



تعیین درصد بهینه خاکستر کوره زباله‌سوزی در مقاومت فشاری بتن

محمد امامی کورنده^{۱*}، سعید فرخی زاده^۲

^{۱*} استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ مرکز تحقیقات نانو تکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(Emamiacademic@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰)

چکیده

بتن سبز به اصطلاح به بتنی اطلاق می‌شود که دوستدار محیط زیست بوده و در فرآیند ساخت آن یا از آلودگی محیط زیست بکاهد یا شرایط بهبود وضعیت زیست‌محیطی را فراهم سازد. تحقیق حاضر به مدفون سازی خاکستر کوره زباله‌سوزی به عنوان سمی‌ترین ماده فرآیند دفع مواد زائد در ساخت بتن پرداخته است. بتن اکو یا سبز حاصل از استفاده خاکستر زباله‌سوزی یا سبک به جای سیمان، تمامی ویژگی‌های بتن معمولی را دارا می‌باشد. هدف اصلی برنامه آزمایشگاهی تعیین درصد خاکستر بهینه در طرح اختلاط بتن‌های ساخته شده است. نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نمونه‌های بتن با درصد خاکستر زباله‌سوز از ۰ تا ۲۰٪، و مقدار افزودنی SP حدود ۲/۵٪ (روان‌کننده) و نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ برای دسته‌های بتنی ۵۰ و ۶۰ و ۰/۳۸ برای دسته‌های بتنی ۳۰ و ۴۰ و ۰/۴۲، برای دسته بتنی ۲۰ ساخته شده‌اند. مقدار درصد خاکستر از صفر تا ۲۰ درصد انتخاب شده است تا نیازی به آزمون‌های نشت مواد سمی (TCLP) نباشد. بر اساس این برنامه ۱۰۰ نمونه مکعبی بتنی با ابعاد ۱۵ در ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متری ساخته شد و طرح اختلاط آن ثبت گردید. پس از گذشت ۲۸ روز از ساخت نمونه و عمل‌آوری آن در شرایط استاندارد آیین‌نامه ACI نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. نتایج مرحله اول نشان داد که تاثیرگذاری معنادار خاکستر کوره زباله‌سوزی در مقاومت فشاری بتن قابل مشاهده است. به طوریکه برای بتن‌های رده پایین ۱۰ درصد خاکستر زباله‌سوزی بیشترین مقاومت را حاصل می‌دهد ولی در بتن‌های رده بالا اثر افزایش خاکستر زباله سوزی بر مقاومت فشاری منفی است.

کلمات کلیدی

بتن سبز، خاکستر زباله سوزی، مقاومت فشاری.



Determining the Optimal Percentage of Incinerator Ash in the Compressive Strength of Concrete

Mohammad EmamiKorandeh, ^{1*}, Saeed Farokhizadeh ²

^{*1} Assistant Professor Islamic Azad University

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Emamiacademic@gmail.com)

(Date of received: 29/03/2024, Date of accepted: 09/06/2023)

ABSTRACT

Green concrete refers to concrete that is environmentally friendly and in the process of making it either reduces environmental pollution or provides conditions for improving the environmental situation. The present research deals with the burial of incinerator ash as the most toxic substance in the process of disposal of waste materials in concrete production. Eco or green concrete obtained by using waste incineration or light ash instead of cement has all the characteristics of normal concrete. The main goal of the laboratory program is to determine the optimal percentage of ash in the mixing plan of manufactured concrete. The samples were selected in such a way that the concrete samples with the percentage of incinerator ash from 0 to 20%, and the SP additive amount of about 2.5% (plasticizer) and the water-cement ratio of 0.33 for concrete batches, 50 and 60 and 0.38 for concrete batches 30, 40 and 0.42 are made for concrete batch 20. The percentage value of ash is chosen from zero to 20% so that there is no need for toxic substance leakage tests (TCLP). Based on this program, 100 concrete cube samples with dimensions of 15 x 15 x 15 cm were made and the mixing plan was recorded. After 28 days of making the sample and processing it under the standard conditions of ACI regulations, the sample was subjected to a compressive strength test. The results of the first stage showed that the significant effect of ash from the incinerator on the compressive strength of concrete can be seen. So, for low-grade concrete, 10% waste incineration ash gives the highest resistance, but in high-grade concrete, the effect of increasing waste incineration ash on compressive strength is negative.

Keywords:

Green concrete, Waste incineration ash, Compressive strength.



۱- مقدمه

بتن پر مصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان است. سیمان ماده اصلی اتصال در بتن است. در طول ۳ دهه گذشته، تولید سیمان به سرعت در سراسر جهان رشد کرده است. انتظار می‌رود تولید سیمان در ایران تا سال ۲۰۵۰ سه برابر شود. بتن سبب ترکیبی طراحی و تولید شده با استفاده از مواد معمولی و جزئیاً جایگزین شده با مواد مناسب و بازیافتی برای دستیابی به عملکرد قابل قبول، اقتصادی و پایدار است. بتن سبب از مواد خام جدید ساخته شده است - به عنوان مثال خاکستر از انفجار، دانه‌های بازیافت شده از بتن و آلومینیم که می‌تواند به الیاف تبدیل شود. خاکستر زغال سنگ، پسماند نیروگاه‌های زغال سنگ است که معمولاً در مخازن آماده می‌شود و به انبار فرستاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که خاکستر انفجار پتانسیل جایگزینی سیمان را دارد، که یک ماده با تأثیرات زیست‌محیطی عمده به دلیل آلودگی هوا از کارخانه‌های سیمان است. هدف از این تحقیق کاربرد خاکستر کوره زباله‌سوزی در طرح اختلاط بتن دوستدار محیط زیست است که از دو جنبه سبب کمک به محیط زیست می‌شود. ۱- سیمان کمتری مصرف شده و آلودگی تولید سیمان کاهش می‌یابد و ۲- خاکستر کوره زباله‌سوزی در بتن مدفون می‌گردد (حق طلب ۱۳۹۱). پارامترهای مهمی در طرح اختلاط بتن سبب وجود دارند. پارامترهایی مانند وزن سیمان، نسبت آب به سیمان، درصد وزن خاکستر نسبت به سیمان، درصد روان‌کننده به عنوان کاهنده آب و افزایشنده مقاومت و ترکیب وزنی سنگدانه‌های درشت و ریز که در فصل چهارم به تشریح توضیح داده شده است. همچنین در تعیین طرح اختلاط بتن سبب مصالح بتن، افزودنی‌ها و آزمون‌ها بتن بسیار مهم هستند.

بررسی و تحلیل تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های مدیریت و بی‌خطر سازی خاکستر زباله سوز زباله شهری در سال ۱۴۰۰ با تأکید بر تثبیت و انجماد، پژوهش دیگری است که توسط مکنون و همکاران انجام شده است در این قرن با روند صعودی تولید زباله در جهان، استفاده از زباله سوزها به دلیل کاهش حجم و وزن زباله‌های شهری و بازیافت انرژی از آن افزایش یافته است. با توجه به وجود فلزات سنگین و سایر مواد سمی مانند دیوکسین و فوران در خاکستر زباله سوز شهری، مدیریت و رفع خطر سازی این ماده به روش‌های مختلف نیاز به بررسی دارد. در سال ۱۴۰۱ دیواندری و مکنون عملکرد آسفالت گرم ساخته شده با افزودنی خاکستر زباله سوز را ارزیابی کردند. امروزه با افزایش روزافزون جمعیت کره زمین و در نتیجه تولید زباله و گسترش محل‌های دفن زباله، آلودگی محیط زیست اجتناب ناپذیر است. در این راستا می‌توان فناوری زباله سوز را به عنوان روشی مطلوب برای کاهش ۹۰ درصدی حجم زباله‌های جامد شهری شناخت. زباله‌های جامد شهری باقی مانده پس از سوزاندن، خاکستر کف زباله سوز نامیده می‌شود، میلیون‌ها تن خاکستر کف زباله سوز هر ساله در محل‌های دفن زباله انباشته می‌شود. اخیراً خاک سطحی زباله سوز در صنایع ساختمانی مانند سرامیک، بلوک سیمانی و مخلوط بتن مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی به دست آمده است. راضیه گرشاسبی در سال ۱۳۹۷ به بررسی استفاده از خاکستر زباله سوز در تحقیقات خود پرداخت. انسان به روش‌های مختلف زباله تولید می‌کند و تولید زباله به طور چشمگیری در حال افزایش است. فناوری تولید بتن سبب ساخته شده از خاکستر زباله سوز از دیگر تحقیقاتی است که توسط سعیدی و عابدینی در سال ۱۳۹۸ انجام شده است. نقش مدیریت فعال پسماند جامد در توسعه پایدار زیست محیطی مهم است. صحرای و همکاران در سال ۱۳۹۹ امکان سنجی استفاده از خاکستر بادی و خاکستر کف زباله سوز را در ساخت روسازی‌های بتنی و آسفالتی بررسی کردند. تأثیر خاکستر بادی بسیار ریز بر عملکرد و دوام بتن تحقیق دیگری است که توسط مایر و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شده است. در این مطالعه خاکستر بادی بسیار ریز به عنوان یک محصول جانبی جدید به دست آمده از فرآیند جداسازی خشک و بسته به عنوان جایگزینی سیمان در بتن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی جامع خواص کوتاه مدت بتن‌های سازگار با محیط زیست مبتنی بر خاکستر بادی تحقیق دیگری است که توسط امران و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شده است. توسعه بتن پایدار به عنوان جایگزینی برای بتن معمولی به کاهش ردپای دی‌اکسید کربن مرتبط با استفاده از سیمان و دفع مواد زائد در محل دفن زباله کمک می‌کند. یکی از راه‌های دستیابی به آن استفاده از خاکستر بادی (FA) به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند معمولی (OPC) است، زیرا FA یک ماده پوزولانی است و دارای مقدار زیادی آلومینا و سیلیس است.



با توجه به آنکه بتن یکی از اصلی ترین مصالح در فرآیند ساخت و ساز در ایران است، هدف اصلی تحقیق حاضر به افزایش مقاومت فشاری بتن با خاکستر کوره زباله سوزی می-پردازد. مجموعه آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه تکنولوژی بتن شرکت سازه پی تحلیل انجام شده است. بخش اول مقاله حاضر به مقدمه و مروری بر ادبیات فنی تحقیق پرداخته است. در بخش دوم این مقاله، به معرفی و تعریف روش تحقیق این مقاله پرداخته شده است. بخش سوم به بررسی روش انجام آزمایشات به کار رفته پرداخته است. در بخش چهارم، نتایج حاصل از آزمایشات تجزیه و تحلیل شده و نتایج بیان شده است. بخش پنجم به جمع بندی و نتیجه گیری پرداخته است.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق مقاله حاضر شامل چند مرحله است. مرحله اول انجام آزمون های کیفیت مصالح جهت اجرای طرح اختلاط بتن سبزی است. مرحله دوم شامل آزمایشات مقاومت فشاری بوده در حالیکه جهت بررسی و رسیدن به طرح اختلاط بتن مرکب با خاکستر کوره زباله سوزی تمامی آزمایشات مورد نیاز با درصد های مختلف خاکستر کوره زباله سوزی انجام شده است. شکل (۱) نمونه از تصاویر انجام آزمون های مورد نیاز را نشان می دهد. همچنین جداول (۱) و (۲) نیز نمونه ای از درصد های وزنی مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط بتن مورد نظر (در اینجا C20 و C60 برای نمونه ارایه شده است) را نشان می دهد.



شکل ۱: خاکستر زباله سوزی الک شده برای طرح اختلاط بتن سبزی.



شکل ۲: نمونه های بتنی ساخته شده و سخت شده.



جدول ۱: مشخصات نمونه‌های ساخته شده در برنامه آزمایشگاهی برای بتن C20 (وزن‌ها به کیلوگرم است).

C20F0	C20F5	C20F10	C20F15	C20F20	مصالح
۲/۴۳	۲/۲۷	۲/۱۸	۲/۰۴	۱/۹۲	وزن سیمان
۰	۰/۱۱۳	۰/۲۲۱	۰/۳۱۵	۰/۳۸۳	وزن خاکستر
۸/۵۹	۱۱/۱۴	۱۱/۰۹	۱۱/۰۶	۱۱/۰۶	وزن شن
۱۶/۶۸	۱۴/۱۸	۱۴/۱۱	۱۴/۰۸	۱۴/۰۸	وزن ماسه
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	وزن آب
۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	وزن روان‌کننده
%۰	%۵	%۱۰	%۱۵	%۲۰	درصد خاکستر زباله‌سوزی

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های ساخته شده در برنامه آزمایشگاهی برای بتن C60 (وزن‌ها به کیلوگرم است).

C60F0	C60F5	C60F10	C60F15	C60F20	مصالح
۵/۷۶	۵/۴۷	۵/۱۸	۴/۹۰	۴/۶۱	وزن سیمان
۰	۰/۲۹	۰/۵۸	۰/۸۶	۱/۱۵	وزن خاکستر
۹/۵۳	۹/۵۳	۹/۵۳	۹/۴۸	۹/۳۲	وزن شن
۱۱/۷۷	۱۲/۱۳	۱۲/۱۳	۱۲/۰۶	۱۱/۸۶	وزن ماسه
۱۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	وزن آب
۰/۱۴۴	۰/۱۴۴	۰/۱۴۴	۰/۱۴۴	۰/۱۴۴	وزن روان‌کننده
%۰	%۵	%۱۰	%۱۵	%۲۰	درصد خاکستر زباله‌سوزی

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله، هدف اصلی برنامه آزمایشگاهی تعیین درصد خاکستر بهینه در طرح اختلاط بتن‌های ساخته شده است. نمونه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نمونه‌های بتن با درصد خاکستر زباله‌سوز از ۰ تا ۲۰٪، و مقدار افزودنی SP حدود ۲/۵٪ (روان‌کننده) و نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ برای دسته‌های بتنی ۵۰ و ۶۰ و ۰/۳۸ برای دسته‌های بتنی ۳۰ و ۴۰ و ۰/۴۲ برای دسته بتنی ۲۰ ساخته شده‌اند. مقدار درصد خاکستر انتخاب شده در این محدوده وزنی سیمان براساس تحقیقات قبلی است، زیرا مخلوط بتن حاوی خاکستر بهترین عملکرد و مقاومت را دارد. بتن مرجع (بتن معمولی) با صفر درصد خاکستر زباله‌سوز برای مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی مخلوط با خاکستر انتخاب شده است. جهت جلوگیری از حجم زیاد پایان‌نامه، نتایج حاصل از سه کلاس مقاومتی بتن ۲۰، ۴۰، و ۶۰ در ادامه ارائه شده است و این بتن ترکیبی با درصد‌های وزنی مختلف خاکستر مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود نتایج سایر رده‌های نیز قابل ارائه خواهد بود. براساس پارامترهای بررسی شده، تعداد نمونه‌های مکعبی مقاومت فشاری ۷۵ مورد (۳*۲۵) انتخاب شده‌اند و در هر مورد، درصد مواد مصرفی متفاوت است و مقادیر آنها در بخش‌های مربوطه توضیح داده شده است. جدول (۳) مشخصات تیپ‌های مختلف بتن ساخته شده را ارائه می‌دهد.



جدول ۳: مشخصات تیپ رده‌های مختلف بتن.

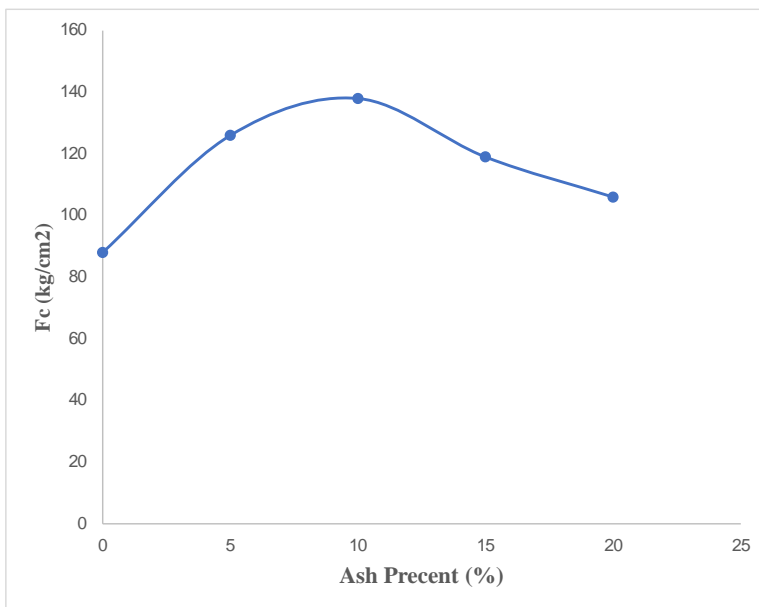
شماره نمونه	کد نمونه	رده بتن	درصد خاکستر کوره زباله‌سوزی
۱	C20	C20	%۰
۲	C20F5	C20	%۵
۳	C20F10	C20	%۱۰
۴	C20F15	C20	%۱۵
۵	C20F20	C20	%۲۰
۶	C30	C30	%۰
۷	C30F5	C30	%۵
۸	C30F10	C30	%۱۰
۹	C30F15	C30	%۱۵
۱۰	C30F20	C30	%۲۰
۱۱	C40	C40	%۰
۱۲	C40F5	C40	%۵
۱۳	C40F10	C40	%۱۰
۱۴	C40F15	C40	%۱۵
۱۵	C40F20	C40	%۲۰
۱۶	C50	C50	%۰
۱۷	C50F5	C50	%۵
۱۸	C50F10	C50	%۱۰
۱۹	C50F15	C50	%۱۵
۲۰	C50F20	C50	%۲۰
۲۱	C60	C60	%۰
۲۲	C60F5	C60	%۵
۲۳	C60F10	C60	%۱۰
۲۴	C60F15	C60	%۱۵
۲۵	C60F20	C60	%۲۰

۴- نتایج آزمون مقاومت فشاری

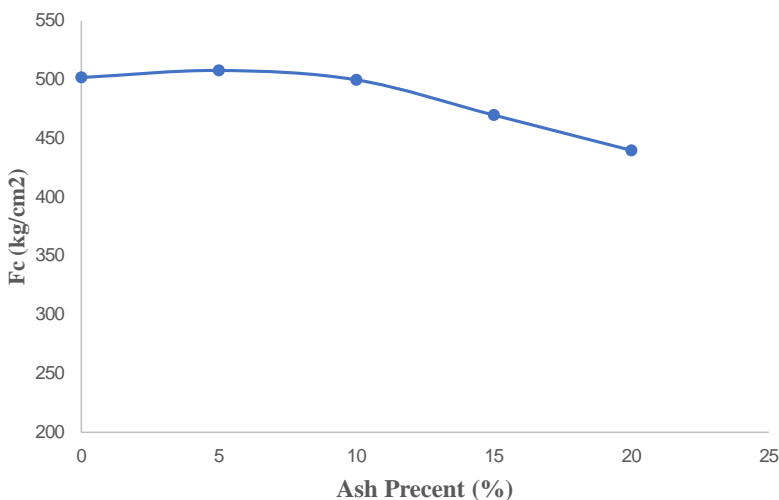
مهمترین پارامتر در طراحی سازه‌های بتنی، مقاومت فشاری بتن (F_c) است و این مقاومت برای محاسبه استحکام اعضاء ضروری است. نمونه‌های بتن تحت نیروی فشار تست شده و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. به اصطلاح ساده، مقاومت فشاری به این صورت محاسبه می‌شود که نیروی بیرونی که به نمونه بتن اعمال می‌شود را بر مساحت مقطع نمونه تقسیم می‌کنیم، معمولاً پس از ۲۸ روز نگهداری و پردازش بتن. پس از ۲۸ روز پردازش، قالب بتن باز می‌شود و نمونه‌ها وزن‌گیری و در دستگاه جک ۲۰۰ تنی



آزمایش می‌شوند. مقاومت توسط دستگاه نمایش داده می‌شود که در نمودارهای زیر آمده است. ابتدا، نمودارهای بتن C20 شرح داده شده است: با اعمال نیرو به نمونه‌های تولید شده، مشخص شد که: نمونه C20F10 بیشترین تحمل نیرو را دارد که برابر با ۳۳ تن است. پس از آن، نمونه‌های C20F5، C20F15، C20F20 و C20 به ترتیب قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهند که افزودن خاکستر به بتن مرجع C20، ظرفیت تحمل بار نمونه را افزایش می‌دهد. بهترین درصد خاکستر زباله‌سوز برای افزایش مقاومت ۱۰ درصد گزارش شده است.



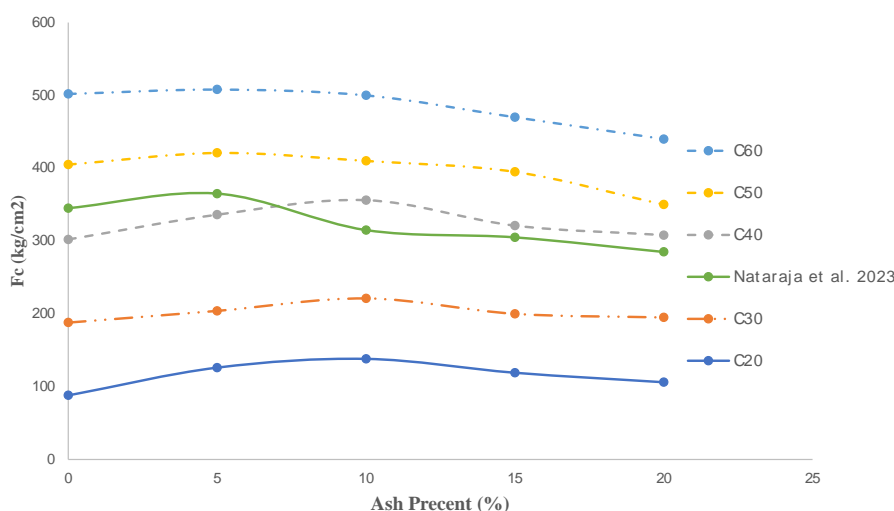
شکل ۳: منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتن C20 بر اساس درصد خاکستر کوره زباله‌سوزی.



شکل ۴: منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتن C60 بر اساس درصد خاکستر کوره زباله‌سوزی.



با اعمال نیرو به نمونه‌های تولید شده C60، مشخص شد که: نمونه C60F5 بیشترین تحمل نیرو را دارد که برابر با ۹۳,۳ تن است. پس از آن، نمونه‌های C60، C60F10، C60F15 و C60F20 به ترتیب قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهند که افزودن خاکستر به بتن مرجع C60، عملکرد نسبتاً نامطلوبی را به دنبال دارد که مقاومت نمونه را کاهش می‌دهد. بدترین حالت برای درصد خاکستر، ۲۰ درصد است. بنابراین، در بتن C60 مشاهده می‌شود که با افزایش خاکستر، نه تنها بار فشاری افزایش نمی‌یابد بلکه اثر معکوس دارد و بار فشاری تحمل شده حتی کمتر از نمونه مرجع است، تنها افزایش کمی در مدل ۵ درصدی مشاهده شده است. روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در بتن C50 نیز مشابه بتن رده C60 اما کمی آرامتر مشاهده شده است. با توجه به اینکه تحقیقات آزمایشگاهی در بخش صحت‌سنجی همواره نیاز به جستجوی بسیار جهت یافتن مقاله مشابه دارند، در این تحقیق پس از انجام اینکار به مقاله Nataraja و همکاران که در سال ۲۰۲۳ در مجله Journal of Engineering and Applied Science چاپ شده استناد شده است. بر این اساس مطابق نمودار زیر روند تغییرات مقاومت بتن با رده‌های بالای بتن ساخته شده در این تحقیق مطابقت خوبی دارد.



شکل ۵: پوش منحنی‌های نتایج مقاومت فشاری آزمایشگاهی.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

اصطلاح بتن سبز در واقع به بتن دوستدار محیط زیست اشاره دارد. با توجه به اینکه در حال حاضر ۷ درصد از آلودگی‌های زیست محیطی مضر برای لایه اوزون ناشی از فرآیند تولید سیمان است و هر تن سیمان تولیدی معادل یک تن دی اکسید کربن است و از سوی دیگر، تعهد ایران به کاهش گازهای گلخانه‌ای در پاریس تا سال ۲۰۲۵ بازنگری در صنعت ساختمان کشور با رویکرد استفاده از سیستم بتن سبز اجتناب ناپذیر است. در حال حاضر بسیاری از این سیستم‌ها در آمریکا و کشورهای اروپایی اجرا می‌شوند. همچنین مروری بر ادبیات فنی در زمینه تحقیق نشان می‌دهد که بتن سبز مورد توجه محققین بوده است. دو پروژه واقعی انجام شده در داخل کشور در زمینه بتن سبز و یک نمونه بتن سبز با خاکستر پروازی کوره زباله‌سوزی ارائه شده است. پروژه‌های مسکن ملی شهرکرد (۲۰۰) واحدی شرکت کیان کار) و پروژه پل آزادراه تهران شمال در محدوده قطعه دوم (شرکت راهیاب ملل) به عنوان مثالی از بتن سبز ارائه شده‌اند. جمع‌بندی این فصل نشان می‌دهد که بتن سبز در ایران از سال ۱۳۹۰ مورد توجه محققین بوده است و در منتشرات بین‌المللی نیز مبنای آن مربوط به سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ است. همچنین نتایجی در زمینه طرح اختلاط بتن سبز با خاکستر کوره زباله‌سوزی از منتشرات پیشین گرفته شده که راهگشا و الگوی طرح اختلاط در فصل سوم تحقیق حاضر خواهد بود.



بتن سبز یا بتن دوست دار محیط زیست به وسیله مدفون سازی خاکستر کوره زباله سوزی در بتن ریزی‌های حجیم یکی از روشهای بسیار مناسب جهت دفع خاکستر کوره زباله‌سوزی است. افزایش مقاومت بتن سبز با خاکستر کوره زباله‌سوزی بر اساس نتایج آزمونهای مقاومت فشاری، در بتن‌های رده پایین معنی‌دار تر از بتن‌های رده بالا می‌باشد و حتی در بتن C60 افزایش درصد خاکستر سبب کاهش مقاومت فشاری شده است. طرح اختلاط بهینه برای رده‌های مختلف بتن ساخته شده در این تحقیق معرفی شده است. به عنوان مثال برای بتن رده ۴۰ درصد خاکستر بهینه برابر ۱۰ درصد وزن سیمان بیشترین بازدهی را در مقاومت فشاری نمونه‌ها از خود نشان داده است. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، در مطالعه Nataraja et al. 2023 نیز اثر خاکستر کوره زباله‌سوزی ابتدا در درصدهای پایین مثبت بوده ولی در ادامه منفی شده است که با نتایج حاصل از تحقیق حاضر در بتن‌های رده بالا مطابقت داشته و نشان دهنده قابل قبول بوده نتایج برنامه آزمایشگاهی دارد.

۶- مراجع

- ۱- افزودنی خاکستر بادی به بتن "، کلینیک فنی و تخصصی بتن ایران، ۱۳۹۴.
- ۲- امامی کورنده، محمد، نوربخش، سیده نگار. (۱۳۹۹). 'بهینه سازی وزن سازه فولادی به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی'، رویکردهای نوین در مهندسی عمران ۴ (۴)، صفحات ۶۳-۷۷.
- ۳- امامی کورنده، محمد، حسینی، سید عظیم، و صبوری املشی، علیرضا. (۱۴۰۲). مدلسازی طرح اختلاط بتن متخلخل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. رویکردهای نوین در مهندسی عمران، ۷(۳)، ۱-۱۵. Doi: 10.30469/jnace.2023.379051.1085
- ۴- امامی کورنده، محمد، و واشقانی فراهانی، فرزانه. (۱۴۰۲). بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سبک نسبتا مقاوم با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی. رویکردهای نوین در مهندسی عمران، ۷(۱)، ۱۷-۳۰. Doi: 10.30469/jnace.2022.368071.1077
- ۵- سعیدی، فرزاد و عابدینی کارشک، محمد، ۱۳۸۹، تکنولوژی تولید بتن سبک ساخته شده از خاکستر زباله سوزها، همایش ملی انسان، محیط زیست و توسعه پایدار، همدان، <https://civilica.com/doc/106687>
- ۶- گرشاسبی، راضیه و زارع نژاد، حمیدرضا، ۱۳۹۰، مصارف خاکستر زباله سوز، پنجمین همایش ملی مهندسی محیط زیست، تهران، <https://civilica.com/doc/122065>
- ۷- صحرانی کرم بستنی، محمد و دیواندری، حسن و ابوالفتحی، بهنام، ۱۳۹۸، امکان سنجی استفاده از خاکستر بادی و خاکستر کف زباله سوزها در ساخت بتن و روسازی های آسفالتی، <https://civilica.com/doc/1006682>
- ۸- گسکین تبریزی، محمدرضا و مکنون، رضا و عبادی، تقی و نیکروان، مرتضی، ۱۳۹۹، بررسی و تحلیل تحقیقات صورت گرفته در زمینه روش های مدیریت و بی خطر سازی خاکستر زباله سوز شهری با تاکید بر تثبیت و جامد سازی، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، <https://civilica.com/doc/1120332>
- ۹- دیواندری، حسن و حسین جان زاده، حسین و صحرانی کرم بستنی، محمد، ۱۴۰۰، ارزیابی عملکرد آسفالت گرم ساخته شده با افزودنی خاکستر زباله سوز، سیزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات، تهران، <https://civilica.com/doc/1360885>
- ۱۰- آخوندی، مهدی، رامشت، محمد حسن، پور رستم، توحید، و گلصورت پهلویانی، علی. (۱۴۰۰). ارائه یک روش جدید برای تولید بتن دوست‌دار محیط زیست با استفاده از خرده پلاستیک ضایعاتی (PET) و دوده سیلیسی و بررسی مشخصات مکانیکی و دوام آن در روسازی بتنی غلتکی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۳)، ۱۱۰۷-۱۱۱۶. Doi: 10.22060/ceej.2020.16789.6346
- ۱۱- مستوفی نژاد، د، "تکنولوژی و طرح اختلاط بتن"، ارکان دانش، چاپ ۲۲، ۱۳۸۹.
- ۱۲- نقی پور، مرتضی و احمدی، شیرین و گرجی نژاد، فاطمه، ۱۴۰۰، بررسی تاثیر باطله زغال سنگ بر رفتار مکانیکی بتن سبز، <https://civilica.com/doc/1995308>



- 13-Alderete, N. M., Joseph, A. M., Van den Heede, P., Matthys, S., & De Belie, N. (2021). Effective and sustainable use of municipal solid waste incineration bottom ash in concrete regarding strength and durability. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105356.
- 14-Aleksander, Igor & De Gregorio, Massimo & França, Felipe & Lima, Priscila & Morton, Helen. (2009). A brief introduction to Weightless Neural Systems.
- 15-Alnezami, S., Lamaa, G., Pereira, M. F. C., Kurda, R., de Brito, J., & Silva, R. V. (2024). A sustainable treatment method to use municipal solid waste incinerator bottom ash as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 423, 135855.
- 16-Altun, A., & Köklü, M. (2022). Optimizing the learning process of multi-layer perceptrons using a hybrid algorithm based on MVO and SA. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 13(4), 617-640.
- 17-Bambang Suhendro, Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment, *Procedia Engineering*, Volume 95, 2014, Pages 305-320, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>.
- 18-Cheng, L., Jin, H., Liu, J., & Xing, F. (2024). A comprehensive assessment of green concrete incorporated with municipal solid waste incineration bottom: Experiments and life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 413, 134822.
- 19-Emami M., 2014. Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
- 20-Emami M. Application of artificial neural networks in pressuremeter test results. Master of Science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. 2009.
- 21-Emami, M. (2014). Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber (Doctoral dissertation, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran).
- 22-*Journal of Cleaner Production*, Volume 91, 2015, Pages 297-304, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.021>.
- 23-Emami, M. and Yasrobi, S.S., 2014. Modeling and interpretation of pressuremeter test results with artificial neural networks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), pp.375-389.
- 24-Javad Nodeh Farahani, Payam Shafiq, Hilmi Bin Mahmud, Production of A Green Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating High Volume Locally Available Waste Materials, *Procedia Engineering*, Volume 184, 2017, Pages 778-783, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.158>.
- 25-M Emami, SS Yasrobi., Modelling of pressuremeter tests with artificial neural networks - *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2012
- 26-Kaur, H., Siddique, R., & Rajor, A. (2019). Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 428-441.
- 27-Kim Hung Mo, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Soon Poh Yap, Feasibility study of high volume slag as cement replacement for sustainable structural lightweight oil palm shell concrete,
- 28-Li, J. (2021). Municipal solid waste incineration ash-incorporated concrete: One step towards environmental justice. *Buildings*, 11(11), 495.
- 29-Liu, J., Fan, X., Li, Z., Zhang, W., Jin, H., Xing, F., & Tang, L. (2022). Novel recycling application of high volume municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) into sustainable concrete. *Science of the Total Environment*, 838, 156124.



- 30-Liu, Y., Kumar, D., Lim, K. H., Lai, Y. L., Hu, Z., Sanalkumar, K. U. A., & Yang, E. H. (2023). Efficient utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash for autoclaved aerated concrete formulation. *Journal of Building Engineering*, 71, 106463.
- 31-Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2022). Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete: Preliminary approach with Oporto wastes. *Construction and Building Materials*, 323, 126548.
- 32-Wu, Z., Jiang, Y., Guo, W., Jin, J., Wu, M., Shen, D., & Long, Y. (2021). The long-term performance of Wu, M. H., Lin, C. L., Huang, W. C., & Chen, J. W. (2016). Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. *Construction and Building Materials*, 111, 618-624.
- 33-Concrete amended with municipal sewage sludge incineration ash. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101574.
- 34-Yasrebi SS, Emami M. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in prediction and interpretation of pressuremeter test results. In *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 2008 Oct 1* (pp. 1634-1638).
- 35-Zeng, C., Lyu, Y., Wang, D., Ju, Y., Shang, X., & Li, L. (2020). Application of fly ash and slag generated by incineration of municipal solid waste in concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 7802103.