

کاربرد بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در تولید آجر نمای بتنی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

سبا نائیج^{۱*}، محسن سرتیپی پور^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.naeij@mail.sbu.ac.ir

چکیده:

هدف پژوهش صورت گرفته، تولید آجر نمای بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج^۱ و فاقد سیمان پرتلند می باشد. آلاینده‌ی 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 400 kg/m^3 و 250 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 ۱۶۰۸-۳ 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 آجر نمای 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 $29/2 \text{ MPa}$ 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 250 kg/m^3 و حفظ سایر مولفه‌ها، مقاومت فشاری نمونه مکعبی با کاهش ۴۲ درصدی به عدد $16/8 \text{ MPa}$ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی تاثیر قابل توجه آن بر مشخصات مکانیکی بتن تولید شده 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 250 kg/m^3 و حفظ سایر مولفه‌ها، درصد جذب آب به عدد ۵/۲۳٪ افزایش یافت.

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: ۲۳۵۲-۲۳۳۲

شاپا الکترونیکی:

۳۰۰۳-۲۷۸۳

کلیدواژه:

بتن ژئوپلیمری، خاکستر پوسته برنج، پوزولان، آجر نمای بتنی

20.1001.1.23222352.1400.10.2.7.4

کد DOR:

^۱ Rice Husk Ash

^۲ Supplementary Cementitious material

^۳ Alkali activator



۱- مقدمه:

در سال ۱۹۷۲ محقق فرانسوی ژوزف دیوید اوویتس^۱ فرآیند بسپارش یا پلیمره سازی را کشف کرد و ۱۱ سال بعد منجر به تولید سیمان های ژئوپلیمری شد. [۱] ایده ی توسعه ی بتن های ژئوپلیمری مبتنی بر تولید مصالح ساختمانی با استفاده از پسماند صنایع مختلف است که از طرفی منجر به تولید مواد ارزان تر شده و از سویی دیگر با استفاده ی مجدد پسماندها و همچنین مصرف انرژی کمتر و تولید کمتر گازهای گلخانه ای به محیط زیست کمک شایانی خواهد کرد. [۲] مکانسیم برقراری پیوند در بتن های سیمان پرتلندی براساس واکنش هیدراتاسیون و تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) می باشد. 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 حلقه ای پلیمری سه بعدی از پیوندهای Si-O-Al-O می شود. این ژئوپلیمر مبتنی بر آلومینوسیلیکات به عنوان اکسید آلومینات سیلیکون یا سیالیت^۲ نامیده می شود. [۳]

سرباره کوره آهن گدازی^۳، خاکستر بادی^۴، خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیسی^۵ به عنوان شناخته شده ترین ژئوپلیمرها محسوب می شوند. [۴] واکنش پلیمریزاسیون در شرایط عمل آوری در دمای محیط سرعت بالایی نداشته و روند

کسب مقاومت آن آهسته تر از هیدراتاسیون و بتن های متداول می باشد. اما در شرایط عمل آوری حرارتی که برای بتن های ژئوپلیمری امری متداول است، فرآیند بسپارش و در نتیجه کسب مقاومت تسریع می شود و نسبت به روند کسب مقاومت بتن های متداول پیشی می گیرد. [۵]

خاکستر پوسته برنج به عنوان پسماند صنعت کشاورزی منبع غنی از سیلیس بوده و یکی از مواد ژئوپلیمری می باشد که از احتراق پوسته برنج حاصل می شود. هر تن شالی برنج تقریباً ۲۰۰ کیلوگرم پوسته برنج تولید می کند که در اثر احتراق حدود ۴۰ تا ۵۰ کیلوگرم خاکستر تولید می شود. [۶] پوسته ی 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 می گذارند. هنگامی که پوسته برنج احتراق کامل پیدا کند، خاکستر پوسته برنج (RHA) تولید می شود. دمای کنترل شده، تهویه مناسب و شرایط کوره و سرعت سرد شدن بر روی کیفیت خاکستر تاثیرگذار است. پوسته ای که فرآیند احتراق آن کامل و مناسب باشد به رنگ خاکستری روشن است، درحالی که خاکستری که حاصل احتراق نامناسب است تا حدی سوخته و مایل به سیاه است که نشان دهنده ی تبدیل آن به کربن است. [۷] خاکستری که در دمای بالای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و در مدت زمان طولانی تولید شده باشد، دارای سیلیس بلوری و کربن فعال بوده و واکنش پذیری مناسبی برای تولید بتن های ژئوپلیمری ندارد. سیلیس (SiO₂) اساسی ترین ماده ی موجود در خاکستر پوسته ی برنج است. میزان فعالیت خاکستر تحت تاثیر ساختار سلولی سیلیس موجود در خاکستر است. فرم بلوری و بی شکل (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



تولید خاکستر با سیلیس آمورف حداکثری از اهمیت بالا برخوردار است زیرا فرم بلوری سیلیس منجر به تولید خاکستر با واکنش پذیری کم می شود. [۷] خاکستر ماده‌ای بسیار نرم و ریز است و اندازه متوسط ذرات آن حدود $10\mu\text{m}$ 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 به دلیل احتراق مواد آلی موجود در ترکیبات آن بوده و موجب بیشتر شدن افت حرارتی (LOI) می شود. [۱۰] کیفیت خاکستر تا حد زیادی تحت تاثیر ساختار متخلخل ذرات، اندازه ذرات و سطح مخصوص آن می باشد. همچنین سرعت خنک شدن بر تخلخل، اندازه‌ی ذرات و میزان آمورف یا کریستالی بودن آن تاثیرگذار است. وقتی خاکستر به سرعت سرد شود اندازه‌ی ذرات کاهش یافته و واکنش پذیری افزایش می یابد. [۱۱] محدوده‌ی کلی که برای خواص پوزولانی مدنظر است، ذرات بین $5/6$ میکرون تا 45 میکرون می باشد و گفته شده ذرات زیر $5/6$ میکرون در واکنش شرکت نمی کنند. [۱۱] همچنین محدوده‌ای که برای چگالی ظاهری RHA مدنظر است، $90-150\text{ kg/m}^3$ می باشد، که نشان دهنده‌ی ساختار پیچیده و متخلخل آن بوده که هوا را به دام می اندازد. حفره‌های روی خاکستر برحسب ابعاد شامل سه دسته منافذ ماکرو (قطر بیش از 50 نانومتر)، منافذ مزو (بین 2 تا 50 نانومتر) و منافذ میکرو (قطر کمتر از 2 نانومتر) می باشد، که منافذ مزو و میکرو روی سطح ویژه و نرمی تاثیرگذار هستند. [۱۲]

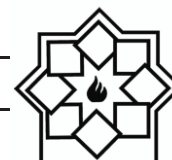
واکنش خاکستر و ایجاد پیوند پلیمره سازی در بتن

ژئوپلیمری همچنین نیاز به محلول‌های قلیایی دارد. در این نوع بتن آب نقشی در فعال سازی مواد پوزولانی و برقراری پیوند ندارد، بلکه آب اضافه^۱ برای تامین کارپذیری به مخلوط اضافه می شود. غلظت و نوع محلول قلیایی نقش مهمی در خواص این نوع بتن دارد.

از جمله محلول‌های قلیایی که در بتن‌های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار می گیرد، می توان به ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات و ترکیب پتاسیم هیدروکسید با پتاسیم سیلیکات اشاره نمود که ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات، متداول ترین محلول قلیایی استفاده شده برای ساخت بتن ژئوپلیمری می باشد. [۱۳] به همین دلیل از این ترکیب به عنوان 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 می گردد 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 تحت تاثیر نوع سنگدانه‌ی به کار رفته در آن است. در تولید بتن‌های ژئوپلیمری ترکیبی از ریزدانه و درشت دانه با دانه بندی استاندارد مدنظر است که ویژگی آن‌ها در استاندارد ASTM C136 و استاندارد ملی 302 آمده است. ماسه‌های رودخانه‌ای شسته شده و الک شده با دانه بندی مناسب برای

^۱ Extra water



ساخت نمونه‌های باکیفیت توصیه می‌شود. تحقیقات بر روی 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]

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

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.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج

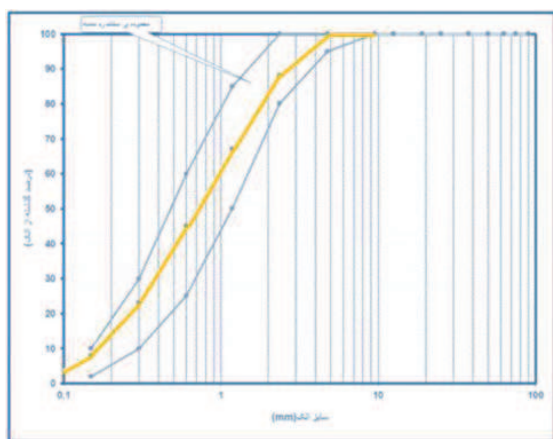
مقدار	مشخصه
۹۰/۴۸	SiO ₂
۰/۰۱	Al ₂ O ₃
۰/۲۱	Fe ₂ O ₃
۱/۰۲	CaO
۰/۷۸	SO ₃
۰/۷۷	MgO
۰/۰۲	Na ₂ O
۱/۹۰	K ₂ O
۱/۱۰	P ₂ O ₅
۳/۷۳	LOI
۸۷۶۰	Blaine (Cm ² /g)
۷/۵٪	مانده بر الک ۴۵ میکرون



شکل ۱- از چپ تصویر پوسته‌ی برنج قبل از سوختن، خاکستر پوسته‌ی برنج آسیاب نشده و خاکستر آسیاب شده



بدین منظور از ماسه‌ی طبیعی و گردگوشه دوبرار 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	

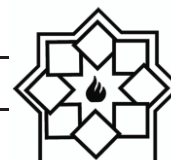
همچنین آسیاب ذرات، تعیین چگالی به روش بالن لوشاتلیه و تعیین سطح ویژه در آزمایشگاه و بخش کنترل کیفیت کارخانه سیمان بجنورد انجام گرفته است. چگالی نسبی خاکستر با روش بالن لوشاتلیه و با استفاده از نفت سفید مطابق استاندارد ملی ۷۱۴۸ و استاندارد ASTM C188 اندازه‌گیری شده است.

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 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 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 غیرباربر 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.



۲-۱-۴- فوق روان کننده

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

۲-۲- طرح اختلاط و ساخت نمونه ها

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 عمل آوری حرارتی دارند، تاثیر دمای عمل آوری 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 نمونه های سیمان پرتلند از فرمول عبارت ۱ محاسبه شده است.

جدول شماره ۳ مقادیر مواد به کاررفته در هر مترمکعب از طرح اختلاط ها را نشان می دهد. در طرح های اختلاط، برخی از نسبت های ثابت به عنوان مبنای اختلاط مدنظر است که عبارت است از:

- نسبت محلول های قلیایی به خاکستر : ۰/۴۵
- نسبت آب به چسباننده : ۰/۴۲
- دوز مصرف فوق روان کننده : ۲ درصد

- نسبت ترکیب محلول سدیم سیلیکات به سدیم

هیدروکسید : ۲/۵

با معلوم بودن مقدار خاکستر و مولاریته محلول قلیایی و سایر مولفه های 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 می شود.

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، سنگدانه ها به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) درآمدند. مراحل اختلاط در مخلوط کن به شرح زیر انجام گرفته است:

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

پس از پایان اختلاط، بتن حاصل مطابق استاندارد ملی ۱۶۰۸-۲ در قالب های مکعبی ۱۰ سانتی متری و در تعداد لایه های مناسب و در هر لایه با تعداد ضربات مناسب با کوبه استاندارد متراکم شده و قالب گیری گردید. پس از ۲۴ ساعت نمونه از قالب خارج شده 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 پلی اتیلنی و از بین رفتن سریع



رطوبت، نمونه‌ها دچار جمع‌شدگی و خشکی‌شده و ترک می‌خورند که موجب کاهش محسوس مقاومت فشاری خواهد شد.

برای ارزیابی نمونه‌ها دو آزمون مقاومت فشاری و جذب آب مدنظر است. بدین منظور از هر طرح اختلاط ۷ آزمون مکعبی ۱۰ سانتی‌متری برای مقاومت فشاری مطابق استاندارد ملی ۱۶۰۸-۳ در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز و ۳ آزمون برای آزمون جذب آب در ۲۸ روز مطابق با استاندارد ملی ۱۴۷۳۳ در نظر 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.

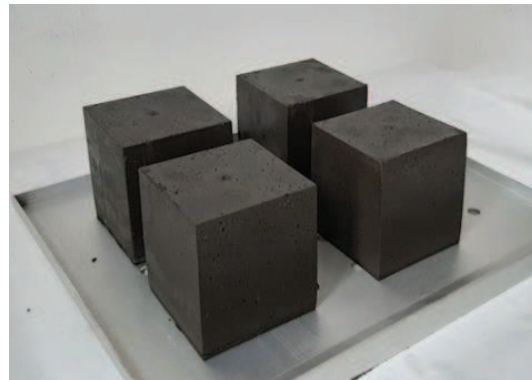
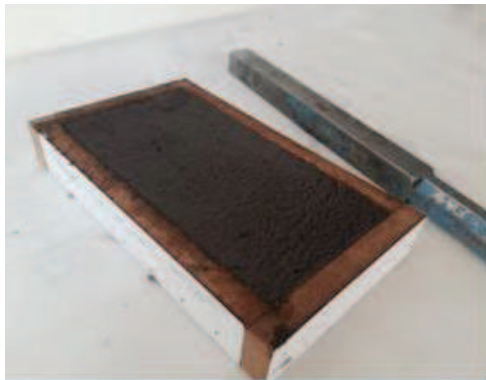
۲-۳- ساخت آجرنما و قطعات ژئوپلیمری

مطابق استاندارد ASTM C1634 معادل استاندارد ملی

۱۶۲۱۱، آجرنمای بتنی-ویژگی‌ها، عرض آجرنمای بتنی حداکثر ۱۰ سانتی‌متر است و سنگدانه‌ی به کار رفته در آن مطابق استاندارد ملی ۳۰۲ می‌باشد. از آنجایی که 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 ۲۰×۱۰×۵/۲ 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							شرایط عمل‌آوری
	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)	
M۱	۱۰	۱۶۰۱/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۴۹	۴۸ h و ۹۰°C
M۲	۱۶	۱۵۹۴/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۵۵	۴۸ h و ۹۰°C
M۳	۱۰	۱۴۷۲	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۰	۴۸ h و ۹۰°C
M۴	۱۶	۱۴۷۵	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۳	۴۸ h و ۹۰°C
M۵	۱۰	۱۶۰۱/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۴۹	۲۴ h و ۶۰°C
M۶	۱۶	۱۵۹۴/۵	۳۵۰	۴۵	۱۱۲/۵	۷	۵۵	۲۴ h و ۶۰°C
M۷	۱۰	۱۴۷۲	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۰	۲۴ h و ۶۰°C
M۸	۱۶	۱۴۷۵	۴۰۰	۵۱/۴۲	۱۲۸/۵۸	۸	۶۳	۲۴ h و ۶۰°C



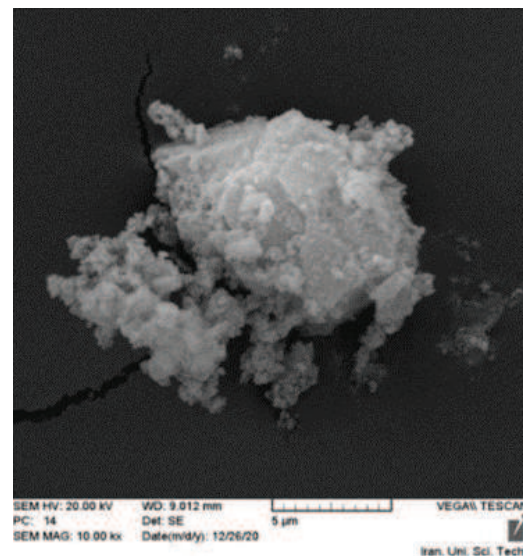
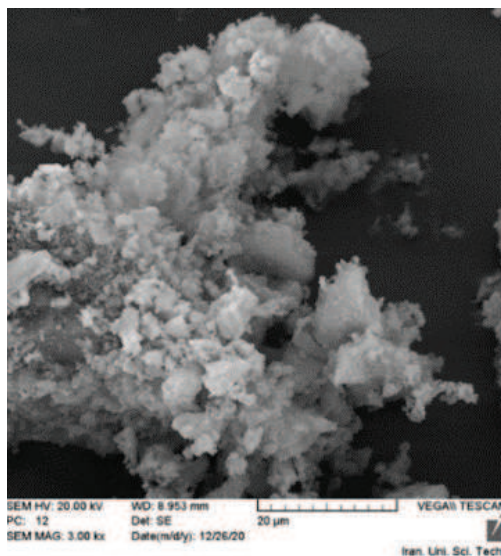
شکل ۳- آزمون‌های مکعبی بتن ژئوپلیمری (راست) و آجرنمای ژئوپلیمری قالب‌گیری شده (چپ)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- چگالی نسبی و بررسی ساختار خاکستر

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 شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) خاکستر با دو بزرگنمایی مختلف آمده است که نشان‌دهنده ذرات با شکل نامنظم و منافذ میکرونی و بسیار ریز روی سطح آن است که دلیل اصلی پایین بودن چگالی توده‌ای RHA می‌باشد.

چگالی نسبی خاکستر با روش بالن لوشاتلیه معادل $2/096$ تعیین شده که در محاسبات طرح اختلاط با تقریب معادل $2/1$ در نظر گرفته شده است. چگالی نسبی RHA در محدوده $2/05-2/53$ می‌باشد، که کمتر از سیمان پرتلند با چگالی نسبی $3/10-3/14$ است. بنابراین در جایگزینی



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی خاکستر پوسته برنج



خمیری و بدون اسلامپ است. با افزایش مولاریته محلول قلیایی از ۱۰ مولار به ۱۶ مولار و افزایش مقدار خاکستر از 35 kg/m^3 به 400 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 پسته برنج بوده که آب موجود در ماتریس بتن را جذب می‌کند. [۳]

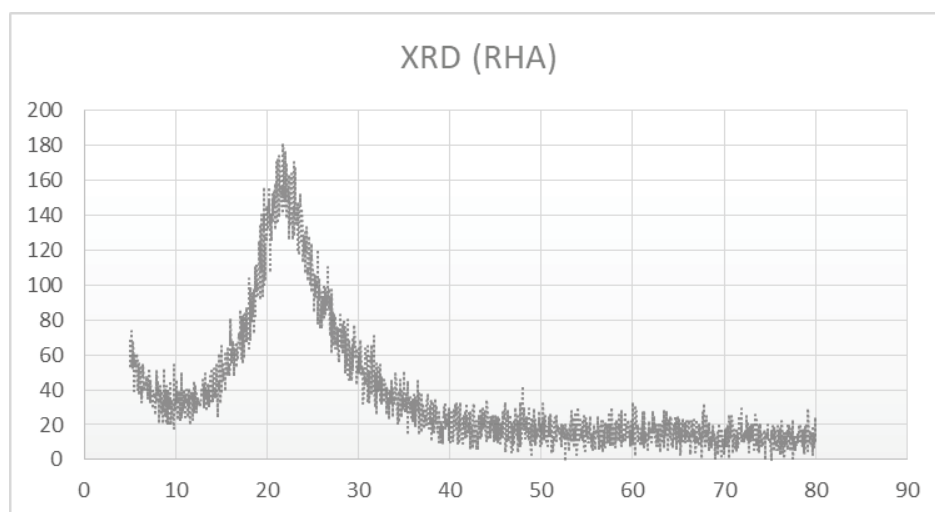
۳-۳- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری یکی از پایه‌ای‌ترین 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 $2/11 \text{ Mpa}$ و مربوط به نمونه با عیار 350 kg/m^3 و غلظت ۱۰ مولار می‌باشد.

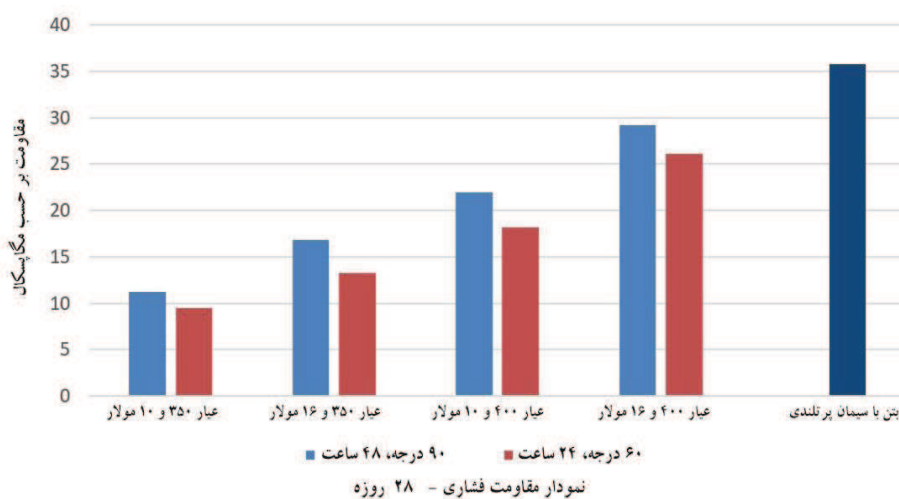
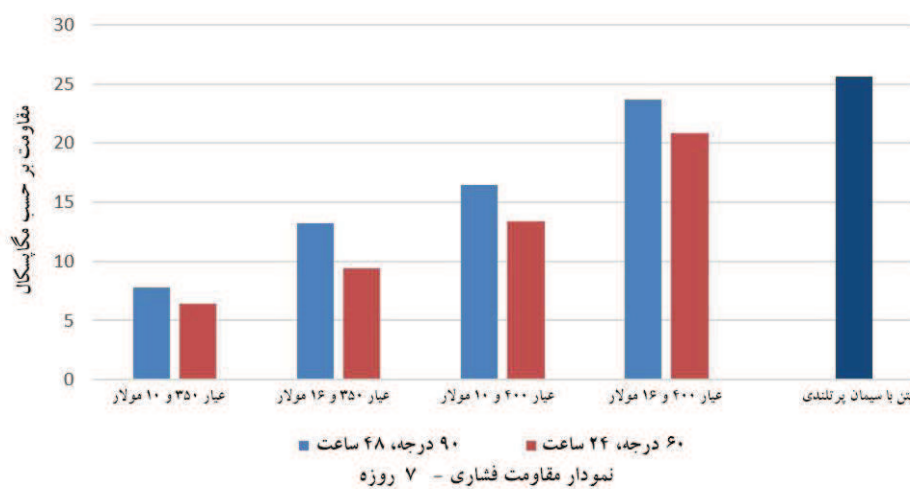
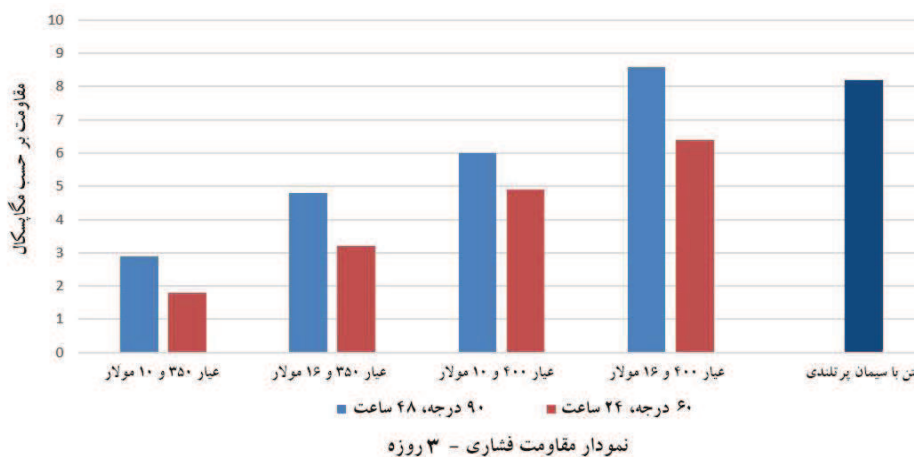
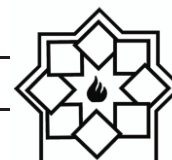
همچنین نمودار پراش اشعه ایکس خاکستر در شکل ۵ آمده است. در نمودار XRD خاکستر هیچ‌گونه پیک بلوری مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد خاکستر مورد آزمایش آمورف می‌باشد، اما با توجه به شیب زیاد نمودار کمی از شرایط بهینه فاصله دارد. [۱۷] فاصله‌ی نمودار از حالت بهینه به دلیل بالا بودن محدوده‌ی دمایی کوره تولید RHA 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 پسته‌ی 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



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



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



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 400 kg/m^3 خاکستر و غلظت ۱۶ و ۱۰ مولار به ترتیب جذب آب معادل $3/46\%$ و $4/58\%$ داشته‌اند، که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول آن‌ها می‌باشد. جذب آب نمونه با عیار 350 kg/m^3 خاکستر و غلظت ۱۶ مولار جذب آب معادل $5/23\%$ درصد داشته که از لحاظ استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ قابل پذیرش می‌باشند. اما نمونه با عیار خاکستر 350 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

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 $29/2 \text{ Mpa}$ و مربوط به نمونه با عیار 400 kg/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 400 kg/m^3 و غلظت ۱۰ مولار و نمونه با عیار 350 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 400 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



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 می شود که بر اساس نمودار پراش اشعه ایکس قابل تشخیص و مقایسه است.

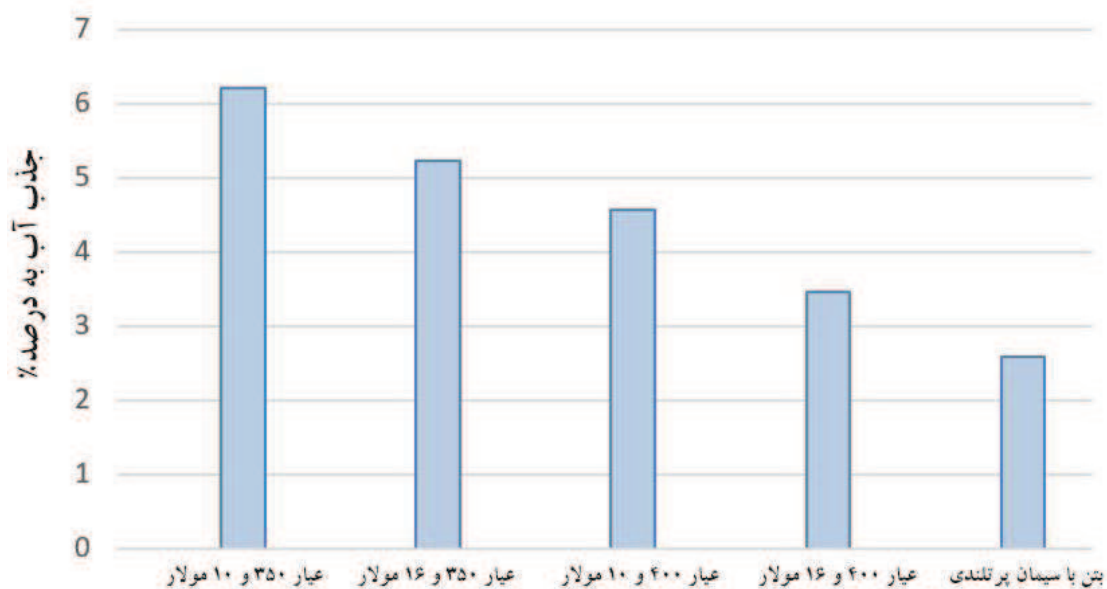
۲- آسیاب مناسب اهمیت ویژه ای در میزان واکنش پذیری خاکستر دارد. با افزایش زمان آسیاب (حداقل ۴۵ دقیقه) سطح ویژه و نرمی افزایش می یابد که تاثیر بسیار زیادی بر روی تسریع واکنش پلیمریزاسیون دارد. ذرات بزرگ تر از ۴۵ میکرون تاثیر زیادی بر پیشبرد واکنش و کسب مقاومت بتن ژئوپلیمری ندارند.

۳- خاکستر پوسته ی برنج اگر به تنهایی به عنوان ماده جایگزین سیمان مصرف شود، در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند مقاومت کمتری کسب می کند، اما با مخلوط کردن خاکستر بادی و یا سرباره برای تولید

بتن ژئوپلیمری می توان به مقاومت های بسیار بالا دست یافت. هرچند به دلیل سبک بودن بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند، نهایتاً نسبت مقاومت به وزن قابل قبولی دارد.

۴- مقاومت فشاری و دوام بتن ژئوپلیمری با عیار خاکستر و مولارینه محلول قلیایی رابطه مستقیم دارد. با افزایش خاکستر مخلوط بتن ویسکوزیته بالا و ساختار بسیار همگن و چسبنده کسب می کند 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 عمل آوری مقاومت فشاری افزایش چشم گیری 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



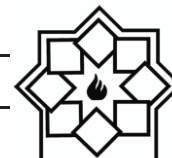
شکل ۸- آجرنمای بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر پوسته برنج در کنار آجرنمای بتنی با سیمان پرتلند

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

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, Dharendra 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



- 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] Ramezaniapour, 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.

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

Saba Naeef^{1*}, Mohsen Sartipipour², Alireza Rahmati³

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.naeef@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/m³ and 400 kg/m³ 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/m³ of RHA and 16 M Alkali solution, which was Heat cured at 90°C. By reducing the amount of RHA to 350 kg/m³ 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/m³ of RHA and 16 M alkaline solution. By reducing the RHA content to 350 kg/m³ and preserving other components, the percentage of water absorption increased to 5,23 %.

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