

Application of Waste Incinerator Ash as Replacement of Fine Aggregate in Self-Compacting Concrete: Technical and Environmental Assessment

M. Delnavaz^{1*}, S. Salehi², S.H. Hosseini Lavasani³

Associate professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

MSc Student in Civil Engineering, Kharazmi University

Associate professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

delnavaz@khu.ac.ir

Received: 11 May 2026

Revised: 10 June 2026

Accepted: 22 June 2026

Research paper

Abstract

The aim of this study was to investigate the properties of self-compacting concrete containing municipal waste incineration ash as a substitute for sand (weight percentages of 5, 10 and 15%) and fly ash as a substitute for cement (weight percentages of 10, 20 and 30%). The properties of fresh concrete including permeability, filling, fluidity, workability and stability and the properties of hardened concrete including compressive strength, flexural strength, tensile strength, volumetric water absorption, capillary water absorption, ultrasonic pulse velocity and scanning electron microscope images were investigated. The results showed that adding bottom ash up to 5% by weight of sand and fly ash up to 30% by weight of cement compared to the control sample improved the properties of hardened concrete, and higher percentages reduced these properties. The life cycle assessment of these designs was examined and the results indicated that adding bottom ash and fly ash in any amount reduces the amount of CO₂ production. Adding bottom ash reduces the amount of NO_x, PM₁₀, and SO₂ produced, and the amount of lead and volatile organic compounds produced is also reduced by adding fly ash. Also, adding incinerator ash and fly ash in any amount in the concrete production process reduces the amount of energy consumed and the amount of global warming produced, and has a positive environmental effect.

Keywords: Self-compacting concrete, Bottom ash, Fly ash, Life cycle assessment, Global warming potential

*Corresponding Author: M. Delnavaz

Delnavaz M, Hosseini Lavasani S H, Salehi S. Application of Waste Incinerator Ash as Replacement of Fine Aggregate in Self-Compacting Concrete: Technical and Environmental Assessment. J. Concr. Struct. Mater.. 2026;10(1):180-199 (In Persian). <http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.581303.1420>

2538-5828/ © 2026 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/>).

استفاده از خاکستر زباله سوز پسماند شهری به عنوان جایگزین ریزدانه در تولید بتن خود تراکم: ارزیابی فنی و زیست محیطی

محمد دلنواز^{۱*}، سارا صالحی^۲، سید حسین حسینی لواسانی^۳

۱. دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳. دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: delnavaz@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف این تحقیق بررسی ویژگی‌های بتن خودتراکم حاوی خاکستر زباله‌سوز پسماند شهری به عنوان جایگزین ماسه (درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و خاکستربادی به عنوان جایگزین سیمان (درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) است. خواص بتن تازه شامل قابلیت عبور، پرکنندگی، روانی، کارایی و پایداری و خواص بتن سخت شده از جمله مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، جذب آب حجمی، جذب آب موئینه، سرعت پالس فرا صوتی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن خاکستر زباله سوز تا ۵ درصد وزنی ماسه و خاکستر بادی تا ۳۰ درصد وزنی سیمان نسبت به نمونه‌ی شاهد باعث ارتقا خواص بتن سخت شده و درصد‌ها بالاتر باعث کاهش این خواص شده است. ارزیابی چرخه‌ی عمر این طرح‌ها بیانگر آن بود که با افزودن خاکستر زباله‌سوز و خاکستربادی در هر مقداری میزان تولید CO_2 کاهش می‌یابد. افزودن خاکستر زباله سوز مقدار NO_x ، PM_{10} و SO_2 تولیدی را کاهش می‌دهد و مقدار تولید سرب و ترکیبات آلی فرار نیز با افزودن خاکستربادی کاهش می‌یابد. همچنین افزودن خاکسترزباله سوز و خاکستر بادی در هر مقداری در فرایند تولید بتن مقدار انرژی مصرفی و مقدار گرمایش جهانی تولیدی را کاهش می‌دهد و اثر مثبت محیط زیستی به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، خاکستر زباله‌سوز، خاکستربادی، ارزیابی چرخه‌ی عمر، پتانسیل گرمایش جهانی

بتن از مهم‌ترین مصالح مصرفی ساختمانی است، به نحوی که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۵۰ نیاز به بتن تا حدود ۷/۵ میلیارد متر مکعب (۱۸ میلیارد تن) افزایش یابد [۱]. استفاده گسترده از بتن و در نتیجه استفاده بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی و سیمان باعث خسارات وارده به محیط زیست می‌شود. حدود سه چهارم حجم کل بتن از سنگدانه‌های درشت و ریز می‌باشد که باعث مصرف بی‌رویه در مصالح طبیعی مانند ماسه رودخانه‌ای و اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از آن شده است [۲]. از طرفی سیمان که از اجزای اصلی بتن می‌باشد، یکی از منابع اصلی تولید CO₂ است به نحوی که تولید یک تن سیمان باعث تولید تقریباً یک تن CO₂ خواهد شد. بنابراین، با افزودن مواد معدنی مختلف به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، بتن اقتصادی‌تر و سازگار با محیط‌زیست را می‌توان تولید کرد [۳].

امروزه پیدا کردن مواد جایگزین جدید برای توسعه‌ی پایدار به طوری که موجب کاهش مصرف منابع طبیعی برای محافظت از منافع نسل‌های آینده شود ضروری شده است. زیاد بودن مصرف منابع طبیعی منجر به میزان بیشتر پسماندهای صنعتی و در نتیجه تخریب محیط زیست می‌شود. از مشکلات زیست محیطی در کشورهای جهان سوم، نبود سامانه مدیریت موثر در دفع زباله‌های جامد است که در بسیاری موارد باعث مشکلات مختلف بهداشتی و همچنین به خطر افتادن سلامت عمومی جامعه می‌شود [۴]. متأسفانه ضعف سامانه مدیریتی در همه‌ی مراحل جمع‌آوری، انتقال و دفع زباله، مقدار کم بازیافت و ضعف‌های اجرایی مرتبط با اعمال قوانین نمایان می‌باشد. تقریباً همه‌ی زباله‌ها به جز بعضی مواد (مصالح ساختمانی، آهن آلات و...) قابل سوختن می‌باشند. اگرچه عملیات سوزاندن زباله باعث کاهش حجم زباله به بیش از ۹۰ درصد می‌شود اما به ازای هر تن زباله ۰/۳ تن خاکستر تحتانی زباله سوز (BA^۱) تولید می‌شود [۵]. هرچه سوزاندن مواد زائد بیشتر می‌شود، احساس ضرورت توسعه روش‌های نوین و کاربردی برای استفاده‌ی مجدد از خاکستر زباله سوز که منفعت زیست محیطی و اقتصادی دارد بیشتر می‌شود [۶]. خاکستر بادی (FA^۲) نیز یک محصول اصلی احتراق زغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی است. تولید جهانی سالانه خاکستر بادی بیش از ۸۰۰ میلیون تن تخمین زده می‌شود. همچنین، پیش‌بینی شده است که بیشتر مقدار تولید شده آن در محل‌های دفن زباله ریخته می‌شود که بیشتر نگرانی‌هایی مانند کمبود زمین و مشکلات محیط‌زیستی را افزایش می‌دهد. همانطور که اشاره شد، BA محصول فرعی اولیه‌ای است که از نیروگاه‌های حرارتی به دست آمده است، با این حال مقدار آن نزدیک به یک چهارم مقدار خاکستر بادی است. استفاده از حجم زیاد خاکستر بادی و خاکستر زباله سوز به ترتیب به جای سیمان پرتلند و سنگدانه‌های طبیعی ریز، این نگرانی‌ها را تا حدی برطرف کرده است [۷-۸]. همانطور که عنوان شد، بازیافت یا استفاده مجدد از ضایعات و محصولات جانبی صنعتی از نظر اقتصادی و یا اکولوژیکی بسیار مهم است. سنگدانه‌ها با توجه به حجم استفاده از آن‌ها در بتن، نقش مهمی در خواص مختلف بتن مانند کارایی، مقاومت، پایداری ابعادی و دوام ایفا می‌کنند. استفاده از مواد زائد مختلف به عنوان جایگزینی برای مواد معمولی کاربرد بالقوه در صنعت ساخت و ساز را نشان می‌دهد. چنین عملی منابع زائد را به خدمت می‌گیرد و فضای مورد نیاز برای دفع آن‌ها را کاهش می‌دهد [۹]. زباله سوزها در ایران جایگاه زیادی در مدیریت پسماند ندارند و استفاده از این دستگاه‌ها محدود به نیروگاه زباله سوز کهریزک با قابلیت سوزاندن ۲۰۰ تا ۳۰۰ تن زباله در روز و تولید ۳ مگاوات ساعت برق از زباله و امکان افزایش تا ۶ مگاوات ساعت می‌باشد.

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه استفاده از BA در بتن مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است در تحقیقات مختلف استفاده از BA جایگزین سیمان و یا ریزدانه مصرفی شده است. Mostofi nejad و همکاران تاثیرات جایگزینی پودر خاکستر زباله پروسیمی به جای سیمان پرتلند بر خواص بتن را بررسی کردند و دریافتند که جایگزینی به میزان ۵ درصد بسیار بهینه می‌باشد و باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود اما در مخلوط‌های با جایگزینی بیش از ۵ درصد مقاومت کششی، فشاری و خمشی

کاهش می‌یابد. همچنین آلودگی‌های ناشی از مصرف سیمان و هزینه‌های دفن این خاکسترها کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که بتن با جایگزینی ۱۰ درصد خاکستر زباله سوز به جای سیمان دارای مدول ارتجاعی بهینه می‌باشد و مقادیر جذب آب و روانی در بتن‌های حاوی خاکستر زباله سوز افزایش داشت [۱۰]. Rafieizonooz و همکاران به بررسی استفاده از خاکستر زباله سوز و خاکستر بادی حاصل از نیروگاه زغال سنگ در بتن به عنوان جایگزینی برای ماسه و سیمان پرداختند که نتایج نشان داد که کارایی بتن با افزایش مقدار خاکستر زباله‌سوز به جای ماسه، کاهش یافت. از طرف دیگر، در سن ۲۸ روز، هیچ اثر مثبتی در مقاومت فشاری، خمشی و کششی کلیه‌ی نمونه‌های بتنی مشاهده نشد. پس از عمل‌آوری در سنین ۹۱ و ۱۸۰ روز، مقاومت فشاری هر دو نمونه‌ی بتنی مورد آزمایش و شاهد به طور مثبتی افزایش یافت ولی تقریباً مشابه بود. با این حال، مقاومت کششی مخلوط آزمایشی حاوی ۷۵ درصد خاکستر زباله سوز و ۲۰ درصد خاکستر بادی بسیار بیشتر از نمونه‌ی کنترل بود. بنابراین نتیجه‌گیری شد که از این مخلوط‌ها در سازه‌های مختلف (فونداسیون، زیر پایه، پیاده روها و غیره) می‌توان استفاده کرد که هزینه، انرژی و مشکلات زیست محیطی را تا حد زیادی به حداقل می‌رساند [۱۱]. Mangi و همکاران در تحقیق خود با هدف بررسی اثر خاکستر کف زغال سنگ بر مقاومت کششی بتن خود تراکم و خواص بتن خودتراکم تازه از این ترکیب به عنوان جایگزین ریزدانه‌ها در درصد‌های وزنی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر زمان T50cm با افزایش سطح جایگزینی خاکستر کف افزایش می‌یابد و مقادیر جریان اسلامپ، قابلیت عبور در جعبه‌ی L کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی برابر با ۴/۲۵ مگاپاسکال و مربوط به نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش مقدار خاکستر کف زغال سنگ منجر به کاهش مقاومت کششی و چگالی بتن خود تراکم شد و در همین حال افزایش نسبت آب به سیمان نیز مقاومت کششی را کاهش داد [۱۲]. Bertolini و همکاران به بررسی اثر جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند توسط خاکستر کارخانه‌ی زباله سوز پرداختند و علت ضعف بتن ساخته شده را اینگونه بیان کردند که حباب‌های هیدروژن تولید شده بر اثر خوردگی ذرات فلز آلومینیوم در بتن تازه، باعث متخلخل شدن بتن و ضعف آن می‌گردد. برای حل این مشکل با کاهش درصد استفاده از خاکستر زباله سوز منجر به بهبود قابل توجه در مقاومت و کاهش قابل توجه در نفوذپذیری بتن شد [۱۳]. Antoni و همکاران نیز در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که خاکستر زباله سوز با ترکیب ۵۰ درصد عبوری از الک ۵ میلی‌متر و ۵۰ درصد عبوری از الک ۱۰ میلی‌متر در جایگزینی سنگدانه درشت می‌تواند ترکیب بهینه‌ای را ایجاد نماید. همچنین در جایگذاری ۵۰ درصد خاکستر بادی به جای سیمان، مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۴۰ مگاپاسکال به دست آمد [۱۴]. Zhang و همکاران به بررسی استفاده از خاکسترزباله سوز پسماند شهری به عنوان ماده‌ی سیمانی مکمل در بتن پرداختند. طبق نتایج حاصله در بررسی آن‌ها خاکستر زباله سوز جذب آب در سنین زود هنگام و دیر هنگام را افزایش داد. همچنین عملکرد یخ زدن و آب شدن بتن سخت شده را بهبود بخشید. نتایج حاصل از گرماسنجی همدم و آنالیز وزنسنجی حرارتی به وضوح افزایش در هیدراته شدن سیمان در سنین اولیه و واکنش پذیری پوزولانی را نشان داد. بتن سخت شده حاوی ۲۰ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین سیمان، مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های شاهد بدون جایگزینی در هر سن آزمایش تا ۹۰ روز از خود نشان داد و مقاومت نهایی بتن حاوی ۱۸ درصد خاکستر زباله‌سوز جایگزین سیمان بیشتر از بتن شاهد بود [۱۵]. در یک مطالعه Lin و همکاران [۱۶] و Astrup و همکارانش در مطالعه‌ی دیگر [۱۷] دریافتند که استفاده از خاکستر زباله سوز پیر در کارهای عمرانی مجاز می‌باشد. خاکستر پیر خاکستری است که از استحصال آن ۲ سال گذشته باشد. طبق قوانین کشور دانمارک خاکستری که در طی یک دوره‌ی متوسط ۴ ماهه در فضای باز نگهداری شود و مواد آن کربناته گردد به آن خاکستر پیر گفته می‌شود و مجاز به استفاده در کارهای عمرانی می‌باشد [۱۷]. همانطور که اشاره شد در عملیات چرخه‌ی فرایند ساخت سیمان، گازهای گلخان‌های تولید می‌شوند که می‌توانند برای محیط زیست آلودگی ایجاد نمایند. امروزه همچنین با استفاده از ابزارهای ارزیابی اثرات

با توجه به مطالب گفته شده، در این تحقیق از خاکستر زباله سوز به عنوان جایگزین ماسه، خاکستر بادی و میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است. به دلیل خودتراکم بودن بتن و نیاز به پرکننده نیز در این مطالعه از سرباره‌ی کوره‌ی آهنگدازی اصفهان به عنوان پرکننده استفاده شده است. همچنین در این مطالعه پس از ساختن بتن خودتراکم با طرح مخلوط‌های مختلف و انجام آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده، چرخه‌ی عمر طرح مخلوط‌ها از نظر زیست‌محیطی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

چگالی ظاهری 32187 kg/m^3 در سه درصد مختلف وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین سیمان استفاده شد. شایان ذکر است که در کشور ایران خاکستر بادی تولید نمی‌شود و علت اصلی استفاده از این پوزولان مصنوعی در طرح‌های مخلوط مقایسه با نتایج سایر تحقیقات بین‌المللی بوده است.

در بتن‌های خودتراکم به صورت معمول از یک پرکننده یا ماده‌ی خنثی مثل پودر سنگ استفاده می‌شود. در این بررسی ابتدا طرح مخلوط‌هایی بدون بکارگیری پودر سنگ و پرکننده و با همان مواد اصلی طرح مخلوط ساخته شد. در فصل زمستان نمونه‌های ساخته شده بدون استفاده از پرکننده یا همان ماده‌ی خنثی نتیجه‌ی مطلوبی داشت اما با گرم شدن هوا مشاهده شد که نمونه‌های بتن تازه دچار آب انداختگی می‌شوند. به همین دلیل دو ماده‌ی پودر سنگ و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی جهت عدم آب انداختگی به صورت مجزا استفاده شدند که نتایج حاصل از سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی مطلوب‌تر بود. پس از انجام سعی و خطاهای زیاد مقدار مناسب سرباره در بتن خودتراکم به دست آمد این مقدار برابر با ۷۱ کیلوگرم در یک مترمکعب بتن بود. سرباره مورد استفاده در این تحقیق از شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شد و دارای چگالی ظاهری معادل 2900 kg/cm^3 بود. در این بررسی از پوزولان مصنوعی میکروسیلیس دارای چگالی ظاهری 2200 kg/cm^3 استفاده شد. میکروسیلیس پس از انجام سعی و خطاهای زیاد و مطابق با مطالعات پیشین جهت بهبود خواص بتن به طور ثابت در تمامی طرح‌های مخلوط و به صورت ۵ درصد وزنی جایگزین سیمان شد. مشخصات شیمیایی سیمان، ماسه، خاکستر زباله، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. جهت رسیدن به مشخصات روانی بتن خود تراکم از فوق روان کننده به میزان ۱/۴ درصد وزنی سیمان در طرح مخلوط استفاده گردید. همچنین از آب شرب شهری در تمامی مراحل ساخت و عمل‌آوری بتن استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان، ماسه، خاکستر زباله، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی با استفاده از آنالیز XRF

Table 1. Results of the XRF test of the Cement, sand, BA, FA, GGBFS and silica fume						
Chemical compo- nents	Cement (%)	Sand (%)	BA (%)	FA (%)	GGBFS (%)	Silica Fume (%)
SiO ₂	18.02	64.2	23.01	84.98	36	95
Al ₂ O ₃	3.53	13.12	5.38	5.46	15.4	1.5
CaO	65.4	7.27	37.687	2.38	38	-
Fe ₂ O ₃	3.92	4	5.197	2.84	1.1	0.8
MgO	3.2	3.1	3.129	0.4	8.5	1.45
K ₂ O	0.68	2.9	1.463	1.91	0.4	-
Na ₂ O	1.1	3.18	6.081	0.044	0.3	-
SO ₃	3.2	1.51	1.44	0.6	0.28	-
TiO ₂	0.35	0.54	1.191	0.6	-	-
P ₂ O ₅	0.15	0.06	4.628	0.1	-	-
Cl	0.01	0.06	1.614	0.11	0.02	-
L.O.I	0.44	0.06	1.18	0.576	-	1.25

۲-۲- نسبت‌های مخلوط در بتن خودتراکم

نسبت‌های اختلاط در این تحقیق طبق توصیه‌های مطرح شده کمیته اروپایی EFNARC در نظر گرفته شدند. این توصیه‌ها شامل نسبت حجمی آب به پودر (مواد ریز) بین ۰/۸ تا ۱/۱، عیار کل مواد پودری در هر متر مکعب ۱۶۰ تا ۲۴۰ لیتر (حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلو گرم) می‌باشد. در این تحقیق پس از ساخت هر طرح مخلوط با توجه به نتایج حاصله و ضعف‌هایی که وجود داشت نسبت‌های اختلاط اصلاح و نسبت‌های جدیدی در نظر گرفته شدند. حدود ۱۰۰ طرح مخلوط در این تحقیق ساخته شد تا نتیجه‌ی مطلوب حاصل شود. هفت طرح مخلوط اصلی در نظر گرفته شد که یکی از آن‌ها بدون وجود خاکستر زباله‌سوز و خاکستریادی به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. نسبت آب به سیمان پس از سعی و خطاهای فراوان برابر با ۰/۳۶ در نظر گرفته شد. طرح‌های مخلوط نهایی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نسبت‌های اختلاط برای طرح‌های نهایی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۶

نام طرح	شن	سرباره	میکرو سیلیس	آب	افزودنی	سیمان	ماسه	خاکستر زباله سوز	خاکستر بادی
Kg/m ³									
شاهد	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۴۷۵	۹۷۰	۰	۰
۵ BA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۴۷۵	۹۲۱/۵	۴۸/۵	۰
۱۰ BA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۴۷۵	۸۷۳	۹۷	۰
۱۵ BA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۴۷۵	۸۲۴/۵	۱۴۵/۵	۰
۱۰ FA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۴۲۷/۵	۹۷۰	۰	۴۷/۵
۲۰ FA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۳۸۰	۹۷۰	۰	۹۵
۳۰ FA	۶۳۵	۷۱	۲۵	۱۸۰	۷	۳۳۲/۵	۹۷۰	۰	۱۴۲/۵

۲-۳- شیوه ساخت و نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق پس از آماده کردن مصالح، حدود یک سوم از آب در ظرفی جدا شده و مقدار فوق روان کننده در نظر گرفته شده در دو سوم آب حل شد. ابتدا کل درشت‌دانه، ریزدانه یا مواد جایگزین ریزدانه و حدود یک سوم مقدار آب بدون فوق روان کننده در مخلوط کن ریخته و برای ۳ دقیقه مخلوط گردید. سپس سرباره و میکروسیلیس و یک سوم مقدار آب دارای فوق روان کننده به مدت ۱ دقیقه مخلوط و در ادامه سیمان یا مواد جایگزین سیمان و یک سوم مقدار آب دارای فوق روان کننده به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. در هر بار ساخت پس از انجام آزمایش‌های مربوط به بتن تازه، مخلوط بتن جهت جلوگیری از سفت شدن دوباره به داخل مخلوط‌کن برگردانده شده و پس از چند دقیقه اختلاط بدون هیچ گونه تراکم در داخل قالب‌های مکعبی (برای آزمون مقاومت فشاری)، تیر مستطیلی (برای آزمون مقاومت خمشی) و استوان‌های (برای آزمون مقاومت کششی) که قبل از شروع ساخت روغن کاری شده بودند ریخته شد. قالب‌های مکعبی دارای طول و عرض و ارتفاع ۱۰ سانتیمتری، قالب‌های تیر مستطیلی دارای طول ۴۰ و عرض و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر و قالب‌های استوان‌های دارای قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر هستند.

در این تحقیق به منظور مشخص نمودن پارامترهای کارایی و روانی بتن خودتراکم ساخته شده مانند قابلیت پرمکنندگی، لزجت

جریان و قابلیت عبور، آزمایش‌های جریان اسلامپ، اسلامپ در T50cm، حلقه‌ی J، قیف V شکل، جعبه‌ی L شکل و شاخص پایداری چشمی بررسی شد. آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن سخت شده نیز شامل آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت خمشی، آزمایش مقاومت کششی، آزمایش جذب آب حجمی، آزمایش جذب آب مؤئینه‌ی بتن، آزمایش اولتراسونیک و آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بود.

۴-۲- ارزیابی زیست محیطی

مقدار شاخص زیست محیطی ناشی از تولید بتن‌های خودتراکم ساخته شده شامل گرمایش جهانی (GWP)، انرژی مصرفی و پارامترهای آلوده کننده هوا به وسیله‌ی نرمافزار طراحی شده توسط دانشگاه برکلی ایالات متحده بنام Green Concrete LCA Web tool تعیین شد. میزان مصالح مصرفی در هر طرح مخلوط شامل سیمان پرتلند، سنگدانه درشت، سنگدانه‌ی ریز، خاکستر زباله سوز، خاکستر بادی، سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی، میکروسیلیس، آب و افزودنی، متغیرهای ورودی در این تحقیق را تشکیل داده و شاخص های زیست محیطی مانند GWP، انرژی مصرفی و میزان آلاینده‌های زیست محیطی هوا نیز متغیرهای خروجی برای ارزیابی زیست محیطی بودند.

۳- نتایج و بحث

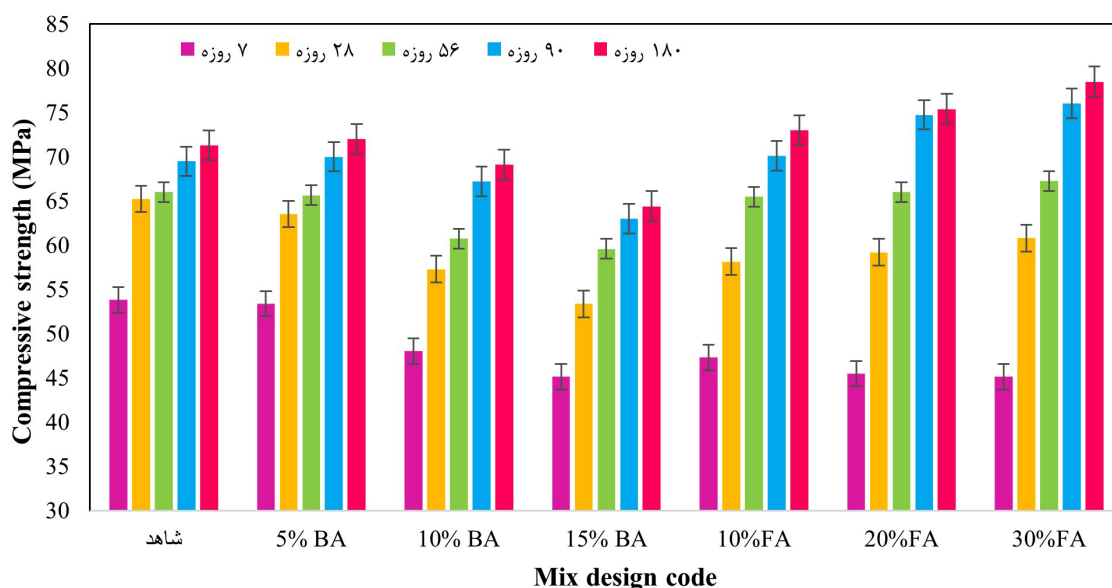
۱-۳- نتایج حاصل از آزمایش‌های بتن تازه

مطابق استاندارد مقدار جریان اسلامپ بتن خود تراکم باید در محدوده‌ی ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلیمتر باشد. همچنین زمان استاندارد در آزمایش T50cm برابر با ۲ تا ۵ ثانیه بیان شده است. نتایج حاصل شده برای این آزمایش‌ها در این تحقیق مطابق شکل ۲ می باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، در همه طرح‌های اختلاط جریان اسلامپ و T50cm در محدوده‌ی استاندارد قرار دارند. مقدار جریان اسلامپ در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر یعنی ۱/۴، ۳/۵۲ و ۵/۶۳ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بدون خاکستر زباله سوز کاهش داشته است و مقدار T50cm به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۶۲ و ۰/۹۶ ثانیه یعنی ۴/۳۵، ۱۶/۸۹ و ۲۶/۱۵ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. Mangi و همکاران نیز در تحقیق خود با جایگزینی خاکستر زباله سوز در درصدهای وزنی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین ریزدانه در بتن خودتراکم دریافتند که با افزایش مقدار خاکستر زباله سوز، مقدار جریان اسلامپ کاهش و زمان T50cm افزایش می یابد [۱۲] که نتایج این تحقیق با آن منطبق است. به عبارتی روانی، قابلیت پرمکنندگی و لزجت بتن خودتراکم تازه در این تحقیق در محدوده استاندارد می باشد. می توان گفت هرچند در این طرح‌ها جریان اسلامپ و T50 cm در محدوده استاندارد و منطبق با مطالعات پیشین قرار گرفتند اما با توجه به اینکه زباله‌ها در هر فصل و زمان و هرکشوری متفاوت بوده و دارای ترکیب یکسانی نیستند و خاکستر حاصل از آن هم در زمان‌ها و مکان‌های غیریکسان متفاوت است بسته به نوع خاکستر زباله سوز که دارای چه ترکیباتی می باشد نتیجه متفاوت است. همچنین مشاهده شد مقدار جریان اسلامپ در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۲۰، ۳۲ و ۴۰ میلی متر یعنی ۲/۸۱، ۴/۵ و ۵/۶۳ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بدون خاکستر بادی افزایش داشته است و مقدار T50 cm به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۸۲ و ۱/۳۴ ثانیه یعنی ۱۲/۸۰، ۲۲/۳۴ و ۳۶/۱۵ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافته است. می توان گفت هرچند در این طرح‌ها جریان اسلامپ و T50 cm در محدوده استاندارد قرار گرفتند، اما با افزودن هر مقدار خاکستر بادی قابلیت روانی و پرمکنندگی افزایش می یابد.

پس می‌توان گفت با افزودن خاکستر زباله‌سوز و خاکستربادی در این تحقیق تغییری در پایداری بتن خودتراکم تازه رخ نمی‌دهد.

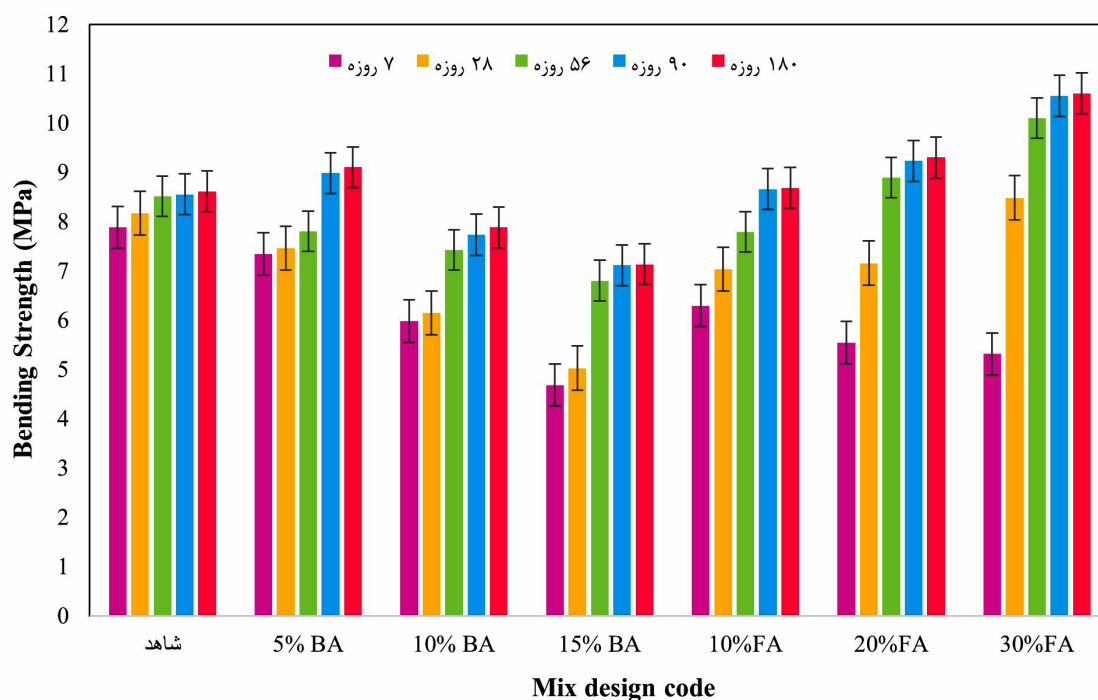
۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در سن‌های ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است مقاومت فشاری ۷ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خود تراکم به ترتیب ۰/۷۹، ۱۰/۷۷ و ۱۶/۱۶ درصد کاهش و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱۲/۱۳، ۱۵/۴۷ و ۱۶/۱۶ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۲/۶، ۱۲/۱۵ و ۱۸/۱۹ درصد کاهش و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱۰/۸۳، ۹/۲۴ و ۶/۸ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. همچنین مقاومت فشاری ۹۰ روزه در طرح حاوی ۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه ۰/۷۱ درصد افزایش و در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۳/۳ و ۹/۳۵ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستربادی جایگزین سیمان به ترتیب ۰/۸۶، ۷/۵۵ و ۹/۴۲ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. دلیل اصلی این کاهش در مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد استفاده از خاکستر زباله سوز می‌تواند به تاثیر درصد پرمکنندگی این مصالح تا ۵ درصد و نیز کاهش هرگونه اثر پوزولانی آن‌ها در درصدهای بالاتر دانست. Rafeizonooz و همکاران در تحقیق خود به بررسی استفاده از خاکستر زباله سوز به عنوان جایگزین ماسه در درصدهای وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ و خاکستر بادی جایگزین سیمان با درصد وزنی ۲۰ پرداختند که نتایج نشان داد که کارایی بتن با افزایش مقدار خاکستر به جای ماسه، کاهش یافت. از طرف دیگر، در سن ۲۸ روز هیچ اثر مثبتی در مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مشاهده نشد. پس از عمل‌آوری در سن ۹۱ روز مقاومت فشاری نمونه‌ها مشابه نمونه‌ی کنترل و در سن ۱۸۰ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها بیشتر از نمونه کنترل بود. بنابراین می‌شود گفت که از این مخلوط‌ها در سازه‌های مختلف (فونداسیون، زیر پایه، پیاده رو ها و غیره) می‌توان استفاده کرد که هزینه، انرژی و مشکلات زیست محیطی را تا حد زیادی به حداقل می‌رساند [۱۱]. همچنین در تحقیق Nagrockienė و Daugėla نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری با استفاده از مدل تغییر یافته مخلوط‌های بتنی نشان دادند که در نمونه‌هایی که تا ۶۵ درصد سیمان با خاکستر بادی جایگزین شده بود، مقاومت فشاری پس از ۷ روز عمل‌آوری ۷/۸۳ درصد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ۳/۵۴ درصد افزایش یافت. بهترین اثر در افزایش مقاومت فشاری زمانی مشاهده می‌شود که ۳۵ درصد سیمان در مخلوط بتن با خاکستر بادی جایگزین شود. مقاومت فشاری بتن پس از ۷ روز عمل‌آوری ۱۳/۶ درصد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ۹/۳۷ درصد افزایش یافت [۲۰]. پس می‌توان بیان کرد افزودن خاکستربادی به عنوان جایگزین سیمان مقدار مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد و نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین منطبق است.



شکل ۳- نتایج میانگین حاصل از آزمایش مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال در نمونه‌های حاوی خاکسترزباله سوز و خاکستربادی و مقایسه‌ی آن‌ها با طرح شاهد

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی در سن‌های ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روزه در شکل ۴ نشان داده شده است. می‌توان گفت مقاومت خمشی ۷ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خود تراکم به ترتیب ۶/۸۵، ۲۴ و ۴۰ درصد و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۳۲ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. همچنین مقاومت خمشی ۲۸ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۸/۷، ۲۴/۸ و ۳۸/۵ درصد و در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱۴ و ۱۲/۴ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است و در طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان ۳/۸ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. مقاومت خمشی ۹۰ روزه در طرح حاوی ۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه ۵ درصد افزایش و در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۹/۶ و ۱۶/۸ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱/۳، ۸ و ۲۳/۴ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. نتایج حاصل شده این تحقیق منطبق با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد و خاکستر زباله‌سوز در دراز مدت و در مقدار کمی می‌تواند مقاومت خمشی را بهبود دهد اما همانطور که اشاره شد، با توجه به اینکه زباله‌ها در هر فصل و زمان و هر کشوری متفاوت بوده و دارای ترکیب یکسانی نیستند و خاکستر حاصل از آن هم در زمان‌ها و مکان‌های غیریکسان متفاوت است، می‌توان گفت بسته به نوع خاکستر زباله سوز که دارای چه ترکیباتی می‌باشد نتیجه متفاوت است.



شکل ۴- نتایج میانگین حاصل از آزمایش مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال در نمونه‌های حاوی خاکسترزباله سوز و خاکستر بادی و مقایسه‌ی آن‌ها با طرح شاهد

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی نشان داد که مقاومت کششی ۷ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خودتراکم به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۴۱ درصد و در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱۵، ۲۴ و ۲۶ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. همچنین مقاومت کششی ۲۸ روزه در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۸، ۱۹ و ۲۶ درصد و در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۱۱ و ۹/۸ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است و در طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان ۵۵/۰ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب حجمی در سن ۹۰ روزه در جدول ۲ ارائه شده است. طبق استاندارد BS1881 اگر درصد جذب آب حجمی ۵/۰ ساعته بتن کمتر از ۲ درصد باشد آن بتن دوام مناسب‌تری دارد، بنابراین می‌توان گفت همه‌ی طرح‌های موجود در این تحقیق از نظر جذب آب حجمی در محدوده‌ی استاندارد قرار گرفته و دوام مناسب دارند. درصد جذب آب حجمی ۵/۰ ساعته در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خود تراکم به ترتیب ۲/۵۲، ۶/۵۶ و ۹/۰۹ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۲۱/۷۱، ۲۴/۷۴ و ۴۲/۹۲ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده شد. Nagrockienė و Daugėla نیز در تحقیق خود ۷ نمونه با درصدهای مختلف خاکستر بادی (صفر، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درصد) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش مقدار خاکستر بادی تا ۵۵ درصد مقدار درصد جذب آب کاهش می‌یابد [۲۰]. می‌توان گفت نتایج این تحقیق منطبق با مطالعات پیشین می‌باشد و با افزایش درصد خاکسترزباله‌سوز و خاکستر بادی مقدار درصد جذب آب کاهش می‌یابد.

جدول ۲- درصد میانگین جذب آب حجمی بتن خودتراکم

زمان / شماره طرح	نیم ساعت	۱ ساعت	۲ ساعت	۲۴ ساعت
شاهد	۱,۹۸	۲,۴۹	۲,۷۷	۳,۴۸
BA ۵%	۱,۹۳	۲,۲۵	۲,۵۲	۳,۱۶
BA ۱۰%	۱,۸۵	۲,۰۸	۲,۳۶	۳,۱۱
BA ۱۵%	۱,۸۰	۲,۰۴	۲,۲۹	۳,۰۱
FA ۱۰%	۱,۵۵	۱,۶۹	۱,۸۹	۳,۲۴
FA ۲۰%	۱,۴۹	۱,۶۶	۱,۸۶	۳,۱۵
FA ۳۰%	۱,۱۳	۱,۳۴	۱,۵۵	۲,۷۰

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب موئینه‌ی ۷ طرح مخلوط در سن ۹۰ روزه نشان داد که درصد جذب آب موئینه‌ی ۵/۰ ساعته در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۱۰، ۳۱ و ۳۴ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۲۷، ۳۵ و ۵۴ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده شد.

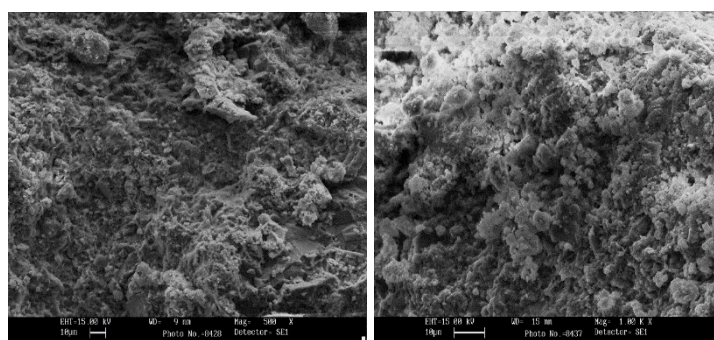
نتایج میانگین حاصل از آزمایش اولتراسونیک در سن ۹۰ روزه و مقایسه آن با مقاومت فشاری در همین سن مطابق جدول ۳ می‌باشد. می‌توان گفت سرعت پالس فرا صوتی در طرح حاوی ۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه با نمونه شاهد برابر بوده است. سرعت پالس فرا صوتی در طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه به ترتیب ۲/۱۷ و ۴/۲۵ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان به ترتیب ۲/۲۸، ۳/۴۸ و ۴/۶۸ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده شد. Rafieizonooz و همکاران در تحقیق خود با جایگزینی خاکستر بادی بصورت ۲۰ درصد وزنی سیمان و خاکستر زباله سوز در درصد‌های وزنی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰ به عنوان جایگزین ماسه دریافتند که افزایش سن عمل‌آوری منجر به افزایش سرعت پالس فرا صوتی در بتن می‌شود. در عمل‌آوری ۹۰ روزه مشاهده شد بیشترین مقدار سرعت پالس فرا صوتی مربوط به نمونه‌ی حاوی ۵۰ درصد خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه می‌باشد که از نمونه‌ی کنترل هم بیشتر شده است. در سایر نمونه‌ها مقدار سرعت پالس صوتی کمتر از نمونه‌ی کنترل می‌باشد ولی با افزایش درصد خاکستر زباله سوز از ۱۰ تا ۵۰ درصد سرعت پالس فرا صوتی هم افزایش یافته است و دارای همبستگی و رابط‌هی خطی با مقاومت خمشی و مقاومت کششی می‌باشد [۱۱].

جدول ۳- نتایج میانگین آزمایش التراسونیک و مقایسه‌ی آن بانتهای مقاومت فشاری

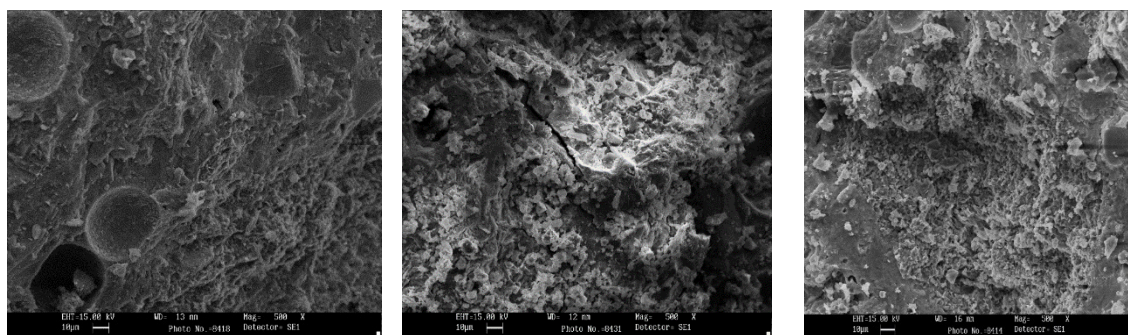
شماره طرح	سرعت پالس التراسونیک (m/s)	زمان پالس التراسونیک (μ s)	مقاومت فشاری بتن (MPa)
شاهد	۴۴۶۴	۲۲/۴	۶۹/۵
BA ۵%	۴۴۶۴	۲۲/۴	۷۰
BA ۱۰%	۴۳۶۷	۲۲/۹	۶۷/۲
BA ۱۵%	۴۲۷۴	۲۳/۴	۶۳
FA ۱۰%	۴۵۶۶	۲۱/۹	۷۰/۱
FA ۲۰%	۴۶۱۹	۲۱/۶	۷۴/۷
FA ۳۰%	۴۶۷۳	۲۱/۴	۷۶

۳-۳- ارزیابی ریز ساختار بتن

ارزیابی ریز ساختار نمونه‌های بتن سخت شده توسط دستگاه SEM در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه BA15 که کمترین مقاومت را در بین طرح‌های مورد آزمایش داشت و دارای ۱۵٪ جایگزینی خاکستر زباله می‌باشد، بیشترین خلل و فرج و کمترین تراکم و یکنواختی را نسبت به سایر طرح‌ها داراست و نمونه FA-۳۰ دارای کمترین فضای خالی و عدم چسبندگی بین سنگدانه‌ها و در نتیجه بیشترین مقاومت فشاری و خمشی را دارا بود. با توجه به اینکه قطر ذرات خاکستر زباله نسبتاً در یک دامنه قرار دارد این عدم تراکم و چسبندگی در نمونه BA15 را می‌توان به کاهش مقاومت این ذرات نسبت به نمونه ماسه طبیعی نسبت داد که باعث عدم چسبندگی ژل سیمان و سنگدانه‌ها و ضعف در ناحیه انتقال (TZ) و در نهایت ضعف ساختاری می‌گردد. همچنین مشاهده می‌گردد ساختار کریستالی ذرات در نمونه کنترل و A-۳۰ به صورت نیمه شکل دار می‌باشد.



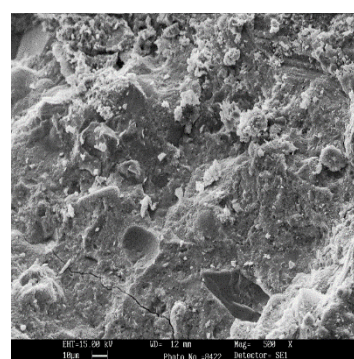
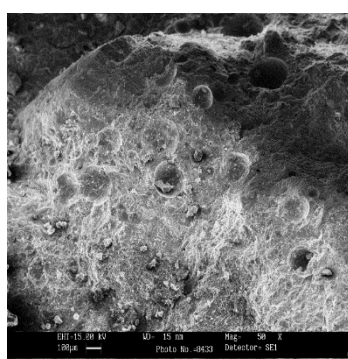
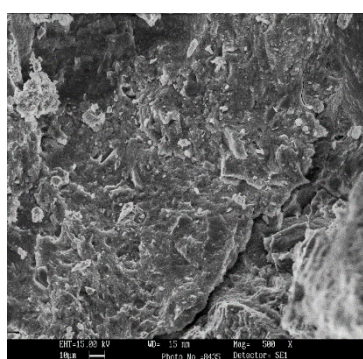
(الف)



(د)

(ج)

ب



(ز)

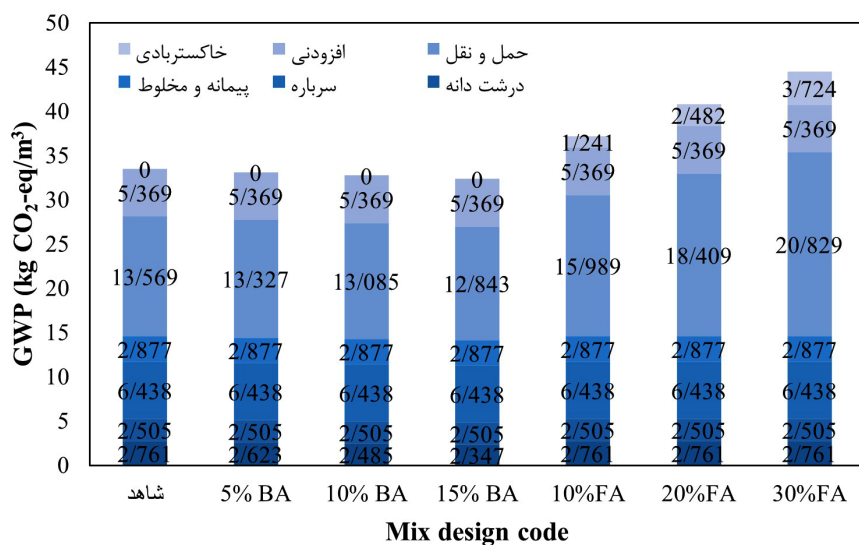
(و)

(ه)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ SEM (الف) نمونه شاهد، ب-د به ترتیب ۵ تا ۱۵ درصد با جایگزینی خاکستر زباله سوز، ه-ز به ترتیب با جایگزینی ۱۰ تا ۳۰ درصد خاکستر بادی

۴-۳- ارزیابی چرخه عمر بتن خود تراکم حاوی خاکستر زباله سوز و خاکستر بادی

در این تحقیق چهار مرحله اصلی طبق استاندارد ISO 14040 برای ارزیابی اثرات زیست محیطی مخلوط‌های بتنی ساخته شده توسط نرم افزار Green Concrete LCA tool طی شد. پارامترهای مدلسازی شده و واحد فرایند یک مترمکعب در نظر گرفته شد که این مقدار همان حجم بتن تولیدی می‌باشد. مشخص نمودن طرح‌های اختلاط و نوع مصالح نیز برای یک مترمکعب حجم بتن در نظر گرفته شده است. داده‌های مرتبط با شبکه‌ی برق و میزان سهم سوخت‌های مصرف شده در تولید برق در جریان استخراج مصالح و نیز استفاده کارخانه‌ی تولید بتن مشخص می‌شود. داده‌های حمل و نقل از جمله نوع وسیله برای حمل مصالح و فاصله‌ی بین محل‌های استخراج مصالح و کارخانه‌های سیمان و بتن مشخص می‌شود. در فرایند ساخت بتن سهم هر یک از اجزای تشکیل دهنده‌ی بتن برای ۷ طرح اختلاط در تولید GWP و انرژی مصرفی به دست آمد. سهم اجزای تشکیل دهنده بتن در فرایند ساخت بتن در تولید GWP برحسب کیلوگرم معادل CO₂ در شکل ۶ نشان داده شده است. در تمامی طرح‌ها به دلیل ثابت بودن مقدار فوق روان کننده، مجموع انرژی مصرفی و GWP تولیدی حاصل از تولید ۷ کیلوگرم فوق روان کننده در یک مترمکعب بتن بدون تغییر و به ترتیب برابر ۱۲۸/۱ مگاژول و ۵/۳۶۹ کیلوگرم معادل CO₂ می‌باشد. Celik و همکاران برای ۶/۶ کیلوگرم فوق روان کننده، مقدار GWP تولیدی را ۵/۱ کیلوگرم معادل CO₂ به دست آوردند [۱].



شکل ۶- سهم اجزای تشکیل دهنده بتن در فرایند ساخت بتن در تولید GWP برحسب کیلوگرم معادل CO₂

در طرح‌های حاوی خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، مجموع انرژی مصرفی در فرایند ساخت بتن به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۹۳، ۱/۴۰ درصد کاهش و مقدار GWP تولیدی در فرایند ساخت بتن به ترتیب ۱/۱۳، ۲/۲۶، ۳/۴۰ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی خاکستربادی جایگزین سیمان در درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، مجموع انرژی مصرفی در فرایند ساخت بتن به ترتیب ۵/۶۸، ۱۱/۳۶ و ۱۷/۰۴ درصد افزایش و مقدار GWP تولیدی در فرایند ساخت بتن به ترتیب ۱۰/۹۲، ۲۱/۸۴ و ۳۲/۷۶ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است که دلیل این افزایش مسافت حمل زیاد خاکستربادی تا کارخانه‌ی بتن می‌باشد و مسافت زیاد حمل سبب افزایش نهایی این پارامترها نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. در تحقیق هدایتی نیا و همکاران نیز در طرح‌های حاوی سرباره جایگزین سیمان در درصدهای وزنی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد، مقدار GWP تولیدی در فرایند ساخت بتن به ترتیب ۳۸/۹۷، ۷۸/۱۱ و ۹۷/۶۹ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است که افزایش GWP در فرایند ساخت بتن در این تحقیق با آن مطابقت دارد [۱۸].

پارامترهای آلوده کننده‌ی هوا شامل CO، سرب، PM₁₀، NO_x و SO₂ و ترکیبات آلی فرار برحسب کیلوگرم طبق جدول ۳ برای هر طرح به دست آمدند. همانطور که ملاحظه می‌شود، در طرح‌های حاوی خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خودتراکم در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، مجموع CO تولیدی در فرایند تولید بتن به ترتیب ۰/۰۰۳، ۰/۰۱۱ و ۰/۰۱۵ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، مجموع CO تولیدی در فرایند تولید بتن به ترتیب ۹/۹۳، ۱۹/۸۶ و ۲۹/۷۹ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن خاکستر زباله‌سوز و خاکستربادی در هر مقداری در تولید بتن خودتراکم مقدار تولید CO کاهش می‌یابد. افزودن خاکستر زباله سوز با توجه به ثابت نبودن ترکیب خاکستر تغییری در مقدار سرب و ترکیبات آلی فرار ایجاد نمی‌کند و مقدار PM₁₀، NO_x و SO₂ تولیدی را کاهش می‌دهد. افزودن خاکستربادی مقدار PM₁₀، NO_x و SO₂ تولیدی را افزایش می‌دهد و مقدار تولید سرب و ترکیبات آلی فرار را کاهش می‌دهد. می‌توان گفت با کاهش فاصله کارخانه بتن با محل تولید خاکستربادی کلیه طرح‌ها از نظر کاهش پارامترهای آلوده کننده‌ی هوا اثرات مثبت زیست محیطی دارند. در تحقیق Nikbin و همکاران در طرح

حاوی ۲۵ درصد ماده‌ی مکمل جایگزین سیمان مقدار SO₂ به میزان ۱۷/۱ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش داشته است [۲۱]. می‌توان گفت با توجه به تفاوت عوامل موثر در تعیین این پارامترها و یکسان نبودن شرایط در همه‌ی کشورها از جمله حمل و نقل، نوع سوخت کارخانه‌ی سیمان، تولید برق و ... این تفاوت در نتایج قابل قبول می‌باشد.

جدول ۳- مجموع هریک از پارامترهای آلوده کننده‌ی هوا در فرایند تولید بتن

VOC بر حسب Kg	SO ₂ بر حسب Kg	PM ₁₀ بر حسب Kg	NO _x بر حسب Kg	Lead بر حسب Kg	CO بر حسب Kg	نام طرح
۱/۰.۸۱	۰/۱۶۹	۰/۱۰۹	۰/۳۴	۰/۰.۴۲	۲۵/۹۶۵	شاهد
۱/۰.۸۱	۰/۱۶۸	۰/۱۰.۸	۰/۳۳۵	۰/۰.۴۲	۲۵/۹۶۴	%۵ BA
۱/۰.۸۱	۰/۱۶۸	۰/۱۰.۷	۰/۳۳۲	۰/۰.۴۲	۲۵/۹۶۲	%۱۰ BA
۱/۰.۸۱	۰/۱۶۷	۰/۱۰.۵	۰/۳۲۹	۰/۰.۴۲	۲۵/۹۶۱	%۱۵ BA
۰/۹۷۳	۰/۱۷۱	۰/۱۱۳	۰/۳۶۱	۰/۰.۳۷	۲۳/۲۸۶	%۱۰ FA
۰/۸۶۶	۰/۱۷۳	۰/۱۱۶	۰/۳۸۵	۰/۰.۳۳	۲۰/۸۰.۸	%۲۰ FA
۰/۷۵۹	۰/۱۷۳	۰/۱۲۰	۰/۴۰۵	۰/۰.۲۹	۱۸/۲۲۸	%۳۰ FA

۴- نتیجه گیری

هدف این تحقیق بررسی امکان تولید بتن خودتراکم با استفاده از موادی است که دفع آن‌ها منجر به مشکلات زیست محیطی خواهد شد. این مواد با جایگزینی در درصدهای مختلف وزنی سیمان و ماسه، هم باعث کاهش مصرف سیمان و ماسه و اقتصادی شدن بتن تولیدی می‌شوند و هم اثرات مخرب زیست محیطی تولید سیمان و ماسه و دفع زیان بار خود را کاهش می‌دهند.

در بخش انجام آزمایش‌های رئولوژیکی و مربوط به خواص بتن خودتراکم تازه در طرح‌های حاوی درصدهای مختلف خاکستر زباله‌سوز جایگزین ماسه در بتن مقدار جریان اسلامپ نسبت به نمونه‌ی شاهد بدون خاکستر زباله‌سوز کاهش داشته است اما همواره در محدوده توصیه شده و به مقدار ۶۷۰ تا ۷۰۰ میلی متر می‌باشد و قابلیت‌های روانی و پرمکنندگی را تامین مینماید. جایگزینی ۵ درصد بهینه و نزدیکتر به نتیجه نمونه شاهد می‌باشد. در طرح‌های حاوی ۱۰،۵ و ۱۵ درصد خاکستر زباله‌سوز جایگزین ماسه در بتن خودتراکم مقدار زمان T50cm نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش داشته است اما همواره در محدوده توصیه شده و به مقدار ۳/۸۳ تا ۴/۶۳ ثانیه می‌باشد و قابلیت‌های روانی و پرمکنندگی را تامین مینماید. جایگزینی ۵ درصد بهینه و نزدیکتر به نتیجه نمونه‌ی شاهد می‌باشد. در طرح‌های حاوی خاکسترزباله سوز جایگزین ماسه در بتن خودتراکم مقدار اختلاف ارتفاع در آزمایش حلقه‌ی J افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است اما همواره در محدوده توصیه شده و به مقدار ۳ تا ۵ میلی متر می‌باشد و قابلیت عبور بتن خودتراکم تازه با وجود مانع را تامین مینماید. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در بتن خودتراکم مقدار زمان تخلیه بتن از داخل قیف V کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است اما همواره در محدوده توصیه شده می‌باشد و قابلیت پرمکنندگی و لزجت و توانایی عبور بتن خودتراکم تازه از فضاهاى باریک را تامین مینماید. تمامی طرح ها عملکرد بهتر از طرح شاهد داشته و جایگزینی ۳۰ درصد بهتر می‌باشد.

در طرح‌های حاوی خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در بتن خودتراکم مقادیر مقاومت فشاری در سنین ۷ تا ۲۸ روز کاهش و در

سن ۹۰ و ۱۸۰ روز مقاومت فشاری نمونه با جایگزینی ۵ درصد وزنی ماسه افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. اما درصد جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در بتن خودتراکم مقدار مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در سن ۵۶ روزه و در طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستربادی جایگزین سیمان درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در بتن خودتراکم مقدار مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه در طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان ۳/۷۹ درصد افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در بتن خودتراکم مقدار مقاومت کششی هر ۳ طرح در دراز مدت عملکرد بهتر از نمونه‌ی شاهد دارند که به دلیل واکنش پوزولانی دیر هنگام آن‌ها می‌باشد اما طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر بادی عملکرد بیشتر و بهینه‌تر دارد.

در طرح‌های حاوی خاکستر زباله سوز جایگزین ماسه در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، مجموع انرژی مصرفی در فرایند تولید بتن به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۱۳ و ۰/۱۹ درصد کاهش و مقدار GWP تولیدی در فرایند تولید بتن به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۱۹ و ۰/۲۸ درصد کاهش نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. در طرح‌های حاوی خاکستر بادی جایگزین سیمان در درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، مجموع CO تولیدی در فرایند تولید بتن به ترتیب ۹/۹۳، ۱۹/۸۶ و ۲۹/۲۷۹ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد داشته است. افزودن خاکستر زباله سوز با توجه به ثابت نبودن ترکیب خاکستر تغییری در مقدار سرب و ترکیبات آلی فرار ایجاد نمی‌کند و مقدار PM10، NOx و SO2 تولیدی را کاهش می‌دهد. افزودن خاکستربادی مقدار PM10، NOx و SO2 تولیدی را افزایش می‌دهد و مقدار تولید سرب و ترکیبات آلی فرار را کاهش می‌دهد.

قدردانی

کلیه آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه مهندسی محیط‌زیست و تکنولوژی بتن دانشگاه خوارزمی انجام گرفت. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی جهت فراهم کردن محیط آزمایشگاهی و همکاری در مسیر انجام پروژه قدردانی نمایند.

۵- مراجع

- [1] Celik K, Meral C, Gursel AP, Mehta PK, Horvath A, and Monteiro PJ. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 56:59-72.
- [2] Mardani A, Tuyan M, and Ramyar K. (2014) Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates, *Materials and Structures*, 48(8), 2629-2640.
- [3] Binici H, Yardim Y, Aksogan O, Reşatoğlu R, Dincer A, and Karrpuz A. (2020). Durability properties of concretes made with sand and cement size basalt, *Sustainable Materials and Technologies* 23:e00145.
- [4] Fu C, Zhang H, Gong F, and Jiang J. (2026). Municipal solid waste incineration bottom ash (MIBA) for high-performance, low-shrinkage, and sustainable foam concrete, *Process Safety and*

Environmental Protection, 211:108777.

[5] Jurič B, Hanžič L, Ilić R, Samec N. (2006). Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete, *Waste Management*, 26(12):1436-1442.

[6] Qiao XC, Tyrer M, Poon CS, and Cheeseman, CR. (2008). Novel cementitious materials produced from incinerator bottom ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3):496-510.

[7] Singh N, Mithulraj M, and Arya S. (2019) Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin, *Resources, Conservation and Recycling*, 144:240-251.

[8] Alnezami S, Lamaa G, Costa Pereira MF, Kurda R, Brito J, Silva RV. (2024). A sustainable treatment method to use municipal solid waste incinerator bottom ash as cement replacement, *Construction and Building Materials*, 423, 2024, 135855.

[9] Ling X, Chen W, Schollbach K, and Brouwers HJH. (2024). Valorization of biomass bottom ash in alkali-activated GGBFS-fly ash: Impact of biomass bottom ash characteristic, silicate modulus and aluminum-anodizing waste, *Construction and Building Materials*, Volume 428:136408.

[10] Moštofi nejad D., Noorpour S., Noorpour M., Karbati Asl R., Sadeghi Balkanlou V. and Karbati Asl A. (2017). Effects of petrochemical wastes incinerator ash powder instead of Portland cement on the properties of concrete, *Scientia Iranica A*, 24(3):1017-1026.

[11] Rafieizonooz M, Razman Salim M, Mirza J, Warid Hussin M, Salmiati, Khan R, and Khankhaje E. (2017). Toxicity characteristics and durability of concrete containing coal ash as substitute for cement and river sand, *Construction and Building Materials*, 143:234-246.

[12] Mangi SA, Wan Ibrahim MH, Jamaluddin N, Arshad MF, Shahidan S. (2019). Performances of concrete containing coal bottom ash with different fineness as a supplementary cementitious material exposed to seawater, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3):929-938.

[13] Bertolini L, Elsener B, Pedersen P, Polder R. (2003). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, Wiley.

[14] Antoni A, Klarens K, Indranata M, and Al Jamali L. (2017). The use of bottom ash for replacing fine aggregate in concrete paving blocks, *MATEC Web of Conferences*, 138(1):01005.

[15] Zhang Y, Wang L, Chen L, Ma B, Zhang Y, Ni W, and Tsang DCW. (2021). Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives, *Journal of Hazardous Materials*, 411:125132.

[16] Lin WY, Cheng W, Wong BSE, Teo SLM, Sivananthan G, Baeg GH, Sik Ok Y, and Wang CH. (2018). Evaluation of sewage sludge incineration ash as a potential land reclamation material, *J Hazard Mater*, 5:357:63-72.

[17] Åstrup T, Muntoni A, Poletti A, Pomi R, Van Gerven T, and Van Zomeren A. (2016). Chapter 24 - Treatment and Reuse of Incineration Bottom Ash, *Environmental Materials and Waste, Resource Recovery and Pollution Prevention*, 607-645.

[18] Hedayatinia F, Delnavaz M, and Emamzadeh SH. (2019). Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan, *Construction and Building Materials*, 206:122-129

[19] Taherlou A. Asadollahfardi G, Salehi AM, and Katebi A. (2021). Sustainable use of municipal solid waste incinerator bottom ash and the treated industrial wastewater in self-compacting con-

crete, *Construction and Building Materials*, 297:123814.

[20] Nagrockienė D, and Daugėla A. (2018). Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash, *Construction and Building Materials*, Volume 174:369-375.

[21] Nikbin IM, Aliaghazadeh M, Charkhtab S, and Fathollahpour A. (2018). Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud), *Journal of Cleaner Production*, 172:2683-2694.