پژوهش و فناوری محیط‌زیست، ۱۴۰۳،(۱۶)۹، ۵۱-۶۰

زیست پژوهش و فناوری محیط

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

بررسی تثبیت خاک با استفاده از سیمان و خاکستر پوسته برنج و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی

میثم سلیم زاده شوئیلی[1]✉

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۱۱/۱۸

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۴/۰۲/۱۵

کلید واژه‌ها:
تثبیت، بهسازی، پوزولان، خاکستر پوسته برنج

چکیده

با توجه به‌ضرورت استفاده از مصالح تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست، این پژوهش به بررسی جامع خاکستر پوسته برنج به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای سیمان پرداخته‌است. انتخاب این ماده به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله فعالیت پوزولانی بالا، فراوانی و دسترسی آسان در منطقه، هزینه تولید پایین و مزایای زیست‌محیطی بوده است. در این مطالعه، پس از مروری بر تاریخچه و مبانی تثبیت خاک، فرآیند تولید و عمل‌آوری خاکستر پوسته برنج در دمای کنترل شده مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات شیمیایی و مورفولوژیکی این ماده با استفاده از روش‌های پیشرفته آزمایشگاهی از جمله پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارزیابی شده است. نتایج تحقیق نشان‌می‌دهد که جایگزینی ۲۰ تا ۳۰ درصدی سیمان با خاکستر پوسته برنج موجب دستیابی به مقاومت فشاری در حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد نمونه‌های شاهد می‌شود. همچنین، استفاده از این ماده به‌عنوان یک پوزولان طبیعی علاوه بر بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک شامل افزایش مقاومت برشی و کاهش پتانسیل تورم، منجر به کاهش ۴۰ تا ۴۵ درصدی مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان تقریبی ۰/۵ تن دی اکسید کربن به‌ازای هر تن سیمان جایگزین شده می‌شود. از منظر زیست‌محیطی، به‌کارگیری این ماده نه تنها مشکل دفع پسماندهای کشاورزی را حل می‌کند، بلکه گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی محسوب می‌شود.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.salimzadehshooiili@guilan.ac.ir

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Investigation of soil stabilization using cement and rice husk ash and the reduction of destructive environmental impacts

Maysam Salimzadeh shooiili[1]✉

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
2024/05/14
Accepted:
2025/02/06
Available online:
2025/05/05

Keywords:
Stabilization,
Improvement,
Pozzolan,
Rice Husk Ash

Abstract

Given the necessity of using renewable and environmentally friendly materials, this study provides a comprehensive investigation into rice husk ash (RHA) as a sustainable substitute for cement. RHA was selected due to its unique properties, including high pozzolanic activity, abundant availability, easy accessibility in the region, low production cost, and environmental advantages. In this study, following a review of the history and principles of soil stabilization, the production and curing process of RHA at controlled temperatures was examined. The chemical and morphological characteristics of RHA were assessed using advanced laboratory techniques such as X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The findings indicate that replacing 20% to 30% of cement with RHA results in achieving compressive strengths approximately 90% to 95% that of control samples. Moreover, using RHA as a natural pozzolan not only enhances the geotechnical properties of soil—such as increasing shear strength and reducing swelling potential—but also leads to a 40% to 45% reduction in cement consumption. This, in turn, results in an approximate reduction of 0.5 tons of CO_2 emissions per ton of replaced cement. From an environmental standpoint, the application of RHA not only addresses the issue of agricultural waste disposal but also constitutes an effective step toward sustainable development and the preservation of natural resources.

مقدمه

بسیاری از طرح‌های اجرایی ممکن است با کمبود مصالح خاکی مناسب مواجه شود و لذا ضرورت دارد که مصالح موجود، اصلاح شده و افزایش مقاومت یابند. یکی از راه‌های اصلاح خاک، افزودن مواد تقویتی است و از این طریق استفاده از مواد ضعیف و در دسترس میسر شده و از حمل مصالح از دوردست و تحمیل هزینه‌های گزاف جلوگیری می‌شود. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان به آهک، سیمان، خاکستر پوسته برنج، پوزولان ها، میکرو سیلیس، سولفات آلومینیم و خاکستر بادی اشاره کرد. تکنیک تقویت خاک با آهک از دوران باستان متداول بوده است و از سال ۱۹۴۵ اصلاح خاک با آهک شکفته در آمریکا رایج شد (Ingles.1972). از مهم‌ترین واکنش‌هایی که در اثر افزودنی‌ها به خاک رخ می‌دهد، واکنش پوزولانی می‌باشد. این واکنش که با ایجاد مواد سیمانی باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود، بین آهک و آب و مواد سیلیس دار و آلومین دار خاک صورت‌می‌گیرد که تابع زمان است و در فقدان رطوبت متوقف می‌شود (Mallela.2004). استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، تأثیر مواد افزوده‌شده (آهک) را بیشتر و تسریع می‌نماید. آهک سبب بهبود خصوصیات رفتاری خاک‌های ریز دانه رس دار مانند تورم، مقاومت برشی، قابلیت جذب آب و مشخصه‌های خمیری (حدود آتربرگ) می‌گردد. البته استفاده از آهک دارای محدودیت‌هایی می‌باشد، افزودن آهک به خاک ممکن است منجر به تأثیرات نامطلوبی ناشی از واکنش‌های مخربی از جمله: کربناسیون، تأثیر سولفات‌ها، تأثیر مواد آلی، تأثیر سولفید ها و نمک طعام گردد. در صورتی که خاک حاوی یون سولفات باشد یا اینکه خاک تثبیت شده در معرض آب سولفاته قرار گیرد حضور آهک نه‌تنها باعث کاهش تورم لایه تثبیت شده نمی‌شود، بلکه نتیجه عکس داده و سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت می‌گردد (Sherwood. 1962) این پدیده به‌علت انجام واکنش‌های شیمیایی بین کانی‌های رس، آهک و سولفات می‌باشد که منجر به تشکیل کانی‌های اترینگات و تاماسایت شده و این کانی‌ها با جذب آب به‌شدت متورم می‌شوند (Hunter .1988). خاکستر بادی اصولاً از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن و کلسیم تشکیل شده‌است، میزان کلسیم محلول با اضافه کردن خاکستر بادی زیاد می‌شود و لذا فعالیت پزولانی افزایش می‌یابد. اضافه کردن خاکستر بادی به‌صورت قابل توجه ای مقدار PH را افزایش می‌دهد. با بالا رفتن PH، سیلیکای خاک از ساختمان ورقه چهار وجهی‌اش و آلومینای خاک از ساختمان ورقه‌ای هشت وجهی‌اش آزاد و انجام واکنش‌های پوزولانی سرعت می‌گیرد (Sezer .2006, McKennon1994). خاکستر پوسته برنج دارای سیلیس فراوان با سطح مخصوص بالاست که جهت فعال کردن واکنش خاک با آهک بسیار مناسب است. خاکستر پوسته برنج باقی مانده حاصل از سوزاندن کنترل شده پوسته برنج در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Della,2002) و از پوسته برنج تقریباً ۲۰٪ خاکستر تولید می‌شود (Anwar .2001) خاکستر پوسته برنج که به‌صورت ترکیبی از سیلیکا و آلومینا می‌باشد، در دسته پوزولانها قرار دارد (ASTM-C618-2012a). پوسته برنج در کشورهایی مانند چین و هند به فراوانی یافت می‌شود (A N Ramakrishna .2006) همچنین این مصالح سبک بوده و به‌علت تراکم کم باعث می‌شود در هوا پراکنده شود. همچنین خاکستر پوسته برنج به‌عنوان مصالحی با درجه پوزولانی و سطح مخصوص بالا (Tashima 2004)می‌تواند به‌صورت ترکیبی با آهک جهت کاهش میزان سیمان پرتلند به کار برده شود (Sata.2007. Zhang. 1996).

هدف اصلی در این مقاله، ضمن مطالعه دقیق ادبیات فنی تثبیت جهت بهسازی خاک، به بررسی امکان جایگزین کامل و یا بخشی از سیمان مورد انتظار جهت بهسازی انواع خاک‌ها پرداخته شده‌است. در این راستا، چگونگی فرآیند تهیه، ساخت، فراوری، درصد مواد تشکیل دهنده شامل مشخصات دقیق خاکستر پوسته برنج به‌کمک آزمایش XRD، رفتار حرارتی پوسته برنج و واکنش‌های شیمیایی انجام و شرح داده شده است.

مواد و روش‌ها

تثبیت خاک با آهک

تثبیت خاک با آهک علاوه بر راه‌سازی در سایر پروژه‌های ساختمانی که در آن نیاز به یک بستر مناسب و پایدار و با مقاومت مطلوب است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. آهک‌بر خاک‌های آلی و خاک‌های بدون ذرات رسی، تأثیر بسیار کمی دارد. از طرف دیگر آهک بسیار بیشتر از سیمان بر مصالحی چون شن رس دار و ماسه رس دار تأثیر گذار است و مقاومت بسیار بالایی را پس

از تثبیت سبب می‌شود (Smith, . 1986.). اصولاً تثبیت خاک با آهک منجر به بهبود بسیاری از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک شامل مدول ارتجاعی خاک، مقاومت فشاری و برشی می‌شود (Little. 1987) چندین روش مختلف جهت طرح مخلوط‌های آهکی براساس استانداردهای مختلف از جمله ASHHTO و ASTM پیشنهاد شده‌است (Clough .1981) . طراحی مخلوط های تثبیت شده با آهک با توجه به نیاز طراح به‌کمک راه‌های زیر که منجر به بهبود خاک می‌گردد قابل انجام می‌باشد .Little) (1987. از آنجا که افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با آهک از جمله مهم‌ترین تغییرات ایجاد شده در خاک می‌باشد و در حقیقت این واکنش سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت CBR می‌گردد (Clough .1981).

تثبیت خاک با سیمان

ساخت سیمان در قرن ۱۸ میلادی توسعه زیادی یافت. در این زمان جان اسمیتون متوجه شد که بهترین ملات از مخلوط پوزولان با سنگ آهکی که دارای درصد قابل توجهی از مواد رسی است به‌دست می‌آید. بعدها ژوزف اسپدین (Joseph Aspdin)، یک معمار انگلیسی موفق به پیدا کردن روش خاصی از تولید سیمان شد و در سال ۱۸۲۴ میلادی این محصول را ثبت نمود و آن را سیمان پرتلند (Portland Cement) نامید (Ingles, 1972). در مهندسی ژئوتکنیک به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد یک توده چسبنده و با مقاومت بیشتر را سیمانی شدن یا سیمانتاسیون می‌گویند. سیمانی شدن مصنوعی بیشتر در ماسه ها مورد بررسی قرار گرفته است، به‌دلیل اینکه مصالح درشت‌تر، مانند شن و ماسه درشت دانه اغلب خصوصیات ژئوتکنیکی مطلوبی دارند، لذا جهت بهسازی خاک محققین بیشترین توجه را به ماسه و مصالح ریز دانه معطوف داشته‌اند (Clough ,1981). زمانی که سیمان به خاک اضافه شود واکنش‌های مختلفی بین خاک و سیمان صورت می‌پذیرد. که از مهم‌ترین این واکنش‌ها، می‌توان به واکنش جانشینی یون‌های مثبت و واکنش تجمع-تراکم (Flocculation-Agglomeration) اشاره نمود. که به‌سرعت پس از تماس ذرات رس با سیمان شروع می‌شود و باعث بهبود آنی خصوصیات پلاستیک خاک می‌شود. در تثبیت خاک با سیمان، دو بخش کلسیم‌دار سیمان یعنی C_3S و C_2S دارای اهمیت به سزایی هستند. این دو بخش با جایگزینی یون‌های مثبت (تبادل یونی) سبب تجمع ذرات خاک می‌شوند. مقدار دو ماده C_3S و C_2S در سیمان‌های پرتلند تیپ ۱ و ۲ در حدود ۷۵٪ کل سیمان است. هرچه اندازه ذرات سیمان ریزتر باشد، هیدراتاسیون بیشتر و برای مدتی طولانی‌تر، حتی تا سالیانی درازتر، انجام می‌شود (Bhattacharja, 2003) تشکیل هیدرات سیلیکات کلسیم به‌محض هیدراتاسیون سیمان، باعث افزایش مقاومت می شود. بر پایه نتایج تحلیلی و خصوصیات مکانیکی، فرضیات زیر برای اثر متقابل بین ذرات رس و سیمان پرتلند ارائه شد (Herzog.1963): هیدرولیز و هیدراتاسیون سیمان فرایند اولیه است و PH آب خالص موجود در ترکیب را افزایش می‌دهد. در مرحله دوم، خاک رس تجزیه می‌شود و یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان با ذرات رس ترکیب می‌شوند و آن را مجتمع می‌کنند. در انتهای این فرآیند ذرات رس با سیمان هیدراته ترکیب می‌شوند و به یکدیگر می‌چسبند. به‌طور خلاصه مرحله اول باعث به وجود آمدن یک دانه بندی مقاوم و متفاوت از دانه بندی اصلی خاک می‌شود و در مرحله دوم فرآیند ترکیب سیمان و خاک رس، این دانه بندی مجزا به یکدیگر چسبیده و حالتی پایدار و مقاوم را در کل مخلوط به وجود می‌آورد . (Bhattacharja, 2003)علاوه بر واکنش پوزولانی، کربناتاسیون می‌تواند در دراز مدت موجب افزایش مقاومت خاک‌های تثبیت شده با سیمان شود. هنگامی که سیمان در معرض هوا قرار می‌گیرد، فرآیند آهسته کربناتاسیون و تشکل محصول سمنته شده منجر به افزایش مقاومت در دراز مدت می‌شود (Geiman, 2005). تفاوت عمده بین دو روش تثبیت خاک با سیمان و آهک، در زمان رسیدن به مقاومت و دمای مورد نیاز است. در بسیاری منابع ذکر شده‌است که افزایش درصد سیمان به افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های تثبیت شده با سیمان می‌انجامد. این افزایش مقاومت در درصد سیمانی حدود ۲۰٪ تقریباً به مقدار ثابتی می رسد، در حالی که در تثبیت خاک با آهک این مقدار در درصد آهک کمتری (حدود ۸٪) اتفاق می‌افتد (Ingles, 1972). علاوه بر این در تثبیت خاک با آهک، سیلیس مورد نیاز هنگامی که ذرات رس شکسته می‌شوند تولید می‌شود، حال آنکه تثبیت با سیمان، مستقل از خصوصیات خاک می‌باشد و تنها نیاز به مقداری آب جهت شروع فرآیند هیدراتاسیون دارد (Geiman,2005).

تثبیت با خاکستر بادی

خاکستر بادی خاکستر به‌جا مانده از زغال سنگ پودر شده در کوره می‌باشد. خاکستر بادی یک گرد بسیار ریزدانه است که ترکیبی از سیلیس، آلومینا، اکسید ها و قلیا ها است. دارای طبیعت پوزولانی بوده و می‌تواند با آهک هیدراته واکنش کرده و فرایند سمنتاسیون به وجود آورد. به همین دلیل مخلوط آهک و خاکستر بادی می‌تواند برای پایدار نمودن اساس و زیر اساس جاده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مخلوط خاک-آهک-خاکستر بادی با میزان رطوبت مناسب و تحت شرایط کنترل شده متراکم می‌شود تا یک لایه خاک پایدار به وجود آید.

تثبیت خاک با خاکستر پوسته برنج

با توجه به اینکه سالیانه در جهان حدود ۵۰۰ میلیون تن برنج تولید می‌شود که ۲۰٪ این وزن پوسته آن می‌باشد از درجه اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد(Salas, 2009). خاکستر پوسته برنج بالاترین میزان سیلیکا را دارد. پوسته برنج نزدیک به ۲۰٪ سیلیکای غیر متبلور هیدراته دارا می‌باشد که اگر به‌صورت کنترل شده سوزانده شود، سیلیکای غیر متبلور با واکنش‌پذیری بالا تولید می گردد (Nair 2008). استفاده از خاکستر پوسته برنج به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان باعث صرفه‌جویی در صنعت می‌شود و با عمل‌آوری مناسب و مصرف بهینه آن ویژگی‌های مقاومتی آن ماده را به میزان قابل توجه‌ای بهبود می‌بخشد (GHORBANI, 2019).

یافته‌های پژوهش

خصوصیات و نحوه عمل‌آوری پوسته شلتوک برنج

در خاکستر حاصل از سوزاندن کنترل شده پوسته برنج، مقدار زیادی سیلیس وجود دارد که با آهک واکنش نشان داده و تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته با خاصیت چسبندگی می‌دهد. جدول ۱ مقدار خاکستر و سیلیس موجود در بعضی از گیاهانی چون پوسته برنج، ساقه برنج و با گاس (ساقه نیشکر) را نشان‌می‌دهد.

جدول ۱- مقدار خاکستر و سیلیس موجود در بعضی از گیاهان

گیاه	بخشی از گیاه	مقدار خاکستر (٪)	مقدار سیلیس (٪)
گندم	غلاف برگ	۱۰,۴۸	۹۰,۴۶
ذرت	تیغه برگ	۱۲,۱۵	۶۴,۳۲
بامبو	گره (قسمت داخلی)	۱,۴۹	۵۷,۴
با گاس	-	۱۴,۷۱	۷۳,۰۰
آفتابگردان	برگ و ساقه	۱۱,۵۳	۲۵,۳۲
پوسته برنج	-	۲۲,۱۵	۹۳,۰۰
ساقه برنج	-	۱۴,۶۵	۸۲,۰۰

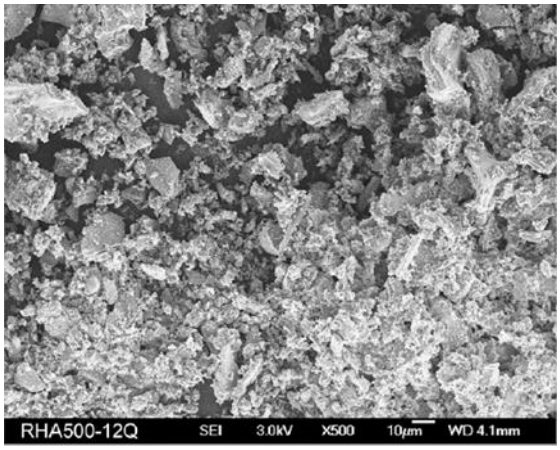
با توجه به جدول۱ مشاهده می‌شود که از پوسته برنج بیشترین خاکستر تولید می‌شود و سیلیس آن در حدود ۹۳٪ می‌باشد. تقریباً با سوزاندن هر تن پوسته برنج ، ۲۰۰ کیلوگرم خاکستر پوسته برنج حاصل می‌شود. بنابراین مشخص است که از پوسته برنج می‌توان به‌عنوان یک زایده کشاورزی با بیشترین توانایی در جهت جایگزینی سیمان استفاده کرد.

رفتار حرارتی خاکستر پوسته برنج

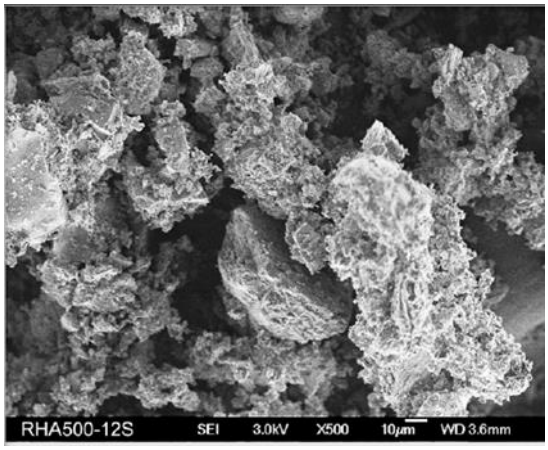
جهت تبدیل پوسته برنج به خاکستر در مرحله سوزاندن مواد آلی موجود در آن خارج شده و سیلیس زیادی باقی می‌ماند. با

حرارت دادن پوسته برنج تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش وزنی را که ناشی از تبخیر آب جذب شده‌است را می‌توان مشاهده کرد. در ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد مواد فرار پوسته برنج خارج شده و افت وزن بیشتری را سبب می‌شود و پوسته‌ها شروع به سوختن می کنند. از ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کربن‌های باقی مانده اکسید شده و کاهش وزن زیادتری را به وجود می‌آورد. در این مرحله سیلیس موجود در خاکستر در شکل کریستالی خود باقی می‌ماند. در برخی مواقع در دمای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است کوارتز تشکیل شود. چنانچه دما بالاتر رود نخست کریستوبالیت و سپس در دمای بالاتر تریدیمیت تشکیل می‌گردد. فعالیت پوزولانی با افزایش دمای سوختن زیاد می‌شود، که دلیل آن کاهش میزان کربنی است که جایگزین خاکستر پوسته برنج شده‌است. با این حال اگر دمای سوزاندن پوسته برنج از ۷۵۰ درجه بیشتر شود بلور کریستوبالیت که از فعالیت کمتری نسبت به سیلیس می‌باشد تولید می‌شود. در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تریدیمیت که شکل دیگری از سیلیس و دارای فعالیت ناچیزی است تولید می‌شود. پراش سنجی پرتو ایکس نمونه‌های خاکستر پوسته برنج سوخته شده با در دمای ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت بیان کننده این نکته است که سیلیس موجود در خاکستر در طی فرآیند سوزاندن بعد از خارج شدن مواد کربنی، به‌صورت غیر بلوری باقی مانده و فاز بلوری کوارتز، کریستوبالیت و تریدیمیت در آن دیده نمی‌شود. نتایج به‌دست آمده از سوختن پوسته برنج در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت نشان‌می‌دهد که مقدار سیلیس به‌صورت فاز بلوری کوارتز در می‌آید. همچنین این نتایج نشان‌می‌دهد که پوسته‌های برنجی که در دمای بین ۴۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد سوزانده شود، سیلیس موجود در آن به‌شکل غیر بلوری باقی می‌ماند. سیلیس به‌شکل بلوری فعالیت کمتری نسبت به سیلیس غیر بلوری دارد، لذا پوسته‌های برنج نباید در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شوند (Feng, 2004).

مقدار سیلیس تولید شده علاوه بر دمای سوختن به طول مدت آن نیز بستگی دارد. مناسب‌ترین زمان برای تولید خاکستر پوسته برنج در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ۲ ساعت می‌باشد، زیرا در زمان‌های بیشتر هیچ‌گونه افت وزنی بیشتری دیده نمی‌شود. از طرفی دیگر با افزایش زمان سوختن که منجر به متلاشی شدن ریزه سوراخ‌های میکرونی موجود در پوسته شلتوک برنج می‌شود و در نتیجه با کاهش سطح مخصوص خاکستر پوسته برنج که در واکنش پذیری و فعالیت پوزولانی آن نقش مهمی دارد روبه‌رو خواهیم شد، لذا باید از افزایش زمان سوختن پوسته برنج اجتناب نمود. بررسی‌ها نشان‌می‌دهد که نحوه خنک کردن خاکستر پوسته برنج در میزان فعالیت پوزولانی تأثیر زیادی دارد، نایر و همکاران (Nair 2008) تحقیقاتی را روی خاکستر پوسته برنج در دماهای مختلف (۵۰۰ و ۷۰۰ و ۹۰۰) و زمان‌های مختلف سوزاندن (۱۵ دقیقه ، ۶ ساعت، ۱۲ ساعت و ۲۴ ساعت) و شرایط مختلف خنک شدن کند و تند انجام دادند. سپس تأثیر شرایط مختلف سوزاندن را از طریق اندازه گیری تغییرات هدایت الکتریکی بر روی میزان فعالیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج اندازه گیری کردند. با این صورت که ابتدا میزان هدایت الکترکی ۲۰۰ میلی لیتر محلول آهک اشباع در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. سپس ۵ گرم به محلول اضافه و پس از گذشت زمان میزان معین هدایت الکتریکی آن مجدداً اندازه گیری شد. تفاوت این دو مقدار به‌عنوان تغییرات هدایت الکتریکی گزارش گردید. این روش که روشی سریع جهت تعیین میزان فعالیت پوزولانی می‌باشد بر این اصل استوار گردیده که میزان هدایت الکتریکی محلول آب و آهک به میزان یون‌های Ca و OH وابسته بوده و کاهش میزان یون‌های مذکور در اثر فعل و انفعالات شیمیایی با آهک منجر به کاهش هدایت الکتریکی محلول خواهد شد. عکس‌برداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ذرات خاکستر پوسته برنج سوخته شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و به‌مدت ۱۲ ساعت تحت شرایط مختلف خنک شدن نشان‌می‌دهد که خنک شدن تدریجی موجب افزایش اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج می‌گردد (شکل 1) ((Salimzadehshooiili, M. (2023).



شکل ۱- (الف) عکس SEM، خنک شدن سریع



شکل ۱- (ب) عکس SEM، خنک شدن تدریجی

یکی دیگر از پارامترهای مهم که نقش کنترل کننده ای در فرآیند تشکیل خاکستر پوسته برنج ایفا می‌کند، هوا است. چنانچه اکسیژن کافی جهت سوختن پوسته برنج در دسترس نباشد، جدا شدن سیلیس بعد از زغال شدن اولیه پوسته برنج ممکن است به کندی انجام شود. علاوه بر این زمانی که پوسته برنج سوزانده می‌شود زدودن دی‌اکسید کربن محیط از اطراف ذرات به‌منظور احتراق کامل اکسیژن در سیستم ضروری است. بنابر این، جانشین کردن هوای تازه به‌جای دی‌اکسید کربن به وجود آمده یکی از عوامل مهمی است که فرآیند ته نشینی سیلیس و بلوری شدن بعدی آن را تنظیم نماید. وجود کربن در خاکستر پوسته برنج موجب تغییر رنگ آن به سیاه و کاهش تاب ملات ساخته شده با آن خواهد شد. یکی دیگر از روش‌هایی که می‌تواند موجب بهبود فعالیت پوزولانی خاکستر پوسته برنج شود عمل‌آوری شیمیایی می‌باشد، مطالعات فنگ و همکاران (GHORBANI,2019) نشان داد که عمل‌آوری شیمیایی پوسته برنج توسط اسید کلریدریکN 1 موجب بهبود خاکستر حاصل شد. جهت عمل‌آوری، پوسته برنج را پیش از سوزاندن در محلول اسید کلریدریک (HCl) قرار داده و بلافاصله توسط آب شسته و سپس در هوا خشک می‌شوند. برای دماهای سوختن بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش فعالیت پوزولانی شدت یافته و برای دماهای سوزاندن بالای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان فعالیت پوزولانی به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. اما در مورد خاکستر عمل‌آوری شده با افزایش دمای سوختن تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت پوزولانی خاکستر حاصل تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. مشاهده می‌شود در دماهای سوزاندن یکسان میزان سیلیس و سطح مخصوص خاکستر عمل‌آوری شده (ADR) بیشتر از خاکستر معمولی می‌باشد.

ویژگی‌های خاکستر پوسته برنج و تهیه خاکستر پوسته برنج

مهم‌ترین ویژگی خاکستر پوسته برنج که واکنش‌های پزولانی را کنترل می‌کند وجود محتوای سلیکای آمورف می‌باشد. خاکستر پوسته برنج به‌دلیل خاصیت پوزولانی بسیار فعال جهت تشکیل ژل سیلیکات کلسیم مناسب است که در حقیقت محصول واکنش آن با سیمان می‌باشد. در واقع زمانی که خاکستر پوسته برنج و سیمان در حضور آب مخلوط می‌شوندPH محیط افزایش یافته و سیلیکای فعال موجود در خاکستر پوسته برنج با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ژل هیدرات سیلیکات کلسیم تولید می‌شود. واکنش شرح داده شده در معادله‌های ۱ تا ۳ نشان داده‌شده‌است (Salas,2009. Geiman,2005)

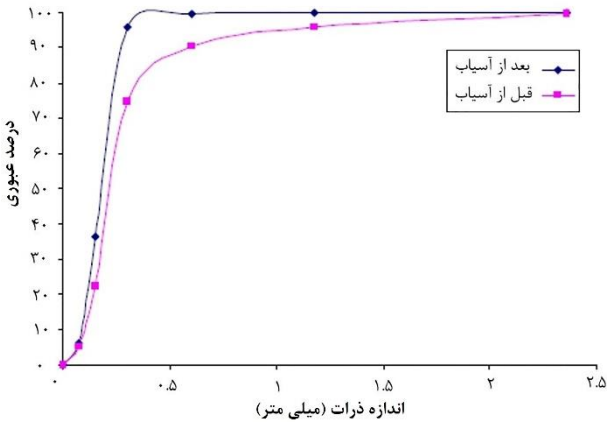
$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2 \qquad (۱)$$

$$Ca(OH)_2 = Ca^{2+} + 2(OH)^- \qquad (۲)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + SiO_2 = CaO.SiO_2 + H_2O \qquad (۳)$$

پوسته برنج مورد استفاده در این مطالعه از شهر رشت تهیه شده‌است. ابتدا به‌طور طبیعی تحت گرمای خورشید برای سه روز خشک شد. سپس سوزانده شد تا به خاکستر تبدیل شود (این عملیات سه روز به طول انجامید). خاکستر سوزانده شده برای دو

ساعت در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت کربن‌زدایی و افزایش خاصیت پوزولانی قرار گرفت، سپس به‌منظور آماده‌سازی آن برای اضافه کردن به سیمان و ایجاد سطح ویژه بالاتر، با استفاده از آسیاب به‌مدت ۱,۵ ساعت آسیاب گرددید. دانه‌بندی خاکستر پوسته برنج مورد استفاده، قبل و پس از آسیاب شدن در شکل (۲) نشان داده‌شده‌است. در واقع دلیل آسیاب کردن توجه به این نکته می‌باشد که با افزایش سطح ویژه مصالح، تعداد سطوح آماده جهت انجام واکنش افزایش یافته و در نتیجه، متعاقباً، احتمال انجام واکنش هیدراسیون افزایش می‌یابد. لذا فرایند آسیاب کردن هر یک از تثبیت کننده ها می‌تواند منجر به افزایش سطح ویژه، افزایش پتانسیل واکنش‌پذیری و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری گردد (Salimzadehshooiili, M. (2023)).



شکل ۲- توزیع ذرات خاکستر پوسته برنج قبل و بعد از آسیاب شدن

همچنین ترکیب شیمیایی سیمان و خاکستر پوسته برنج استفاده‌شده، در جدول (2) ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی خاکستر پوسته برنج مورد مطالعه

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	L.O.I
۹۰,۶	۰,۴۹	۰,۷۳	۱,۵۱	۰,۸۸	۰,۲۲	۱,۸	۰,۴۳	۳,۳۴

بحث و نتیجه‌گیری

از مصالح مختلفی برای تثبیت خاک و بهبود خواص مکانیکی آن استفاده‌شده است. علاوه بر واکنش‌پذیری مناسب و انجام واکنش هیدراسیون، معیارهای اصلی در انتخاب این مواد، فراوانی و هزینه کم تولید آن‌ها بوده است. همچنین، اگر این مواد، محصولات زائد باشند که حضورشان در طبیعت خطرات زیست‌محیطی ایجاد کند، استفاده از آن‌ها در پروژه‌های مختلف جذابیت بیشتری خواهد داشت. در این زمینه، خاکستر بادی، سیلیکا فوم و خاکستر پوسته برنج (RHA) از جمله موادی هستند که این معیارهای مهم را دارا می‌باشند. استفاده از این مواد به‌عنوان روشی برای تثبیت خاک منجر به بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی می‌شود. از سوی دیگر، تثبیت‌کننده‌های شیمیایی متداول مانند سیمان و آهک همواره به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اما جایگزینی بخشی از این تثبیت‌کننده‌های معمول با مواد جایگزین ذکرشده می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به صرفه‌جویی اقتصادی در عملیات تثبیت کمک کند. با توجه به اینکه مصرف کل انرژی در تولید سیمان حدود ۵ تراژول به‌ازای هر ۱۰۰۰ تن است و تولید هر تن سیمان تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن در اتمسفر منتشر می‌کند، مزیت اصلی استفاده از این مواد جایگزین به‌جای

بخشی از سیمان یا آهک، صرفه‌جویی قابل‌توجه در انرژی و هزینه است. در این میان، خاکستر پوسته برنج (RHA) که از سوزاندن کنترل‌شده پوسته برنج در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌آید، به‌عنوان یک ماده مکمل و در دسترس در سطح جهانی مطرح است [۵]. دو عامل کلیدی، استفاده از آن را در پروژه‌های عمرانی ترغیب می‌کند(1) : فراوانی (به‌ویژه در استان‌های شمالی ایران) و (2) تأثیرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از تخلیه و انباشت این خاکستر در طبیعت. از نظر فرآیند تولید و در دسترس‌پذیری، سوزاندن هر تن پوسته برنج حدود ۲۰۰ کیلوگرم RHA تولید می‌کند. پوسته برنج حاوی مواد آلی و ٪۲۰ مواد معدنی است و در فرآیند فرآوری برنج، ٪۷۸ برنج و سبوس جدا شده و ٪۲۲ پوسته باقی می‌ماند که ٪۷۵ آن مواد آلی سبک است. طی فرآیند سوزاندن، ٪۲۵ وزن پوسته به RHA تبدیل می‌شود. پوسته برنج معمولاً به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده می‌شود و خاکستر حاصل به‌مدت 1.5ساعت در دستگاه آسیاب برای افزایش سطح ویژه، آسیاب می‌شود. این خاکستر دارای ظاهری خاکستری روشن و محتوای ۸۵ تا ۹۵٪ سیلیکای آمورف است که مهم‌ترین ویژگی تعیین‌کننده فعالیت پوزولانی آن محسوب‌می‌شود RHA .یک ماده پوزولانی بسیار واکنش‌پذیر است که می‌تواند در ترکیب با آهک یا به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شود. با توجه به محتوای بالای دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) و در دسترس بودن قابل‌توجه برنج و ضایعات مرتبط با آن در کشور، RHA می‌تواند به‌عنوان یک ماده اقتصادی و در دسترس برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. A., & Kentgens, A. P. (2008). A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. *Cement and concrete research*, *38*(6), 861-869.

Ghorbani, A., & Salimzadehshooiili, M. (2019). Dynamic characterization of sand stabilized with cement and RHA and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(7), 04019095.

Salimzadehshooiili, M. (2023). Investigation of the effect of frequency on shear strength and damping of pure sand and sand stabilised with rice husk ash using cyclic triaxial tests. *Advances in Civil and Architectural Engineering*, *14*(26), 25-39.

Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and building materials*, *21*(7), 1589-1598.

Salas, A., Delvasto, S., de Gutierrez, R. M., & Lange, D. (2009). Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. *Cement and concrete research*, *39*(9), 773-778.

Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H. R., & Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, *41*(2), 150-155.

Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1972). *Soil stabilization principles and practice* (Vol. 11, No. Textbook).

Mallela, J., Quintus, H. V., & Smith, K. (2004). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *The National Lime Association*, *200*(1), 1-40.

Sherwood, P. T. (1962). Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, (353).

Hunter, D. (1988). Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. *Journal of geotechnical engineering*, *114*(2), 150-167.

McKennon, J. T., Hains, N. L., & Hoffman, D. C. (1994). Method for stabilizing clay bearing soils by addition of silica and lime. *Patent Cooperation Treaty (PCT), Patent Classification: C09K*, *17*(00).

Della, V. P., Kühn, I., & Hotza, D. (2002). Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials letters*, *57*(4), 818-821.

Anwar, M., Miyagawa, T., & Gaweesh, M. (2000). Using rice husk ash as a cement replacement material in concrete. In *Waste management series* (Vol. 1, pp. 671-684). Elsevier.

Ramakrishna, A. N., & Pradeepkumar, A. V. (2006). Stabilization of black cotton soil using rice husk ash and cement. In *National conference on Civil Engineering meeting the challenges of tomorrow, GND Engineering college, Ludhiana* (pp. 215-220).

Tashima, M. M., Silva, C. A. R., Akasaki, J. L., & Barbosa, M. B. (2004, November). The possibility of adding the rice husk ash (RHA) to the concrete. In *the Proceedings of the 2004 International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures* (pp. 778-786).

Zhang, M. H., Lastra, R., & Malhotra, V. M. (1996). Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. *Cement and concrete Research*, *26*(6), 963-977.

Smith, R. G., & Kamwanja, G. A. (1986, October). The use of rice husk for making a cementitious material. In *Proc. Joint Symposium on the Use of Vegetable Plants and their Fibers as Building Material, Baghdad*.

Little, D. N., & Little, D. N. (1987). *Soil stabilization for roadways and airfields*. Engineering & Services Laboratory, Air Force Engineering & Services Center.

Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., & Rad, N. S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *107*(6), 799-817.

Bhattacharja, S. A. N. K. A. R., Bhatty, J. I., & Todres, H. A. (2003). Stabilization of clay soils by Portland cement or lime–a critical review of literature. *PCA R&D Serial*, *60*(1), 124-133..

Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., & Randolph, M. F. (2002). Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *128*(6), 520-529.

Herzog, A., & Mitchell, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clay with cement. *Highway Research Record*, (36).

Geiman, C. M. (2005). *Stabilization of soft clay subgrades in Virginia phase I laboratory study* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and concrete research*, *34*(3), 521-526.