Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.3, No.3; 2025.pp: 17-29

Research paper

(Received 29 Dec. 2024 Accepted 2 Sep. 2025)

Strength of geopolymer clay blocks using industrial-agricultural waste and synthetic sodium silicate

Elnaz Zangiabadi*[1], Hanie Abbaslou[1], Hatef Seifollahi[1]

[1]*Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran*

Abstract

Considering the three major problems of energy crisis, raw material shortage, and waste generation, the development of environmentally friendly building materials is one of the progressing programs in the field of civil engineering. This study investigates the use of industrial and agricultural wastes in the development of sustainable clay blocks through activated geopolymerization technology with synthesized sodium silicate. Kaolinite clay was used as the initial matrix and supplemented with industrial fly ash, rice husk ash, and natural sands to synthesize sodium silicate additive. The alkaline activator was synthesized from silica sand through an optimized dissolution process with sodium hydroxide, and the SiO_2/Na_2O molar ratio was 1.5 and the H_2O/Na_2O ratio was 10. The samples were tested under different curing conditions and different concentrations of synthetic sodium silicate in clay blocks with different percentages of waste (0.5, 1, and 1.5%). Key findings show that: (1) compressive strength increased by 21–24% with 30 cc of alkaline activator at 150°C curing condition. (2) optimal substitution of 1% rice husk ash yielded maximum strength (1.81 MPa) that outperformed fly ash; (3) longer curing time increased strength by 18–30% in 28-day specimens due to complete geopolymerization; (4) silica sand-derived activator was economically viable. The results confirm that waste-derived geopolymers reduce energy consumption while utilizing industrial/agricultural byproducts and provide a scalable route to environmentally friendly construction.

Keywords: Green materials, Clay, Geopolymer, Ash, Waste

*Corresponding Author: Elnaz Zangiabadi
Email: *e.zangiabadi.ahco@gmail.com*
Phone: 09136174554

Doi: 10.48306/juem.2025.496509.1062

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال سوم/شماره سوم/پاییز ۱۴۰۴/صفحه ۱۷-۲۹

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۱

مقاومت بلوک‌های رسی ژئوپلیمری با استفاده از ضایعات صنعتی-کشاورزی و سیلیکات سدیم سنتزی

الناز زنگی آبادی*[۱]، حانیه عباسلو[۲]، هاتف سیف اللهی[۳]

[۱] *دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان*

[۲] *دانشیار گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان*

[۳] *کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان*

چکیده

باتوجه به سه معضل مهم انرژی، کمبود مواد اولیه، و پسماند، توسعه مصالح ساختمانی سازگار با محیط زیست جزوء برنامه های توسعه ای حوزه مهندسی عمران می باشد. این مطالعه به بررسی استفاده از ضایعات صنعتی و کشاورزی در توسعه بلوک‌های رسی پایدار از طریق فناوری ژئوپلیمریزاسیون فعال‌شده با سیلیکات سدیم سنتز شده می‌پردازد. خاک رس کائولینیت به عنوان ماتریس اولیه استفاده شد و با خاکستر بادی صنعتی، خاکستر پوسته برنج و ماسه های طبیعی جهت سنتز افزودنی سیلیکات سدیم تکمیل شد. فعال‌کننده قلیایی از طریق فرآیند انحلال بهینه‌شده با هیدروکسید سدیم از ماسه سیلیسی سنتز شد و نسبت مولی SiO_2/Na_2O برابر با ۱/۵ و نسبت H_2O/Na_2O برابر با ۱۰ به دست آمد. نمونه‌ها تحت شرایط مختلف عمل‌آوری و غلظت‌های مختلف سیلیکات سدیم سنتزی در بلوک های رسی با درصدهای مختلف ضایعات (۰/۵، ۱، و ۱/۵ درصد) آزمایش شدند. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند که: (۱) مقاومت فشاری با ۳۰ سی‌سی فعال‌کننده قلیایی در عمل‌آوری ۱۵۰ درجه سانتیگراد ۲۱ تا ۲۴ درصد افزایش یافت. (۲) جایگزینی بهینه ۱٪ خاکستر پوسته برنج، حداکثر مقاومت (۱/۸۱ مگاپاسکال) را به همراه داشت که از خاکستر بادی بهتر عمل می‌کرد؛ (۳) عمل‌آوری طولانی‌تر به دلیل ژئوپلیمریزاسیون کامل، مقاومت را ۱۸ تا ۳۰ درصد در نمونه‌های ۲۸ روزه افزایش داد؛ (۴) فعال‌کننده مشتق‌شده از ماسه سیلیس از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه بود. نتایج تأیید می‌کند که ژئوپلیمرهای مشتق‌شده از ضایعات، انرژی مصرفی را کاهش می‌دهند و در عین حال، محصولات جانبی صنعتی/کشاورزی را به کار می‌گیرند و مسیری مقیاس‌پذیر برای ساخت‌وساز سازگار با محیط زیست ارائه می‌دهند.

واژگان کلیدی: مصالح سبز، رس، ژئوپلیمر، خاکستر، پسماند

* نویسنده مسئول: الناز زنگی آبادی

ایمیل: *e.zangiabadi.ahco@gmail.com*

تلفن: ۰۹۱۳۶۱۷۴۵۵۴

Doi: 10.48306/juem.2025.496509.1062

۱-مقدمه

مصالح ساختمانی سازگار با محیط‌زیست رو به افزایش بوده و این صنعت به‌سرعت درحال‌رشد است. عوامل اصلی مؤثر بر محبوبیت روزافزون مصالح ساختمانی سازگار با محیط‌زیست شامل مقررات زیست‌محیطی، ارزش منابع طبیعی، کاهش پسماند و تأثیر بر محیط و سلامت انسان است. با واردشدن بشریت در عصر جدید دیدگاه‌های مختلفی مدنظر قرار گرفت از جمله حفظ محیط‌زیست و بهینه‌سازی مصرف انرژی به عبارتی دیگر می‌توان مطرح کرد که زندگی آینده ما در گرو مسائلی همچون استفاده کمتر از منابع فسیلی، استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از مواد و مصالح قابل بازیافت، پایداری و چرخه حیات و برگشت‌پذیری محصولات است. اگر در ساخت آجرهای رسی از درصد صحیح پسماندهای بازیافت شده صنعتی و شهری استفاده گردد، مفید واقع شده و روش مناسبی جهت دفع ضایعات آلاینده است. این امر سبب کاهش هزینه مواد اولیه و مصرف انرژی و بهبود خواص آن خواهد شد [۱]. امروزه با افزایش تولید CO_2 و انتشار گاز های گلخانه ای و عدم تعادل اکولوژیکی و کاهش مداوم منابع طبیعی که سبب تغییر کاربری زمین شده ، در انعکاس این وضعیت تولید سبز و پایدار کالاها در راستای محدودیت کاهش انتشار گاز های گلخانه ای مورد ترویج قرار گرفته است [۲]. با گسترش نیاز به مصالح ساختمانی پایدار، مطالعات متعددی به بررسی ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند پرداخته‌اند. ژانگ و همکاران [۳] نشان دادند که استفاده از خاکستر بادی در ساخت ژئوپلیمرها می‌تواند تا ٪۴۰ از انتشار CO_2 بکاهد، اما شوره‌زایی سطحی از چالش‌های اصلی آن است. از سوی دیگر، محسنی و همکاران [۴] تأکید کردند که خاکستر سبوس برنج (RHA) به‌دلیل محتوای بالای سیلیس آمورف (٪۹۷-۸۹)، عملکرد پوزولانی برتر نسبت به سایر ضایعات کشاورزی دارد. در زمینه فعال‌کننده‌های قلیایی، خضری و همکاران [۵] سنتز سیلیکات سدیم از ماسه سیلیکاتی را با نسبت مولی SiO_2/Na_2O ۱,۵:۱ بهینه تشخیص دادند که هزینه تولید را تا ٪۳۵ کاهش می‌دهد. فرآیند ژئوپلیمراسیون یک واکنش شیمیایی بین اکسید های Siو Al را نشان می دهد که منجر به تشکیل یک زنجیره پلیمری سه بعدی و ساختار حلقه با پیوند های Si-O-Al-O می گردد. به عبارت دیگرSiO_2 وAl_2O_3 در ماده خام در ابتدا در محلول قلیایی حل می شود تا Si وAl تشکیل شود سپس Si وAl تحت واکنش ژئوپلیمراسیون قرار می گیرد تا ژل ژئوپلیمر تشکیل شود، در نهایت این ژل و ذرات بی اثر ماده خام به هم متصل شده و ژئوپلیمر را تشکیل می دهد [۶]. این فرآیند به عواملی همچون طرح اختلاط فعال کننده قلیایی، دمای پخت و دوره عمل آوری بستگی دارد [۷]. با توجه به اینکه هر ماده غنی از آلومینیم و سیلیس، می‌تواند به عنوان ماده اولیه (بستر اصلی)، در سنتز ژئوپلیمر استفاده شود. بسته به هزینه و خواص مورد نظر، طیف گسترده‌ای از مواد خام، در سنتز ژئوپلیمر کاربرد دارند. موادی که قابلیت استفاده در سنتززئوپلیمر به‌عنوان بستر اصلی، را دارند، شامل مواد معدنی طبیعی، چون خاک رس، کائولینایت و زئولیت و ضایعاتی چون گل قرمز، خاکستر بادی یا سرباره، می‌باشند [۸]. مطالعه الکرانی [۹] بر روی عمل‌آوری حرارتی نشان داد که دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد با زمان ۲۴ ساعته، استحکام فشاری ژئوپلیمرهای مبتنی بر کائولین را تا ٪۲۵ نسبت به عمل‌آوری محیطی افزایش می‌دهد. هنگامی که خاکستر بادی به عنوان ماده اولیه در ساخت ژئوپلیمر استفاده می شود، عواملی همچون نسبت فعال کننده قلیایی، شرایط سوختن خاکستر بادی، انواع و محتویات معدنی موجود در آن و اندازه و شکل ذرات و غیره در واکنش ژئوپلیمراسیون موثر است. در حین فرآیند برای بدست آوردن استحکام بالا، بیش از حد با فعال کننده قلیایی واکنش می دهد که سبب ایجاد شوره در سطح ژئوپلیمر و بدتر شدن کیفیت آن می گردد. اما در مقایسه با روش های دیگر استفاده از خاکستر بادی موثر تر و مقرون به صرفه تر می باشد[۱۰]. براساس مطالعات انجام شده ضایعاتی چون خاکستر سبوس برنج و گندم حاوی درصدهای بالایی از سیلیس هستند که در سنتز ژئوپلیمر بسیار کاربردی می‌باشند. استفاده از ضایعات در سنتز ژئوپلیمر، علاوه بر کاهش هزینه‌های سنتز، از رهاسازی حجم عظیم ضایعات در طبیعت جلوگیری می‌کند. خاکستر پوسته برنج، ضمن دارا بودن محتوای بالای سیلیس با سطح ویژه زیاد، جهت فعال کردن واکنش پوزولانی بسیار مناسب است [۱۱]. در یک بررسی مشخص شد که افزایش میزان بستر و فعال‌کننده قلیایی موجب انحلال بهتر یون‌های Si^{+4} و Al^{+3} و تشکیل بیشتر ژل‌های آلومینوسیلیکات شده و مقاومت افزایش می‌یابد [۱۲].از طرفی هرچه مولاریته بهینه کمتر باشد، به دلیل مصرف کمتر سود، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود [۱۳]. مطالعات انجام شده نشان می دهد که میزان فعال‌کننده قلیایی به‌عنوان پیشرو واکنش پلیمریزاسیون بسیار مورد اهمیت است. اگر دوز فعال‌کننده قلیایی بیش‌ازحد باشد، نسبت سیلیس به آلومینیوم در سیستم واکنش بالا رفته، از دامنه مطلوب خارج شده و باعث ایجاد اختلال در ساختار داخلی ژئوپلیمر می‌شود و در نتیجه بر میزان مقاومت فشاری نمونه اثر منفی می‌گذارد [۱۴]. رابطه بین زمان عمل آوری و مقاومت فشاری به این صورت است که در نمونه‌های ۲۸ روزه که مدت زمان کافی جهت انجام واکنش ژئوپلیمریزاسیون وجود داشت، تشکیل آلومینوسیلیکات‌ها به خوبی صورت پذیرفت و در اطراف نمونه‌ها به راحتی قابل مشاهده بود. این

ژل‌های سیلیکاته و محصولات کریستالی ساختار نمونه را به طور اساسی بهبود بخشیده و این امر افزایش مقاومت را به همراه داشت [۱۵].

با این وجود، تحقیقات پیشین به‌طور همزمان نواقصی مانند، استفاده انحصاری از فعال‌کننده‌های تجاری (نه سنتزی از منابع بومی)، عدم مقایسه سیستماتیک ضایعات صنعتی و کشاورزی در شرایط یکسان، عدم بهینه‌سازی همزمان دما-زمان-نسبت اختلاط را دارند. این موضوع، ضرورت تولید بلوک رسی با انرژی مصرفی پایین و سازگار با محیط‌زیست را آشکار می‌کند. بنابراین تحقیق حاضر با اهداف (۱) سنتز فعال‌کننده قلیایی از ماسه سیلیکاتی بومی و تعیین نسبت های بهینه مولی SiO_2/Na_2O و H_2O/Na_2O در ساخت سیلیکات سدیم و ارزیابی کارایی آن در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، (۲) تعیین تاثیر ضایعات صنعتی (خاکستر بادی) و کشاورزی (خاکستر سبوس برنج) و مقایسه سهم هر پسماند در بهبود مقاومت فشاری بلوک‌های رسی تحت دماهای عمل‌آوری متفاوت و تعیین مناسبترین طرح اختلاط، و (۳) بهینه‌سازی پارامترهای عمل‌آوری و تحلیل اثر زمان (۷ و ۲۸ روز) بر تشکیل ژل آلومینوسیلیکات و مکانیزم افزایش مقاومت انجام گرفت.

۲- روش کار

۲-۱-مواد مورد استفاده

مواد استفاده شده در این مقاله شامل خاک رس کائولینایت، ماسه سیلیکاتی معدنی بومی (دشت ریگ سفید شهربابک) جهت ساخت محلول فعال‌کننده قلیایی و ضایعات صنعتی و کشاورزی (سبوس برنج مزارع شمال ایران و خاکستر صنعتی شرکت پارسمان شیمی) به‌عنوان مواد افزودنی در ساخت بلوک رسی استفاده شده است. همچنین هیدروکسید سدیم مورد استفاده تهیه شده از برند شرکت مرک و آب مقطر از برند شرکت طب شیمی بوده است.

۲-۲-ساخت بلوک رسی

منبع سیلیس در ساخت محلول فعال‌کننده قلیایی در این پژوهش ماسه سیلیکاتی است، جهت استفاده از آن در تهیه محلول، ابتدا در آسیاب‌های صنعتی کاملاً پودر گردید. در ساخت این محلول از ماسه سیلیکاتی به‌عنوان منبع سلیس، سدیم هیدروکسید جهت افزایش قلیائیت و آب مقطر استفاده گردید این مواد با نسبت‌های $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ = ۱/۵ و $\frac{H_2O}{Na_2O}$ = ۱۰ با یکدیگر ترکیب شدند [۱۶]. سپس با توجه به این نسبت ها، جرم اختلاط مواد محاسبه گردید. سپس بر روی دستگاه همزن مغناطیسی SCIENTIFICA VELP با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته تا کاملا مخلوط گردند، در نهایت از یک کاغذ صافی، ترکیب ساخته شده عبور داده شد [۱۶]. برای استخراج سیلیس از ماسه سیلیکاتی ابتدا دو محلول با میزان ماسه سیلیکاتی و NaOH یکسان ساخته شد سپس به یکی از این محلول‌ها حرارت داده و از کاغذ صافی گذرانیده شد، محلول دیگر که نمونه شاهد نام گرفت بدون حرارت از کاغذ صافی عبور داده شد سپس عصاره آنها در داخل آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ و در نهایت در کوره با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفتند. در نهایت اختلاف وزن دو نمونه اندازه‌گیری شد که این نتیجه میزان استخراج سیلیس از سیلیکات سدیم را نشان می‌دهد [۱۶]. قالب با ابعاد مورد نیاز (طول: ۱۶ سانتیمتر، عرض: ۴ سانتیمتر، و ارتفاع: ۴ سانتیمتر) تهیه گردید. سپس ملات‌های تهیه شده با شرایط مختلف دما، زمان عمل آوری و افزودنی های با درصدهای متفاوت (مطابق جدول ۱) با میکسر بتن به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط می‌شوند تا اینکه یک مخلوط همگن به دست آید. نمونه‌ها در دماهای مختلف و زمانهای متفائت عمل‌آوری گردیدند؛ سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری روی بلوک‌های رسی صورت پذیرفت. شکل ۱، تصویری از بلوکهای رسی عمل آوری شده را نشان میدهد.

جدول۱- بلوک های رسی تهیه شده در شرایط مختلف دما، زمان عمل آوری و افزودنی های با درصدهای مختلف

ردیف	ساختار ملات	مقادیر افزودنی (سی سی)	دما (درجه سانتی گراد)	زمان عمل آوری (روز)
۱	خاک کائولینایت+مواد فعال کننده قلیایی	۱۰،۲۰،۳۰،۵۰،۱۰۰،۲۰۰	۲۶،۱۵۰	۷ و ۲۸
۲	خاک رس کائولینایت + محلول سیلیکات سدیم			

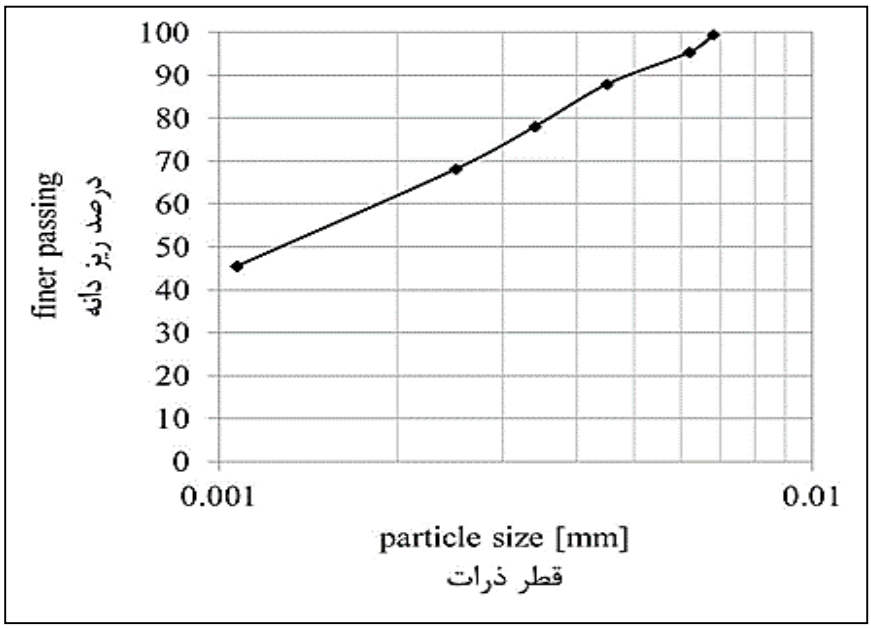
شکل ۱- نمونه‌های بلوک رسی ساخته شده با بسترهای مختلف

۲-۳-آزمایشات

جهت شناخت دقیق ترکیبات و ویژگی های مواد مورد استفاده، آزمایشات مورد نیاز شیمیائی و فیزیکی انجام گرفت. تحلیل عنصری ماسه سلیکاتی، خاکستر صنعتی و پوسته برنج توسط دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) ساخت کشور هلند، کمپانی PHILIPS و مدل PW1410 انجام شد. کانی شناسی رس کائولینایت توسط تفرق اشعه ایکس (XRD) ساخت کشور هلند، کمپانی PHILIPS و مدل PW1730 انجام شد. دانه بندی به روش هیدرومتری، حدود اتربرگ، چگالی خاک، pH ، تراکم و مقاومت فشاری محصور نشده بودند جهت بررسی خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده به عنوان بستر بلوک رسی انجام گرفت [۱۷]. مقاومت فشاری تک‌محوری تحت تنش فشاری با سرعت بارگذاری ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه، انجام شد.

۳- نتایج و بحث

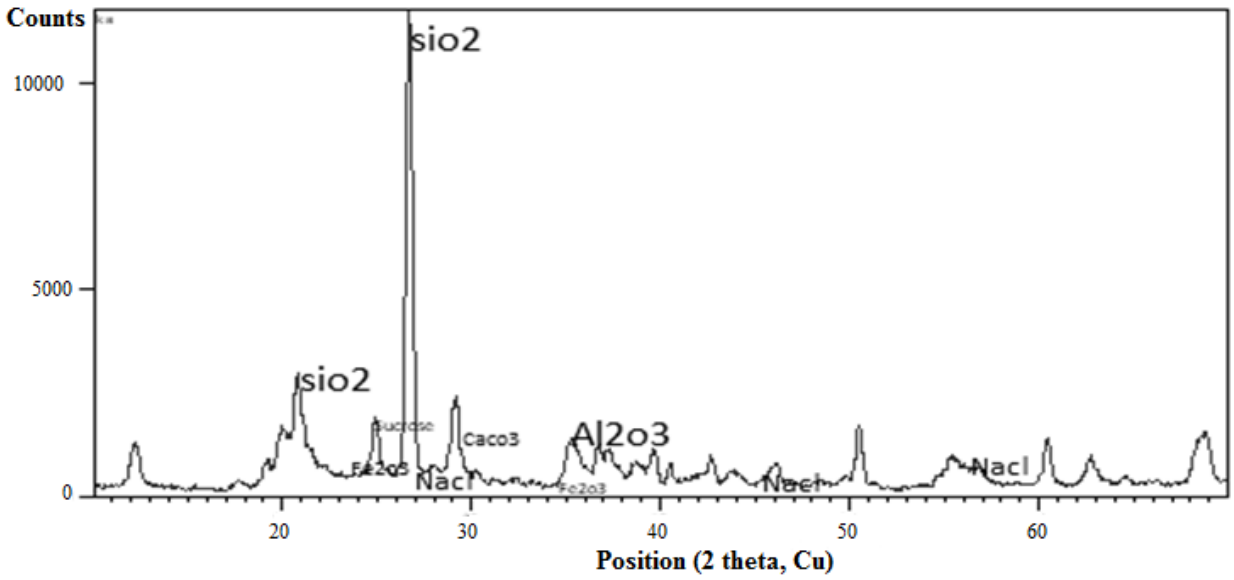
خصوصیات خاک رس (کائولینایت) به عنوان بستر اصلی بلوک رسی در جدول ۲ آورده شده است. دانه بندی خاک رس کائولینایت (شکل ۲) نشان میدهد که همه ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۹ میلیمتر بوده که در حدود ۶۰ درصد آن در اندازه رس و ۴۰ درصد در اندازه سیلت ریزدانه می باشد. همچنین آنالیز تفرق اشعه ایکس رس کائولینایت طبیعی (ترکیب آلومینوسیلیکاتی به همراه ناخالص های اندکی از آهن، کلسیم و سدیم) در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۲- دانه بندی خاک رس کائولیانیت

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی خاک رس بلوک رسی (کائولینایت)

ویژگی	کیفیت/مقدار
دانه بندی	ریز دانه (رس سیلتی)
حد خمیری	٪ ۲۹/۱
حد روانی	٪ ۵۰/۶
چگالی خاک	۲/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب
pH	۷/۵
تراکم	رطوبت بهینه: ٪۲۰ و وزن مخصوص خشک حداکثر: ۱/۶۵گرم بر سانتی‌مترمکعب
مقاومت فشاری	Qu: ۲/۴۵، Cu: ۱/۲۳ مگاپاسکال



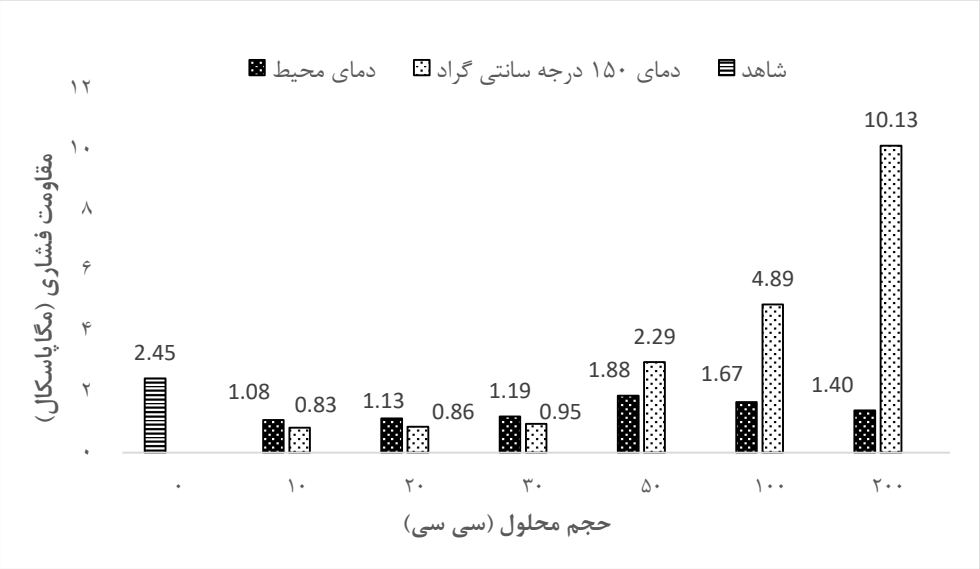
شکل ۳- XRD خاک رس کائولینایت

نتایج ترکیب شیمیائی مواد اصلی مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. ماسه مصرفی حاوی ۹۰/۰۱ درصد سیلیس است که بایستی جهت ساخت فعال‌کننده قلیایی این میزان سیلیس استخراج گردد. این ماده پتانسیل بالایی جهت استفاده به‌عنوان منبع سیلیکا آمورف در ساخت ژئوپلیمر دارد. برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی از ماسه سیلیکاتی و سدیم هیدروکسید استفاده گردید. ماسه سیلیکاتی به‌عنوان منبع سیلیس و سدیم هیدروکسید جهت استخراج سیلیس در این پژوهش بکار برده شد. باید توجه داشت که با افزایش هر یک از این دو منبع واکنش با اختلال روبه‌رو می‌گردد، با افزایش میزان ماسه سیلیکاتی غلظت سیلیس بالا رفته چگالی چسب ژئوپلیمر کاهش می‌یابد، در نتیجه ضعیف عمل خواهد کرد. از طرفی با افزایش سدیم هیدروکسید نیز ویسکوزیته بالا رفته و از شسته شدن سیلیس و آلومینیوم جلوگیری می‌نماید و سبب کاهش کیفیت ژئوپلیمر می‌گردد. در این پژوهش از نسبت ۱ به ۲ سیلیس به سدیم هیدروکسید استفاده گردید [۱۹و۲۰]. همچنین خاکستر پوسته برنج و خاکستر صنعتی دارای مقادیر سیلیس به ترتیب ۸۹/۵ و ۲۳/۵ درصد می باشند که قابل توجه به ویژه برای پوسته برنج می باشد. اما درصد آلومینیوم و کلسیم خاکستر صنعتی بیش ار پوسته برنج می باشد.

جدول۲- ترکیب شیمیایی (XRF) ماسه سیلیکاتی، خاکستر صنعتی و خاکستر سبوس برنج

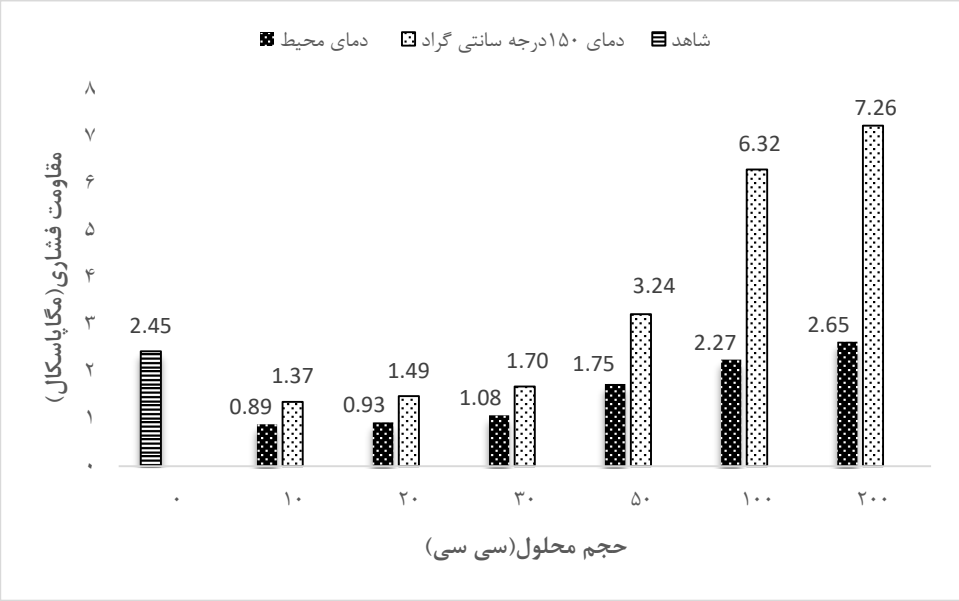
ترکیبات	ماسه سیلیکاتی	خاکستر صنعتی	خاکستر پوسته برنج
سیلیس (SiO_2)	۹۰/۰۱	۲۳/۵۱	۸۹/۵
آلومینیوم (Al_2O_3)	۳/۳۳	۳/۵۰	۰/۲۷
آهن (Fe_2O_3)	۰/۷۳	۴۵/۲۲	۰/۶۳
کلسیم (CaO)	۱/۹۷	۱۲/۰۸	۱/۱۶
سدیم (Na_2O)	۰/۶۹	۰/۴۳	۰/۷۴
منیزیم (MgO)	۰/۱۳	۸/۹۷	۱/۶۴
پتاسیم (K_2O)	۱/۰۰	۰/۵۹	۳/۵۵
تیتانیوم (TiO_2)	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۰۳
منگنز (MnO)	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۹
(P_2O_5)	۰/۰۱	۰/۵۴	۱/۱۳
هدر روی از طریق احتراق (LOI)	۱/۹۸	۴/۷۸	۰/۵۰

شکل ۴ و ۵ به ترتیب مقاومت فشاری بلوک رسی با مخلوط سیلیکات سدیم مصنوعی و سنتز شده با ماسه سنگ معدنی را نشان می دهند. با توجه به شکل ۴، در دمای محیط مقاومت فشاری از ۱/۰۸ مگاپاسکال در ۱۰ سی سی سیلیکات سدیم به ۱/۱۹ مگاپاسکال در ۳۰ سی سی سیلیکات سدیم رسیده است؛ یعنی مقاومت فشاری در این حالت با افزایش ۱۰ درصدی روبروست، همچنین درصد افزایش مقاومت به ازای هر مرحله افزایش سلیکات سدیم در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد بیشتر از دمای محیط است، به عبارت دیگر از ۱۰ سی سی به ۳۰ سی سی مقاومت فشاری ۱۴ درصد افزایش یافته در صورتی که در دمای محیط مقاومت فشاری فقط ۱۰ درصد افزایش داشته است. همینطور از ۳۰ سی سی تا ۲۰۰ سی سی سیلیکات سدیم در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد مقاومت به صورت چشمگیری افزایش یافته در حالی که در شرایط محیط تنها ۱۷ درصد افزایش داشته است. با افزایش درصد سیلیکات سدیم در هر دو دمای عمل‌آوری مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است که این بدین معنی است با افزایش درصد سیلیکات سدیم، فرآیند ژئوپلیمری شدن و تشکیل ژل ژئوپلیمری بهتر اتفاق می افتد و باعث تحکیم بیشتر مواد می شود و مقاومت افزایش می یابد. رابطه بین دمای عمل‌آوری و مقاومت بدین صورت است که با افزایش دما تا رسیدن به دمای بهینه مقاومت فشاری به دلیل انحلال بهتر مواد، افزایش‌یافته و پس آن به دلیل بالارفتن بیش از حد سرعت انحلال و کامل نشدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون مقاومت کاهش می‌یابد[۲۱].



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های خاک رس کائولینایت و محلول سیلیکات سدیم (غیر سنتزی).

باتوجه به شکل ۵، در دمای محیط مقاومت فشاری از ۰/۸۹ مگاپاسکال در ۱۰ سی سی فعال کننده قلیایی ماسه سلیکاتی به ۱/۰۸ مگاپاسکال در ۳۰ سی سی فعال کننده قلیایی ماسه سلیکاتی رسیده است یعنی مقاومت فشاری در این حالت با افزایش ۲۱ درصدی روبروست، همچنین درصد افزایش مقاومت به ازای هر مرحله افزایش فعال کننده قلیایی ماسه سلیکاتی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد بیشتر از دمای محیط است؛ به عبارت دیگر از ۱۰ سی سی به ۳۰ سی سی مقاومت فشاری ۲۴ درصد افزایش یافته در صورتی که در دمای محیط مقاومت فشاری ۲۱ درصد افزایش داشته است. همینطور از ۳۰ سی سی تا ۲۰۰ سی سی فعال کننده قلیایی ماسه سلیکاتی در دمای محیط و ۱۵۰ درجه سانتیگراد درصد افزایش مقاومت به صورت چشمگیری بالا رفته است. با افزایش میزان فعال‌کننده قلیایی مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش‌یافته است؛ زیرا زمانی که فعال‌کننده قلیایی به خاک افزوده می‌شود با نفوذ و رسوب‌گذاری در منافذ ترکیب، ساختاری توپر ایجاد می‌کند و گیرش مخلوط و لخته شدن خاک صورت می‌گیرد[۲۱]. با افزایش دما از دمای محیط به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت افزایش‌یافته است؛ ولی نمی‌توان این دما را بهینه معرفی کرد زیرا باید دماهای حدفاصل این دو دما نیز بررسی گردد.

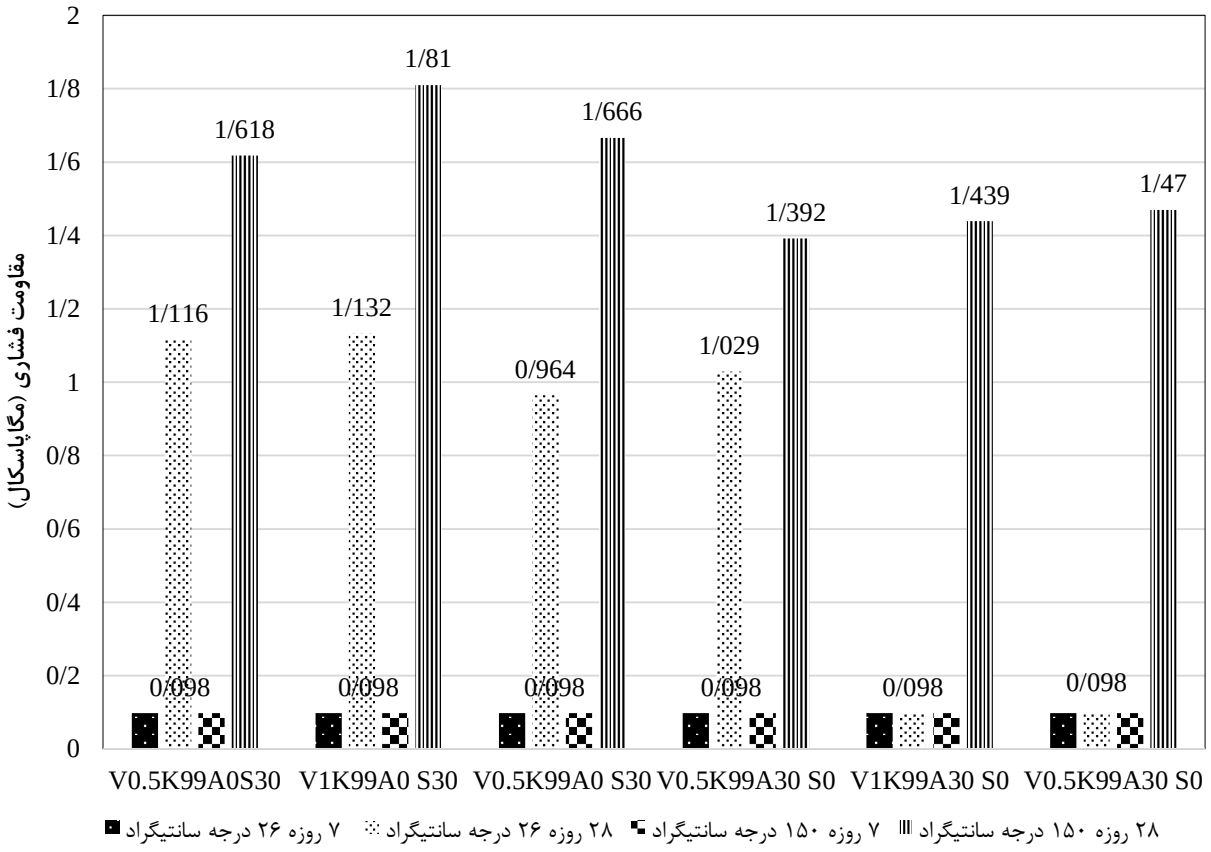


شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های مخلوط خاک رس کائولینایت و محلول فعال‌کننده قلیایی ماسه سیلیکاتی (سنتزی).

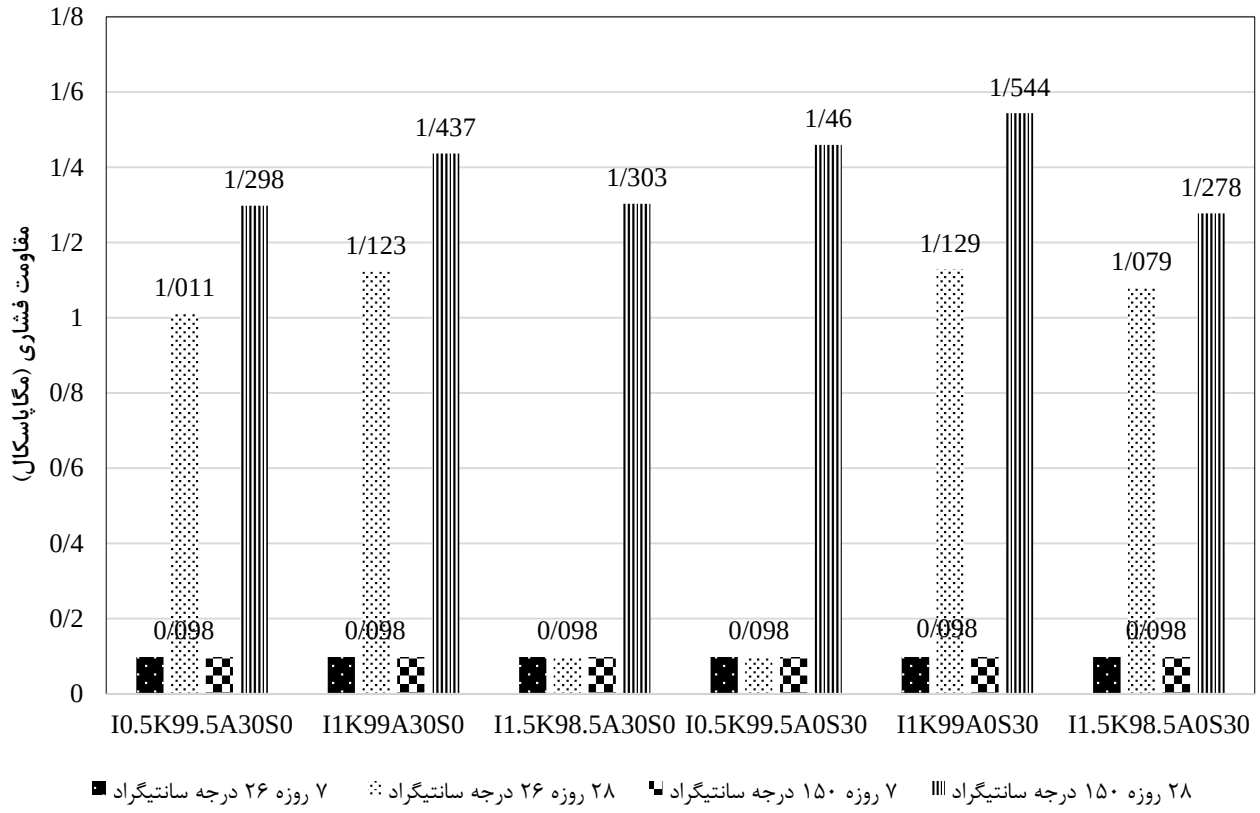
در این تحقیق با اینکه با افزودن مقدار فعال‌کننده قلیایی میزان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، اما به دلیل اینکه این مقاومت در مقایسه با سایر افزودنی‌ها مانند سیمان و آهک، بالا نیست و همچنین افزودن مقدار بیشتر فعال‌کننده قلیایی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده است لذا از اضافه‌کردن بیشتر فعال‌کننده به نمونه‌ها صرف نظر شد و مقدار فعال‌کننده قلیایی نیز به میزان حداکثر ۳۰ سی‌سی به مخلوط‌های با درصدهای مختلف خاکستر صنعتی و گیاهی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصدی) از بسترها و خاک رس کائولینایت اضافه و در دما و زمانهای مختلف، مقاومت فشاری اندازه گیری گردید. شکل ۶ و ۷ به ترتیب مقاومت فشاری بلوک رسی با درصدهای مختلف خاکستر گیاهی و خاکستر صنعتی را نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد، مقاومت فشاری در نمونه‌های ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بود که دلیل آن کامل شدن واکنش پوزولانی در سن ۲۸ روزه و نداشتن زمان مناسب بهسازی در سن ۷ روزه است [۲۲]. نمونه‌های ۷ روزه در حین گسیختگی حالت انعطاف‌پذیر داشته و ترک‌های کوچکی در طول آنها مشاهده شد. نمونه‌های ۲۸ روزه واکنش ژئوپلیمریزاسیون به‌خوبی انجام شد و آلومینوسیلیکات ها تشکیل شدند، همین عامل سبب افزایش مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه گردید [۲۰]، بیشترین مقاومت مربوط به جایگزینی ۱ درصد خاکستر بود و بیشتر از این مقاومت کاهش یافت با توجه به نتایج مقاومت فشاری بلوک های ساخته شده با ضایعات صنعتی و کشاورزی (شکل های ۶ و ۷) ملاحظه می شود که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه با ۳۰ سی سی محلول فعال کننده قلیایی و ۱ درصد جایگزینی خاکستر سبوس برنج با دمای عمل آوری ۱۵۰ درجه سانتی گراد که معادل ۱/۸۱مگاپاسکال می

باشد، خاکستر سبوس برنج نیز در خمیر به‌عنوان منبع سیلیس عمل کرده و باعث افزایش مقاومت نمونه شده است [۲۳] . افزایش مقدار مصرفی خاکستر برنج سبب می‌شود، مقداری خاکستر سبوس برنج (RHA) در واکنش شرکت نکند و در محصولات نهایی باقی بماند و خواص مکانیکی نمونه را ضعیف‌تر و در نهایت نمونه را انعطاف‌پذیرتر کند. افزودن خاکستر به نمونه خاک - ژئوپلیمر موجب انعطاف‌پذیری نمونه در حین گسیختگی گردید. ازآنجاکه خاکستر بادی منبع آلومینوسیلیکات بوده و محلول فعال‌کننده قلیایی منبع سیلیس است هنگامی که آلومینوسیلیکات و سیلیس در یک محیط وجود داشته باشند واکنش‌های پوزولانی کاملاً فعال هستند[۲۴].



شکل ۶- مقاومت فشاری بلوک رسی با درصدهای مختلف خاکستر گیاهی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ ٪) در دو سطح سیلیکات سدیم (۰ و ۳۰)، در زمان (۷ و ۲۸ روز) و دما (۲۵ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد) مختلف عمل آوری (V: خاکستر گیاهی، K: کائولینایت، S: سیلیکات سدیم سنتزی، A: سلیکات سدیم مصنوعی)



شکل ۷- مقاومت فشاری بلوک رسی با درصدهای مختلف خاکستر صنعتی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ ٪) در دو سطح سیلیکات سدیم (۰ و ۳۰)، در زمان (۷ و ۲۸ روز) و دما (۲۵ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد) مختلف عمل آوری (I: خاکستر صنعتی، K: کائولینایت، S: سیلیکات سدیم سنتزی، A: سلیکات سدیم مصنوعی)

در مطالعات انواع بلوک های رسی موجود اعم از خام و پخته، مورد بررسی قرار گرفت که مقاومت فشاری خشت پخته و خام به ترتیب برابر ۱۰/۱۵ و ۰/۹۷ است که بیانگر مقاومت متوسط خشت خام و مقاومت زیاد خشت پخته می‌باشد[۲۴]. با استفاده از مواد پوزولانی سعی در تثبیت خاک‌های واگرا کردند، نتیجه این‌گونه حاصل گردید که با افزایش میزان مواد پوزولانی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد[۲۳].

۴-نتیجه گیری

- این مطالعه نشان می‌دهد که بلوک‌های رسی حاوی ۱٪ خاکستر پوسته برنج و ۳۰ سی‌سی فعال‌کننده قلیایی سنتز شده با ماسه سیلیس، که در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده‌اند، به حداکثر مقاومت فشاری ۱/۸۱ مگاپاسکال دست می‌یابند. این نشان دهنده بهبود ۳۷ درصدی نسبت به بلوک‌های رسی تثبیت نشده معمولی است که به تشکیل ژل ژئوپلیمر افزایش یافته از محتوای بالای سیلیس در ضایعات کشاورزی نسبت داده می‌شود.

- سیلیکات سدیم سنتز شده از ماسه سیلیس محلی با نسبت SiO_2/Na_2O برابر با ۱/۵ که امکان انحلال بهینه یون (Al^{3+}، Si^{+4}) را فراهم می‌کند، مؤثر واقع شد. حجم‌های بالاتر فعال‌کننده (۳۰ سی‌سی) مقاومت را به طور جزئی بهبود بخشید اما از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبود، که بر اهمیت استوکیومتری متعادل در ژئوپلیمریزاسیون تأکید می‌کند.

- فعال‌سازی حرارتی (۱۵۰ درجه سانتیگراد) ژئوپلیمریزاسیون را تسریع کرد و ۱۴ تا ۲۴ درصد مقاومت اولیه بالاتر از عمل‌آوری در محیط را ارائه داد. با این حال، عمل‌آوری ۲۸ روزه برای سینتیک کامل واکنش حیاتی باقی ماند، همانطور که با رشد ۳۰ درصدی مقاومت از بلوغ ژل آلومینوسیلیکات مشهود است.

- خاکستر پوسته برنج به دلیل ساختار سیلیس آمورف (SiO_2 89.5%) که واکنش‌پذیری را افزایش می‌دهد، از خاکستر بادی صنعتی بهتر عمل کرد. خاکستر بادی در دوزهای بالاتر باعث شوره زدن شد و دوام را کاهش داد. ترکیب ضایعات هیچ مزیت هم‌افزایی نداشت، و نمونه‌های هیبریدی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به بلوک‌های بهینه شده با پوسته برنج داشتند.

این تحقیق نشان می‌دهد که ضایعات کشاورزی/صنعتی را می‌توان از طریق شیمی ژئوپلیمر متناسب، کاهش بار دفن زباله و امکان تولید با انرژی کارآمد، به مصالح ساختمانی با ارزش بالا تبدیل کرد. یافته های مهم پژوهش استفاده از سیلیکات سدیم سنتزشده از ماسه سیلیکاتی بومی، جایگزینی فعال‌کننده‌های تجاری با روشی کم‌هزینه و کارا (کاهش ۴۰٪ هزینه تولید بر اساس مطالعات پیشین)، اولین مطالعه تطبیقی بر روی ضایعات کشاورزی و صنعتی در بلوک‌های ژئوپلیمری، اثبات برتری خاکستر سبوس برنج (با ۸۹/۵ ٪ SiO_2 آمورف) نسبت به خاکستر بادی در افزایش مقاومت فشاری ۱/۸۱ مگاپاسکال در جایگزینی ۱٪)، تدوین پروتکل عمل‌آوری بهینه برای مصالح رسی، و دستیابی به حداکثر مقاومت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ۲۸ روزه بر پایه واکنش‌های پوزولانی تسریع‌شده، می باشند.

۵-پیشنهادات تحقیقاتی آتی

- ارزیابی عملکرد بلندمدت تحت چرخه‌های انجماد-ذوب، قرار گرفتن در معرض سولفات و مقاومت در برابر شوره زدن.
- بررسی اثرات هم‌افزایی پسماندهای صنعتی-کشاورزی ترکیبی (به عنوان مثال، خاکستر بادی + خاکستر پوسته برنج) از طریق مخلوط‌های سه‌تایی.
- انجام آزمایش‌های تولید در مقیاس پایلوت و تجزیه و تحلیل چرخه عمر (LCA) برای تعیین مقدار انرژی/ردپای کربن.
- توسعه پروتکل‌های عمل‌آوری در محیط با استفاده از پسماندهای پیش‌تیمار شده با جوشش قلیایی برای کاهش مصرف انرژی.

۶-منابع

1- Abdul Kadir, A., Sarani, N., An overview of wastes recycling in fired clay bricks, International journal of integrated engineering, 2012, 4(2), p. 53-69.

2- Zhibin, M., Hao, S., Xinxing, Z., Jianming, G., Jinyan, L., Guangjun, L., Yanxia, G., Siyu, D., Feasibility analysis of the preparation of geopolymers from different types of coal based ash: Reaction, synthesis, and properties, Case Studies in Construction Materials, 2024, 20. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03234

3- Zhang, G., He, X., Zhang, P., Mitigation strategies for efflorescence in fly ash-based geopolymers: A critical review, *Journal of Cleaner Production*, 2023, 402, p. 1122–1138. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815

4- Mohseni, E., Tang, W., Cui, H., Rice husk ash as a renewable source for high-performance geopolymers: Reactivity mechanisms and microstructural evolution, *Cement and Concrete Composites*, 2024, 146, p. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105382

5- Khezri, M., Yaghoubi, E., & Arulrajah, A., Synthesis of sodium silicate from silica sand for geopolymer production: Optimization and cost analysis, *Construction and Building Materials*, 2022, 342, p. 1045–1058. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127845

6- Tanan, C., Thanakorn, C., Thanakit Thepumong Worathep, S., Anupong, K., Sumate, C., Influence of partial substitution of metakaolin by palm oil fuel ash and alumina waste ash on compressive strength and microstructure in metakaolin-based geopolymer mortar, *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02519

7- Bokyeong, L., Gyuyong, K , Raehwan, K. , Bongsuk, C. , Sujeong , L., Chul-Min, C., Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash *Construction and Building Materials*, 2017, 151, p. 512-519

8- Nergis, D.D.B., Abdollah, M.M.A.B., Vizureanu, P., Tahir, M.F.M., Geopolymers and Their Uses: Review, *Materials Science and Engineering*, 2018, 374.

9- Alqarni, A.S., Albidah, A.S., Abadel, A.A., Thermal curing effects on kaolin-based geopolymer concrete, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15, p. 302–314. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.032

10- Bazyar, M.H., Ebrahimi, M., Zamani Lenjani, M., Makarchian, M., The Effect of Rice Husk Ash on Mechanical Properties of Clayey Soils Stabilized with Lime in the Presence of Sulphate. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 11(3), p. 23-52.

11- Blaszczynski, T.Z., Król, M.R., Alkaline Activator Impact on the Geopolymer Binders, *Materials Science and Engineering Conference Series*, 2017, 245. https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022036

۱۲-ابراهیمی، م.، بررسی تأثیر الیاف و مواد تثبیت‌کننده بر روی رفتار ماسه‌ی رس‌دار، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، ۱۳۹۳.

13- Sun, S., Lin, J., Zhang, P., Fang, L., Ma, R., Quan, Z., Song, X., Geopolymer synthetized from sludge residue pretreated by the wet alkalinizing method: Compressive strength and immobilization efficiency of heavy metal, Construction and Building Materials, 2018, 170, p. 619-626.

۱۴- اسماعیل‌نیا، م.، و فریدی، م.، رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی در بتن خود تراکم حاوی سنگدانه بازیافتی و زئولیت طبیعی، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات بتن، ۱۳۹۳، ۷(۱)، صفحه ۲۲-۷.

۱۵-زیدآبادی، ا.، امکان‌سنجی تولید ژئوپلیمر از خاکستر سیلیس ضایعات کشاورزی و استفاده ازآن‌جهت بهسازی خاک و حذف فلزات سنگین، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی سیرجان، ۱۳۹۷.

16- Tchakouté, H.K., Rüscher, C.H., Kong, S., Kamseu, E., Leonelli, C., Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 2016, 114, p. 276-289.

17- Mohammed, J., Soil and Soil Mechanics Textbook (1st ed.). University of Duhok, Duhok Governate, kurdistan Region, Iraq, 2014.

18- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G., Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites, *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37, p. 108-118. Diop, MB., Grutzeck, MW., Low temperature process to create brick, *Construction and Building Material*; 2008, 22(6), p. 1114–21.

۱۹-داوری آلقو، س.، تاثیرسرباره قلیا- فعال بر روی خصوصیات مقاومتی خاک رس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵.

۲۰-ملاعباسی، ح.، و شوش‌پاشا، ع.، بررسی اثر زئولیت بر مقاومت خاک ماسه‌ای بابلسر تثبیت‌شده با سیمان با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مجله علمی - پژوهشی مهندسی عمران مدرس، ۱۳۹۵، ۱۶(۴)، صفحه ۲۱۳-۲۰۳.

۲۱-ظفری، م.، رنجبر، م.، مدندوست، ر. و بلالایی، ف.، بررسی تولید آجر با استفاده از خاکستر پوسته برنج ماسه و آهک، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران، ۱۳۸۵.

22-Vakili, A., Selamat, M., Moayedi, H., Amani, H., Stabilization of dispersive soils by pozzolan Forensic Engineering 2012: Gateway to a Safer Tomorrow, 2013, p. 726-735.

۲۳-امینی، م.، میرجلیلی، ع.، بررسی و مقایسه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری خشت خام، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران، ۱۳۹۳.