

## کارایی و مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی خاکستر پوسته برنج حاصل از سوختن کنترل شده و کنترل نشده

ساسان معتقد \*

استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

علی رستگار

کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

سید عباس حسینی

استادیار، دانشکده صنعت و معدن جرام، دانشگاه یاسوج، جرام، ایران.

### چکیده

پوسته برنج یک ماده زائد کشاورزی با مقدار زیادی سیلیس آمورف است که افزودن خاکستر آن به بتن موجب افزایش خاصیت پوزولانی بتن و افزایش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی می‌شود. کیفیت و نحوه تهیه خاکستر پوسته برنج بر خواص نهایی بتن تهیه شده از آن تأثیر تأثیرگذار است. در این مقاله خاکستر پوسته برنج در شرایط دمایی کنترل شده، نیمه کنترل شده و کنترل نشده سوزانده شده و خاکستر حاصل به میزان ۱۰ درصد جایگزین سیمان در بتن خود تراکم شده است. خواص کارایی و مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج در سنین مختلف ارزیابی شده است. خواص مربوط به پودر خاکستر پوسته برنج از طریق آزمایش‌های XRF، FESEM و محدوده اندازه دانه‌ها تعیین شده است. نتایج نشان داد که در همه حالت‌ها حاصل جمع  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  بالاتر از ۷۰٪ است؛ که نشان‌دهنده قرار گرفتن در محدوده‌ی استاندارد مواد سیمانی پوزولانی است. در حالت نیمه کنترل شده، سیلیس آمورف بیش از ۸٪ و در حالت کنترل نشده بیش از ۱۵٪ از حالت کنترل شده کمتر است. بر اساس نتایج، تغییر نوع خاکستر تأثیر چندانی بر خواص بتن تازه نشان نمی‌دهد. اضافه کردن خاکستر پوسته برنج موجب افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه و کاهش در مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن خود تراکم شده است. افزایش مقاومت بلند برای نمونه‌های با خاکستر تولید شده در شرایط کنترل شده بیشتر و تا میزان ۱۸ درصد بوده است. کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت برای نمونه‌های با خاکستر کنترل نشده بیشتر و تا ۲۵ درصد بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: خاکستر پوسته برنج، کارایی بتن، بتن خود تراکم، مقاومت فشاری، دانه بندی.

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مضرات گسترش استفاده از بتن در سالیان اخیر، افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از صنایع سیمان بوده است [۱]. برای کم کردن این اثر مضر و همچنین اصلاح و یا ایجاد خواص ویژه برای بتن، بخشی از سیمان با مواد با خواص سیمانی جایگزین می‌شود. به دلیل کاهش اثرات زیست محیطی تولید بتن، معمولاً در استفاده از مواد جایگزین سیمان یا حتی سنگ‌دانه، توجه بسیار زیادی به استفاده از مواد زائد معدنی، صنعتی و حتی کشاورزی وجود دارد [۲, ۳].

خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA<sup>۱</sup>) که ماده به جا مانده از سوختن پوسته‌ی برنج است به دلیل وجود مقدار زیادی سیلیس آمورف به عنوان یک ماده پوزلانی در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد و در سال‌های اخیر نیز موضوع بیاری از تحقیقات حوزه‌ی تکنولوژی بتن بوده است [۴, ۵]. خاکستر پوسته‌ی برنج به صورت سنتی از سوختن پوسته‌ی برنج در هوای آزاد تولید می‌شود که خاکستر حاصل به دلیل عدم کنترل دما و مدت زمان سوختن، دارای کیفیت و عملکرد متفاوتی خواهد بود. برای تنظیم کیفیت خاکستر ناشی از احتراق در سال‌های اخیر کوره‌هایی برای تولید کنترل شده خاکستر پوسته برنج ایجاد شده است [۶]. در سیستم کنترل شده انرژی برای سوزاندن مصرف می‌شود و در سیستم کنترل نشده از سوختن پوسته انرژی تولید می‌شود.

خاصیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج به مقدار سیلیس آمورف، سطح مخصوص دانه‌ها و دانه‌بندی این ماده وابسته است [۷]. شرایط دمایی و مدت زمان سوختن پوسته‌ی برنج برای تولید خاکستر بادی بر خواص سیمانی این محصول تأثیر گذار است [۸]. برای تولید مقدار مناسبی از سیلیس آمورف، دمای سوختن پوسته برنج باید در محدوده مناسبی کنترل گردد تا سیلیس به شکل کریستالی تغییر ماهیت ندهد [۹]. محدوده دمایی بین ۵۵۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس در مراجع مختلف گزارش شده است [۱۰, ۱۱]. متناً شرایط لازم برای تولید سیلیس آمورف از پوسته‌ی برنج را سوختن طولانی آن در دمای زیر ۵۰۰ درجه سلسیوس همراه با اکسیداسیون و یا سوختن در دمای بالای ۶۸۰ درجه سلسیوس در مدت زمان حداکثر یک

## دقیقه گزارش کرده است [۱۲].

خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی خاکستر پوسته برنج موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. بهری و همکاران با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با خاکستر پوسته برنج تولید شده در شرایط کنترل شده با دمای میانگین ۷۰۰ درجه سلسیوس، افزایش ۲۰ درصدی در مقاومت فشاری بتن را گزارش کردند. بر اساس نتایج گزارش شده، افت سرخ‌شدگی برای خاکستر پوسته برنج که به رنگ خاکستری به دست آمده بود برابر با ۴/۰۵ گزارش گردید [۱۳].

رمضانیان پور و همکاران با تولید خاکستر بادی در دمای میانگین ۶۵۰ درجه در مدت زمان ۶۰ دقیقه در شرایط کنترل شده، افزایش ۱۶ درصدی مقاومت فشاری را گزارش کرده اند [۱۴]. مایوران<sup>۳</sup> و همکاران با سوختن پوسته برنج در کوره باز در شرایط کنترل نشده به مدت ۶۰ دقیقه و جایگزینی ۵ درصد سیمان با خاکستر به دست آمده، افزایش ۳۵ درصدی مقاومت فشاری را گزارش کرده اند [۱۵]. ونکاتارایانان و رانگاراچو<sup>۴</sup> با تولید خاکستر پوسته برنج تحت فرآیند بدون هوای پیرولیز در دمای ۸۰۰ درجه و در مدت زمان ۴۰ دقیقه پودر خاکستر سفید رنگ تولید کردند که با جایگزینی ۱۵ درصد سیمان طرح اختلاط موجب افزایش ۳۵ درصدی مقاومت فشاری گردید [۱۶]. سالاس<sup>۵</sup> و همکاران جایگزینی ۵ تا ۱۰ از سیمان بتن با خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری بتن را بسیار مفید ارزیابی کردند گزارش کردند که این اثرات همانند جایگزینی سیمان با ژل میکرو سیلیس بوده است [۱۷]. بی<sup>۶</sup> و همکاران مقدار بهینه خاکستر پوسته برنج در بتن را ۱۰ درصد وزن سیمان گزارش کرده اند [۱۸].

علاوه بر خواص بتن سخت شده، توجه به خواص مرتبط با کارایی بتن حاوی خاکستر پوسته برنج نیز اهمیت زیادی دارد. آنتونیوس و همکاران با انجام آزمایش بر بتن‌های حاوی مقادیر مختلف RHA گزارش کرده‌اند که برای رسیدن به کارایی یکسان در همه نمونه‌ها باید از فوق روان‌کننده استفاده شود [۱۹]. سالاس و همکاران با بررسی اسلامپ بتن حاوی RHA گزارش کردند که کارایی بتن حاوی ۱۵ تا ۲۰ درصد RHA به شدت کاهش می‌یابد و در این طرح‌ها حتماً باید از فوق روان‌کننده استفاده شود [۱۷]. صفی‌الدین

<sup>4</sup> Venkatanarayanan and Rangaraju

<sup>5</sup> Salas

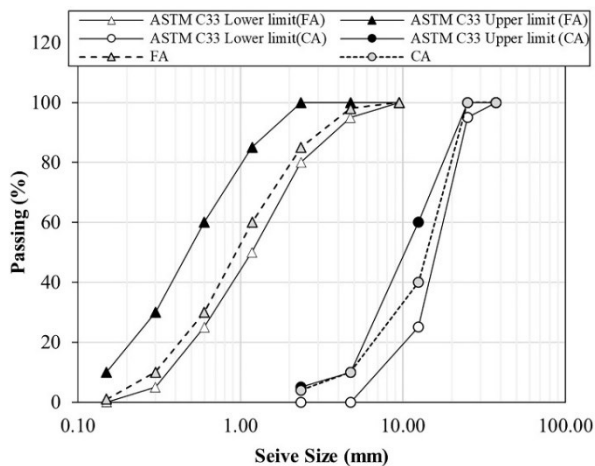
<sup>6</sup> Bie

<sup>1</sup> Rice Husk Ash

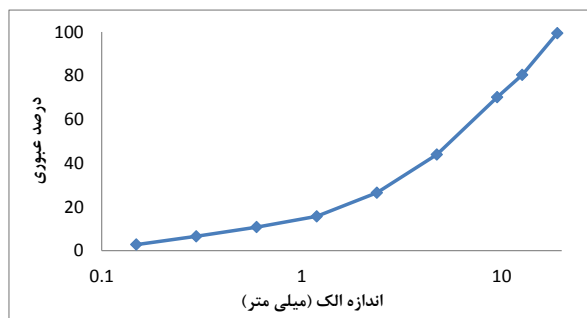
<sup>2</sup> Mehta

<sup>3</sup> Mayooran

در شکل ۲ نمودار دانه بندی کل سنگ دانه مصرفی نشان داده شده است. آب مصرفی برای ساخت نمونه‌ها از نوع آشامیدنی شهرستان بهبهان با میزان pH حدود ۷/۶ است.



شکل ۱- نمودار دانه بندی ریز دانه و درشت دانه و حدود استاندارد (FA: ریز دانه، CA: درشت دانه)



شکل ۲- نمودار دانه بندی مخلوط کل سنگ دانه‌ها

از دیگر مواد مورد نیاز در بتن خودتراکم، پودر سنگ است. در این پژوهش از پودر سنگ آهک عبوری از الک ۱۲۰ استفاده شده است. فوق روان کننده سوپر پلاست PC5000 (HR) بر پایه پلی کربوکسیلات با نام تجاری PC 5000 و با وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و غلظت ۲۰٪ مطابق با استانداردهای ASTM-C-434 و EN 934-2 استفاده شده است. رمز تولید یک مخلوط بتن خودتراکم قابل قبول بدون آب انداختگی، جداشدگی و یا انباشتگی وجود لزجت مناسب در بتن است [۲۲]. برای تأمین لزجت از پودر VMA<sup>۱</sup> به عنوان ماده اصلاح کننده لزجت استفاده می‌شود. این افزودنی شیمیایی دارای وزن مخصوص ۱/۰۷ گرم بر سانتیمتر مکعب، ویسکوزیته ۵۵۰۰-۳۰۰۰

و صوکی در بتن‌های خود تراکم حاوی RHA افزایش جریان اسلامپ و عبور از حلقه L را برای نمونه‌های با درصد آب به سیمان کم و مقدار بالای RHA گزارش کردند [۲۰]. لی و لودویگ اثر مطلوب استفاده از RHA در کاهش آب انداختگی و اصلاح لزجت بتن خود تراکم با مقاومت بالا را گزارش کرده‌اند [۲۱].

با توجه به مطالب گفته شده، دما و زمان سوختن، شرایطی است که مقدار سیلیس آمورف را در جهت عملکرد بهتر پوزولانی، بهینه می‌کند. از طرف دیگر در نظر گرفتن این شرایط بهینه ممکن است موجب تغییرات دانه بندی و سطح مخصوص دانه‌های خاکستر پوسته برنج در جهت غیر بهینه گردد. فراهم کردن شرایطی که عوامل تأثیرگذار، بهینه باشند تا حدی دشوار است و استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن را محدود کرده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق ساده‌سازی استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن است. به این منظور خاکستر پوسته برنج در سه حالت مختلف کنترل شده، نیمه کنترل شده و کنترل نشده تهیه شده و ترکیبات آن‌ها بر اساس آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و ساختار و دانه بندی آن‌ها با آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) تعیین شده است. همچنین آسیاب کردن خاکستر با استفاده از مخلوط کن بتن مورد آزمون قرار گرفته است. پس از بررسی مناسب بودن از نظر شرایط آیین نامه‌ای، این خاکسترها برای ساخت ۵ طرح مخلوط بتن خود تراکم مورد استفاده قرار گرفته و خواص تازه و سخت شده آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع II تولید شده توسط شرکت سیمان بهبهان استفاده شده است. سنگ دانه‌های درشت از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلی‌متر و سنگ دانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر با مدول نرمی (FM) برابر با ۳/۷ از نوع طبیعی شسته و از معادن شهرستان بهبهان تأمین شده است. در شکل ۱ نمودار دانه بندی ریزدانه و درشت دانه به همراه حدود قابل قبول استاندارد ASTM C33 نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Viscosity modifying admixture

۵ وضعیت ظاهری پوسته‌های برنج بعد از سوخت در دو حالت نشان داده شده است.



شکل ۳- پوسته برنج و سوزاندن آن در کوره بتنی محیطی



شکل ۴- کوره مورد استفاده در روش کنترل شده

جدول ۱- نام‌گذاری طرح‌ها و شرایط تولید خاکستر پوسته برنج

نام طرح	شرایط	مدت زمان	
		احتراق (ساعت)	دمای احتراق (سلسیوس)
SCC-C	کنترل شده	۲	۶۰۰
SCC-SC1	نیمه کنترل شده	۲	۵۰۰-۷۰۰
SCC-SC2	نیمه کنترل شده	۴	۶۰۰-۶۵۰
SCC-SC3	نیمه کنترل شده	۴/۵	۵۵۰-۶۰۰
SCC-UC	کنترل نشده	۲/۵	-

برای آسیاب کردن خاکستر پوسته برنج از دستگاه لس آنجلس استفاده شده است. شکل ۶ وضعیت ظاهری خاکستر پوسته برنج آسیاب شده توسط دستگاه را نشان می‌دهد. در طی مراحل سوختن پوسته برنج، مواد آلی سلولزی به سیلیس و کربن برخی ترکیبات دیگر تبدیل می‌شوند و رنگ خاکستر تولید شده قبل از انجام آزمایش XRF می‌تواند بیانگر کیفیت خاکستر تولید شده از نظر وجود سیلیس آمورف باشد. رنگ تیره بیانگر وجود مقدار زیاد کربن نسوخته و رنگ در طیف‌های سفید بیانگر وجود سیلیس کریستالی می‌باشد. رنگ طیف خاکستری به عنوان یک پیش‌آگهی از کیفیت خاکستر پوسته برنج می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. خاکسترهای تولید شده در این تحقیق در طیف رنگ خاکستری قرار داشته‌اند.

پوآز و pH آن در محدوده ۱۲-۱۱ است [۲۳-۲۴]. خاکستر پوسته برنج نیز دارای اثرات اصلاحی بر لزجت بتن خود تراکم است که بر مقدار پودر VMA در نمونه‌های دارای خاکستر پوسته برنج اثر گذار است.

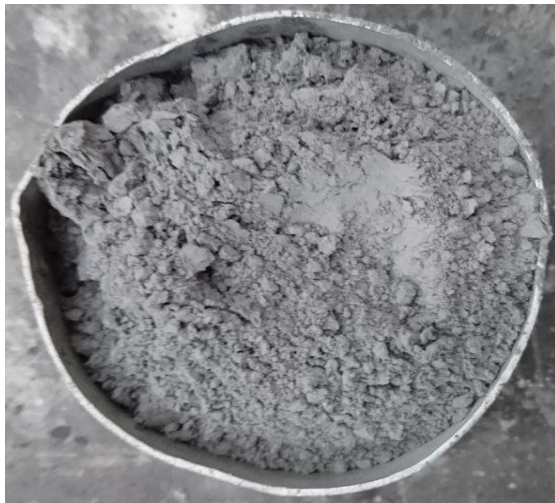
برای تولید انبوه خاکستر به روش سوزاندن «نیمه کنترل شده» و «کنترل نشده» از کوره بتنی محیطی استفاده شده است. دو عبارت نیمه کنترل شده و کنترل نشده در مقابل عبارت کنترل شده به کار گرفته شده است. حالت کنترل نشده می‌تواند تولید خاکستر به صورت عملی و مقرون به صرفه در کوره‌های با دقت کم را بررسی کند.

برای تولید خاکستر پوسته برنج، با توجه به محدوده دمایی بیان شده در مراجع مختلف، دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و زمان ۲ ساعت مبنای قرار گرفته است و سعی شده شرایط سوختن به گونه‌ای تنظیم شود که بتواند عدم دقت در کنترل زمان و دما را نمایندگی کند. به این ترتیب، ۵ حالت برای تولید خاکستر پوسته برنج در نظر گرفته شده است: حالت کنترل شده شامل استفاده از کوره آزمایشگاهی به مدت زمان ۲ ساعت و دمای ثابت  $600^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس، برای شرایط نیمه کنترل شده استفاده از کوره بتنی محیطی در ۳ حالت شامل: الف) مدت زمان ۲ ساعت در محدوده دمایی  $500^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  (ب) مدت زمان ۴ ساعت در محدوده  $500^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  (ج) مدت زمان ۴/۵ ساعت در محدوده  $550^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  (د) برای وضعیت کنترل نشده: مدت زمان ۲،۵ ساعت در دمای کنترل نشده (سوختن آزاد).

در شکل ۳ کوره بتنی محیطی استفاده شده برای حالت‌های کنترل نشده و نیمه کنترل شده و در شکل ۴ کوره آزمایشگاهی استفاده شده برای حالت کنترل شده نشان داده شده است. در جدول ۱ نام‌گذاری نمونه‌های تولید شده به همراه شرایط دمایی و زمانی نشان داده شده است. کوره بتنی به شکل دوار در یک لوله فلزی اجرا شده که مشعل از بالا و کناره‌های کوره وارد می‌شود. برای حالت کنترل شده از کوره آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است که قابلیت تنظیم دما به صورت دقیق‌تری امکان پذیر باشد. برای سنجش دمای کوره از دماسنج دیجیتال استفاده شده است.

پس از اینکه نمونه‌ها سوزانده و جمع‌آوری شدند، ناخالصی‌ها، پوسته‌های نیم‌سوز و سیاه رنگ از خاکستر جدا گردید. در شکل

که نحوه نام گذاری این طرح ها بر اساس شرایط دمایی و زمانی تولید خاکستر بادی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶- خاکستر پودر شده

برای ترکیب مصالح، ابتدا سنگ دانه ها را درون مخلوط کن ریخته و پس از حدود ۱ دقیقه تا نیمی از آب موجود را اضافه و پس از ۱ دقیقه سیمان، خاکستر پوسته برنج، و پودر سنگ به مخلوط اضافه می شود. بعد از ۱ دقیقه، آب باقیمانده همراه با فوق روان کننده اضافه می شود و ۲ دقیقه بعد مخلوط کن متوقف می شود. سپس در صورت نیاز از پودر اصلاح کننده لزجت (VMA) استفاده کرده و آن را به دستگاه اضافه می کنیم. روند کلی ساخت تا قبل از بیرون آوردن مخلوط از مخلوط کن حدود ۵/۵ دقیقه است.

بعد از ترکیب مصالح، برای آزمایش مقاومت فشاری آنها را در قالبهای مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر ریخته و بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای اتاق و زیر پوشش پلاستیکی، نمونه ها به صورت غرقاب تا سن آزمایش در شرایط استاندارد عمل آوری می شوند. تعداد نمونه ها برای هر سن ۳ عدد می باشد و مقدار میانگین به عنوان مقاومت فشاری در سن مورد نظر گزارش گردیده است.

جدول ۲- طرح اختلاط بتن خودتراکم برای ساخت یک متر مکعب

W/P	W/CM	W/C	VMA (gr)	فوق روان کننده (kg)	پودر سنگ آهک (LSP <sup>1</sup> ) (kg)	پودر شن بادی (kg)	شن نخودی (kg)	ماسه (kg)	خاکستر (RHA) (kg)	آب (W) (kg)	سیمان (C) (kg)
۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۴۸	۱۸۱	۵/۷۵	۱۷۵	۲۱۲	۴۹۴	۸۶۲	۴۰	۱۷۵	۳۶۰

<sup>1</sup> Limestone powder



الف) مدت زمان ۲ ساعت در محدوده دمایی ۵۰۰ °C تا ۷۰۰ °C



ب) مدت زمان ۴ ساعت در محدوده دمایی ۶۰۰ °C تا ۶۵۰ °C

شکل ۵- خاکستر حاصل از سوختن پوسته به روش سوزاندن نیمه کنترل شده

## ۲-۲- ساخت نمونه ها

برای ساخت یک متر مکعب بتن خود تراکم از ترکیبات نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است مقدار ۴۰ کیلوگرم خاکستر پوسته برنج به طرح اضافه گردیده که معادل ۱۰ درصد سیمان موجود در طرح است. با تغییر نوع خاکستر در مجموع ۵ طرح مختلف ساخته شده است

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خواص خاکستر پوسته برنج

##### ۳-۱-۱- ترکیبات

سلسیوس به صورت نیمه کنترل شده سوخته مقدار سیلیس ۸۴/۶۵ درصد و افت وزنی حرارتی کمتر از ۱۰ درصد است که نشان می‌دهد متناسب با نوع کوره و شرایط سوزاندن هوادهی نسبتاً مناسبی داشته است و هر دو مقدار در محدوده مجاز آیین نامه قرار دارند. مقدار  $K_2O$  این نمونه ۲/۰۳ درصد می‌باشد که بیانگر تبدیل مقادیر بیشتر از  $K_2O$  به کربن است. وجود  $K_2O$  در خاکستر بادی به عنوان یک کاتالیست برای تبدیل سیلیس آمورف به حالت کریستالی عمل می‌کند؛ بنابراین هرچه مقدار آن کمتر باشد بر رفتار پوزولانی خاکستر پوسته برنج تأثیر بهتری دارد [۲۳]. در نمونه‌ای که در مدت زمان ۲۷۰ دقیقه در محدوده دمایی ۵۵۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس با دو شعله در کوره بتنی محیطی سوزانده شده مقدار سیلیس، افت وزنی حرارتی و مقدار  $K_2O$  به ترتیب ۷۸/۶۶، ۱۰/۴۵ و ۶/۰۹ درصد است.

برای ارزیابی ترکیبات خاکستر پوسته برنج از آزمایش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده گردید. نتایج این آزمایش برای انواع خاکستر تولید شده در شرایط مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس استاندارد ASTM C618 مجموع  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  موجود در خاکستر پوسته برنج به عنوان یک پوزولان دسته N باید بیشتر از ۷۰ درصد باشد [۲۲]. همانطور که از مقادیر جدول ۲ مشخص است مجموع این مقادیر برای همه نمونه‌ها بالاتر از ۷۰ درصد است. بر اساس استاندارد ASTM C618 مقدار LOI نیز باید حداکثر ۱۰ درصد باشد. در نمونه‌ای که در مدت زمان ۲۴۰ دقیقه در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه

جدول ۳- نتایج آنالیز XRF نمونه‌های خاکستر پوسته برنج

LOI	ترکیبات (%)											نمونه
	$P_2O_5$	MnO	$TiO_2$	MgO	$K_2O$	$Na_2O$	CaO	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$		
۲/۳۵	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۷۴	۲/۹۳	۰/۳۶	۱/۰	۰/۱۵	۰/۲۵	۹۱/۶۸	C	
۹/۴۲	۰/۶۵	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۹۰	۲/۱۲	۰/۳۰	۱/۰۳	۰/۳۱	۰/۵۴	۸۳/۹۱	SC1	
۱۰/۴۵	۱/۵۱	۰/۰۶	۰/۰۹	-	۶/۰۹	-	۱/۴۳	۰/۳۰	-	۷۸/۶۷	SC2	
۹/۳۵	۰/۶۲	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۸۴	۲/۰۳	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/۲۲	۰/۵۸	۸۴/۶۵	SC3	
۱۱/۱۲	۲/۴۳	۰/۰۹	۰/۰۴	۲/۳۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۳/۲۶	۰/۳۶	۰/۴۸	۷۳/۷۳	UC	

قوی‌تر است در این پژوهش استفاده شده است. در شکل ۷ تصویر همچنین نمونه‌ای که در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه در دمای کنترل نشده با یک شعله در کوره بتنی محیطی سوخته است میزان سیلیس، افت وزنی حرارتی و  $K_2O$  آن به ترتیب ۷۳/۷۳ درصد و ۱۱/۱۲ درصد و ۴/۷۵ درصد است که نشان دهنده هوادهی نامناسب در کوره بتنی است زیرا درصد سیلیس پایین و افت وزنی حرارتی بالاست.

همچنین نمونه‌ای که در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه در دمای کنترل نشده با یک شعله در کوره بتنی محیطی سوخته است میزان سیلیس، افت وزنی حرارتی و  $K_2O$  آن به ترتیب ۷۳/۷۳ درصد و ۱۱/۱۲ درصد و ۴/۷۵ درصد است که نشان دهنده هوادهی نامناسب در کوره بتنی است زیرا درصد سیلیس پایین و افت وزنی حرارتی بالاست.

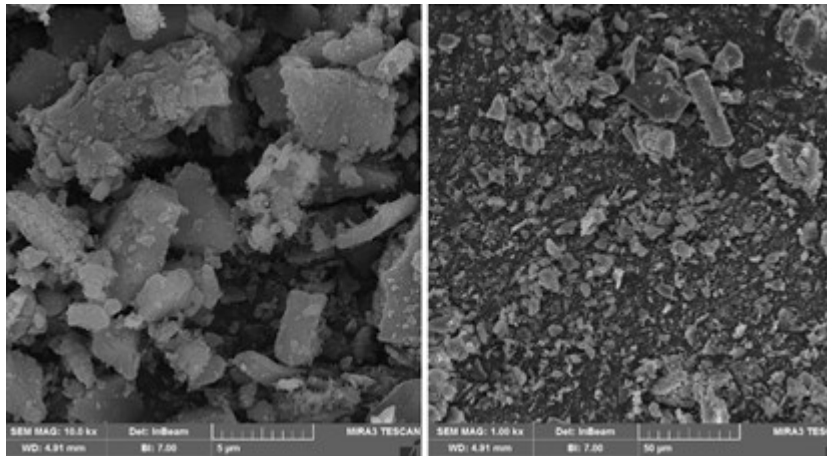
##### ۳-۱-۲- دانه بندی

مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ تا حدی عملکرد مناسب‌تر دستگاه لس آنجلس از نظر توزیع دانه بندی خاکستر پوسته برنج را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن محدوده اندازه ذرات و متوسط آن‌ها از نرم افزار Digimizer برای تعیین اندازه استفاده می‌شود. شکل ۹ خروجی نرم افزار را در مقایسه اندازه ذرات دو حالت آسیاب نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۹ که پردازش آماری آن در جدول ۴ داده شده است، محدوده اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج که به

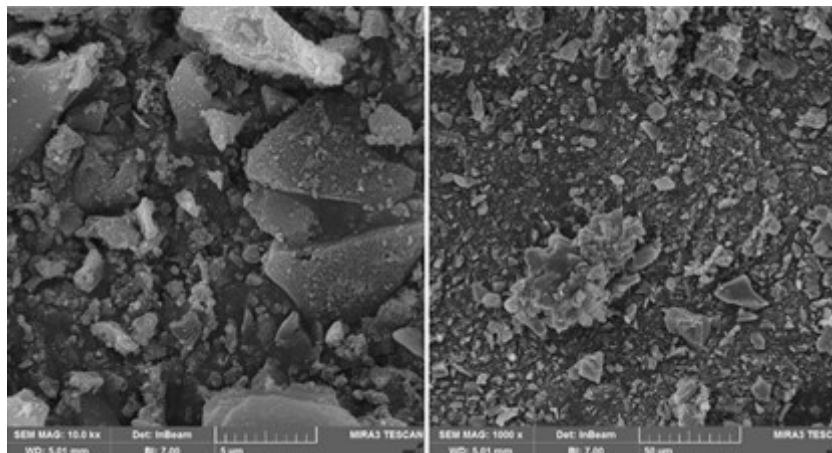
برای بررسی دقیق‌تر وضعیت دانه بندی و توزیع آن‌ها از تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی استفاده گردید. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) که قدرت تصویربرداری‌هایی از اندازه میکرومتر تا میزان نانومتر ذرات را دارا است و از میکروسکوپ الکترونی روبشی بسیار



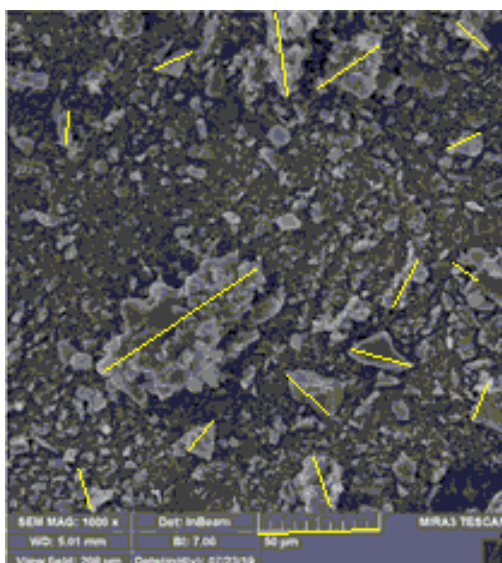
مدت ۱۰ دقیقه با استفاده از دستگاه لس آنجلس با تعداد ۳۲ گوی است. نرمی این نمونه بر حسب آزمایش بلین، ۲۸۴ کیلوگرم بر متر فلزی به قطر ۵ تا ۱,۵ سانتی متر آسیاب شده است تا ۳۷ میکرون مربع به دست آمد.



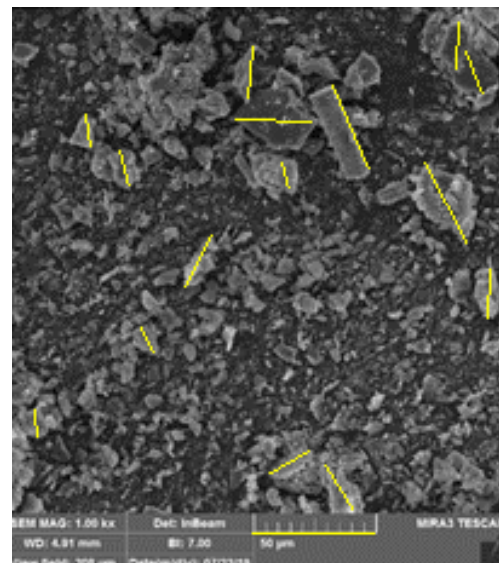
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از خاکستر پوسته برنج آسیاب شده به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه لس آنجلس



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از خاکستر پوسته برنج آسیاب شده به مدت ۱۵ دقیقه در مخلوط کن بتن



خاکستر آسیاب شده در مخلوط کن بتن



خاکستر آسیاب شده در دستگاه لس آنجلس

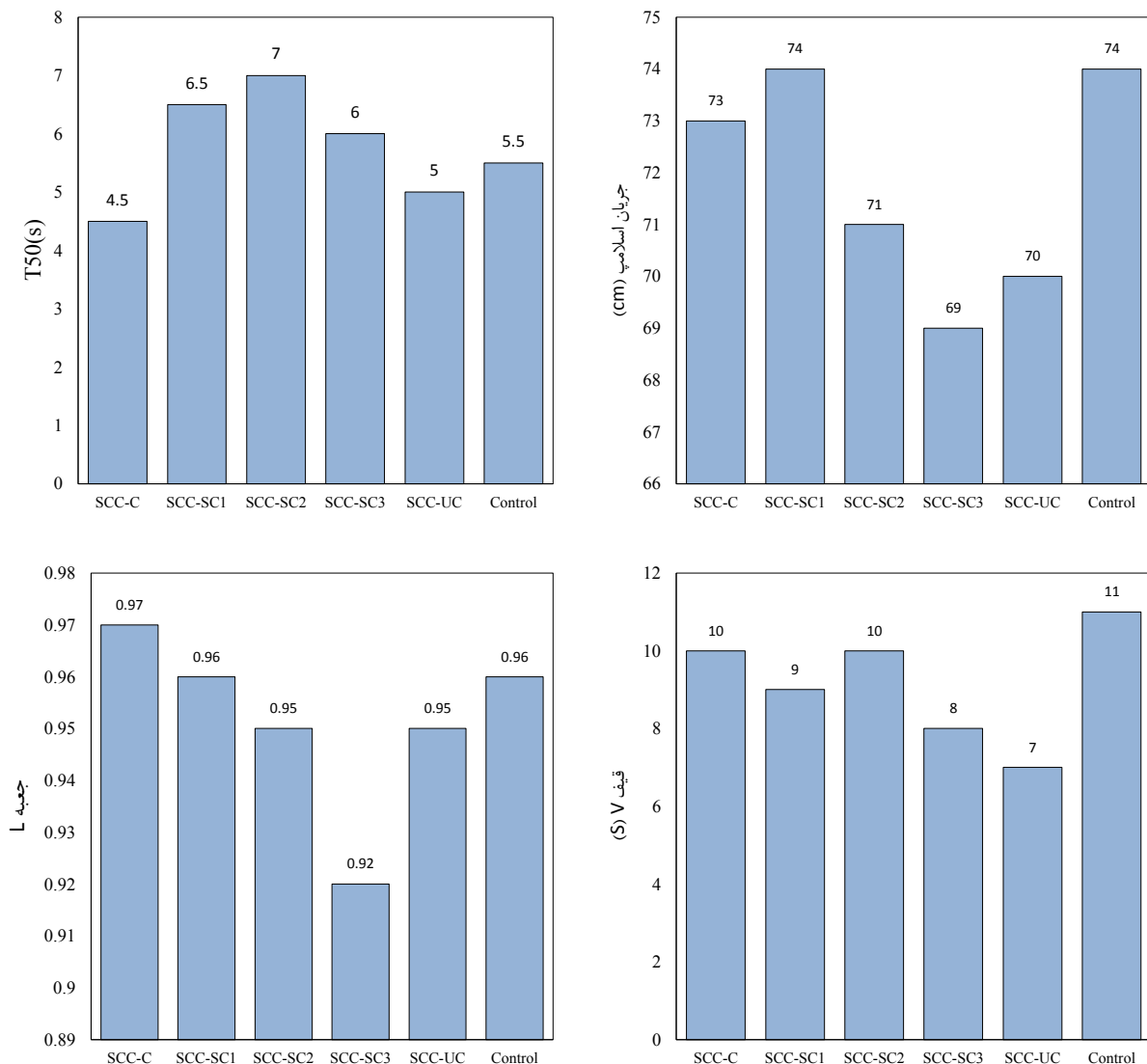
شکل ۹- پردازش اندازه ذرات در عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی در نرم افزار Digimizer

جدول ۴- مشخصات اندازه ذرات در دو حالت با آسیاب (لس آنجلس) بدون آسیاب (با مخلوط کن)

شرایط آسیاب	میانگین اندازه ذرات ( $\mu\text{m}$ )	انحراف معیار ( $\mu\text{m}$ )	حداقل ( $\mu\text{m}$ )	حداکثر ( $\mu\text{m}$ )
لس آنجلس به مدت ۱۰ دقیقه	۲۱/۰۷۸	۸/۵۶	۱۱/۳۶	۳۷/۸۹
مخلوط کن بتن به مدت ۱۵ دقیقه	۲۴/۰۸۵	۱۵/۶۴	۱۲/۸۰	۷۵/۸۷

برای خاکستری که به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از مخلوط کن بتن که با سنگ‌دانه‌ها بارگیری شده است آسیاب گردید محدوده اندازه ذرات تا ۷۵ میکرون است. بلین این نمونه ۲۳۳ مترمربع بر کیلوگرم بدست آمد که نسبت به نمونه‌ی قبلی، نرمی کمتر خاکستر بدست آمده را نشان می‌دهد. میانگین و همچنین انحراف

معیار اندازه ذرات بدست آمده از روش لس آنجلس نشان می‌دهد که این روش موجب تولید خاکستر با اندازه یکنواخت‌تری می‌گردد که با توجه به انتظاری که به عنوان ماده چسباننده از خاکستر پوسته برنج می‌رود، ماده حاصل کارایی بهتری خواهد داشت.

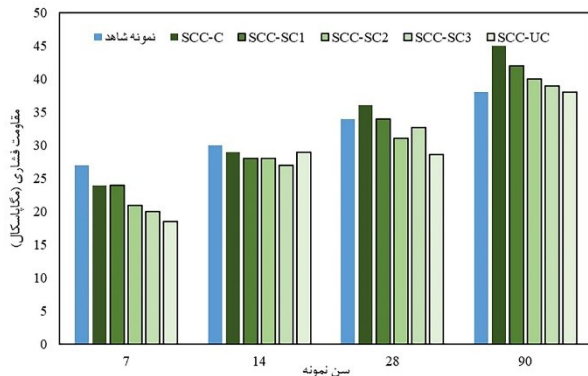


شکل ۱۰- نتایج آزمایش‌های بین تازه شامل جریان اسلامپ، T50، قیف V و جعبه L

در هر صورت اندازه‌ی خاکستر در هر دو حالت، جهت اختلاط با سیمان مناسب است؛ زیرا ریزی زیاد باعث نیاز آب زیاد و ریزی کم باعث تأخیر در فعالیت پوزلانی می‌شود. بنابراین باید از ریز کردن بیش از حد خاکستر اجتناب کرد چون که فعالیت پوزلانی



کرده‌اند.[۲۴]. در واقع دلیل این کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد تأخیر در شروع واکنش‌های پوزولانی است. از اثر پرکنندگی خاکستر پوسته برنج که موجب کاهش خلل و فرج بتن سخت شده می‌گردد به‌عنوان دلیل دیگر افزایش مقاومت بتن حاوی RHA ذکر شده است[۲۵].



شکل ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش در سنین مختلف

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان طرح اختلاط با خاکستر پوسته برنج در بتن خود تراکم مورد بررسی قرار گرفته است. متغیر اصلی نحوه تولید خاکستر پوسته برنج بود که بر اساس نحوه کنترل دما و مدت زمان سوختن پوسته برنج به سه حالت کنترل نشده، نیمه کنترل شده و کنترل شده تقسیم گردید. خواص خاکستر تولید شده، خواص بتن تازه و همچنین مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و در مجموع نتایج زیر حاصل گردیده است:

- خاکستر پوسته برنج به‌دست آمده از سه روش استفاده شده در این تحقیق، در محدوده ضوابط تعیین شده استاندارد برای در نظر گرفتن به عنوان ماده پوزولانی قرار دارد؛ به‌طوری که مجموع اکسیدهای سیلیس، آهن و آلومینیوم موجود در آنها بالاتر از ۷۰ درصد بوده است و همچنین افت سرخ‌شدگی آنها نیز تقریباً در محدوده مرزی استاندارد قرار داشت.

- نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خود تراکم نشان داد که استفاده از این خاکستر به میزان ۱۰ درصد جایگزینی با سیمان، مقاومت فشاری بتن را در بدترین حالت حداکثر به میزان ۱۵ درصد کاهش می‌دهد.

- با توجه به اندازه دانه‌های خاکستر پوسته برنج به‌دست آمده در

خاکستر پوسته برنج عمدتاً از سطح داخلی ذرات به‌دست می‌آید و ریزی زیاد کمک چندانی نمی‌کند. اندازه ذرات تا ۷۵ میکرون رفتار پوزولانی قابل قبولی دارد [۲۲].

#### ۳-۲- خواص بتن تازه (کارایی)

نتایج آزمایش‌های بتن تازه برای ۵ حالت گفته شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج آزمون‌های جریان اسلامپ، T50، قیف V و جعبه L نشان می‌دهد که تغییر نوع خاکستر تأثیر قابل توجه و معنی داری بر نتایج نداشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ثابت بودن میزان خاکستر و دانه‌بندی نسبتاً یکسان آن‌ها باعث شده است که نتایج آزمون‌های تازه چندان متأثر از نوع خاکستر پوسته برنج نباشد.

#### ۳-۳- مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر و عمل‌آوری شده در آب برای سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به‌صورت کلی از نتایج مشاهده می‌شود که خاصیت پوزولانی ماده افزودنی (خاکستر پوسته برنج) موجب شده که مقاومت فشاری همه نمونه‌های حاوی خاکستر بادی در سن ۹۰ روزه به‌دلیل واکنش‌های پوزولانی، بیشتر از نمونه شاهد باشد. در این سن نمونه‌ی حاوی خاکستر پوسته برنج تولید شده در شرایط کنترل شده، مقاومتی حدود ۱۸ درصد بیشتر از نمونه شاهد داشته است. کمترین رشد مقاومت مربوط به نمونه کنترل نشده بوده است که تقریباً ۳ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد را نشان داده است. در سن ۷ روزه مشاهده می‌شود که به‌دلیل تأخیر در واکنش‌های پوزولانی و همچنین خاصیت رقیق‌کنندگی خاکستر پوسته برنج (به‌دلیل کاهش مواد سیمانی به میزان ۱۰ درصد) مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. مقدار این کاهش در بتن حاوی خاکستر کنترل نشده بیشتر و تا میزان ۲۵ درصد بوده است. دلیل بیشتر بودن مقاومت برای نمونه‌های حاوی خاکستر کنترل شده نسبت به کنترل نشده، وجود مقدار بیشتر سیلیس آمورف و اثر آن بر افزایش واکنش‌های پوزولانی بوده است. مدندوست و همکاران با جایگزینی ۲۰ درصد از سیمان با RHA کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت (۳ روزه) بتن را به میزان ۳۵ درصد نسبت به نمونه شاهد گزارش

Cement and concrete research, 2003. 33(8): p. 1203-1210.

[7] Jittin, V., A. Bahurudeen, and S. Ajinkya, Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. *Journal of cleaner production*, 2020. 263: p. 121578.

[8] Kwan, W.H. and Y.S. Wong, Acid leached rice husk ash (ARHA) in concrete: A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2020. 3: p. 501-507.

[9] Patil, R., R. Dongre, and J. Meshram, Preparation of silica powder from rice husk. *Journal of Applied Chemistry*, 2014. 27: p. 26-29.

[10] Thomas, B.S., Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 82: p. 3913-3923.

[11] Nzereogu, P., et al., Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 2023: p. 100111.

[12] Mehta, P. The chemistry and technology of cements rice husk ash made from rice husk ash. in *Proc. Unido-Escap/RCTT Workshop on Rice Husk Ash Cement*, 1979. 1979.

[13] Bahri, S., H. Mahmud, and P. Shafiqh, Effect of utilizing unground and ground normal and black rice husk ash on the mechanical and durability properties of high-strength concrete. *Sādhanā*, 2018. 43: p. 1-12.

[14] Ramezaniapour, A., M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni, The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes. 2009.

[15] Mayooraan, S., S. Ragavan, and N. Sathiparan, Comparative study on open air burnt low-and high-carbon rice husk ash as partial cement replacement in cement block production. *Journal of Building Engineering*, 2017. 13: p. 137-145.

[16] Venkatanarayanan, H.K. and P.R. Rangaraju, Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete. *Cement and concrete composites*, 2015. 55: p. 348-363.

[17] Salas, A., et al., Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. *Cement and concrete research*, 2009. 39(9): p. 773-778.

[18] Bie, R.-S., et al., Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. *Cement and Concrete Composites*, 2015. 55: p. 162-168.

[19] Antiohos, S., V. Papadakis, and S. Tsimas, Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and

این تحقیق (هم شرایط کنترل شده و هم شرایط کنترل نشده) و همچنین دیگر خواص آن مشخص است که این دانه‌ها در محدوده اندازه میکرو سیلیس (بزرگتر از ۱۰ میکرومتر) می‌باشد و با توجه به اینکه در مناطقی که دارای مزارع برنج هستند، قیمت تمام شده تولید RHA می‌تواند کمتر از میکروسیلیس باشد، می‌توان از آن بجای میکروسیلیس برای تولید بتن پوزولانی استفاده کرد.

– با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که از خاکستر پوسته برنج می‌توان در تهیه بتن با مقاومت بالا استفاده کرد و به عنوان یک جایگزین مناسب برای ژل میکروسیلیس آن را در نظر گرفت.

## ۵- تقدیر و تشکر

این مطالعه با حمایت شرکت پالایش گاز بید بلند صورت گرفته است. تولید خاکستر کنترل شده در آزمایشگاه مهندسی مواد گروه مکانیک و ساخت و آزمایش‌های بتن در مرکز بتن‌های خاص (SCC) دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان انجام شده است. به این وسیله از این مجموعه‌ها سپاسگزاری می‌شود.

## ۶- مراجع

[1] Chaitanya, M., et al., Strength and micro-structural performance of geopolymer concrete using highly burned rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

[2] Hosseini, S.A., F. A Khankahdani, and S.A.H. Moosavinezhad, Effect of Acidic Environments Containing Hydrochloric Acid on Rubberized Concrete. *International Journal of Engineering*, 2023. 36(12): p. 2198-2206.

[3] Hosseini, S.A., Seawater curing effects on the permeability of concrete containing fly ash. *Advances in Concrete Construction*, 2022. 14(3): p. 205.

[4] Khan, M.A., et al., Investigating the feasibility of producing sustainable and compatible binder using marble waste, fly ash, and rice husk ash: a comprehensive research for material characteristics and production. *Results in Engineering*, 2023. 20: p. 101435.

[5] Kone, B., J.N. Mwero, and E.K. Ronoh, Experimental effect of cassava starch and rice husk ash on physical and mechanical properties of concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2022. 70(2): p. 343-350.

[6] Nehdi, M., J. Duquette, and A. El Damatty, Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete.

- concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and concrete research*, 2014. 61: p. 20-27.
- [20] Safiuddin, M., J. West, and K. Soudki, Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, 2012. 30: p. 833-842.
- [21] Le, H.T. and H.-M. Ludwig, Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. *Materials & Design*, 2016. 89: p. 156-166.
- [22] Concrete, A.C.C.-o. and C. Aggregates, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. 2013: ASTM international.
- [23] Feng, Q., et al., Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and concrete research*, 2004. 34(3): p. 521-526.
- [24] Madandoust, R., et al., Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. *Biosystems engineering*, 2011. 110(2): p. 144-152.
- [25] Jamil, M., et al., Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. *Construction and Building Materials*, 2013. 47: p. 588-593.

## Workability and compressive strength of self-compacting concrete containing rice husk ash from controlled and uncontrolled burning condition

Sasan Motaghd \*  
Assistant professor, Department of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology,  
Behbahan, Iran.

Ali Rastegar  
MSc, Department of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Seyed Abbas Hosseini  
Assistant professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran.

### Abstract

Rice husk as an agricultural waste material has a large amount of amorphous silica, adding its ash to concrete increases the pozzolanic property of concrete and consequently increases the strength and durability of reinforced concrete structures. The quality and method of rice husk ash preparation greatly influence the final properties of the concrete prepared from it. In this article, rice husk ash has been burned in controlled, semi-controlled, and uncontrolled conditions in terms of temperature conditions, and the resulting ash has been used as a 10% substitute for cement in self-compacting concrete. Properties related to concrete performance and compressive strength of samples containing rice husk ash at different ages have been evaluated. The properties of rice husk ash powder have been determined through XRF, FESEM, and the determination of grain size range. The results show that in all cases the sum of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  is higher than 70%; which indicates being within the standard range of pozzolanic cement materials. In the semi-controlled state, the amorphous silica is more than 8%. Based on the results, adding rice husk ash increases the long-term compressive strength (90 days) and decreases the short-term compressive strength of self-compacting concrete. The increase in long-term strength for samples with ash produced in controlled conditions was more and up to 18%. The reduction of short-term compressive strength for samples with uncontrolled ash has been obtained up to 25%.

**Keywords:** Rice husk ash, workability, self-compacting concrete, compressive strength, particle size distribution.

---

\* Corresponding Author: motaghd@bkatu.ac.ir