فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۴۰۰

کاربرد بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در تولید آجرنمای بتنی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

سبا نائیج[۱،*]، محسن سرتیپی‌پور[۲]، علیرضا رحمتی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

[۲] استاد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

[۳] رئیس کمیته فنی کانون انجمن‌های صنفی بتن آماده ایران، استاد مدعو دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* s.naeej@mail.sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۹ اسفند ۱۳۹۹

پذیرش: ۰۷ اردیبهشت ۱۴۰۰

صفحه ۴۹ تا صفحه ۶۳

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

چکیده:

هدف پژوهش صورت‌گرفته، تولید آجرنمای بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج[۱] و فاقد سیمان پرتلند می‌باشد. آلایندگی صنعت سیمان سهمی ۸ درصدی در تولید کل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های جهان دارد. امروزه جایگزینی پوزولان‌های آلومینوسیلیکاتی که با عنوان مواد مکمل سیمان[۲] در جهان شناخته می‌شوند، نقش قابل توجهی در کاهش تولید و استفاده از سیمان پرتلند دارند. نوآوری این تحقیق جایگزینی صد درصدی خاکستر پوسته‌ی برنج و حذف کامل سیمان پرتلند بوده و نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با استفاده از مقادیر $350\ kg/m^3$ و $400\ kg/m^3$ خاکستر، محلول قلیایی فعالساز[۳] سدیم هیدروکسید ۱۰ و ۱۶ مولار در ترکیب با محلول سدیم سیلیکات، ریزدانه (ماسه) و افزودنی تولید شده است و در دو شرایط مختلف ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری حرارتی شده است. در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت محلول قلیایی به خاکستر برابر ۰/۴۵ و نسبت کلی آب به خاکستر برابر ۰/۴۲ می باشد. در نهایت ۸ نمونه‌ی تولید شده مطابق استاندارد ملی ۳-۱۶۰۸ در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری و مطابق استاندارد ملی ۱۴۷۳۳ در ۲۸ روز مورد آزمایش جذب آب قرار گرفتند که بهترین طرح اختلاط برای ساخت آجرنمای بتن ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقادیر خاکستر و مولاریته محلول قلیایی، کارپذیری بتن کاهش یافته و چسبندگی و ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد. بالاترین مقاومت کسب شده نمونه مکعبی در سن ۲۸ روز معادل ۲۹/۲ مگاپاسکال مربوط به نمونه با عیار $400\ kg/m^3$ خاکستر و محلول ۱۶ مولار بوده که در ۹۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده است. با کاهش مقدار خاکستر به $350\ kg/m^3$ و حفظ سایر مولفه‌ها، مقامت فشاری نمونه مکعبی با کاهش ۴۲ درصدی به عدد ۱۶/۸ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی تاثیر قابل توجه آن بر مشخصات مکانیکی بتن تولیدشده است. کم‌ترین درصد جذب آب نیز معادل ۳/۴۶ ٪ و مربوط به نمونه با $400\ kg/m^3$ خاکستر و محلول قلیایی ۱۶ مولار بوده که با کاهش خاکستر به $350 kg/m^3$ و حفظ سایر مولفه‌ها، درصد جذب آب به عدد ۵/۲۳ ٪ افزایش یافت.

کلیدواژه:

بتن ژئوپلیمری، خاکستر پوسته برنج، پوزولان، آجرنمای بتنی

کد DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4

[۱] Rice Husk Ash

[۲] Supplementary Cementitious material

[۳] Alkali activator

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

۱- مقدمه:

در سال ۱۹۷۲ محقق فرانسوی ژوزف دیوید اوویتس[۱] فرآیند بسپارش یا پلیمره‌سازی را کشف کرد و ۱۱ سال بعد منجر به تولید سیمان‌های ژئوپلیمری شد. [۱] ایده‌ی توسعه‌ی بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر تولید مصالح ساختمانی با استفاده از پسماند صنایع مختلف است که از طرفی منجر به تولید مواد ارزان‌تر شده و از سویی دیگر با استفاده‌ی مجدد پسماندها و همچنین مصرف انرژی کمتر و تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای به محیطزیست کمک شایانی خواهدکرد. [۲] مکانسیم برقراری پیوند در بتن‌های سیمان پرتلندی براساس واکنش هیدراتاسیون و تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) می‌باشد. اما فرآیند بسپارش که در تشکیل پیوند ژئوپلیمرها موثر است یک واکنش شیمیایی نسبتاً سریع مبتنی بر واکنش مواد آلومینوسیلیکاتی است که منجر به ایجاد یک ساختار حلقه‌ای پلیمری سه‌بعدی از پیوندهای Si-O-Al-O می‌شود. این ژئوپلیمر مبتنی بر آلومینوسیلیکات به عنوان اکسید آلومینات سیلیکون یا سیالیت[۲] نامیده می‌شود. [۳]

سرباره کوره آهن‌گدازی[۳]، خاکستربادی[۴]، خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیسی[۵] به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین ژئوپلیمرها محسوب می‌شوند. [۴] واکنش پلیمریزاسیون در شرایط عمل‌آوری در دمای محیط سرعت بالایی نداشته و روند کسب مقاومت آن آهسته‌تر از هیدراتاسیون و بتن‌های متداول می‌باشد. اما در شرایط عمل‌آوری حرارتی که برای بتن‌های ژئوپلیمری امری متداول است، فرآیند بسپارش و در نتیجه کسب مقاومت تسریع می‌شود و نسبت به روند کسب مقاومت بتن‌های متداول پیشی می‌گیرد. [۵]

خاکستر پوسته برنج به‌عنوان پسماند صنعت کشاورزی منبع غنی از سیلیس بوده و یکی از مواد ژئوپلیمری می‌باشد که از احتراق پوسته برنج حاصل می‌شود. هر تن شالی برنج تقریباً ۲۰۰ کیلوگرم پوسته برنج تولید می‌کند که در اثر احتراق حدود ۴۰ تا ۵۰ کیلوگرم خاکستر تولید می‌شود. [۶] پوسته‌ی برنج حاوی حدود ۵۰٪ سلولز، ۲۵-۳۰ ٪ لیگنین و ۱۵-۲۰ ٪ سیلیس است. در فرآیند احتراق، سلولز و لیگنین از بین می روند و سیلیس را برجای می‌گذارند. هنگامی که پوسته برنج احتراق کامل پیدا کند، خاکستر پوسته برنج (RHA) تولید می‌شود. دمای کنترل‌شده، تهویه مناسب و شرایط کوره و سرعت سردشدن بر روی کیفیت خاکستر تاثیرگذار است. پوسته‌ای که فرآیند احتراق آن کامل و مناسب باشد به رنگ خاکستری روشن است، درحالی‌که خاکستری که حاصل احتراق نامناسب است تا حدی سوخته و مایل به سیاه است که نشان‌دهنده‌ی تبدیل آن به کربن است. [۷] خاکستری که در دمای بالای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان طولانی تولید شده باشد، دارای سیلیس بلوری و کربن فعال بوده و واکنش‌پذیری مناسبی برای تولید بتن‌های ژئوپلیمری ندارد. سیلیس(SiO_2) اساسی‌ترین ماده‌ی موجود در خاکستر پوسته‌ی برنج است. میزان فعالیت خاکستر تحت تاثیر ساختار سلولی سیلیس موجود در خاکستر است. فرم بلوری و بی‌شکل (آمورف) سیلیس خواص متفاوتی دارند. بنابراین

[۱] Prof. Joseph Davidovits
[۲] sialite
[۳] Ground Granulated Blast Furnance Slag (GGBS)
[۴] Fly Ash
[۵] Silica Fume

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

تولید خاکستر با سیلیس آمورف حداکثری از اهمیت بالا برخوردار است زیرا فرم بلوری سیلیس منجر به تولید خاکستر با واکنش‌پذیری کم می‌شود. [۷] خاکستر ماده‌ای بسیار نرم و ریز است و اندازه متوسط ذرات آن حدود ۱۰μm است. [۸] وزن مخصوص، اندازه متوسط ذرات و درجه نرمی (Blaine) خاکستر از جمله ویژگی‌های فیزیکی است که بر روی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری با پایه RHA تاثیرگذار است. [۹] مورفولوژی متخلخل RHA به‌دلیل احتراق مواد آلی موجود در ترکیبات آن بوده و موجب بیشتر شدن افت حرارتی (LOI) می‌شود. [۱۰] کیفیت خاکستر تا حد زیادی تحت تاثیر ساختار متخلخل ذرات، اندازه ذرات و سطح مخصوص آن می‌باشد. همچنین سرعت خنک‌شدن بر تخلخل، اندازه‌ی ذرات و میزان آمورف یا کریستالی بودن آن تاثیرگذار است. وقتی خاکستر به سرعت سرد شود اندازه‌ی ذرات کاهش‌یافته و واکنش‌پذیری افزایش می‌یابد. [۱۱] محدوده‌ی کلی که برای خواص پوزولانی مدنظر است، ذرات بین ۵/۶ میکرون تا ۴۵ میکرون می‌باشد و گفته شده ذرات زیر ۵/۶ میکرون در واکنش شرکت نمی کنند. [۱۱] همچنین محدوده‌ای که برای چگالی ظاهری RHA مدنظر است، kg/m^3 ۹۰–۱۵۰ می‌باشد، که نشان‌دهنده‌ی ساختار پیچیده و متخلخل آن بوده که هوا را به دام می‌اندازد. حفره‌های روی خاکستر برحسب ابعاد شامل سه دسته منافذ ماکرو (قطر بیش از ۵۰ نانومتر)، منافذ مِزو (بین ۲ تا ۵۰ نانومتر) و منافذ میکرو (قطر کمتر از ۲ نانومتر) می‌باشد، که منافذ مزو و میکرو روی سطح ویژه و نرمی تاثیرگذار هستند. [۱۲]

واکنش خاکستر و ایجاد پیوند پلیمره سازی در بتن ژئوپلیمری همچنین نیاز به محلول‌های قلیایی دارد. در این نوع بتن آب نقشی در فعال‌سازی مواد پوزولانی و برقراری پیوند ندارد، بلکه آب اضافه[۱] برای تامین کارپذیری به مخلوط اضافه می‌شود. غلظت و نوع محلول قلیایی نقش مهمی در خواص این نوع بتن دارد.

از جمله محلول‌های قلیایی که در بتن‌های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات و ترکیب پتاسیم هیدروکسید با پتاسیم سیلیکات اشاره نمود که ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات، متداول‌ترین محلول قلیایی استفاده شده برای ساخت بتن ژئوپلیمری می‌باشد. [۱۳] به‌همین دلیل از این ترکیب به‌عنوان محلول قلیایی در این پژوهش استفاده گردیده است. همچنین پژوهش دیگر محققان بیانگر آن است که استفاده از ترکیب دو محلول سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نسبت به استفاده از ترکیب دو محلول پتاسیم هیدروکسید و پتاسیم سیلیکات می‌گردد زیرا سود، ظرفیت آزاد کردن بیشتر سیلیکات و مونومر آلومینات را به همراه دارد. [۱۴، ۱۵]

سنگدانه یکی از اجزای اصلی بتن است که مقاومت، کارپذیری و مشخصات مکانیکی بتن تا حد زیادی تحت‌تاثیر نوع سنگدانه‌ی به‌کار رفته در آن است. در تولید بتن‌های ژئوپلیمری ترکیبی از ریزدانه و درشت‌دانه با دانه‌بندی استاندارد مدنظر است که ویژگی آن‌ها در استاندارد ASTM C136 و استاندارد ملی ۳۰۲ آمده است. ماسه‌های رودخانه‌ای شسته شده و الک‌شده با دانه‌بندی مناسب برای

[۱] Extra water

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

ساخت نمونه‌های باکیفیت توصیه می‌شود. تحقیقات برروی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی حاکی از آن است که مقدار بهینه سنگدانه برای بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی و سرباره حدود ۷۰ تا ۷۳ درصد می‌باشد. [۱۶]

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

۲-۱-۱- خاکستر پوسته برنج

در این تحقیق خاکستر پوسته برنج به عنوان ماده چسباننده مورد استفاده قرار گرفته که از شرکت گیلان کشت خریداری شده است. بر اساس اطلاعات شرکت، خاکستر تولیدشده حاصل احتراق پوسته برنج در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲۰ دقیقه می‌باشد. همچنین خاکستر به مدت ۴۵ تا ۹۰ دقیقه در آسیاب گلوله‌ای (Ball mill) آسیاب می‌شود تا دانه‌بندی مناسب حاصل شود. آنالیز شیمیایی خاکستر خریداری‌شده در جدول ۱ آمده است.

جهت بررسی ساختار و مورفولوژی خاکستر، آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی، پراش اشعه ایکس (XRD) در دانشکده متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج

مشخصه	مقدار
SiO_2	۹۰/۴۸
Al_2O_3	۰/۰۱
Fe_2O_3	۰/۲۱
CaO	۱/۰۲
SO_3	۰/۷۸
MgO	۰/۷۷
Na_2O	۰/۰۲
K_2O	۱/۹۰
P_2O_5	۱/۱۰
LOI	۳/۷۳
Blaine (Cm^2/g)	۸۷۶۰
مانده بر الک ۴۵ میکرون	٪ ۷/۵

شکل ۱- از چپ تصویر پوسته‌ی برنج قبل از سوختن، خاکستر پوسته‌ی برنج آسیاب‌نشده و خاکستر آسیاب‌شده

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

همچنین آسیاب ذرات، تعیین چگالی به روش بالن لوشاتلیه و تعیین سطح ویژه در آزمایشگاه و بخش کنترل کیفیت کارخانه سیمان بجنورد انجام گرفته است. چگالی نسبی خاکستر با روش بالن لوشاتلیه و با استفاده از نفت سفید مطابق استاندارد ملی ۷۱۴۸ و استاندارد ASTM C188 اندازه‌گیری شده است.

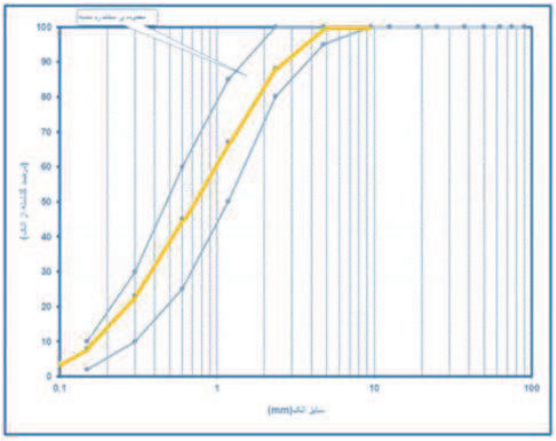
۲-۱-۲- محلول قلیایی فعالساز

محلول قلیایی مورد استفاده در این پژوهش ترکیب محلول سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) و محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) با نسبت ۲/۵ می‌باشد. محلول سدیم سیلیکات صنعتی با نسبت SiO_2/Na_2O معادل ۲/۱، با غلظت ۴۰ درصد و چگالی نسبی ۱/۴۵ مورد استفاده قرار گرفته است. محلول سدیم هیدروکسید با استفاده از سود پرک با خلوص ۹۹ درصد تهیه شده است. برای تولید ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول، ۱۰ و ۱۶ مولار سدیم هیدروکسید به ترتیب ۴۰ و ۶۴ گرم سودپرک مورد استفاده قرار می‌گیرد. محلول سدیم هیدروکسید ۲۴ ساعت قبل از اختلاط تهیه شده و ۱ ساعت قبل از ساخت نمونه‌ها با سدیم سیلیکات ترکیب می‌شود.

۲-۱-۳- سنگدانه

در این پژوهش فقط از ریزدانه (ماسه) عبوری از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی متر) استفاده شده است. زیرا تولید بتن ژئوپلیمری با هدف غیربابر و برای تولید آجرنمای بتنی بوده است و استفاده از ریزدانه به تنهایی، یکی از جنبه‌های نوآورانه در این تحقیق است. هرچند به دلیل جذب آب بالای خاکستر و ویسکوزیته‌ی محلول‌های قلیایی، کارپذیری بتن ژئوپلیمری تولید شده پایین است و استفاده از ریزدانه‌ی گردگوشه به افزایش کارپذیری کمک می‌کند.

بدین منظور از ماسه‌ی طبیعی و گردگوشه دوبار شور رودخانه‌ای با ضریب نرمی ۲/۶۹ و چگالی ۲/۴۹ در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) مطابق استاندارد ملی ۳۰۲ استفاده شده‌است، که نمودار آن در شکل ۲ نمایش داده شده است و جدول ۲ نمایانگر دانه‌بندی آن است.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی

جدول ۲- آنالیز الک ماسه مصرفی

سایز الک (mm)	شماره الک	وزن مانده (g)	درصد مانده
۰	۰	#۴	۴/۷۵
۱۲	۱۲۰	#۸	۲/۳۶
۲۱	۲۱۰	#۱۶	۱/۱۸
۲۲	۲۲۰	#۳۰	۰/۶
۲۲	۲۲۰	#۵۰	۰/۳
۱۵	۱۵۰	#۱۰۰	۰/۱۵
۷	۷۰	#۲۰۰	۰/۰۷۵
۱	۱۰	زیر الکی	
۱۰۰	۱۰۰۰	جمع کل	

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

۲-۱-۴- فوق روان‌کننده

برای بهبود کارپذیری بتن از فوق روان‌کننده نفتالین سولفونات NS-MIX شرکت شیمی‌سازه آرمانی با چگالی ۱/۰۷ و با دوز مصرف ۲ درصد وزن خاکستر استفاده شده است. فوق روان‌کننده را می‌توان با آب طرح اختلاط مخلوط کرده و به ترکیب افزود.

۲-۲- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

برای ساخت بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج و مشاهده تاثیر مقدار خاکستر و مولاریته محلول قلیایی بر خواص مکانیکی و شیمیایی این نوع بتن، از ۴ نوع طرح اختلاط استفاده شده است. از آنجایی که بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج برخلاف بتن ژئوپلیمری با پایه سرباره نیاز به عمل‌آوری حرارتی دارند، تاثیر دمای عمل‌آوری در ۹۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت و ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت نیز بررسی شده است. همچنین برای مقایسه از نتایج مقاومت فشاری نمونه بتنی با سیمان پرتلند نوع ۱ با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و سنگدانه یکسان در سنین ۷،۳ و ۲۸ روز استفاده شده است. مقدار سنگدانه در نمونه‌های سیمان پرتلند از فرمول عبارت ۱ محاسبه شده است.

جدول شماره ۳ مقادیر مواد به کاررفته در هر مترمکعب از طرح اختلاط‌ها را نشان می‌دهد. در طرح‌های اختلاط، برخی از نسبت‌های ثابت به‌عنوان مبنای اختلاط مدنظر است که عبارت است از:

- نسبت محلول‌های قلیایی به خاکستر : ۰/۴۵
- نسبت آب به چسباننده : ۰/۴۲
- دوز مصرف فوق روان‌کننده : ۲ درصد
- نسبت ترکیب محلول سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید : ۲/۵

با معلوم بودن مقدار خاکستر و مولاریته محلول قلیایی و سایر مولفه‌های ثابت، وزن سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک(SSD) در هر طرح اختلاط با استفاده از فرمول حجم مطلق مطابق راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن، محاسبه می‌شود.

عبارت ۱: رابطه حجم مطلق برای تعیین جرم سنگدانه

$$A_{SSD} = \rho_{A_{SSD}}\left(1000 - \frac{c}{\rho_c} - \frac{w_f}{\rho_w} - \frac{D}{\rho_D} - V_a\right)$$

پیش از اختلاط، سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) درآمدند. مراحل اختلاط در مخلوط‌کن به شرح زیر انجام گرفته است:

- مخلوط کردن ریزدانه و خاکستر پوسته برنج (۱دقیقه)؛
- افزودن نیمی از محلول قلیایی و ترکیب‌شدن مواد (۴۵ ثانیه)؛
- افزودن مابقی محلول قلیایی (۴۵ثانیه)؛
- افزودن ترکیب آب اضافه و فوق روان‌کننده (۲ دقیقه)؛

پس از پایان اختلاط، بتن حاصل مطابق استاندارد ملی ۲-۱۶۰۸ در قالب‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری و در تعداد لایه‌های مناسب و در هر لایه با تعداد ضربات مناسب با کوبه استاندارد متراکم شده و قالب‌گیری گردید. پس از ۲۴ ساعت نمونه از قالب خارج‌شده و با پوشش نایلون پلی اتیلنی ضخیم در گرمخانه (Oven) مطابق با شرایط عمل آوری حرارتی یادشده، قرار خواهد گرفت. در صورت عدم حفظ رطوبت با نایلون پلی‌اتیلنی و از بین‌رفتن سریع

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

رطوبت، نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی و خشکی‌شده و ترک می خورند که موجب کاهش محسوس مقاومت فشاری خواهدشد.

برای ارزیابی نمونه‌ها دو آزمون مقاومت فشاری و جذب آب مدنظر است. بدین منظور از هر طرح اختلاط ۷ آزمونه مکعبی ۱۰ سانتی‌متری برای مقاومت فشاری مطابق استاندارد ملی ۳-۱۶۰۸ در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز و ۳ آزمونه برای آزمون جذب آب در ۲۸ روز مطابق با استاندارد ملی ۱۴۷۳۳ درنظر گرفته شده است. برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌ها در سنین یادشده زیر جک هیدرولیک بتن شکن با سرعت ۰/۳ Mpa/s تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۲-۳- ساخت آجرنما و قطعات ژئوپلیمری

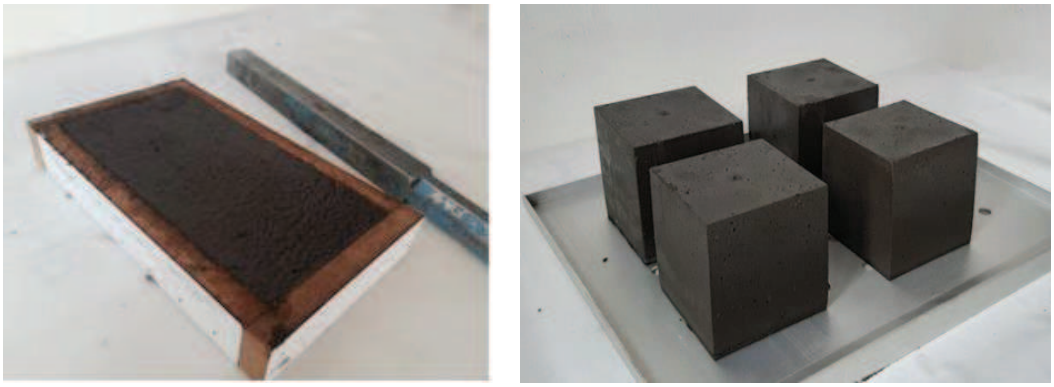
مطابق استاندارد ASTM C1634 معادل استاندارد ملی ۱۶۲۱۱، آجرنمای بتنی-ویژگی‌ها، عرض آجرنمای بتنی حداکثر ۱۰ سانتی‌متر است و سنگدانه‌ی به‌کار رفته در آن مطابق استاندارد ملی ۳۰۲ می‌باشد. از آنجایی‌که استاندارد تعریف‌شده‌ای در دنیا برای بتن ژئوپلیمری فاقد سیمان و قطعات پیش‌ساخته با این نوع بتن موجود نیست، برای سنجش برخی از ویژگی‌های مکانیکی و ظاهری از استاندارد نام برده شده استفاده شده است. بتن ژئوپلیمری تولیدشده در قالب‌های چوبی با ابعاد ۲۰×۱۰×۲/۵ سانتی‌متر قالب‌گیری شده و پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده است. آجرهای خارج‌شده از قالب با پوشش نایلون پلی‌اتیلنی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس در گرم‌خانه عمل‌آوری حرارتی شده‌اند. در شکل ۳ نمونه‌های مکعبی بتن ژئوپلیمری و آجرنمای ژئوپلیمری قالب‌گیری شده قبل از خروج از قالب آمده است.

جدول ۳- طرح اختلاط‌های آزمایش شده

طرح اختلاط	مقادیر مصالح استفاده‌شده در هر طرح به ازای هر مترمکعب							
	مولاریته	ریزدانه (kg/m^3)	خاکستر (kg/m^3)	محلول سدیم هیدروکسید (kg/m^3)	محلول سدیم سیلیکات (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)	آب اضافه (kg/m^3)	شرایط عمل آوری
M۱	۱۰	۱۶۰۱/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۴۹	۹۰°C و ۴۸ h
M۲	۱۶	۱۵۹۴/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۵۵	۹۰°C و ۴۸ h
M۳	۱۰	۱۴۷۲	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۰	۹۰°C و ۴۸ h
M۴	۱۶	۱۴۷۵	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۳	۹۰°C و ۴۸ h
M۵	۱۰	۱۶۰۱/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۴۹	۶۰°C و ۲۴ h
M۶	۱۶	۱۵۹۴/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۵۵	۶۰°C و ۲۴ h
M۷	۱۰	۱۴۷۲	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۰	۶۰°C و ۲۴ h
M۸	۱۶	۱۴۷۵	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۳	۶۰°C و ۲۴ h

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

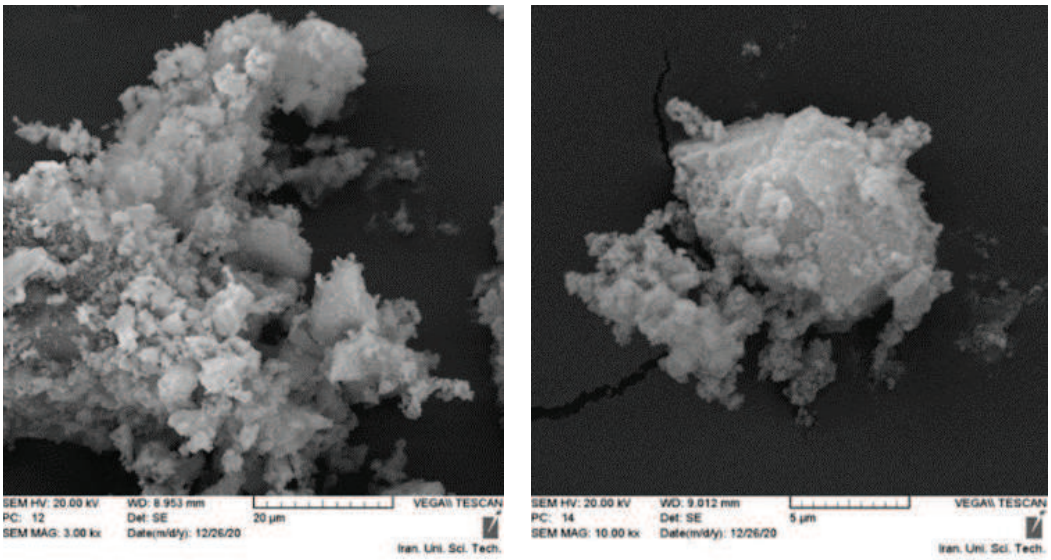


شکل ۳- آزمونه‌های مکعبی بتن ژئوپلیمری (راست) و آجرنمای ژئوپلیمری قالب‌گیری شده (چپ)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- چگالی نسبی و بررسی ساختار خاکستر

چگالی نسبی خاکستر با روش بالن لوشاتلیه معادل ۲/۰۹۶ تعیین شده که در محاسبات طرح اختلاط با تقریب معادل ۲/۱ در نظر گرفته شده است. چگالی نسبی RHA در محدوده ۲/۰۵-۲/۵۳ می‌باشد، که کمتر از سیمان پرتلند با چگالی نسبی ۳/۱۰-۳/۱۴ است. بنابراین در جایگزینی درصد وزنی سیمان با خاکستر، حجم بیش‌تری از خاکستر به نسبت سیمان وارد مخلوط می‌شود که موجب افزایش حجم کل مخلوط، کاهش چگالی و در نتیجه سبک‌شدن بتن تولید شده خواهد شد. [۱۳] در شکل۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) خاکستر با دو بزرگنمایی مختلف آمده است که نشان‌دهنده‌ی ذرات با شکل نامنظم و منافذ میکرونی و بسیار ریز روی سطح آن است که دلیل اصلی پایین بودن چگالی توده‌ای RHA می‌باشد.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی خاکستر پوسته برنج

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

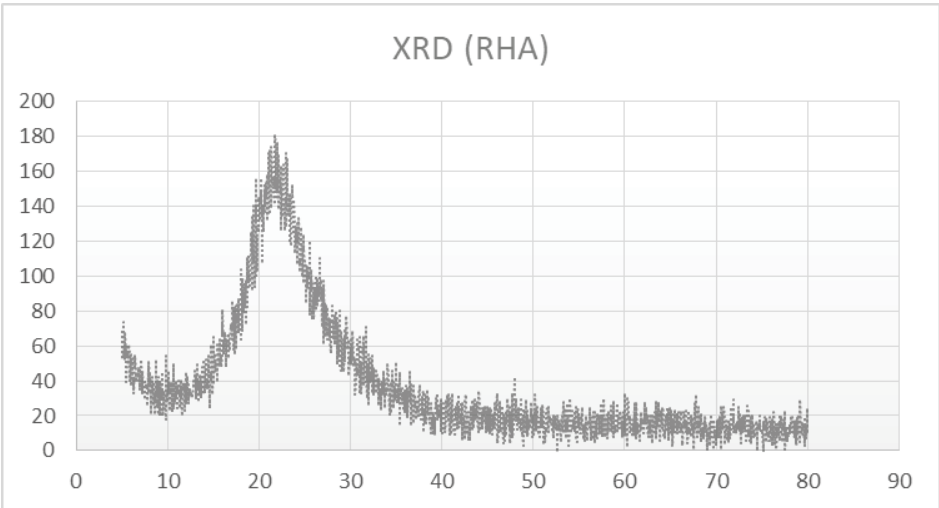
همچنین نمودار پراش اشعه ایکس خاکستر در شکل ۵ آمده است. در نمودار XRD خاکستر هیچ‌گونه پیک بلوری مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد خاکستر مورد آزمایش آمورف می‌باشد، اما با توجه به شیب زیاد نمودار کمی از شرایط بهینه فاصله دارد. [۱۷] فاصله‌ی نمودار از حالت بهینه به دلیل بالا بودن محدوده‌ی دمایی کوره تولید RHA بوده است که در نهایت منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. در مجموع باتوجه به نتایج آزمون XRD و XRF خاکستر خریداری‌شده دارای بیش از ۹۰ درصد سیلیس آمورف است.

۳-۲- خواص بتن تازه

خاکستر پوسته‌ی برنج دارای ساختار متخلخل و جاذب آب است. از طرفی ویسکوزیته محلول سدیم سیلیکات و خواص چسبندگی آن و غلظت محلول سدیم هیدروکسید، در مجموع موجب کاهش چشمگیر اسلامپ و کاهش روانی بتن شده است. در نهایت بتن تولیدشده در این پژوهش بتنی خمیری و بدون اسلامپ است. با افزایش مولاریته محلول قلیایی از ۱۰ مولار به ۱۶ مولار و افزایش مقدار خاکستر از ۳۵ kg/m^3 به ۴۰۰ kg/m^3، میزان چسبندگی بتن افزایش یافته و بافت آن خمیری‌تر شده است. کاهش اسلامپ متاثر از افزایش مقدار خاکستر به دلیل سطح ویژه بالای خاکستر پوسته برنج بوده که آب موجود در ماتریس بتن را جذب می کند. [۳]

۳-۳- مقاومت فشاری

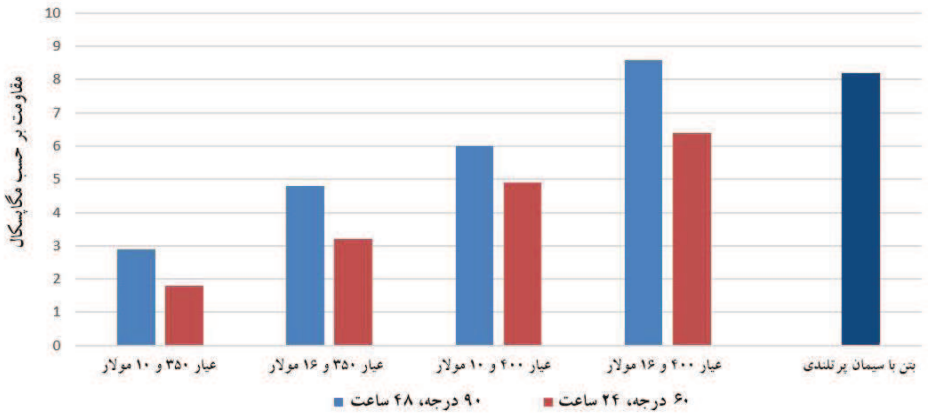
آزمون مقاومت فشاری یکی از پایه‌ای ترین مولفه‌های سنجش مکانیکی بتن است. نتایج آزمون مقاومت فشاری مکعبی ۱۰ سانتی‌متری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با دو شرایط عمل‌آوری در شکل ۶ آمده است، که با نتایج مقاومت فشاری بتن با سیمان پرتلند مقایسه شده است. کم‌ترین مقاومت فشاری کسب شده در نمونه ۲۸ روزه با عمل‌آوری در ۹۰ درجه سلسیوس معادل ۲/۱۱ Mpa و مربوط به نمونه با عیار ۳۵۰ kg/m^3 و غلظت ۱۰ مولار می‌باشد.



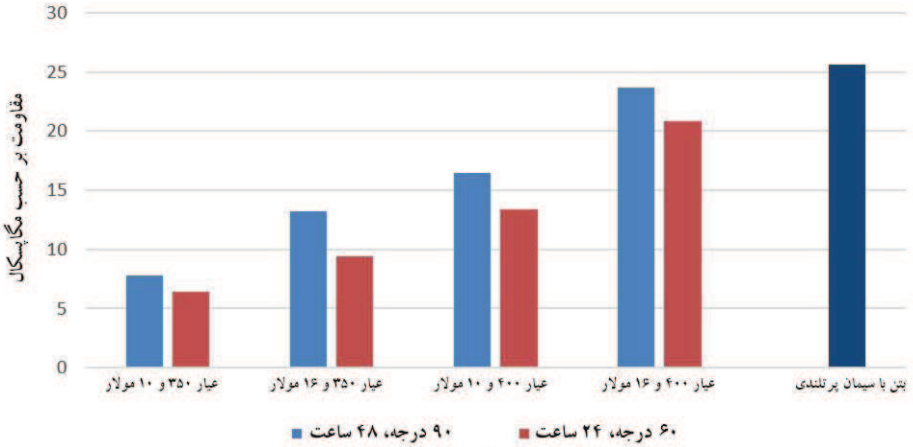
شکل ۵- نمودار پراش اشعه ایکس (XRD) خاکستر پوسته برنج

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

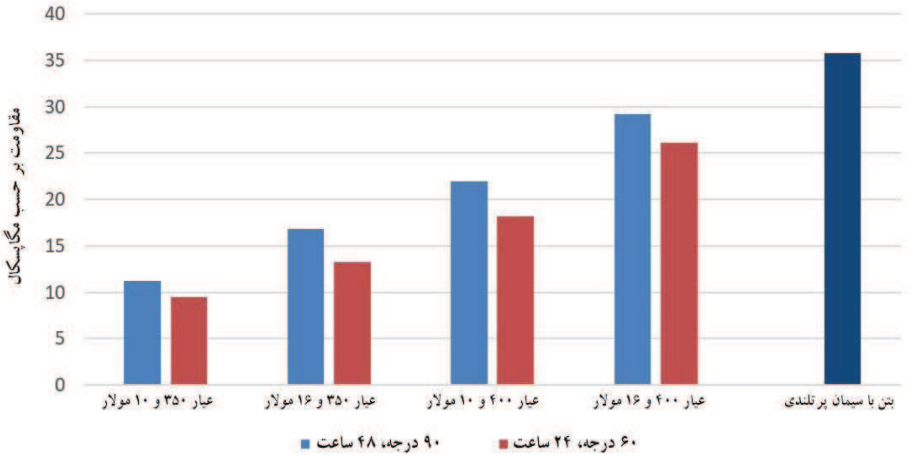
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]



نمودار مقاومت فشاری - ۳ روزه



نمودار مقاومت فشاری - ۷ روزه



نمودار مقاومت فشاری - ۲۸ روزه

شکل ۶- نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در سنین گوناگون

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

که این عدد با افزایش عیار خاکستر و مولاریته به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری کسب‌شده در نمونه ۲۸ روزه با عمل‌آوری در ۹۰ درجه سلسیوس نیز معادل ۲۹/۲ Mpa و مربوط به نمونه با عیار $۴۰۰kg/m^3$ و غلظت ۱۶ مولار است. این دو طرح اختلاط به‌عنوان کران بالا و پایین گستره‌ی مقاومت فشاری هستند. با مقایسه نتایج آزمون مقاومت نمونه با عیار $۴۰۰\ kg/m^3$ و غلظت ۱۰ مولار و نمونه با عیار $۳۵۰\ kg/m^3$ و غلظت ۱۶ مولار می‌توان دریافت که تاثیر عیار خاکستر بر روی مقاومت بیش‌تر از مولاریته می‌باشد.

از طرفی با مقایسه‌ی روند کسب مقاومت بتن ژئوپلیمری با بتن سیمان پرتلندی می‌توان دریافت که بتن ژئوپلیمری در سن ۳ روزه حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد مقاومت ۲۸ روزه‌ی خود را کسب کرده که روندی سریع‌تر از بتن سیمان پرتلندی است.

نمونه بتن ژئوپلیمری با عیار $۴۰۰\ kg/m^3$ و غلظت ۱۶ مولار در سن ۳ روزه مقاومتی بالاتر از بتن با سیمان پرتلند کسب کرده است اما با گذشت زمان آهنگ کسب مقاومتش از آن کم‌تر شده و در نهایت نتیجه پایین‌تری کسب می‌کند. همچنین افزایش دما و زمان عمل‌آوری موجب رشد ۳۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت فشاری در سنین مختلف نمونه‌ها شد. مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با عیار ژئوپلیمر و غلظت محلول قلیایی رابطه مستقیم دارد. [۲] در مجموع واکنش پلیمریزاسیون در شرایط عمل‌آوری در دمای محیط سرعت بالایی نداشته و روند کسب مقاومت آن آهسته‌تر از هیدراتاسیون در بتن‌های متداول می‌باشد. اما در شرایط عمل‌آوری حرارتی که برای برخی از انواع بتن‌های ژئوپلیمری امری متداول است، فرآیند پلیمریزاسیون و در نتیجه کسب مقاومت تسریع می‌شود و نسبت به روند کسب مقاومت بتن‌های متداول پیشی می‌گیرد.

۳-۴- جذب آب

جذب آب و مقاومت فشاری دو معیار متفاوتی هستند که ارتباط مستقیم اثبات شده‌ای با هم ندارند. اما با مقایسه‌ی نتایج جذب آب و مقاومت فشاری می‌توان دریافت که نمونه‌های پرمقاومت‌تر از لحاظ معیارهای ظاهری و تخلخل سطحی و همچنین جذب آب عملکرد بهتری دارند. زیرا مقاومت فشاری بالا از ماتریس متراکم‌تر و با تخلخل درونی کم‌تر حاصل می‌شود در نتیجه جذب آب نیز کاهش می‌یابد. در شکل ۷ نتایج جذب آب درصدی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز با عمل‌آوری در ۹۰ درجه سلسیوس آمده است. استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ جذب آب حداکثر ۶ درصد را برای قطعات بتنی قابل قبول می‌داند. دو طرح اختلاط با عیار $۴۰۰\ kg/m^3$ خاکستر و غلظت ۱۶ و ۱۰ مولار به ترتیب جذب آب معادل ٪ ۳/۴۶ و ٪ ۴/۵۸ داشته‌اند، که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول آن‌ها می‌باشد. جذب آب نمونه با عیار $۳۵۰\ kg/m^3$ خاکستر و غلظت ۱۶ مولار جذب آب معادل ٪ ۵/۲۳ درصد داشته که از لحاظ استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ قابل پذیرش می باشند. اما نمونه با عیار خاکستر $۳۵۰\ kg/m^3$ و غلظت ۱۰ مولار به دلیل جذب آب بالای ۶ درصد مطابق استاندارد غیرقابل قبول می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- فعالیت پوزولانی خاکستر در درجه اول تحت تاثیر

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

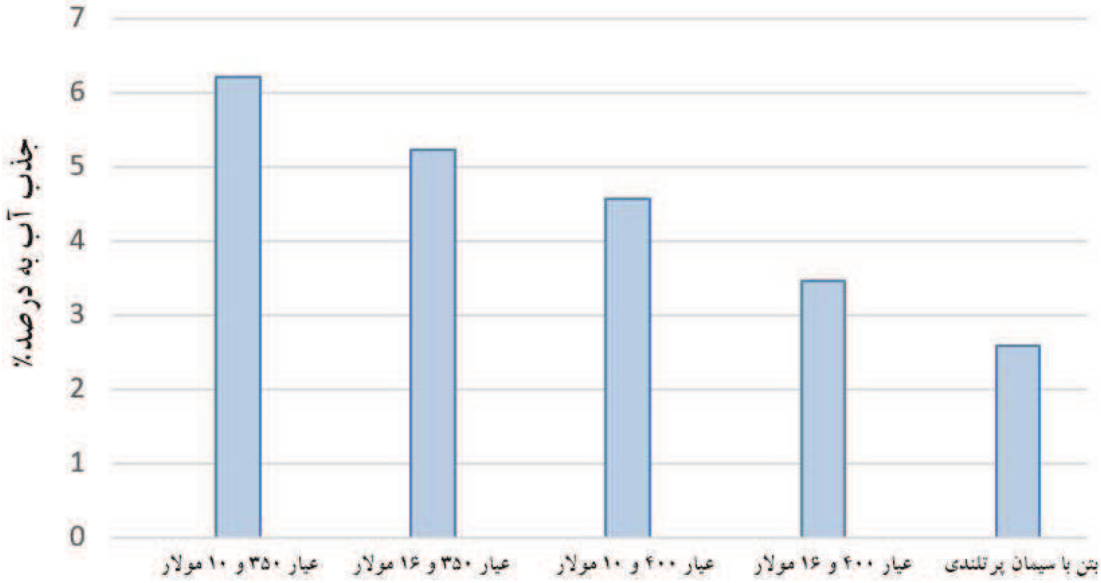
دما و زمان تولید آن است. حالت بهینه خاکستر در دمای ۶۵۰ درجه و در مدت زمان ۶۰ تا ۹۰ دقیقه با سیلیس آمورف حداکثری تولید می‌شود که بر اساس نمودار پراش اشعه ایکس قابل تشخیص و مقایسه است.

۲- آسیاب مناسب اهمیت ویژه‌ای در میزان واکنش‌پذیری خاکستر دارد. با افزایش زمان آسیاب (حداقل ۴۵ دقیقه) سطح ویژه و نرمی افزایش می‌یابد که تاثیر بسیار زیادی بر روی تسریع واکنش پلیمریزاسیون دارد. ذرات بزرگ‌تر از ۴۵ میکرون تاثیر زیادی بر پیشبرد واکنش و کسب مقاومت بتن ژئوپلیمری ندارند.

۳- خاکستر پوسته‌ی برنج اگر به تنهایی به عنوان ماده جایگزین سیمان مصرف شود، در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند مقاومت کم‌تری کسب می‌کند، اما با مخلوط‌کردن خاکستر بادی و یا سرباره برای تولید بتن ژئوپلیمری می‌توان به مقاومت‌های بسیار بالا دست یافت. هرچند به دلیل سبک‌بودن بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند، نهایتا نسبت مقاومت به وزن قابل قبولی دارد.

۴- مقاومت فشاری و دوام بتن ژئوپلیمری با عیار خاکستر و مولاریته محلول قلیایی رابطه مستقیم دارد. با افزایش خاکستر مخلوط بتن ویسکوزیته بالا و ساختار بسیار همگن و چسبنده کسب می‌کند که هم بر روی کاهش تخلخل و معیارهای ظاهری تاثیر دارد و هم موجب کاهش جذب آب و افزایش مقاومت فشاری خواهد شد.

۵- با افزایش زمان و دمای عمل‌آوری مقاومت فشاری افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. دمای ۹۰ درجه و مدت زمان ۴۸ ساعت تاثیر قابل توجهی بر روی افزایش مقاومت بتن ژئوپلیمری دارد.



شکل ۷- نمودار جذب آب بتن ژئوپلیمری در ۲۸ روز مطابق استاندارد ملی ۱۴۷۳۳

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

شکل ۸- آجرنمای بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در کنار آجرنمای بتنی با سیمان پرتلند

۵- مراجع

[1] Prabu Baskar , A. Shalini , J. S. Kishore Kumar (2014), Rice husk ash based geopolymer concrete - A Review, Chemical Science Review and Letters, 3(10), pp. 288-294.

[2] Parveen Jangra, Dhirendra Singhal, Bharat Bhushan Jindal (2017), Experimental study on geopolymer concrete prepared using high-silica RHA incorporating alccofine, Advances in Concrete Construction, Vol. 5, No. 4, pp. 345-358.

[3] Saraswati Verma, Mayank Kumar (2018), Behaviour of Fly Ash and Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete, Key Engineering Materials, Vol. 775, pp. 596-602.

[4] Shaswat Kumar Das, Jyotirmoy Mishra, Alok Patel (2018), A Review On Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete, Conference Paper.

[۵] بندار دالی، حسنی نعمت، خداپرست محمد مهدی، ۱۳۹۰، بتن ژئوپلیمری و کاربردهای آن، کنفرانس بین‌المللی بتن‌های ناتراوا، گیلان

[6] Bui, D.D., (2001). Rice Husk Ash as a Mineral Admixture for High Performance Concrete (Ph.D thesis). Delft University of Technology, Delft.

[7] Hwang, C. L. and Chandra, S. (2016). The Use of Rice Husk Ash in Concrete. (assessed 27- 4-2016).

[8] Badorul Hisham Abu Bakar, Ramadhansyah Putrajaya, Hamidi Abdulaziz (2010), Malaysian Rice Husk Ash – Improving the Durability and Corrosion Resistance of Concrete, Concrete Research Letters, Vol. 1(1)

[9] Fapohunda Christopher, Akinbile Bolatito, Shittu Ahmed (2017), Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement, International Journal of Sustainable Built Environment.

[10] Foong, K. Y., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z. and Mo, K. H. (2015), Enhancement of the mechanical properties of lightweight oil palm shell concrete using rice husk ash and manufactured sand. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering, 16(1), pp. 59–69.

[11] Nguyen, V.T., (2011). Rice Husk Ash as Mineral Admixture for Ultra Performance Concrete (Ph.D thesis). Delft University of

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

Technology, Delft

[12] Le, H.T., (2015). Behaviour of Rice Husk Ash in Self-Compacting High Performance Concrete (Ph.D thesis). Institute for Building Materials Science, Bauhaus University Weimar, Germany.

[13] C. K. Ma, A. Z. Awang, and W. Omar, (2018), Structural and material performance of geopolymer concrete: A review, Constr. Build. Mater., vol. 186, pp. 90–102.

[14] B.V.R. Djwantoro Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M.J. Sumajouw, (2003) "Geopolymer Concrete: Turn Waste Into Environmentally Friendly Concrete," In International Conference On Recent Trends In Concrete Technology And Structures, Pp. 1–11.

[15] C. Panagiotopoulou, E. Kontori, T. Perraki, and G. Kakali, (2007), Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, J. Mater. Sci., vol. 42, no. 9, pp. 2967–2973.

[16] B. Joseph and G. Mathew, (2012), Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete," Sci. Iran., vol. 19, no. 5, pp. 1188–1194.

[17] Ramezanianpour, A.A., Khani, M.M., Ahmadibeni, G.H., (2009). The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes. Int. J. Civ. Eng. 9 (8), pp. 63–11.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 10, No. 2, 2021

Application of Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete in Production of Concrete Facing Brick

Saba Naeej[1,*], Mohsen Sartipipour[2], Alireza Rahmati[3]

[1] M.A in Bionic Architecture, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Professor, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
[3] Visiting Professor, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*s.naeej@mail.sbu.ac.ir

Abstract: The objective of this paper is to produce Rice husk ash based Geopolymer concrete brick without Portland cement. Pollution of the cement industry produces 8% of the world's greenhouse gases and pollutants. Today, the replacement of aluminosilicate pozzolans, known as supplementary cementitious materials (SCMs), play a significant role in reducing the production and use of Portland cement. In this research, samples of geopolymer concrete with 350 kg/m^3 and 400 kg/m^3 of rice husk ash, Alkali activator solution consisting of 10 and 16 M sodium hydroxide in combination with sodium silicate solution, fine aggregates and additives were produced and cured at 60 and 90°C. In all 8 mixing designs, water to RHA ratio is 0,42 and alkaline solution to RHA ratio is 0,45. Finally, the specimens were tested for compressive strength according to the Iranian national standard 1608-3 at the ages of 3, 7 and 28 days and according to the Iranian national standard 14733 in 28 days for water absorption.

The results showed that with increasing the amount of RHA and molarity of Alkali activator solution, the workability of concrete decreases and the adhesion and viscosity of concrete increases. The highest Compressive Strength of 100mm Cube after 28 days was 29.2 MPa and it is related to the specimens with 400 kg/m^3 of RHA and 16 M Alkali solution, which was Heat cured at 90°C. By reducing the amount of RHA to 350 kg/m^3 and preserving other components, the compressive strength decreased by 42% to 16.8 MPa, which indicates the significant effect of these parameters on the mechanical properties of the produced concrete.

The lowest percentage of water absorption was 3,46 % and related to the specimens with 400 kg/m^3 of RHA and 16 M alkaline solution. By reducing the RHA content to 350 kg/m^3 and preserving other components, the percentage of water absorption increased to 5,23 %.

Keywords: Geopolymer concrete, Rice husk ash, Pozzolans, Concrete Facing Brick.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-12-16]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4]