

تثبیت خاک ماسه‌ای با استفاده از سیمان و خاکستر پوسته برنج و مسلح شده توسط الیاف پلی‌پروپیلن

علی قربانی^{۱*}، میثم سلیم زاده شوئیلی^۲

- ۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، ایران
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، ایران

*ghorbani@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۰/۲۵]

چکیده

در این مقاله روشی جدید جهت تثبیت ماسه انزلی با استفاده از خاکستر پوسته برنج و سیمان ارائه و امکان جایگزینی سیمان با خاکستر پوسته برنج بررسی شده است. در این راستا، سیمان و خاکستر پوسته برنج به ترتیب با درصد‌های ۳، ۵، ۷، ۵ و ۱۰ (سیمان) و همچنین ۳، ۵، ۷، ۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ (خاکستر پوسته برنج) به ماسه افزوده شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری روی نمونه‌ها انجام شده است. همچنین با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن با درصد‌های مختلف ۰/۲٪ و ۰/۴٪، اثر الیاف بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیتی بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، سیمان و خاکستر پوسته برنج مقاومت فشاری نمونه‌ها را افزایش داده و جایگزینی نیمی از سیمان توسط خاکستر پوسته برنج، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. با استفاده از رگرسیون چند متغیره تکامل یافته، رابطه‌ای با دقت بالا برای پیش بینی مقاومت فشاری ماسه تثبیتی با سیمان-خاکستر پوسته برنج و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن ارائه شده است. با استفاده از آنالیز حساسیت، میزان همبستگی مقاومت فشاری تک محوری با درصد مواد تشکیل دهنده بررسی شده است. همچنین، نتایج بدست آمده به کمک عکس‌های میکروسکوپ الکترونی تفسیر و توجیه شده‌اند.

واژگان کلیدی: ماسه، تثبیت خاک، خاکستر پوسته برنج، الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری تک محوری، رگرسیون چند متغیره تکاملی، آنالیز حساسیت.

۱. مقدمه

معرفی این مصالح، فراوانی و قیمت تمام شده پایین چنین مصالحی بوده است. همچنین، چنانچه این مصالح موادی زائد بوده که وجود آن در طبیعت دارای خطرهایی باشد، استفاده از آن در پروژه‌های مختلف با ترغیب بیشتری روبرو خواهد بود.

در سال‌های اخیر مصالح مختلفی برای تثبیت خاک و بهبود خواص مکانیکی آن استفاده شده‌اند. علاوه بر واکنش پذیری مناسب و انجام واکنش هیدراسیون، رویکرد عمده در

۲۲٪ پوسته برنج بدست می‌آید. این پوسته شامل ۷۵٪ مواد آلی سبک است. ۲۵٪ از وزن این پوسته طی فرایند سوزاندن به خاکستر پوسته برنج تبدیل می‌شود. پوسته برنج معمولاً حدود ۴۸ ساعت تحت فرآیند احتراق کنترل نشده سوزانده می‌شود. درجه حرارت سوزاندن در محدوده ۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد است. خاکستر حاصل برای افزایش سطح ویژه در دستگاه آسیاب به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود. ظاهر آن خاکستری روشن است. این خاکستر به صورت معمول شامل ۸۵ تا ۹۵ درصد سیلیکای آمورف است. مهم‌ترین مشخصه خاکستر پوسته برنج که تعیین‌کننده فعالیت پوزولانی آن است میزان سطح آمورف آن می‌باشد. خاکستر پوسته برنج یک ماده پوزولانی فعال و بسیار واکنش‌پذیر برای استفاده در مخلوط با آهک یا جایگزینی با سیمان است. خاکستر پوسته برنج حاوی میزان بالایی دی‌اکسید سیلیکون است. پس چنانچه اشاره شد، با آگاهی از اینکه برنج و تمام مواد زائد مربوط به آن به‌طور قابل توجهی در کشور موجود است، می‌تواند به عنوان یک ماده اقتصادی و قابل دسترس در تثبیت مورد استفاده قرار گیرد. در طول چند دهه گذشته تحقیقات پژوهشی به منظور بررسی استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان ماده تثبیت‌کننده در بهبود خاک انجام شده است [6-7]. نایر و همکاران به بررسی ساختار واکنش‌های پوزولانی خاکستر پوسته برنج پرداختند [8-9]. سرکار و همکاران (۲۰۱۲) آثار خاکستر پوسته برنج روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک چسبنده را مورد بررسی قرار دادند [10]. پژوهش‌های زیادی برای بهبود مشخصات خاک‌های رسی و کاربرد آن در مهندسی ژئوتکنیک صورت گرفت [3, 11-14]. پژوهش‌های آزمایشگاهی را روی ظرفیت باربری پی‌های مربعی روی خاک رس تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج انجام دادند. بعلاوه، تانگ و همکاران با استفاده از الیاف و سیمان در ترکیب با خاک رسی نشان دادند که مسلح کردن با الیاف، مقاومت برشی و مقاومت فشاری را افزایش داد [15]. همچنین مشاهده شد که الیاف پلی پروپیلن مانع از توسعه و باز شدن ترک و در نتیجه جلوگیری از شکست کامل نمونه می‌شود. با توجه به این واقعیت که خاک ماسه‌ای یکی از گسترده‌ترین خاک‌های تشکیل دهنده انزلی و گیلان است، این مقاله به بررسی اثر مخلوط سیمان-خاکستر

در این راستا، خاکستر بادی، سیلیکا فوم و خاکستر پوسته برنج از جمله مصالحی هست که دارای چنین فاکتورهای مهمی است [1-2]. استفاده از این مواد به عنوان یکی از روش‌های تثبیت خاک منجر به برخی از مزیت‌های اصلی در مهندسی ژئوتکنیک مانند افزایش ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک، کنترل یا محدود کردن تغییر شکل، تسریع روند تحکیم، تأمین پایداری جانبی در دامنه‌های خاک و افزایش مقاومت در برابر پدیده روانگرایی می‌شود. به علاوه، این عمل می‌تواند باعث اصلاح مشخصات خاک شود. از طرف دیگر، تثبیت‌کننده‌های شیمیایی متداول مانند سیمان و آهک همواره مورد استفاده بوده‌اند. حال آنکه جایگزینی بخشی از این تثبیت‌کننده‌های متداول با مصالح جدید تشریح شده، کمک زیادی در صرفه اقتصادی عملیات تثبیت خواهد بود [3-4]. با توجه به اینکه مصرف کل انرژی در تولید سیمان حدود ۵ Tjs در ۱۰۰۰ تن است، همچنین تولید هر تن سیمان حدود یک تن دی‌اکسید کربن در اتمسفر منتشر می‌کند، نتیجه مهم استفاده از این مواد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان یا آهک، صرفه‌جویی زیاد در انرژی و هزینه دارد. علاوه بر این در دسترس بودن این مواد درخواست استفاده از چنین محصولاتی را بیشتر می‌کند. از این بین، خاکستر پوسته برنج که حاصل از سوزاندن کنترل‌شده پوسته برنج (یک ماده زائد) در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است به عنوان یکی از این مواد مکمل و در دسترس در سراسر جهان است [5]. توجه به دو نکته اساسی که (۱) این ماده به وفور در استان‌های شمالی کشور موجود است و (۲) تخلیه و انبار نمودن این خاکستر در طبیعت آثار شدید زیست محیطی به دنبال دارد، تمایل برای بهره بردن از آن در پروژه‌های عمرانی را افزایش می‌دهد. پس در صورت ایجاد واکنشی مناسب و فراهم کردن مقاومت مطلوب برای تثبیت خاک، گزینه بسیار مناسبی برای جایگزینی سیمان است. به لحاظ فرایند تولید و در دسترس بودن نیز، تقریباً با سوزاندن هر تن پوسته برنج، ۲۰۰ کیلوگرم خاکستر پوسته برنج حاصل می‌شود. پوسته برنج حاوی مواد آلی و ۲۰ درصد مواد معدنی است. خاکستر پوسته برنج که به عنوان محصول فرعی در تولید برنج است، از احتراق پوسته برنج حاصل می‌شود. در طول فرایند جداسازی پوسته از برنج ۷۸٪ برنج و سبوس و

۲. مصالح مورد استفاده

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، ماسه انزلی که دربرگیرنده بخش گسترده‌ای از خاک نوار ساحلی شمالی و علی‌الخصوص استان گیلان است مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، خاکستر پسته برنج و سیمان از جمله مصالحی است که برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده شده‌اند. الیاف پلی پروپیلن نیز برای تسلیح نمونه‌ها به نمونه‌ها افزوده شده است. در ادامه، خواص و مقدار هر یک از مصالح مورد اشاره به تفصیل ارائه شده است.

۱.۲. ماسه

ماسه مورد مطالعه ماسه بندر انزلی که دربرگیرنده منطقه وسیعی از استان گیلان، است. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. براساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید و استاندارد ASTM D۲۴۸۷ [17]، ماسه مورد مطالعه SP است. ضریب یکنواختی C_u و ضریب انحنا C_c این ماسه به ترتیب ۲/۲۸ و ۱/۱۱ است. همچنین چگالی ویژه دانه‌های خاک G_s ، ۲/۶۶ و ضریب معادل (D_{60}) آن ۰/۲۴ میلی‌متر است.

شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه انزلی استفاده شده

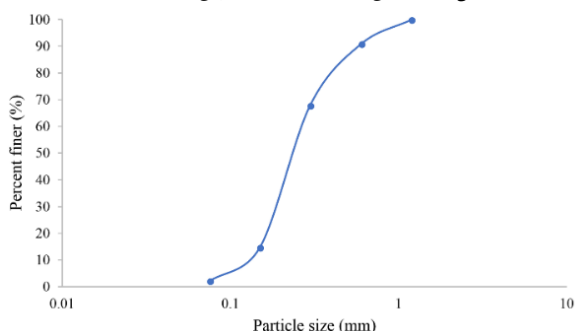


Fig. 1. Grain distribution curve of the used Anzali sand

۲.۲. سیمان، خاکستر پسته برنج (RHA) و الیاف (PP)

اگر چه بسیاری از انواع سیمان می‌تواند برای تثبیت در خاک مورد استفاده قرار گیرد، اما نوع متداول آن سیمان پرتلند معمولی است. سیمان مورد استفاده در این مطالعه سیمان پرتلند معمولی (OPC) است. توزیع تصادفی الیاف پلی پروپیلن برای

پوسته برنج بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه انزلی پرداخته و امکان جایگزینی سیمان را با خاکستر پسته برنج بررسی نموده است. علاوه بر این به اثر درصد‌های مختلف سیمان و خاکستر پسته برنج بر UCS خاک تثبیت شده و اثر الیاف پلی پروپیلن بر کاهش یا محدود کردن گسیختگی خاک پرداخته است. کومار و گوپتا در سال ۲۰۱۶، به بررسی حضور باهم مخلوط رسوبی خاکستر ته کوره و خاکستر بادی که با عنوان Pond ash شناخته می‌شوند و خاکستر پسته برنج و سیمان به همراه الیاف پلی پروپیلن در تثبیت رس پرداختند [16]. تمرکز اصلی این پژوهش بر تثبیت خاک رسی بوده و تمامی تثبیت کننده‌های فوق به صورت همزمان برای تثبیت مود استفاده قرار گرفته‌اند. حال آن که به بررسی اثر این تثبیت کننده‌ها روی رفتار سایر خاک‌ها (از جمله ماسه) پرداخته نشده است. همچنین، تأثیر وجود ترکیب سیمان-خاکستر پسته برنج نیز به تنهایی مورد بررسی قرار نگرفته است. بعلاوه، تمرکز اصلی مطالعه کومار و گوپتا تنها بر درصد‌های پایین سیمان بوده و تنها به ارزیابی حضور ۲ و ۴ درصد سیمان در ترکیب‌ها می‌پردازد. حال آن که در این مقاله، هدف گذاری اصلی بر امکان جانشینی بخشی از سیمان مصرفی جهت تثبیت با خاکستر پسته برنج است تا از آثار زیست محیطی ناشی از دپوی آن در طبیعت کاسته و باعث افزایش صرفه اقتصادی شد. در این راستا، درصد‌های گوناگون ترکیبی برای سیمان (۳-۱۰٪) و خاکستر پسته برنج (۳-۱۵٪) که بسیار فراگیرتر است، مورد استفاده قرار گرفته است و با افزودن آن‌ها به ماسه در حضور الیاف با درصد‌های مختلف، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها محاسبه شده و به عنوان یکی از نوآوری‌های اصلی تحقیق، به ارائه رابطه‌ای کاربردی برای محاسبه آن پرداخته شده است. همچنین با کمک گرفتن از تحلیل داده‌های حاصل و انجام آنالیز حساسیت، با معرفی حساسیت مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیتی به هر یک از تثبیت کننده‌ها، کمک شایانی برای طراحی برنامه‌های تثبیت به مهندسان طراح شده است. علاوه بر معرفی درصد بهینه جایگزینی سیمان با خاکستر پسته برنج، از جمله دیگر نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بررسی میکروسکوپی روند تغییرات در نتیجه انجام واکنش‌ها اشاره نمود.

منظور آماده سازی آن برای اضافه کردن به سیمان و ایجاد سطح ویژه بالاتر، با استفاده از آسیاب به مدت ۱/۵ ساعت آسیاب شدند. دانه‌بندی خاکستر پوسته برنج مورد استفاده، قبل و پس از آسیاب شدن در شکل (۲) نشان داده شده است. در واقع دلیل آسیاب کردن توجه به این نکته است که با افزایش سطح ویژه مصالح، تعداد سطوح آماده برای انجام واکنش افزایش یافته و در نتیجه، متعاقباً، احتمال انجام واکنش هیدراسیون افزایش می‌یابد. بنابراین فرایند آسیاب کردن هر یک از تثبیت کننده‌ها می‌تواند منجر به افزایش سطح ویژه، افزایش پتانسیل واکنش پذیری و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری شود. ترکیب شیمیایی سیمان و خاکستر پوسته برنج استفاده شده، در جدول (۱) ارائه شده است.

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

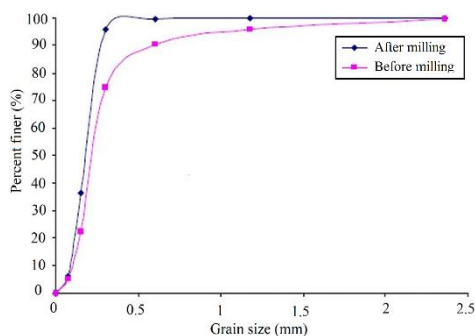


Fig. 2. Distribution of RHA particles before and after milling

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان و خاکستر پوسته برنج مورد استفاده

RHA (%)	Cement (%)	Constituent
90.6	22.2	SiO ₂
0.49	5.48	Al ₂ O ₃
0.73	3.35	Fe ₂ O ₃
1.51	63.9	CaO
0.88	1.06	MgO
0.22	0.17	Na ₂ O
1.8	0.31	K ₂ O
0.43	2.29	SO ₃
3.34	1.24	L.O.I.

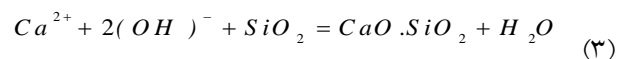
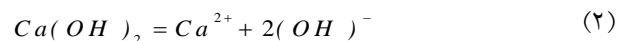
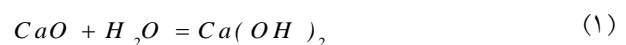
Table 2. Chemical composition of studied cement and RHA

۳. برنامه آزمایش‌ها

چنانچه اشاره شد، درصدهای مختلف مصالح برای انجام آزمایش‌ها و بررسی مقاومت فشاری مصالح مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا، برنامه مورد استفاده برای انجام

غلبه بر مشکلات سیمان شامل سختی بالا و رفتار شکننده آن در خاک تثبیت شده می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اعتقاد بر این است که الیاف می‌توانند بطور قابل ملاحظه‌ای در برابر ترک‌های اولیه و کنترل فرایند توسعه ترک مؤثر باشند [18].

از سوی دیگر چندین مطالعه دیگر نشان داده است که به علت فعالیت شیمیایی بسیار کم الیاف، چسبندگی شیمیایی ناچیزی با مخلوط ایجاد می‌کنند [19]. از این رو اثر کلی الیاف پلی پروپیلن بر تقویت و افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده کاملاً مشخص نیست. از این رو درصدهای مختلف الیاف (۰، ۰/۲ و ۰/۴ درصد) برای مطالعه بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. برخی از خواص الیاف پلی پروپیلن مورد مطالعه که توسط سازنده ارائه شده بدین صورت است: استاندارد [20] (ASTM-C1116)، رنگ: سفید، مقطع: دایره‌ای، قطر: ۳۴ میکرومتر، مدول یانگ: ۳۵۰۰ مگاپاسکال، وزن مخصوص: ۹۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب. همچنین، مهم‌ترین ویژگی خاکستر پوسته برنج که واکنش‌های پوزولانی را کنترل می‌کند وجود محتوای سلیکای آمورف می‌باشد. خاکستر پوسته برنج به دلیل خاصیت پوزولانی بسیار فعال برای تشکیل ژل سلیکات کلسیم مناسب است که در حقیقت محصول واکنش آن با سیمان است. در واقع زمانی که خاکستر پوسته برنج و سیمان در حضور آب مخلوط می‌شوند pH محیط افزایش یافته و سلیکای فعال موجود در خاکستر پوسته برنج با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ژل هیدرات سلیکات کلسیم تولید می‌شود. واکنش شرح داده شده در معادله‌های ۱-۲ نشان داده شده است [2, 21-22].



پوسته برنج مورد استفاده در این مطالعه از شهر رشت تهیه شده است. ابتدا به طور 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 برای کربن زدایی و افزایش خاصیت پوزولانی قرار گرفت، سپس به

پایان دوره عمل آوری، مطابق استاندارد ASTM D ۱۶۳۳ [23] به مدت ۴ ساعت درون آب قرار گرفته تا اشباع شوند و از نقش مکش در گسیختگی نمونه‌ها جلوگیری شود. سپس، قبل از انجام تست‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک لایه ظریفی از پودر کائولینیت پوشیده شده (کلاهک گذاری نمونه‌ها)، بدین ترتیب سطحی کاملاً صاف و صیقلی برای توزیع مناسب تنش قائم حاصل شد. شایان ذکر است که به منظور کم کردن نقش خطاهای آزمایشگاهی، ساخت هر نمونه با تکرارپذیری ۳ مرتبه انجام گرفت و از بین این ۳ نمونه، نمونه‌هایی که دارای مقادیر مقاومت فشاری با اختلاف کمتر از ۱۰٪ بودند، برای هر ترکیب مورد استفاده قرار گرفتند.

۵. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)

به منظور بررسی اثر سیمان، خاکستر پوسته برنج و الیاف پلی پروپیلن بر UCS خاک ماسه‌ای تثبیت و مسلح شده، سیمان به مقدار ۳٪ و ۵٪ و ۷٪/۵ و ۱۰٪، خاکستر پوسته برنج به مقدار ۳٪ و ۵٪ و ۷٪ و ۱۰٪ و ۱۲٪ و ۱۵٪ به نمونه‌ها اضافه شد، علاوه بر این با درصد‌های مختلف ۰٪ و ۲٪ و ۴٪ از الیاف پلی پروپیلن مسلح به طول ۱۲ میلی‌متر مسلح شدند. همه نمونه‌ها با بهره بردن از قالب‌هایی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و با توجه به استاندارد ASTM D ۱۶۳۳ [23] ساخته شدند. با توجه به این استاندارد نمونه‌ها نخست اشباع شده و سپس بارگذاری شدند. با توجه به شباهت بین مقاومت فشاری خاک-سیمان و خاک-آهک استاندارد ASTM D ۵۱۰۲ [24] برای انجام آزمایش استفاده شده است. همچنین، آزمایش در سرعت ثابت ۱ میلی‌متر در دقیقه همراه با قرائت بارهای عمودی متناظر به صورت مداوم ثبت شدند.

۶. نتایج

پس از انجام تست‌های UCS روی نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف OPC، RHA و مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن، نتایج آزمایش آنالیز شده و مورد بحث قرار گرفته

آزمایش‌ها به صورت جدول (۲) است. در این جدول، C، R و P به ترتیب بیانگر سیمان، خاکستر پوسته برنج و الیاف پلی پروپیلن است.

جدول ۲. برنامه آزمایش‌ها

Materials (%)			Sample number
PP	RHA	Cement	
0	7	3	3C-7R-nP
0.2	7	3	3C-7R-0.2P
0.4	7	3	3C-7R-0.4P
0	5	5	5C-5R-nP
0.2	5	5	5C-5R-0.2P
0.4	5	5	5C-5R-0.4P
0	10	5	5C-10R-nP
0.2	10	5	5C-10R-0.2P
0.4	10	5	5C-10R-0.4P
0	7.5	7.5	7.5C-7.5R-nP
0.2	7.5	7.5	7.5C-7.5R-0.2P
0.4	7.5	7.5	7.5C-7.5R-0.4P
0.2	3	7.5	7.5C-3R-0.2P
0.2	5	7.5	7.5C-5R-0.2P
0.2	10	7.5	7.5C-10R-0.2P
0.2	12	7.5	7.5C-12R-0.2P
0.2	15	7.5	7.5C-15R-0.2P
0.2	15	5	5C-15R-0.2P
0	10	10	10C-10R-nP
0.2	10	10	10C-10R-0.2P
0.4	10	10	10C-10R-0.4P

Table 3. Test program

۴. ساخت نمونه و عمل آوری

به منظور ایجاد توزیع یکنواخت کلیه مواد ترکیبی، نخست، الیاف پلی پروپیلن به صورت رشته‌های جدا از هم در آمده و ضمن اختلاط با درصد وزنی مشخص از پیش تعیین شده با سایر افزودنی‌ها و خاک، از یک همزن برقی با موتور چرخشی به منظور حصول ترکیبی یکنواخت استفاده شده است. سپس هر یک از نمونه‌ها در ۳ مرحله در قالب ریخته شده و متراکم شد. در هر یک از این مراحل، نمونه‌ها به حداکثر تراکم قابل حصول خود متراکم شدند. شایان ذکر است که نمونه‌ها در ابعاد ۲۰ سانتی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر ساخته شدند. پس از آماده‌سازی نمونه برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز، باید نمونه‌ها در یک ظرف در بسته برای حفظ رطوبت برای ۲۸ روز نگهداری شوند. پس نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب درون دسیکاتور قرار گرفته و شرایطی فراهم شد که نمونه‌ها در آن رطوبت خود را از دست ندهند. نمونه‌ها پس از

همچنین با بررسی نمونه‌ها شامل مجموع تثبیت کننده ۱۰٪ (شامل نمونه‌های ۳٪ سیمان+۷٪ خاکستر پوسته برنج و همچنین نمونه‌های ۵٪ سیمان+۵٪ خاکستر پوسته برنج) و همچنین مجموع تثبیت کننده ۱۵٪ (شامل نمونه‌های ۵٪ سیمان+۱۰٪ خاکستر پوسته برنج و همچنین نمونه‌های ۷٫۵٪ سیمان+۷٫۵٪ خاکستر پوسته برنج)، چنین ملاحظه شد که به منظور تعیین درصد اختلاط تثبیت کننده‌ها، جایگزینی نیمی از سیمان توسط خاکستر پوسته برنج می‌تواند به بالاترین میزان مقاومت فشاری منتج شود. این میزان اختلاط (۵۰٪+۵۰٪)، میزان بهینه‌ی اختلاط سیمان و خاکستر پوسته برنج به ازای هر درصد ثابتی از مجموع این دو است.

۲.۶. تعیین مقدار بهینه خاکستر پوسته برنج مصرفی

از آنجایی که مقدار متداول مجموع تثبیت کننده در پروژه‌های عملی عموماً ۱۰-۱۵٪ است، با بررسی رفتار نمونه‌های مختلف تثبیتی، نمونه‌های شامل ۷٫۵٪ سیمان، ۷٫۵٪ خاکستر پوسته برنج به عنوان نمونه‌های بهینه بدست آمد و این درصد اختلاط به عنوان درصد بهینه معرفی شد. پس به منظور بررسی نقش مقدار RHA روی مقاومت فشاری ماسه‌های تثبیتی، ۷٫۵٪ سیمان به عنوان پایه بررسی‌ها مد نظر قرار گرفته و مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای مقادیر ۳، ۵، ۷٫۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۵٪ خاکستر پوسته برنج اندازه‌گیری شد. چنانچه در شکل (۴) نشان داده شده است، با افزایش RHA تا ۱۲٪، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

شکل ۴. تأثیر درصد خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری تک

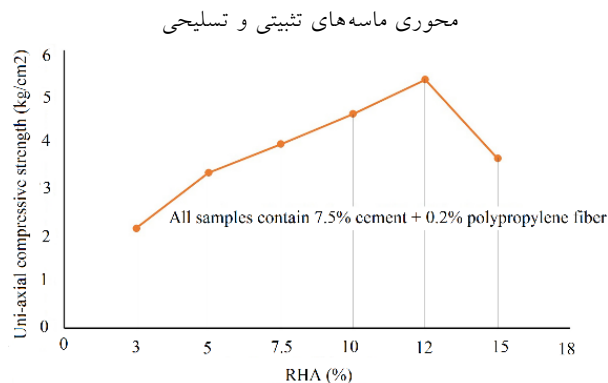


Fig. 4. Effect of RHA content on the uni-axial compressive strength of stabilized and reinforced sands

است. در این راستا، نتایج و آنالیز آنها به چهار بخش تقسیم شدند. دسته اول نتایج، به اثر میزان الیاف و نسبت اختلاط سیمان و خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها می‌پردازد. دسته دوم نتایج، اثر میزان خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های حاوی RHA و OPC و تثبیت شده توسط الیاف پلی پروپیلن را بررسی می‌نماید. دسته سوم با استفاده از آنالیز داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، به ارائه رابطه کاربردی برای UCS پرداخته و با استفاده از آنالیز حساسیت، وابستگی آن را با هر یک از مصالح مورد ارزیابی قرار می‌دهد. دسته آخر نتایج در واقع تفسیری بر رفتار مشاهده شده با استفاده از نتایج مربوط به تصاویر میکروسکوپ الکترونی برخی از نمونه‌های مورد استفاده می‌باشد.

۱.۶. تأثیر میزان الیاف پلی پروپیلن و نسبت اختلاط سیمان و خاکستر پوسته برنج

به منظور بررسی اثر مقدار الیاف پلی پروپیلن بر UCS نمونه‌های مسلح شده، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مختلف متشکل از سیمان و خاکستر پوسته برنج به ازای مقادیر مختلف الیاف محاسبه شد. چنانچه در شکل (۳) نشان داده شده است، با افزایش مقدار الیاف به ۰/۲٪، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. حال آنکه با افزایش بیشتر آن به ۰/۴٪، روند معکوس خواهد شد. چنین رفتاری و تأثیر مقدار الیاف بر مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شده است. این مسأله لزوم مطالعه دقیق‌تر میکروسکوپی این پدیده را نشان می‌دهد.

شکل ۳. مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مورد آزمایش

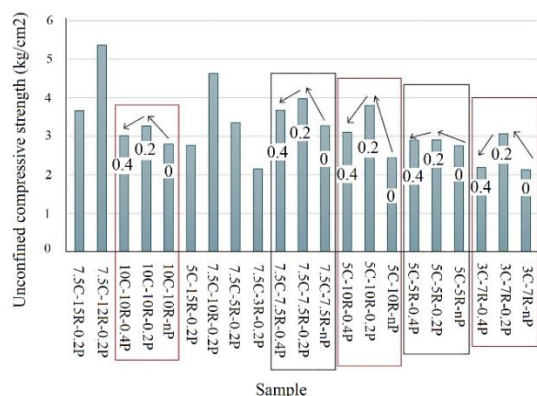


Fig. 3. Uni-axial compressive strength of tested samples

وجود نقطه تغییر رفتار مقاومت فشاری به ازای مقدار الیاف متفاوت و همچنین مقدار خاکستر متفاوت، لزوم وجود مدلی که به صورت توأمان به بررسی رفتار نمونه‌های تثبیتی به ازای تغییرات همزمان مصالح مختلف پردازد را آشکار می‌سازد. بخش‌های آتی به ارائه مدلی برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های ماسه‌ای تثبیتی و تسلیح شده می‌پردازد.

۳.۶. پردازش داده‌های UCS

چنانچه پیشتر بیان شد، با توجه به وجود پیچیدگی‌هایی در رفتار مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیتی و تسلیح شده (تغییر رفتار در مقادیری خاص برای درصدهای مختلف الیاف و خاکستر)، نیاز به مدلی ریاضی برای تفسیر رفتار توأمان نمونه‌ها ضروری است. همچنین چنین مدلی قادر به ارائه مطالعات پارامتریک چند متغیره نیز خواهد بود. پس در این بخش، با بهره بردن از روشی مناسب و دقیق، به این امر پرداخته خواهد شد.

۱.۳.۶. پیش‌بینی UCS با استفاده از روش EPR

تکنیک‌های هوش مصنوعی کاربرد زیادی در پیش‌بینی توابع پیچیده مهندسی عمران دارد. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون چند جمله‌ای تکامل یافته (EPR) اشاره نمود که با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی به یافتن ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی در داده‌های مختلف پرداخته و به این وسیله به پیش‌بینی توابع پیچیده مهندسی عمران کمک شایانی می‌نمایند. مراجع [25-30] برخی از منابعی است که از چنین تکنیک‌هایی بهره برده‌اند. در میان آنها، EPR به عنوان یک روش رگرسیون ترکیبی جدید، خواص رگرسیون‌های مرسوم و برنامه‌نویسی ژنتیک را به صورت توأمان دارد. ایده اصلی این روش به کارگیری روش محاسبات تکاملی برای جستجو برای مدلی از سیستم و همچنین استفاده از تخمین پارامترها برای محاسبه ثوابت با بهره بردن از روش حداقل مربعات است [31]. در مراحل تکاملی ساخت مدل EPR، قیدهایی به

$$\begin{aligned}
 UCS = & (5.8464 \times C^{-0.5} \times RHA^{-0.5} \times e^{-2PP}) \\
 & - (1.1691 \times 10^{-7} \times e^{(0.25C + RHA)}) \\
 & - (1.6345 \times 10^{-11} \times RHA \times PP^{-0.5}) \\
 & - (0.043678 \times C^{0.25} \times e^{0.5C}) \\
 & + (0.11721 \times C^{0.5} \times RHA^{0.5} \times e^{(0.25 \times (C - PP))}) \\
 & + 1.1241
 \end{aligned} \quad (4)$$

در این رابطه C، RHA و PP به ترتیب بیانگر درصد سیمان، درصد خاکستر پوسته برنج و درصد الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده بوده و UCS، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را بر حسب kg/cm^2 نشان می‌دهد. همچنین، شکل (۵) نشان دهنده مقادیر مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش و پیش‌بینی شده توسط مدل EPR برای نمونه‌های مختلف است. چنانچه در شکل‌های (۵ و ۶) مشاهده می‌شود، خطای محاسبات پایین بوده و هماهنگی مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده وجود دارد.

سپس، رابطه مقاومت بین x_i و x_j با استفاده از معادله ۸ محاسبه می‌شود [31].

$$r_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^k x_{im} x_{jm}}{\sqrt{\sum_{m=1}^k x_{im}^2 \sum_{m=1}^k x_{jm}^2}} \quad (8)$$

با استفاده از این روش، بیشترین و کمترین عوامل تأثیرگذار بر UCS نمونه‌های تثبیت و مسلح شده بدست می‌آید. میزان وابستگی بین پارامترهای ورودی و UCS در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، پلی پروپیلن و تغییرات میزان آن بیشترین تأثیر را بر تغییرات مقاومت فشاری تک محوری ماسه تثبیت و مسلح شده نشان می‌دهد. همچنین، سیمان و خاکستر پوسته برنج نیز به صورت چشمگیری بر مقاومت فشاری تأثیرگذار است.

شکل ۷. میزان همبستگی مقاومت فشاری تک محوری با درصد هر یک از مصالح به کار رفته

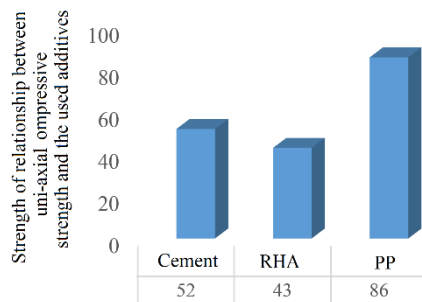


Fig. 7. Strength of relationship between uni-axial compressive strength and the material percentages

۴.۶. عکس‌های میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

شکل (۸)، تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه‌های ساخته شده با ۱۰٪ سیمان + ۱۰٪ خاکستر بدون الیاف، ۱۰٪ سیمان + ۱۰٪ خاکستر + ۰٫۴٪ الیاف و ۷٫۵٪ سیمان + ۱۲٪ خاکستر + ۰٫۲٪ الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به کریستال‌های سیلیکای موجود در هر سه نمونه، می‌توان نتیجه گرفت که RHA به عنوان یک ماده جایگزین مناسب برای سیمان است که می‌تواند همان شرایط را برای واکنش هیدراسیون ایجاد نماید. چنانچه در شکل دیده می‌شود، وجود الیاف تا حد ۰٫۲٪ به عنوان المان جداکننده نقش مثبت ایفا کرده و سبب افزایش سطح ویژه و فراهم شدن بهتر امکان واکنش‌های پوزوانی و

شکل ۵. میزان خطا در پیش‌بینی UCS برای نمونه‌های مختلف

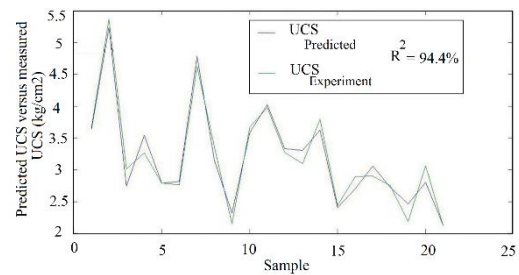


Fig. 5. Errors in the prediction of UCS of studied samples

شکل ۶. مقادیر UCS پیش‌بینی شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده

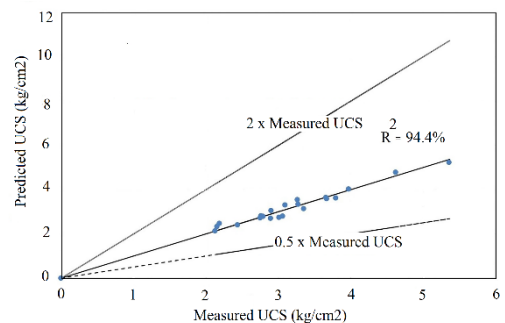


Fig. 6. Predicted UCS values versus the measured ones

۲.۳.۶. آنالیز حساسیت

معرفی بیشترین و کمترین عوامل مؤثر بر UCS نمونه‌های تثبیت شده می‌تواند بطور قابل توجهی برای انتخاب روش و برنامه تثبیت به مهندسین طراح کمک نماید. بنابراین به کمک روش دامنه‌کازین (CAM) آنالیز حساسیت انجام شده است. این روش برای دستیابی به میزان وابستگی بین پارامترهای ورودی و تابع هدف می‌باشد. به منظور انجام آنالیز حساسیت، در گام نخست تمامی داده‌ها توسط رابطه ۵، بی‌بعد شده و به اعدادی بین ۰ و ۱ مقیاس می‌شوند [29-30] و [32-33].

$$\text{مقدار کمینه} - \text{هر یک از مقادیر} = \frac{\text{مقدار مقیاس شده}}{\text{مقدار کمینه} - \text{مقدار بیشینه}} \quad (5)$$

سپس، هر یک از پارامترهای ورودی به عنوان یکی از المان‌های آرایه X نشان داده می‌شود (معادله ۶) [31-32].

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n\} \quad (6)$$

که هر یک از المان‌ها یک بردار با طول m هستند که در معادله ۷ نشان داده شده است.

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\} \quad (7)$$

۷. نتیجه گیری

استفاده از خاکستر پوسته برنج در کنار سیمان و یا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در پروژه‌های اجرایی تثبیت ماسه، به دلیل الزامات محیط زیستی، قیمت پایین و استحکام بالا، بسیار مفید بوده و توصیه می‌شود. در این مقاله، با معرفی خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تثبیت خاک ماسه‌ای، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن ساخته شده و به بررسی اثر میزان الیاف پلی پروپیلن و خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری تک محوری ۲۸ روزه ماسه تثبیت و مسلح شده پرداخته شده است. همچنین، با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌ها و با بهره بردن از روش رگرسیون چند جمله‌ای چند متغیره تکاملی، رابطه‌ای جدید برای پیش بینی UCS نمونه‌های ۲۸ روزه ارائه شده است. بعلاوه، میزان وابستگی UCS نمونه‌های تثبیتی و تحکیمی با هر یک از مصالح مورد استفاده با استفاده از آنالیز حساسیت بر اساس روش دامنه کازین (CAM) بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از تست‌های مقاومت فشاری محدود نشده:

- نمونه‌هایی که دارای مقدار بالای الیاف پلی پروپیلن است (۰/۴٪)، مقدار UCS کمتری از نمونه‌های حاوی ۰/۲٪ الیاف دارند. و نمونه‌های مسلح شده با ۰/۲٪ مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف از خود نشان می‌دهند.
- ترکیب ۷/۵٪ سیمان و ۷/۵٪ خاکستر پوسته برنج به عنوان ترکیب بهینه جهت تثبیت ماسه انزلی در محدوده مورد مطالعه مجموع تثبیت کننده (۱۵٪) معرفی شد. همچنین، جایگزینی نیمی از سیمان با خاکستر پوسته برنج در تمامی درصد‌های الیاف، به مقاومت فشاری بالاتری منتج خواهد شد.
- با استفاده از آنالیز داده‌ها و استفاده از مدل EPR، روابط جدیدی با ضریب همبستگی بالایی (۹۴/۴٪) جهت پیش بینی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت و مسلح شده ۲۸ روزه معرفی شدند.

تشکیل ساختار بلورین شده است. حال آن که در شکل (۸) الف، به دلیل سطح ویژه پایین‌تر، تنها خمیره‌ای ضعیف گیرنده ذرات شده و با تشکیل ساختاری بی شکل مقاومت چندانی را در بر نخواهد داشت. از طرف دیگر، با توجه به شکل (۸) ج، میزان بهینه سیمان (۷/۵٪) و الیاف (۰/۲٪) سبب شکل گیری ساختاری منظم و بلوری شده و ضمن ایجاد سطح ویژه لازم، ترکیب حاصل دارای مقاومت بالاتری در قیاس با شکل ۸ ب که دارای بلورهای چندان منظمی نیست، است.

شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه‌های الف)

۱۰C-۱۰R-nP (ب)، ۱۰C-۱۰R-۰.۴P (ج) و ۷.۵C-۱۲R-۰.۲P

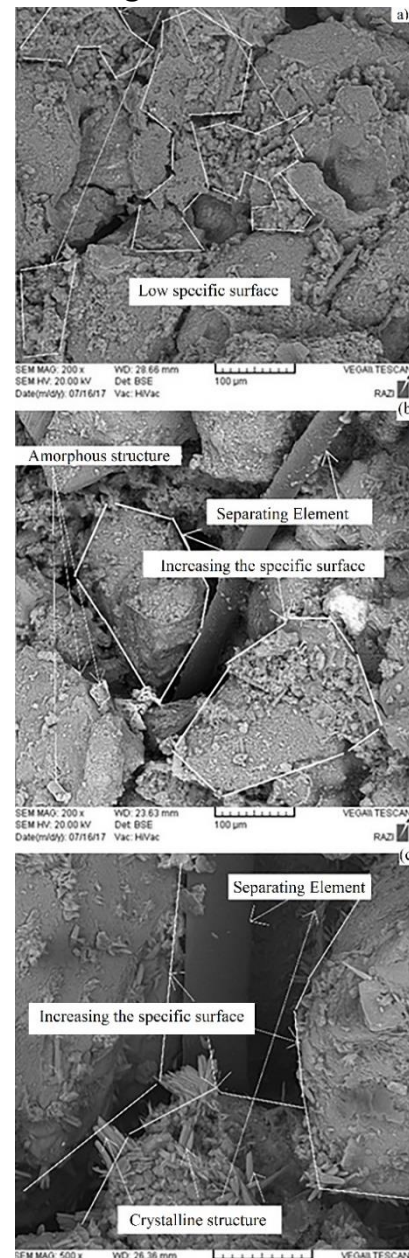


Fig. 8. Scanning electron microscopy photos for a) 10C-10R-nP; b) 10C-10R-0.4P and 7.5C-12R-0.2P samples

- [12] Cai, Y., Shi, B., Ng, C. W. W. & Tang, C. S. 2006 Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87, 230-240.
- [13] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. & Cai, Y. 2007 Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- [14] Tripathi, R. K. & Yadu, L. 2013 Bearing Capacity of Square Footing on Soft Soil Stabilized with Rice Husk Ash—An Experimental Study, *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET'2013)* Patong Beach, Phuket (Thailand), 95-99.
- [15] Tang, C-S., Shi, B., Cui, Y-J., Liu, C. & Gu, K. 2012 Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal* 49, 1088-1101.
- [16] Kumar, A. & Gupta, D. 2016 Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes* 44(3): 466-474.
- [17] ASTM D2487-11. 2011 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [18] Sun, W., Chen, H., Luo, X., & Qian, H. 2001 The effect of hybrid fibers and expensive agent on the shrinkage and permeability of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 435-438.
- [19] Linfa, Y., Pendelton, R. L. & Jenkins, C. H. M. 1998 Interface morphologies in polyolefin fiber reinforced concrete composites. *Composite Part A* 29A, 643-650.
- [20] ASTM C1116 / C1116M-10a. 2015 Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [21] Ghorbani, A. & Salimzadehshooiili, M. 2018 Dynamic characterization of sand stabilized with cement and RHA and reinforced with polypropylene fibre. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Under Review.
- [22] Ghorbani, A. & Salimzadehshooiili, M. 2018 Compressive and tensile strength of cement-RHA stabilized sand-clay mixture reinforced with polypropylene fibers. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Accepted.
- [23] ASTM D1633-00 2007 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM D5102-09. 2009b Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] Rezanian, M. & Faramarzi, A. 2011 An evolutionary based approach for assessment of earthquake-induced soil liquefaction and lateral displacement. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(1): 142-153.

- بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، مقاومت فشاری تک محوری ماسه تثبیت و مسلح شده، حساسیت بسیار بالایی نسبت به میزان الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده داشته و نقش سیمان و خاکستر پسته برنج، تقریباً یکسان است.

References

منابع

- [1] Ghorbani, A. & Forouzes, K 2010 Improving mechanical properties of clay using cement and fly ash and reinforced with polypropylene fibers 4th *International conference on geotechnical engineering and soil mechanics*, Tehran, Iran, Paper No. 2(CATKAV)250.
- [2] Ghorbani, A., Hasanzadehshooiili, H., Karimi, M., Daghigh, Y. & Medzvieckas, J. 2015 Stabilization of problematic silty sands using microsilica and lime, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(1), 61-70.
- [3] Mtallib, M. O. A. & Bankole, G. M. 2011 The Improvement of the Index Properties and Compaction Characteristics of Lime Stabilized Tropical Lateritic Clays with Rice Husk Ash (RHA) Admixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16(Bund. I), 984-996.
- [4] Muntohar, A. Widiarti, A. Hartono, E. & Diana, W. 2013 Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. *J. Mater. Civ. Eng.* 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659.
- [5] Della, V.P., Kuhn, I. & Hotza, D. 2002 Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters* 57(4), 818-821.
- [6] Ali, F. H., Adnan, A. & Choy, C. K. 1992 Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from Malaysia with rice husk ash as an additive. *Geotechnical & Geological Engineering* 10(2), 117-134.
- [7] Basha E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B. & Muntohar, A.S. 2005 Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Journal of Construction and Building Materials*. 19(6), 448-453.
- [8] Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A. A. K. & Kentgens, A. P. M. 2008 A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. *Cement and Concrete Research* 38(6), 861-869 (2008).
- [9] Nair, D. G., Jagadish, K. S. & Fraaij, A. 2006 Reactive pozzolanas from rice husk ash: an alternative to cement for rural housing. *Cement and Concrete Research* 36(6), 1062-1071.
- [10] Sarkar, M., Rafiqul Islam, & Muhammed Alamgir. 2012 Interpretation of rice husk ash on geotechnical properties of cohesive soil. *Global Journal of Researches In Engineering* 12.2-B.
- [11] Muntohar A. S. & Hantoro, G. 2000 Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 5, 1-19.

- models; application to the deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 58(1), 34-49.
- [31] Giustolisi, O. & Savic, D. A. 2006 A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression. *Journal of Hydroinformatics* 8(3), 207-222.
- [32] Ghorbani, A., Hasanzadehshooiili, H., Ghamari, E. & Medzvieckas, J. 2014 Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58, 21-36.
- [33] Hasanzadehshooiili, H., Lakirouhani, A. & Medzvieckas, J. 2012 Superiority of artificial neural networks over statistical methods in prediction of the optimal length of rock bolts. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(5), 655-661.
- [26] Ahangar-Asr, A., Johari, A. & Javadi, A.A. 2012 An evolutionary approach to modelling the soil-water characteristic curve in unsaturated soils. *Journal of Computers & Geosciences*, 43, 25-33.
- [27] Sadowski, L. & Hoła, J. 2015 ANN modeling of pull-off adhesion of concrete layers. *Advances in Engineering Software*, 89, 17-27.
- [28] Nikoo, M., Torabian Moghadam, F. & Sadowski, L. 2015 Prediction of concrete compressive strength by evolutionary artificial neural networks. *Advances in Materials Science and Engineering*, 8.
- [29] Ghorbani, A. & Hasanzadehshooiili, H. 2017a A novel solution for ground reaction curve of tunnels in elastoplastic strain softening rock masses. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(6), 773-786.
- [30] Ghorbani, A. & Hasanzadehshooiili, H. 2018 Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR

Stabilization of sandy soil using cement and RHA reinforced with polypropylene fiber

Ali Ghorbani^{1*}; Maysam Salimzadehshooili²

- 1- Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Guilan
- 2- Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Guilan

Ghorbani@Guilan.ac.ir

Abstract:

Nowadays, cement is broadly applied to stabilize the soil to improve the mechanical and engineering properties of different soils and to control their deformations and swelling behavior. Nevertheless, due to the high expenses, civil engineers have always been trying to find an economic pozzolanic alternative for cement. In this regard, lots of construction materials such as fly ash, lime, blast furnace ash, pond ash, rice husk ash, etc. are added to different soil materials to find an optimum replacement for the cement. Among the mentioned materials, rice husk ash (RHA), which is widely available in Guilan, Iran, is an environmentally dangerous material (if dumped in the nature). Hence, application of this material will be both economically and environmentally useful. Also, due to its high applicability, it can be easily applied in civil constructions. Hence, application of RHA in civil/construction projects will be considerably useful. On the other hand, different fibers (e.g. plastic, polyester, polypropylene, etc.) are used for engineering purposes to both control the process of crack initiation and increase the material mechanical properties. The length of applied fibers, also, their percentage is two famous controlling parameters of applying fibers in soil stabilization programs. In this paper, a new soil stabilization method is introduced to stabilize Anzali sand using the combination of cement and RHA. Also, the possibility of cement replacement with RHA is investigated. Polypropylene fibers in 0.2 and 0.4 percentages are also added to the samples to control the growth of tensile cracks and to evaluate their effect on the compressive strength of stabilized samples. Hence, cement in 3, 5, 7.5, 10 percentages, also, RHA in 3, 5, 7.5, 10, 12 and 15 percentages are added to the sand samples to increase their compressive strength. Samples are cured for 28 days and unconfined compressive strength tests are conducted on the stabilized and reinforced samples. Based on the test results, compressive strength of all the samples were increase as cement and RHA percentages were increased. Also, RHA is introduced as a capable replacement additive for the cement. In order to make a generalization and provide a relationship for practitioners to use the results of the present study, different techniques can be adopted. Among them, artificial intelligence techniques are most in demanding ones. Neural networks, gen programming languages, genetic algorithms and evolutionary approaches can be applied to provide such relationships. In this paper, evolutionary approaches are considered and using evolutionary polynomial regression technique, simple predictive equation for forecasting UCS is proposed. In this regard, based on the results of conducted un-confined compressive strength tests, Evolutionary Polynomial Regression (EPR) technique is applied and a high accuracy predictive relationship for forecasting UCS of cement-RHA stabilized and polypropylene reinforced sand is presented (coefficient of determination of 94.4%). In addition, sensitivity analysis based on Cosine Amplitude Method (CAM) is carried out to investigate the most and the least effective materials on the compressive strength of samples. CAM analysis showed that although cement and RHA have meaningful effect on the determination of UCS, polypropylene percentage is the most sensitive additive controlling the variation of UCS.

Keywords: Sand; Soil stabilization; Rice husk ash; Polypropylene fiber; Unconfined compressive strength; Evolutionary polynomial regression; Sensitivity analysis.