبیه‌سازی شده و بررسی احتمال انسداد انجام می‌شود. در این روش بتن پس از پر شدن مخروط اسلامپ و برداشتن آن، از میان شبکه آرماتورگونه عبور می‌کند و قطر جریان و اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه اندازه‌گیری می‌شود. کاهش قطر جریان و افزایش اختلاف ارتفاع نشانه افزایش لزجت، کاهش روانی و کاهش توان عبور بتن است. حد مجاز اختلاف ارتفاع برای بتن خودتراکم ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود و مقادیر بالاتر از آن احتمال انسداد و کاهش کارایی را نشان می‌دهد. نتیجه این آزمایش از رابطه شماره ۱ می‌شود [۲۷]:

$$P_J = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0 \quad (1)$$

P_J = انسداد بتن پشت میلگرد

میزان ارتفاع جریان در مرکز بتن Δh_0

میزان ارتفاع جریان در اطراف بتن $\Delta h_{x1}, \Delta h_{x2}, \Delta h_{y1}, \Delta h_{y2}$

نتایج به دست آمده نشان داده است که با افزایش درصد پسماند قهوه، قطر جریان بتن به صورت پیوسته کاهش یافته و میزان تغییرات نسبی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در طرح کنترل C-0% قطر جریان ۷۰۰ میلیمتر ثبت شده است که بیان کننده روانی مناسب و توان عبور مطلوب بتن بدون پسماند قهوه است. در طرح C-2.5% قطر جریان به ۶۶۵ میلیمتر کاهش یافته و مقدار تغییرات نسبی ۵٪ بوده است. این مقدار نشان داده است که مقدار کم پسماند قهوه موجب افزایش محدود لزجت مخلوط شده. در طرح C-5% قطر جریان به ۶۲۵ میلیمتر رسیده و میزان تغییرات نسبی ۱۰/۱٪ ثبت شده است و این مقدار نشان داده است که اثرات پسماند قهوه بر افزایش چسبندگی، کاهش آب آزاد و افزایش اصطکاک داخلی مخلوط محسوس تر شده و توان عبور بتن نسبت به طرح شاهد کاهش بیشتری یافته است. در طرح C-7.5% قطر جریان برابر با ۵۸۰ میلیمتر و تغییرات نسبی ۱۶/۶٪ بوده است که این مقدار بیان کننده کاهش قابل توجه جریان پذیری و تمایل مخلوط به رفتار نیمه غلیظ و کاهش توان عبور از میان آرماتورها است. در طرح C-10% قطر جریان ۵۳۰ میلیمتر و تغییرات نسبی ۲۳/۷٪ ثبت شده است و این مقدار نشان داده است که مخلوط دچار افت شدید روانی و توان عبور شده است. افزایش مقدار پسماند قهوه باعث افزایش اصطکاک داخلی مخلوط و افزایش مقاومت جریان در ناحیه عبور از میان آرماتورها می شود. زبری و نامنظمی ذرات پسماند قهوه موجب کاهش توان لغزش بین ذرات شده و تجمع آن ها در پشت میلگردها احتمال ایجاد انسدادهای موضعی را افزایش می دهد. این رفتار منجر به افزایش میزان اختلاف ارتفاع و کاهش نسبت اختلاف ارتفاع و کاهش یکنواختی عبور بتن از شبکه آرماتورها می شود [۲۲]. شکل شماره ۶ آزمایش حلقه J بر روی بتن خودتراکم و عدم آب انداختگی بتن را در این تحقیق نشان می دهد.

جدول ۷- مقایسه نتایج آزمایش حلقه J و تغییرات نسبی آن

ردیف	نام طرح	قطر جریان (mm)	قطر جریان (%)	P_f (mm)	P_j (%)	ارزیابی طبق EFNARC
۱	C-0%	۶۹۵	-	۸	-	قابل قبول
۲	C-2.5%	۶۶۰	-۵/۰	۱۲	۳۳	مردود
۳	C-5%	۶۲۵	-۱۰/۱	۱۸	۵۶	مردود
۴	C-7.5%	۵۸۰	-۱۶/۶	۲۸	۷۱	مردود
۵	C-10%	۵۳۰	-۲۳/۷	۳۹	۷۹	مردود



شکل ۶- شماتیک و تصاویری از آزمایش حلقه J بر روی بتن خودتراکم [۲۷]

۳-۴- جعبه L

جدول شماره ۸ نتایج بدست آمده از آزمایش جعبه L را نشان می‌دهد. آزمایش جعبه L شکل برای ارزیابی قابلیت عبور و پرکنندگی بتن خودتراکم و بررسی احتمال انسداد بتن تازه هنگام عبور از میان آرماتورها انجام می‌شود. در روند آزمایش، ابتدا جداگر کشویی بسته می‌شود و بخش قائم جعبه با بتن همگن پر شده و به مدت یک دقیقه در حالت سکون باقی می‌ماند. سپس جداگر باز شده و بتن تحت وزن خود به بخش افقی جریان پیدا می‌کند. پس از توقف جریان بتن، ارتفاع بتن پشت آرماتورها (h_1) و جلوی جعبه (h_2) اندازه‌گیری می‌شود و نسبت h_2/h_1 به عنوان معیار قابلیت عبور محاسبه می‌گردد. محدوده قابل قبول این نسبت بین ۰/۸ تا ۱ است. هرچه این نسبت به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برابری ارتفاع بتن در دو ناحیه و قابلیت عبور مناسب از میان آرماتورها است [۲۷]. این آزمایش میزان روانی و انسداد بتن خودتراکم را در شبکه‌های متراکم آرماتور تعیین می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که طرح C-0% با میزان اختلاف ارتفاع برابر ۱۲ میلیمتر و نسبت اختلاف ارتفاع معادل ۰/۹۲ به عنوان مبنای ارزیابی سایر طرح‌ها از توان عبور بسیار مطلوبی برخوردار بوده است. در طرح C-2.5% مقدار میزان اختلاف ارتفاع به ۱۹/۵ میلیمتر افزایش یافته و تغییر نسبی ۳۸٪ را نشان می‌دهد. نسبت اختلاف ارتفاع نیز به ۰/۸۷ کاهش یافته و کاهش ۵/۷٪ را ثبت کرده است که حاکی از افزایش محدود مقاومت در برابر عبور بتن از میان آرماتورهای قائم است. در طرح C-5% میزان اختلاف ارتفاع به ۳۱/۵ میلیمتر رسیده و تغییر نسبی ۶۲٪ را ثبت کرده است. نسبت اختلاف ارتفاع در این طرح به ۰/۷۹ کاهش یافته و کاهش ۱۶/۵٪ را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش محسوس لزجت، افزایش تنش تسلیم و آغاز بروز رفتار نیمه‌انسدادی در شبکه آرماتورها است. در طرح C-7.5% مقدار میزان اختلاف ارتفاع به ۴۸ میلیمتر افزایش یافته و تغییر نسبی ۷۵٪ گزارش شده است. نسبت اختلاف ارتفاع نیز برابر ۰/۶۸ بوده و افت ۳۵٪/۳ را نشان می‌دهد که بیان می‌کند بتن بخش قابل توجهی از توان عبور خود را از دست داده و پدیده قفل‌شدگی ذرات و افزایش اصطکاک جداره‌ها بر جریان بتن غالب شده است. نهایتاً در طرح C-10% مقدار میزان اختلاف ارتفاع به ۶۹ میلیمتر رسیده و تغییر نسبی ۸۳٪ ثبت شده است. نسبت اختلاف ارتفاع نیز تا ۰/۵۴ کاهش یافته و کاهش ۷۰/۴٪ را نشان می‌دهد که بیانگر افت شدید قابلیت عبور و تشکیل ناحیه انسداد در پشت آرماتورها است.

افزایش مقدار پسماند قهوه موجب بالا رفتن تنش تسلیم و گرانیوی مخلوط و افزایش مقاومت جریان در ناحیه عبور از میان آرماتورها می‌شود. ساختار متخلخل و جذب رطوبت توسط ذرات پسماند قهوه سبب کاهش سیالیت و کند شدن حرکت در بخش افقی جعبه می‌گردد و زبری این ذرات نیز احتمال بروز رفتار قفل‌شدگی و تجمع پشت آرماتورها را افزایش می‌دهد. این رفتار موجب افزایش میزان اختلاف ارتفاع و کاهش نسبت اختلاف ارتفاع می‌شود و بیانگر افت توان عبور بتن است. مقایسه روندهای میزان و نسبت اختلاف ارتفاع نشان می‌دهد که حد عملکردی بتن خودتراکم در این مطالعه در محدوده کمتر از ۵٪ پسماند قهوه قرار دارد و مقادیر بالاتر از آن با بروز انسداد، افزایش مقاومت در برابر عبور و کاهش کیفیت جریان مواجه می‌شوند. شکل شماره ۷ آزمایش جعبه L و دستگاه آن را نشان می‌دهد.

جدول ۸- مقایسه نتایج آزمایش جعبه L و تغییرات نسبی آن

ردیف	نام طرح	ΔH (h_2-h_1) (mm)	تغییرات نسبی (%)	نسبت (h_2/h_1)	تغییرات نسبی (%)	ارزیابی طبق EFNARC
۱	C-0%	۱۲	-	۰/۹۲	-	قابل قبول
۲	C-2.5%	۱۹/۵	۳۸	۰/۸۷	-۵/۷	قابل قبول
۳	C-5%	۳۱/۵	۶۲	۰/۷۹	-۱۶/۵	نزدیک به مرز/قابل قبول
۴	C-7.5%	۴۸	۷۵	۰/۶۸	-۳۵/۳	مردود
۵	C-10%	۶۹	۸۳	۰/۵۴	-۷۰/۴	مردود



شکل ۷- شماتیک و تصویری از آزمایش جعبه L بتن خودتراکم [۲۷]

۳-۵- جعبه U

جدول شماره ۹ نتایج بدست آمده از آزمایش جعبه U را نشان می‌دهد. این آزمایش با هدف ارزیابی قابلیت عبور، میزان پرشدگی و رفتار بتن خودتراکم هنگام گذر از میان آرماتورهای قائم انجام می‌شود و عملکرد بتن بر پایه دو شاخص میزان اختلاف ارتفاع و نسبت اختلاف ارتفاع بررسی می‌گردد. در روند انجام آزمایش، محفظه اول جعبه تا ارتفاع مشخصی با بتن تازه پر شده و پس از یک دقیقه توقف، دریاچه میانی باز می‌شود تا بتن از میان میلگردها عبور کرده و محفظه دوم را پر کند. پس از توقف کامل جریان، ارتفاع بتن در دو محفظه اندازه‌گیری می‌شود و مقادیر میزان اختلاف ارتفاع و نسبت اختلاف ارتفاع به عنوان شاخص‌های اصلی توان عبور محاسبه می‌گردند. مطابق معیارهای بتن خودتراکم، میزان اختلاف ارتفاع باید تا حد امکان کم و نسبت اختلاف ارتفاع نزدیک به عدد ۱ باشد تا نشان‌دهنده توان عبور سالم و بدون انسداد بتن باشد [۲۷].

نتایج جدول نشان می‌دهد که طرح C-0% با میزان اختلاف ارتفاع ۲۰ میلیمتر و نسبت اختلاف ارتفاع ۰/۹۴ عملکرد پایه و قابل قبول داشته و عبور مناسبی از میان میلگردها را نشان می‌دهد. در طرح C-2.5% مقدار میزان اختلاف ارتفاع به ۳۰ میلیمتر افزایش یافته و ۳۳٪ رشد نسبت به نمونه کنترل دارد. نسبت اختلاف ارتفاع نیز به ۰/۹۱ کاهش یافته و افت ۳٪ را ثبت کرده که بیانگر افزایش محدود مقاومت جریان و کاهش جزئی توان عبور بتن است. در طرح C-5% میزان اختلاف ارتفاع به ۵۰ میلیمتر رسیده و افزایش ۶۰٪ نشان می‌دهد، در حالی که نسبت اختلاف ارتفاع به ۰/۸۵ کاهش یافته و افت ۱۱٪ را تجربه کرده است. این وضعیت بیانگر افزایش محسوس تنش تسلیم، بالا رفتن گرانی و کاهش یکنواختی عبور بتن از میان آرماتورهای قائم است. در طرح C-7.5% میزان اختلاف ارتفاع به ۸۰ میلیمتر افزایش یافته و تغییر نسبی ۷۵٪ گزارش شده است. نسبت اختلاف ارتفاع نیز به ۰/۷۶ کاهش یافته و افت ۲۴٪ را نشان می‌دهد که حاکی از بروز قفل‌شدگی موضعی، تجمع ذرات پشت میلگردها و افزایش اصطکاک داخلی است. نهایتاً در طرح C-10% میزان اختلاف ارتفاع به ۱۲۰ میلیمتر رسیده و افزایش ۸۳٪ را ثبت کرده است. نسبت اختلاف ارتفاع نیز تا ۰/۶۳ کاهش یافته که بیانگر افت ۴۹٪ و نشان‌دهنده بروز انسداد، افت شدید روانی و ناتوانی بتن در پر کردن محفظه دوم است.

افزایش مقدار پسماند قهوه موجب افزایش تدریجی تنش تسلیم و گرانی و پلاستیک مخلوط شده و با جذب بخشی از آب آزاد، سیالیت بتن را کاهش می‌دهد. زبری سطحی و ساختار متخلخل این ذرات، اصطکاک داخلی را افزایش داده و تمایل مخلوط به قفل‌شدگی در پشت آرماتورها را بیشتر می‌کند [۱۸]. این رفتار منجر به افزایش تدریجی میزان اختلاف ارتفاع و کاهش نسبت اختلاف ارتفاع با افزایش درصد پسماند قهوه شده و نشان‌دهنده افت توان عبور بتن است. بر اساس نتایج جدول، محدوده قابل قبول عملکرد بتن خودتراکم تنها در مقادیر کمتر از ۵٪ پسماند قهوه قرار داشته و مقادیر بالاتر موجب کاهش شدید توان عبور و بروز انسداد در ناحیه آرماتورها می‌شود. شکل شماره ۸ آزمایش جعبه U و دستگاه آن را نشان می‌دهد.

جدول ۹- مقایسه نتایج آزمایش جعبه U و تغییرات نسبی آن

ردیف	نام طرح	ΔH (h_2-h_1) (mm)	تغییرات (%)	نسبت (h_2/h_1)	تغییرات (%)	ارزیابی طبق EFNARC
۱	C-0%	۲۰	-	۰/۹۴	-	قابل قبول
۲	C-2.5%	۳۰	۳۳	۰/۹۱	-۳	قابل قبول
۳	C-5%	۵۰	۶۰	۰/۸۵	-۱۱	مردود
۴	C-7.5%	۸۰	۷۵	۰/۷۶	-۲۴	مردود
۵	C-10%	۱۲۰	۸۳	۰/۶۳	-۴۹	مردود



شکل ۸- شماتیک و تصاویری از آزمایش جعبه U بر روی بتن خودتراکم [۲۷]

۳-۶- مقاومت فشاری

جدول شماره ۱۰ و شکل شماره ۹ نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. مقادیر گزارش شده مقاومت فشاری، میانگین نتایج سه آزمون مکعبی ۱۵ سانتیمتری برای هر طرح و در هر رده سنی بوده است. طبق ضوابط آبا [۲۸] مقاومت مکعبی به مقاومت معادل استوانه‌ای تبدیل شده است. همچنین بر اساس میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها، انحراف معیار محاسبه شده تا میزان یکنواختی و پراکندگی نتایج مشخص شود [۲۰]. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پسماند قهوه، مقاومت فشاری بتن در تمام سنین کاهش یافته، کسب مقاومت به تاخیر افتاده و پراکندگی نتایج (انحراف از معیار) نیز بیشتر شده است. این روند کاملاً با مکانیزم‌های علمی مرتبط با رفتار ذرات آلی قهوه در ماتریس سیمانی سازگار است.

مقاومت فشاری ۷ روزه طرح C-0% با میانگین ۲۴/۳ مگاپاسکال بالاترین مقدار را دارد. طرح C-2.5% مقاومت فشاری ۲۱/۴ مگاپاسکال را ثبت کرده و کاهش حدود ۱۲/۳٪ نشان می‌دهد. طرح C-5% با مقاومت فشاری ۱۸/۶ مگاپاسکال کاهشی حدود ۲۳/۸٪ نسبت به طرح شاهد دارد. طرح C-7.5% مقاومت فشاری ۱۵/۶ مگاپاسکال را ارائه کرده و کاهش حدود ۳۶/۱٪ دارد. طرح C-10% با مقدار ۱۱/۸ مگاپاسکال کاهش ۵۱/۶٪ نسبت به شاهد نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح C-0% با میانگین ۳۳/۸ مگاپاسکال بالاترین مقدار را دارد. طرح C-2.5% مقاومت فشاری ۲۹/۸ مگاپاسکال را ثبت کرده و کاهش حدود ۱۱/۸٪ نشان می‌دهد. طرح C-5% با مقاومت فشاری ۲۵/۶ مگاپاسکال کاهشی حدود ۲۴/۳٪ نسبت به طرح شاهد دارد. طرح C-7.5% مقاومت فشاری ۲۲/۱ مگاپاسکال را ارائه کرده و کاهش حدود ۳۴/۶٪ دارد. طرح C-10% با مقدار ۱۸/۱ مگاپاسکال کاهش حدود ۴۶/۴٪ نسبت به شاهد نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه، در طرح C-0% با میانگین ۳۵/۲ مگاپاسکال بالاترین مقدار را دارد. طرح C-2.5% مقاومت فشاری ۳۲/۲ مگاپاسکال را ثبت کرده و کاهش حدود ۸/۵٪ نشان می‌دهد. طرح C-5% با مقاومت فشاری ۲۹/۱ مگاپاسکال کاهشی برابر ۱۷/۳٪ نسبت به طرح شاهد دارد. طرح C-7.5% مقاومت فشاری ۲۵/۸ مگاپاسکال را ارائه کرده و کاهش حدود ۲۶/۷٪ دارد. طرح C-10% با مقاومت فشاری ۲۲/۶ مگاپاسکال کاهش حدود ۳۵/۸٪ نسبت به شاهد نشان می‌دهد. این رفتار کاملاً با مکانیزم‌های علمی مطالعات پیشین سازگار است [۱۶-۱۲].

کاهش مقاومت فشاری می‌تواند تا حدی با ماهیت آلی پسماند قهوه و وجود ترکیبات آلی گزارش شده در مطالعات پیشین مانند فنول‌ها و تانن‌ها^۲ مرتبط باشد. در حضور این مواد، تشکیل ژل C-S-H (اصلی‌ترین محصول مقاومتی سیمان) ناقص و کند می‌شود و شبکه پیوندهای شیمیایی در خمیر سیمان به طور کامل شکل نمی‌گیرد [۱۶]. نتیجه این فرایند، کاهش مقاومت فشاری و دیرگیری بتن است. به همین دلیل در طرح‌های حاوی قهوه رشد مقاومت در ۹۰ روزه همچنان پایین‌تر از شاهد باقی می‌ماند. عامل مهم دیگر، نقش ضعیف پسماند قهوه در ناحیه اتصال سنگدانه و خمیر سیمان است. سطح ذرات قهوه نرم و آلی است و مانند ماسه رفتار نمی‌کند. این ذرات قادر به ایجاد پیوند فیزیکی و شیمیایی پایدار با خمیر سیمان نیستند و به عنوان نقاط ضعف موضعی عمل می‌کنند [۱۷]. بنابراین ترک‌های ریز تحت بارگذاری ابتدا در اطراف این ذرات تشکیل و سپس گسترش می‌یابند و منجر به گسیختگی زود هنگام می‌شوند [۱۸]. تخلخل طبیعی پسماند قهوه نیز عامل مهمی در کاهش مقاومت است. جایگزینی ماسه متراکم با ذرات سبک و متخلخل قهوه سبب افزایش حجم حفرات و کاهش چگالی موثر بتن می‌شود. افزایش تخلخل همواره رابطه معکوس با مقاومت دارد و همین موضوع آفت

^۱ آیین نامه بتن ایران

^۲ Phenols

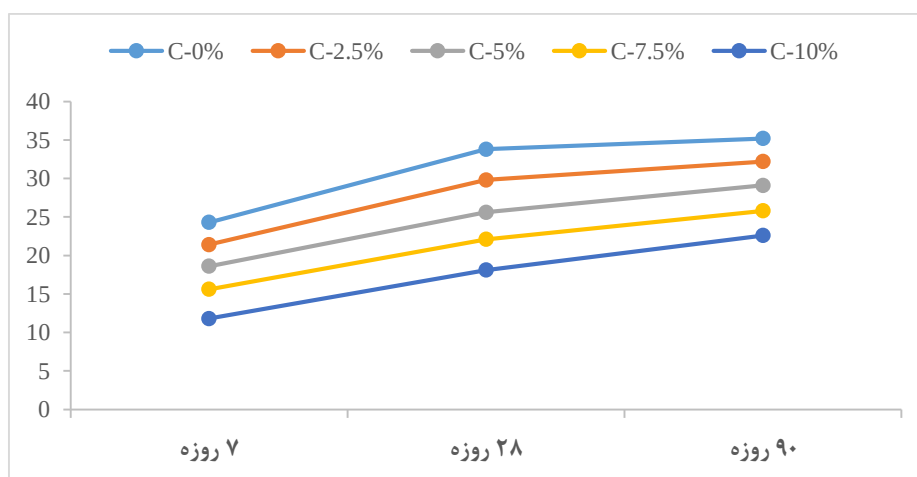
^۳ Tannins

مقاومت طرح‌های ۷/۵٪ و ۱۰٪ را تشدید کرده است. افزون بر این، خاصیت جذب آب بالای ذرات قهوه موجب می‌شود آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان در لحظات اولیه کاهش یابد و سپس در فرآیند خشک‌شدن، ذرات قهوه آب خود را از دست داده و جمع‌شدگی^۱ ایجاد کنند. این تغییر حجم درون بتن سخت‌شده موجب ایجاد فضای خالی و جدایش موضعی می‌شود و مقاومت بیشتری را کاهش می‌دهد [۱۹].

همچنین، با افزایش نسبت پسماند قهوه، در برخی نمونه‌ها افزایش انحراف معیار مقاومت فشاری مشاهده شد که می‌تواند نشان دهنده افزایش ناهمگنی در مخلوط باشد. این رفتار احتمالاً با توزیع غیریکنواخت ذرات پسماند قهوه، ماهیت متخلخل آن‌ها و کاهش یکنواختی در ماتریس بتن مرتبط است.

جدول ۱۰- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در سنین مختلف به همراه درصد تغییرات و انحراف از معیار

نام طرح	سن نمونه (روزه)	نمونه اول (MPa)	نمونه دوم (MPa)	نمونه سوم (MPa)	میانگین (MPa)	معادل استوانه‌ای (MPa)	تغییرات (%)	انحراف از معیار
C-0%	۷ روزه	۲۴/۸	۲۴/۰	۲۴/۳	۲۴/۴	۱۹/۳	-	۰/۳۰
	۲۸ روزه	۳۴/۲	۳۳/۵	۳۳/۷	۳۳/۸	۲۸/۸	-	۰/۳۶
	۹۰ روزه	۳۵/۸	۳۵/۰	۳۴/۸	۳۵/۲	۳۰/۲	-	۰/۵۳
C-2.5%	۷ روزه	۲۱/۰	۲۱/۸	۲۱/۴	۲۱/۴	۱۶/۴	-۱۲/۳	۰/۴۰
	۲۸ روزه	۲۸/۴	۳۰/۲	۳۰/۸	۲۹/۸	۲۴/۸	-۱۱/۸	۱/۲۵
	۹۰ روزه	۳۲/۸	۳۰/۹	۳۲/۹	۳۲/۲	۲۷/۲	-۸/۵	۱/۱۳
C-5%	۷ روزه	۱۸/۰	۱۷/۶	۲۰/۲	۱۸/۶	۱۳/۶	-۲۳/۸	۱/۴۰
	۲۸ روزه	۲۴/۳	۲۶/۱	۲۶/۴	۲۵/۶	۲۰/۶	-۲۴/۳	۱/۱۴
	۹۰ روزه	۳۰/۵	۲۸/۳	۲۸/۵	۲۹/۱	۲۴/۱	-۱۷/۳	۱/۲۲
C-7.5%	۷ روزه	۱۴/۵	۱۴/۹	۱۷/۴	۱۵/۶	۱۰/۶	-۳۶/۱	۱/۵۷
	۲۸ روزه	۲۳/۲	۲۲/۸	۲۰/۳	۲۲/۱	۱۷/۱	-۳۴/۶	۱/۵۷
	۹۰ روزه	۲۷/۶	۲۴/۲	۲۵/۶	۲۵/۸	۲۰/۸	-۲۶/۷	۱/۷۱
C-10%	۷ روزه	۹/۵	۱۲/۳	۱۳/۶	۱۱/۸	۶/۸	-۵۱/۶	۲/۱۰
	۲۸ روزه	۱۹/۶	۱۶/۴	۱۸/۳	۱۸/۱	۱۳/۱	-۴۶/۴	۱/۶۱
	۹۰ روزه	۲۰/۶	۲۳/۶	۲۳/۶	۲۲/۶	۱۷/۶	-۳۵/۸	۱/۷۳



شکل ۹- مقایسه زمان گیرش نمونه‌ها در سنین مختلف

¹ shrinkage

۳-۷- جمع بندی

در این تحقیق تلاش گردید تا مزایا و معایب استفاده از پسماند قهوه بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گیرد. امروزه در کشور، بطور روزانه حجم زیادی پسماند قهوه به محیط زیست تحمیل می شود که سازوکاری موثری برای بازیافت این ماده وجود ندارد. بطوریکه بخش عمده ای از این پسماندها به عنوان زباله در محل های دفن زباله در اطراف شهرها رها یا دفن می شود. بارگیری و انتقال این پسماندها و سرانجام دفن کردن آن برای شهرداری ها هزینه های گزافی دارد. علاوه بر آن پسماند قهوه بعنوان یک زباله باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی و آلودگی سفره های آب زیرزمینی خواهد شد [۱۹، ۱۶]. ادامه روند فعلی باعث از بین رفتن سرمایه های در گردش، زمینه سازی برای آلودگی بیشتر محیط زیست، از بین رفتن فرصت های شغلی می شود. بنابراین لازم است تا تدابیری برای کاهش حجم پسماند مصرفی به کار گرفته شود. وجود این مشکلات و تهدیدها امروزه ایجاب می کند تا برای کاهش تولید سیمان و نیز کاهش حجم پسماندهای دورریز به چرخه بازیافت مصالح روی آورد و به وسیله بازیافت پسماندهای ساختمانی در تولید بناهای جدید اقدامات موثری صورت گیرد. لذا با توجه به منافع اقتصادی و زیست محیطی بلند مدت با بهره گیری از سرمایه گذاری بخش خصوصی، می توان در جهت توسعه بازیافت نیز قوانینی وضع نمود و اجرا کرد [۲۲، ۲۱].

نتایج آزمایش های رئولوژیکی نشان داد که افزودن پسماند قهوه موجب کاهش تدریجی جریان پذیری و افزایش زمان های عبور بتن خودتراکم می شود. کاهش قطر جریان و افزایش زمان T_{50} بیانگر افزایش گرانروی و تنش تسلیم است. رفتاری که با توجه به جذب آب قابل توجه و چگالی پایین پسماند قهوه، ناشی از کاهش آب مؤثر و افزایش غلظت خمیر سیمان قابل تفسیر است. در مقادیر کمتر از ۵٪، این تغییرات محدود بوده و بتن همچنان با الزامات EFNARC همخوانی دارد. افزایش زمان قیف V و اُفت نسبت عبور در حلقه L و جعبه U نشان داد که پسماند قهوه علاوه بر کاهش روانی، توان عبور بتن را نیز تضعیف می کند. افزایش میزان اختلاف ارتفاع در جعبه L و U بیانگر ایجاد مقاومت موضعی در مسیر جریان است که در درصدهای بالاتر به انسداد نسبی منجر می شود. این رفتار با ویژگی های فیزیکی پسماند قهوه شامل چگالی بسیار پایین، زبری ذرات و توزیع اندازه گسترده مرتبط است که اصطکاک داخلی را افزایش داده و حرکت نسبی ذرات را محدود می کند. در محدوده های پایین استفاده (کمتر از ۵٪)، بتن همچنان قابلیت پراکندگی و پایداری مناسبی دارد و کاهش آب انداختگی نیز مشاهده می شود. اما در مقادیر ۷/۵٪ و ۱۰٪ اُفت جریان، افزایش زمان های عبور و کاهش نسبت اختلاف ارتفاع در آزمون های عبوری نشان داد که مخلوط از حدود استاندارد خارج می شود و نیازمند اصلاح طرح اختلاط و تنظیم دوز روان کننده است. این موضوع نتیجه مستقیم افزایش گرانروی و پایداری بیش از حد مخلوط به واسطه ویژگی های فیزیکی پسماند قهوه است. در مجموع، پسماند قهوه می تواند نقش یک فیلر غیرفعال را در بتن خودتراکم ایفا کند، اما استفاده از آن باید به مقادیر کنترل شده محدود شود. قرارگیری این ماده در محدوده های بهینه نه تنها امکان پذیر است، بلکه از نظر پایداری مخلوط نیز قابل قبول خواهد بود.

از طرفی افزایش پسماند قهوه در بتن به طور مستقیم موجب اُفت مقاومت فشاری، افزایش تخلخل، تضعیف ناحیه انتقال، کُند شدن واکنش های هیدراتاسیون و رشد پراکندگی نتایج می شود [۱۹-۱۶]. تداوم این روند در تمام سنین عمل آوری نشان می دهد که استفاده از نسبت های بالا از نظر مکانیکی قابل قبول نیست و رفتار بتن را به محدوده عملکرد ضعیف منتقل می کند. مقایسه نتایج سه سن عمل آوری نیز بیانگر آن است که طرح $C-2.5\%$ بهترین پاسخ را ارائه داده است. زیرا ساختار خمیر سیمان را تا حد قابل توجهی پایدار نگه داشته و کمترین آسیب را به ناحیه انتقال وارد می کند. بنابراین، برای دستیابی به بتن خودتراکم حاوی پسماند قهوه با حداقل اُفت مکانیکی، طرح $C-2.5\%$ به عنوان درصد مناسب توصیه می شود.

با توجه به طراحی آزمایش، نتایج ارائه شده بیانگر اثر توأمان جایگزینی پودر سنگ با پسماند قهوه بر خواص رئولوژیکی بتن است. اگرچه این رویکرد به معنای اثرگذاری همزمان بر سامانه فیلری و بخش ریزدانه است، اما با هدف مطالعه برای دستیابی به جایگزینی پایدار در بتن خودتراکم کاملاً هم راستا بوده است.

۴- نتیجه گیری

یافته های این تحقیق نشان می دهد که افزودن پسماند قهوه به بتن خودتراکم، به دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای این ذرات، منجر به افزایش ویسکوزیته و تنش تسلیم مخلوط می شود. این پدیده در حالت تازه به صورت کاهش پیوسته قطر جریان اسلامپ (تا ۲۲/۲٪) و افزایش غیرخطی زمان های T_{50} و قیف V (تا ۱۳۰٪) نمود پیدا کرد. تشدید اصطکاک داخلی و جذب آب آزاد توسط پسماند قهوه، نه تنها سیالیت را کاهش داد، بلکه در مقادیر بیش از ۵٪ موجب اختلال جدی در توان عبور و بروز پدیده انسداد در

آزمایش‌های جعبه U، حلقه J و جعبه L گردید. به‌گونه‌ای که در درصدهای بالا، مخلوط عملاً حساسیت شدیدی در مقاطع باریک و پرماتور از خود نشان داد.

در بخش خواص مکانیکی، جایگزینی پسماند قهوه روند کسب مقاومت فشاری را در تمامی سنین تضعیف کرد. بیشترین کاهش مقاومت در سن ۷ روزه مشاهده شد که نشان‌دهنده تاخیر در گیرش اولیه است. اگرچه در سن ۹۰ روزه بخشی از این کاهش مقاومت جبران گردید (برای مثال افت مقاومت در طرح ۲/۵٪ از ۱۳/۶٪ در ۷ روز به ۹/۳٪ در ۹۰ روز رسید)، اما تداوم روند کاهشی در مقادیر بالا بیانگر اثرات منفی این پسماند بر پیوستگی ساختار خمیر سیمان است. در مجموع، مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی، رابطه‌ای معکوس و کاهشی را نشان داد.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه استفاده از پسماند قهوه در بتن خودتراکم بین ۲/۵٪ تا ۵٪ وزنی است. در این محدوده، اگرچه کاهش روانی وجود دارد، اما مخلوط همچنان معیارهای استاندارد EFNARC را برآورده کرده و کارایی لازم را حفظ می‌کند. با این حال، استفاده از مقادیر بالاتر از ۷/۵٪ به دلیل افزایش شدید ویسکوزیته، افت شدید توان عبور از میان آرماتورها و کاهش قابل توجه مقاومت فشاری، برای تولید بتن خودتراکم توصیه نمی‌شود.

۵- منابع و مراجع

1. Suksiripattanapong, C., Kua, T. A., Arulrajah, A., Maghool, F., & Horpibulsuk, S. (2017). Strength and microstructure properties of spent coffee grounds stabilized with rice husk ash and slag geopolymers. *Construction and Building Materials*, 146, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.103>
2. Arulrajah, A., Kua, T. A., Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., & Shen, J. S. (2017). Compressive strength and microstructural properties of spent coffee grounds–bagasse ash-based geopolymers with slag supplements. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1491–1501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.171>
3. Arulrajah, A., Kua, T. A., Horpibulsuk, S., Mirzababaei, M., & Chinkulkijniwat, A. (2017). Recycled glass as a supplementary filler material in spent coffee grounds geopolymers. *Construction and Building Materials*, 151, 18–27. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1408483>
4. Arulrajah, A., Kua, T. A., Suksiripattanapong, C., & Horpibulsuk, S. (2017). Stiffness and strength properties of spent coffee grounds–recycled glass geopolymers. *Road Materials and Pavement Design*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024>.
5. Zein, K. C. S., & Ariadi, P. N. (2019, February). Effect of mixing coffee husk ash as a cement replacement on the strength of concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1140(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1140/1/012019>
6. Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., & Li, C. Q. (2025). Translating lab success to the field: Evaluating coffee biochar-enhanced concrete in real-world construction. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04233. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04233>
7. Guendouz, M., Boukhekhel, D., Triki, Z., Mechante, A., & Boukerma, T. (2023). Effect of using spent coffee grounds wastes as aggregates on physical and thermal properties of sand concrete. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 9(3).

8. Lin, L. K., Kuo, T. M., & Hsu, Y. S. (2015). Application and evaluation of coffee residue ash in mortar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18, 541–551. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0351-5>
9. Tessema, A. T., Alene, G. A., & Wolelaw, N. M. (2022). The influence of coffee husk ash as a filler on the performance of bituminous concrete mix. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 1234567. <https://doi.org/10.1155/2022/2888098>
10. Gedefaw, A., Worku Yifru, B., Endale, S. A., & Habtegebreal, B. T. (2022). Experimental investigation on the effects of coffee husk ash as partial replacement of cement on concrete properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 7654321.
11. Anisah, A., Nugroho, M., Handoyo, S. S., Musalamah, S., Maulana, A., Ramadhan, M. A., & Sumarsono, R. A. (2021, March). Furnace temperature of coffee grounds as organic waste-based cementitious material in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(2), 022087. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/2/022087>
12. De Almeida, A. C., Da Silva, M. A. L., De Abreu, Q. C., Da Silva, A. L., Martins, S. P. R., & Pereira, C. D. S. S. (2021). Evaluation of partial sand replacement by coffee husks in concrete production. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 8(4), 129–133. <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2019.04.001>
13. Saberian, M., Li, J., Donnoli, A., Bonderenko, E., Oliva, P., Gill, B., & Siddique, R. (2021). Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125837>
14. Moreno, L. J. A., Lemus, D. D. S. Z., Rosero, J. L., Morales, D. M. A., Castaño, L. M. S., & Cuervo, D. P. (2020). Evaluation of aquifer contamination risk in urban expansion areas as a tool for integrated groundwater management: Case of coffee-growing region, Colombia. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100298. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02197-9>
15. Cibelli, M., Cimini, A., Cerchiara, G., & Moresi, M. (2021). Carbon footprint of different methods of coffee preparation. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1614–1625. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.004>
16. Lachheb, A., Allouhi, A., El Marhoune, M., Saadani, R., Kousksou, T., Jamil, A., & Oussouaddi, O. (2019). Thermal insulation improvement in construction materials by adding spent coffee grounds: An experimental and simulation study. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1411–1419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.140>
17. Demissew, A., Fufa, F., & Assefa, S. (2020). Partial replacement of cement by coffee husk ash for C-25 concrete production. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 10(1), 12–21. <https://doi.org/10.33736/jcest.1433.2019>
18. Tessema, A. T., Wolelaw, N. M., & Alene, G. A. (2022). Experimental evaluation of coffee husk ash as a filler in hot mix asphalt concrete productions. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 6726700. <https://doi.org/10.1155/2022/6726700>

19. Ricciardi, P., Torchia, F., Belloni, E., Lascaro, E., & Buratti, C. (2024). Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. *Construction and Building Materials*, 147, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.114>
20. Khodabandeh Lou, A., & Oskouei, A. (2025). Laboratory study of mechanical behavior and durability of concrete containing different proportions of coffee waste. *Structural and Construction Engineering*, e224826. <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.514152.3689>
21. Alizadeh, M., Nazarpour, H., Mousavi, S. S., & Dehestani, M. (2025). Recycling of used coffee waste in geopolymer mortars: A sustainable approach to reduce environmental impacts and improve mechanical properties. *Structural and Manufacturing Engineering*, e233519. <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.534089.3774>
22. Arulrajah, A., Kua, T.-A., Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Maghoolpilehrood, F., & Disfani, M. M. (2017). Spent coffee grounds–fly ash geopolymer used as an embankment structural fill material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.082>
23. Kua, T. A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y. J., & Shen, S. L. (2023). Strength assessment of spent coffee grounds–geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. *Construction and Building Materials*, 115, 565–575.
24. Kua, T. A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y. J., & Suksiripattanapong, C. (2017). Engineering and environmental evaluation of spent coffee grounds stabilized with industrial by-products as a road subgrade material. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 63–75. DOI: [10.1007/s10098-016-1188-x](https://doi.org/10.1007/s10098-016-1188-x)
25. Damavand Mining Co. (2025). Specifications of Damavand cement. Damavand Mining Co. Available: <https://damavandmining.co.ir/home-2/>
26. Shimi Sakhteman Chemical Co. (1404). Technical datasheet and product specifications for polycarboxylate-based concrete superplasticizer. Retrieved from <https://www.shimisakhteman.com/>
27. EFNARC. (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete. European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. Retrieved from <https://www.efnarc.org>
28. Iranian Concrete Code – ABA. (1402). Regulations for Concrete Structures (3rd ed.). Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran.