

مطالعه‌ی تأثیر ژئوپلیمر در پایه‌ی خاکستر پوسته‌ی برنج در تثبیت خاک ماسه‌یی

فرشید ریاحی دهکردی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

وحید توفیق* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

محمد محسن توفیق (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۲۶-۳۵

به‌طور مرسوم برای افزایش پارامترهای مقاومتی خاک از افزودنی‌های صنعتی، همچون سیمان، استفاده می‌شود؛ اما به دلیل آثار مخرب سیمان در محیط زیست، از ژئوپلیمر جهت تثبیت خاک استفاده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوپلیمر بر پایه‌ی پوزولان مصنوعی خاکستر پوسته‌ی برنج و باطله‌ی معدن سنگ آهن و دو نوع فعال‌کننده‌ی قلبیایی پسماند کاربید کلسیم و سدیم هیدروکسید برای تثبیت خاک ماسه‌یی استفاده شده است. جهت بررسی تأثیر مواد، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم، که معیار اصلی مقایسه‌ی نمونه‌ها بوده‌اند، انجام شده است. از طرفی، جهت بررسی ریزساختاری خاک تثبیت شده، آنالیز XRD و SEM انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند با استفاده از ژئوپلیمر مذکور، مقاومت فشاری محدود نشده‌ی نمونه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌یی داشته است و همچنین استفاده از فعال‌کننده‌ی قلبیایی سدیم هیدروکسید نشان می‌دهد که برای تشکیل ژل‌های آلومینوسیلیکات در ترکیبات ژئوپلیمر مؤثرتر است.

واژگان کلیدی: تثبیت خاک، خاکستر پوسته‌ی برنج، باطله معدن سنگ آهن،

سیمان پرتلند، ژئوپلیمر.

farshidriahid@gmail.com

vahiddavis@gmail.com

toufigh@uk.ac.ir

۱. مقدمه

جایگزین مناسب در برابر مشکلات و آلودگی‌های تولید و استفاده از سیمان‌های پرتلند دانست. «پلیمرهای آلومیناسیلیکاتی غیرآلی»^[۱] که اولین بار توسط جوزف دیویدویچ^۱ با عنوان «ژئوپلیمر»^[۶،۵] معرفی شد، می‌توانند در یک فرایند پلیمری شدن طیف وسیعی از پسماندهای صنعتی، خاکستر بادی، خاکستر مواد سوختی، خاکستر پوسته‌ی برنج، متاکاؤلن، پوزولان‌های طبیعی و هر منبعی که آلومیناسیلیکات آمورف داشته باشد، را به تولیدات ساختمانی تبدیل کنند. تولید ژئوپلیمر در محدوده‌ی ۲۵-۸۰ (°C) است، برخلاف سیمان که در محدوده‌ی ۱۴۰۰-۱۵۰۰ (°C) قرار دارد.^[۷] بنابراین مصرف انرژی و انتشار CO₂ در زمینه‌ی ژئوپلیمرزاسیون بسیار کم است.^[۸]

ژئوپلیمر به دلیل داشتن مقاومت بالا، نفوذپذیری پایین، هزینه‌ی ساخت پایین، مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ بسیار کم در هنگام ترکیب، مقاومت شیمیایی خوب و رفتار عایق حرارت عالی آن، به‌عنوان جایگزین مناسب و نویدبخشی به‌جای سیمان پرتلند برای پیشرفت تولیدات پایدار گوناگون جهت ساخت مصالح، بتن، پوشش‌های عایق حرارت، کامپوزیت‌های ژئوپلیمر - فیبر تقویت شده و محلول‌های تثبیت بازیافتی برای صنعت شیمیایی می‌توان از آن استفاده کرد.

اولین بار در دهه‌ی ۱۹۵۰، ویکتور گلوکوفزکی^۲ از روسیه، مواد بتنی با نام‌های «بتن‌های سیلیکات خاکی» و «خاک بتنی» توسعه داد، اما از زمان معرفی ژئوپلیمر

با پیشرفت صنعت و افزایش سرعت رشد جمعیت، ساخت و ساز ساختمان و زیرساخت‌ها در خاک ضعیف ضرورت پیدا کرده است. چندن فرایند جهت تثبیت خاک برای افزایش میزان تحمل بارهای خاک سست استفاده شده است. یکی از روش‌های گسترده برای تثبیت خاک، تثبیت به روش شیمیایی توسط سیمان و آهک است.^[۱] در حال حاضر، تقریباً ۷٪ از انتشار CO₂ ساخته شده توسط انسان در سطح جهان به دلیل تجزیه‌ی کربنات است.^[۲] بدیهی است که سیمان پرتلند یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در ساخت و ساز است، اما تولید آن مستلزم صرف هزینه‌های زیاد، اتلاف انرژی و آسیب به محیط زیست است. با توجه به معایبی که در چرخه‌ی تولید و مصرف سیمان در محیط‌های مختلف وجود دارد، باید از موادی به‌عنوان جایگزین استفاده شود که ارزان‌تر، داشتن فناوری ساده‌تر، منابع اولیه‌ی فراوان، صرفه‌جویی انرژی، ضرر کمتر به محیط زیست، و خواص شیمیایی و فیزیکی بهتر باشد. بتن ژئوپلیمری از جمله مواد جدید و نوین است، که اخیراً در صنعت ساخت و ساز استفاده می‌شود، عملکرد بالا و کارایی مطلوب دارد و با مصرف پوزولان‌ها و پسماندهای آلومیناسیلیکاتی، سازگار با محیط زیست است و می‌توان آن را یک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۲۹/۱۳۹۸، اصلاحیه ۳/۳۶/۱۳۹۹، پذیرش ۳/۱۹/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55217.2712

توسط جوزف دیویدویچ، اصطلاحات و همچنین تعاریف متعددی که رفته‌رفته شکل متناقضی به خود گرفتند، ایجاد شد. ساختار کلی زنجیره‌ی ژئوپلیمری به‌صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$M_n [-(SiO_2)_z - AlO_2]_n, wH_2O \quad (1)$$

که در آن، M عنصر قلیایی مانند پتاسیم، سدیم، یا کلسیم و n درجه‌ی ژئوپلیمریزاسیون و w تعداد مول آب است.^[۱۳] از سال ۱۹۹۰، با توجه به آثار بد و خطرات زیست‌محیطی سیمان پرتلند، استفاده از ژئوپلیمر به رسمیت شناخته شد. ژئوپلیمر از مخلوط کردن پیش‌ماده‌های ژئوپلیمر با فعال‌ساز قلیایی حاصل می‌شود.^[۱۴] پیش‌ماده‌های ژئوپلیمر از مواد دارای منبع عالی سیلیس و آلومینیم تشکیل شده است، که شامل هرگونه مواد ضایعاتی طبیعی و مصنوعی، مانند: خاکستر پوسته‌ی برنج، سرباره‌های صنعتی: آهن، منیزیم، پسماندهای معادن و ... است.

ژانگ^۳ و همکارانش (۲۰۱۳) در انجام آزمایشی متوجه شدند که مقاومت فشاری، کرنش گسیختگی و مدول یانگ نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر، افزایش و کرنش‌های حاصل از انقباض و آب‌رفتگی در طی زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد و همچنین با بررسی آنالیزهای ریزساختاری نشان دادند که خاک پس از تثبیت توسط ژل ژئوپلیمر، ساختار متراکم و ظاهری همگن پیدا می‌کند.^[۱۵] مواد دارای سیلیس و آلومینیم اهمیت فراوانی نسبت به بقیه‌ی مواد تشکیل‌دهنده‌ی ژئوپلیمر داشته‌اند، که در سال ۲۰۱۲، پروفیسور سیلوا و همکارانش به بررسی تأثیر Al_2O_3 و SiO_2 در سخت‌شدگی و دمای عمل‌آوری سیستم ژئوپلیمری $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ ($N - A - S - H$) پرداختند و در نتیجه مشخص شد که دمای عمل‌آوری اولیه‌ی ژئوپلیمر عمدتاً توسط میزان Al_2O_3 کنترل می‌شود و همچنین میزان Si نقش مهمی در مقاومت نهایی دارد. افزایش در میزان Al_2O_3 (میزان کم نسبت SiO_2/Al_2O_3) باعث ایجاد مقاومت کم، همراه با ریزساختارهای عظیم $Na - Al - Si$ به جای تشکیل ماتریس منظم $Na - Al - Si$ می‌شود.^[۱۶]

باطله‌ی معدن سنگ آهن (IOT) سنگ‌های زباله‌ی تولید شده در طول فرایند استخراج سنگ معدن آهن است. IOTها در کشورهای در حال توسعه عمدتاً به‌عنوان زباله ذخیره شده و اغلب به‌کار رفته‌اند. با افزایش تقاضای صنعت ساخت و توسعه‌ی سریع صنعت فولاد و آهن، میلیون‌ها تن IOT سالانه تولید می‌شوند. IOTها ذرات پودری با اندازه‌های بسیار کوچک هستند، که باعث اختلال‌های زیست‌محیطی مختلف مانند: مه، طوفان گرد و غبار، آلودگی رودخانه و غیره در زمانی که خودسرانه تخلیه می‌شوند، هستند.^[۱۷-۱۵] با توجه به نگرانی اقتصادی و آگاهی زیست‌محیطی، استفاده‌ی مجدد از IOTها بسیار نیازمند است. مصرف IOTها در تولید کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده^۵ می‌تواند به طور بالقوه، مزایای قابل توجهی در پایداری هر دو صنعت ساخت و ساز و معدن، به ویژه از نظر کاهش مصرف منابع طبیعی، مصرف انرژی، هزینه‌ی تولید کامپوزیت‌های سیمانی، استفاده از زمین و مدیریت هزینه‌های IOTها را به ارمغان بیاورد.^[۱۶]

هر ساله تولید میلیون‌ها تن ضایعات در کشور، مشکلات جدی برای از بین بردن و مصرف آن‌ها ایجاد می‌کند و همچنین موجب بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود، که خطری برای سلامت ساکنان آن محسوب می‌شود. پوسته‌ی برنج، ماده‌ی تولیدی جانبی در کشاورزی است، که حدود ۲۰٪ از وزن برنج را تشکیل می‌دهد. سالانه حدود ۱۰^۸ تن پوسته‌ی برنج در جهان تولید می‌شود. این ماده حاوی حدود ۵۰٪ سلولز، ۲۵-۳۰ درصد لیگنین^۶ و ۱۵-۲۰ درصد سیلیکاست. از سوختن پوسته‌ی برنج، خاکستر پوسته‌ی برنج تولید می‌شود. در هنگام سوختن، سلولز و

لیگنین حذف می‌شود و خاکستر سیلیس باقی می‌ماند. سطح ویژه و اندازه‌ی ذرات خاکستر به شرایط و درجه‌ی حرارت سوختن آن بستگی دارد؛ بنابراین، برای حصول خاکستر با کیفیت، باید تحت درجه‌ی حرارت کنترل شده و محیط سوخت مناسب انجام شود.

با مطالعه‌ی بی جاچاراپیتاکول^۷ و همکارش (۲۰۰۳) بر روی امکان ساخت سیمان به‌وسیله‌ی کاربیدکلسیم و خاکستر پوسته‌ی برنج انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که سیمان حاوی ۵۰٪ خاکستر پوسته‌ی برنج و ۵۰٪ کاربیدکلسیم، بیشترین مقاومت فشاری در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۱۸۰ روزه را داشته است.^[۱۷] باشا^۸ و همکارانش (۲۰۰۵) در بررسی تثبیت خاک با سیمان و خاکستر پوسته‌ی برنج، با افزودن سیمان و خاکستر پوسته‌ی برنج به خاک کاتولینیت منجر به کاهش دادن شکل‌پذیری خاک در نتیجه‌ی افزایش حد روانی و حد خمیری شدند. میزان مقدار بهینه جهت رسیدن به این نتیجه، افزودن ۶-۸ درصد سیمان و ۱۵-۱۰ درصد خاکستر پوسته‌ی برنج بود و با انجام دادن آزمایش اخیر متوجه شدند که خاکستر پوسته‌ی برنج عامل خیلی مؤثری در کنار مقدار پایین‌تر سیمان نسبت به خاک تثبیت شده توسط سیمان جهت بالا بردن مقاومت فشاری خاک به‌دلیل عدم وجود خواص سیمانی است.^[۱۸]

و در ادامه در سال ۲۰۰۶، رودریگز^۹ افزایش مقاومت بتن حاوی خاکستر پوسته‌ی برنج را بررسی و مشاهده کرد که افزایش مقاومت سیمان حاوی خاکستر پوسته‌ی برنج به‌دلیل خاصیت پوزولانی بودن و بهتر پُر کردن فضای سیمان به‌صورت فیزیکی، نه شیمیایی بوده است و این‌که تأثیر خاکستر پوسته‌ی برنج در سنن اولیه‌ی نگهداری بسیار مثبت بوده و در دراز مدت، ریزتر بودن خاکستر در مقاومت بتن تأثیر داشته است.^[۱۹]

به‌علاوه در سال ۲۰۱۷، بهاک^{۱۰} بر روی تثبیت خاک با خاکستر سبوس برنج و آهک با استفاده از ۴ نوع خاکستر پوسته‌ی برنج متفاوت در دمای خاکسترسازی مطالعه و پژوهش کرد و دریافت که خاکستر پوسته‌ی برنجی که در دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ (°C) فعالیت پوزولانی زیادی را از خود نشان داده است. میزان UCS با اضافه کردن خاکستر پوسته‌ی برنج به مخلوط در تمامی انواع خاکسترها افزایش پیدا کرد و آن‌ها میزانی از خاکسترها که تأثیر مثبتی در تثبیت خاک نداشتند، توسط آهک اضافه شده بر روی خاک مؤثر واقع شدند و مقدار بهینه‌ی خاکستر در مقادیر بود که میزان آهک کمتر بوده است.^[۲۰]

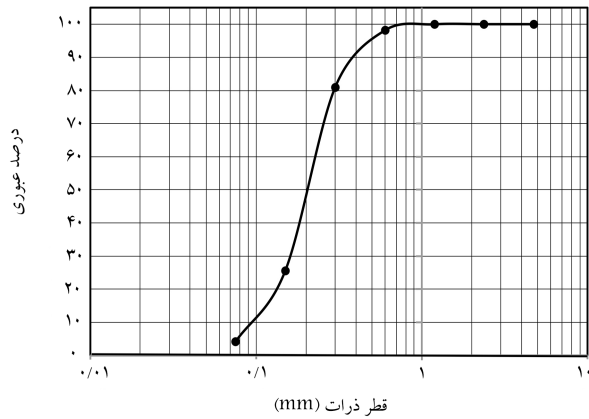
و در ادامه، پورعباس و همکارانش (۲۰۱۸) به بررسی امکان استفاده از پسماند کاربیدکلسیم و سدیم هیدروکسید، به‌عنوان فعال‌کننده‌ی قلیایی و پودر شیشه به‌عنوان یک ماده‌ی خام ژئوپلیمر برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک رس پرداختند و دریافتند که با افزایش میزان غلظت مولار سدیم هیدروکسید، نمونه‌ی رسی ضعیف و تخریب می‌شود و بیشینه‌ی مقاومت ژئوپلیمر رس - پودر شیشه مربوط به نمونه‌ی حاوی ۲ و ۳ مول سدیم هیدروکسید است، که با جایگزینی ۱۵ درصدی پودر شیشه به خاک به دست می‌آید. ژئوپلیمر مد نظر در دمای بین ۲۵ الی ۷۰ درجه بررسی شد، که مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های در دمای اتاق به دست آمد. همچنین پسماند کاربیدکلسیم نیز به‌عنوان یک فعال‌کننده‌ی قلیایی برای فعال‌سازی ژئوپلیمر تثبیت‌کننده‌ی خاک رس شناخته شد.^[۲۱]

در سال ۲۰۱۸، توفیق و همکارانش^{۱۱} با مطالعه بر روی تثبیت خاک توسط پوزولان نفتان به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن سیلیکافوم بر ماده‌ی قلیایی سدیم هیدروکسید، نتیجه‌ی منفی بر روی مقاومت فشاری گذاشته است، ولی اگر مواد پوزولان و سیلیکافوم مستقیماً به خاک اضافه شوند، تأثیر خوبی در مقاومت فشاری می‌گذارد و این‌که بالا بردن درصد مولار ماده‌ی قلیایی از ۵ به ۱۲/۵ مول،

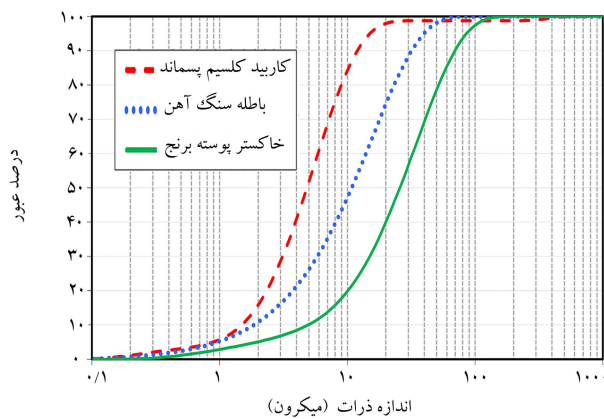
جدول ۱. ترکیب‌های شیمیایی خاکستر پوسته‌ی برنج، باطله‌ی سنگ آهن و کاربیدکلسیم پسماند (درصد وزنی).

ترکیب	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	Fe_2O_3	K_2O	SO_2
نام ترکیب	سیلیکا	آلومینا	کلسیم اکسید	سدیم اکسید	منیزیم اکسید	آهن اکسید	پتاسیم اکسید	گوگردتری اکسید
خاکستر پوسته‌ی برنج	۶۵	۶٫۵	۱٫۷	۰٫۱۲	۱	۰٫۵	۲٫۵	۱٫۲
باطله‌ی معدن سنگ آهن	۵۷٫۳۵	۱۰	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۹	۲۵٫۲	۰٫۱	۰٫۲
کاربیدکلسیم پسماند	۳	۱٫۵	۶۴٫۶۸	۰٫۳۱	۰٫۱۵	۰٫۲۸	۰٫۰۱	۰٫۶

LOI، کاهش وزن نمونه (% طی یک ساعت قرارگیری درون کوره در دمای ۱۰۲۰° برای خاکستر پوسته‌ی برنج ۸ و برای باطله‌ی سنگ آهن ۶٫۶۵ است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی لیزری مواد مصرفی.

شدن بهتر مواد است، که با استفاده از آسیاب، به خوبی مواد آسیاب و سپس جهت ترکیب مصالح، از الک #۲۰۰ رد شدند. نمودار دانه‌بندی آن، که به وسیله آزمایش دانه‌بندی لیزری تعیین شد، در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۳.۲. باطله‌ی معدن سنگ آهن

باطله‌ی معدن سنگ آهن استفاده شده در پژوهش حاضر از معدن سنگ آهن جلال‌آباد زرنده استان کرمان تهیه شده است، که با توجه به مشخصات شیمیایی ارائه شده در جدول ۱، که از آنالیز XRF به دست آمده است، می‌توان از آن به عنوان ماده‌ی کمکی در تشکیل ژل ژئوپلیمر استفاده کرد. طبق شکل ۲، ۴۷٪ ذرات آن، از ۱۰ میکرو کوچک‌تر بودند، که بوسیله آزمایش دانه‌بندی لیزری اندازه‌گیری شده است.

بر اساس استاندارد ASTM - C6۱۸ [۲۵]، مجموع $SiO_2 + Fe_2O_3$

تأثیر بسیاری در مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد و هر چه غلظت محلول بیشتر باشد، ژل ژئوپلیمری بیشتری تشکیل داده می‌شود. [۱]

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی بهبود خواص مکانیکی خاک به‌وسیله‌ی تثبیت با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه‌ی پوزولان مصنوعی است. در پژوهش حاضر، خاکستر پوسته‌ی برنج به‌عنوان پوزولان مصنوعی، باطله‌ی معدن سنگ آهن و دو نوع فعال‌کننده‌ی قلیایی برای تثبیت خاک ماسه‌ی استفاده شده است. نوع I، سدیم هیدروکسید و نوع II، پسماند کاربیدکلسیم است. همچنین به پارامترهای مختلفی، مانند: نوع ماده‌ی مصرفی، درصد ترکیب مواد، نوع فعال‌کننده‌ی قلیایی و زمان عمل‌آوری به‌عنوان عوامل مؤثر در رفتار نمونه‌های تثبیت شده توجه شده است. جهت ارزیابی تأثیر ژئوپلیمر در رفتار مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی)، که معیار اصلی مقایسه‌ی نمونه‌ها بوده‌اند، انجام شده است. از طرفی، تحلیل پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی ریزساختاری خاک تثبیت شده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از ژئوپلیمر ذکر شده، مقاومت فشاری محدود نشده‌ی نمونه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ی داشته است و همچنین استفاده از فعال‌کننده‌ی قلیایی سدیم هیدروکسید نشان می‌دهد که برای تشکیل ژل‌های آلومینوسیلیکات در ترکیب‌های ژئوپلیمر مؤثرتر بوده و نمونه‌های مقاوم‌تری به دست آمده است.

۲. مصالح

۱.۲. خاک

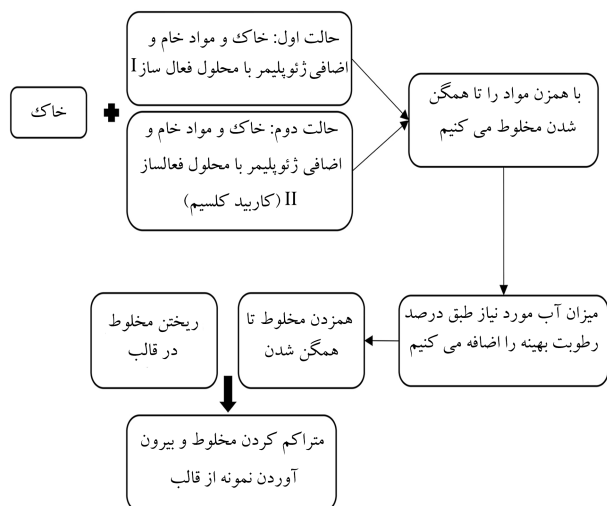
خاک مصرفی پروژه از منطقه‌ی واقع در اتوبان هفت باغ علوی، که در حال توسعه و پیشرفت است، با مختصات $30^{\circ}11'35''N$ / $57^{\circ}08'04''E$ استفاده شده است. خاک مذکور به علت دانه‌بندی و ظرفیت باربری پایین آن، مسئله‌دار تشخیص داده شده است. ابتدا برای مشخص شدن نوع و دانه‌بندی خاک طبق استاندارد ASTM - D۴۲۲ [۲۳] آزمایش دانه‌بندی انجام شد. خاک در دسته‌ی خاک بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی شده است. در ابتدا، به منظور مشخص شدن رطوبت بهینه‌ی خاک، با توجه به استاندارد ASTM - D۶۹۸ [۲۴]، آزمایش تراکم روی نمونه‌ی از خاک مورد نظر انجام و درصد رطوبت بهینه در حدود ۱۴٪ تعیین شد. شکل ۱، نشان‌دهنده‌ی منحنی دانه‌بندی خاک است.

۲.۲. خاکستر پوسته‌ی برنج

در پژوهش حاضر، ماده‌ی پایه‌ی ژئوپلیمر، خاکستر پوسته‌ی برنج است، که ترکیب‌های شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF به دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است. مهم‌ترین اصل استفاده از خاکستر پوسته‌ی برنج، ریزدانه بودن آن جهت همگن

جدول ۲. نسبت مواد مصرفی، زمان عمل آوری و شرایط نگهداری نمونه‌ها.

مواد استفاده شده	درصد مواد استفاده شده (درصد وزنی)	شرایط نگهداری	زمان عمل آوری (روز)
سیمان (نمونه‌ی کنترل)	۷ و ۱۵ درصد		
خاکستر پوسته‌ی برنج	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد		
باطله‌ی معدن سنگ آهن	۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد		
پسماند کاربیدکلسیم	۷ درصد		
		دما و رطوبت محیط آزمایشگاه	۲۸، ۷ و ۹۰



شکل ۳. فلوجارت انجام آزمایش.

اندازه‌ی بیشینه‌ی دانه‌های موجود از $\frac{1}{8}$ قطر نمونه کوچک‌تر باشد و برای نمونه‌های با قطر ۷۲ میلی‌متر (۲/۸ اینچ) و بزرگ‌تر، بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌ها باید کوچک‌تر از $\frac{1}{4}$ قطر نمونه باشد و همچنین ارتفاع نمونه باید ۲ تا ۲/۵ برابر قطر آن باشد.^[۲۹] بنابراین در پژوهش حاضر از قالب‌های با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. قالب ساخته شده برای نمونه‌ها از نوع فلزی و جداشونده بوده و با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌ها با محلول فعال‌ساز نوع I، در ابتدا خاک با مقدار مشخص مواد خام و اضافی ژئوپلیمر با هم مخلوط شدند تا کاملاً یکنواخت شوند. سپس محلول فعال‌ساز و آب اضافی به مخلوط اضافه شده است تا مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. منظور از آب اضافی میزان آبی است که به مخلوط برای رسیدن به رطوبت بهینه باید اضافه شود، چرا که با اضافه کردن آب اضافی به خاک، غلظت مولار سدیم هیدروکسید کاهش می‌یابد. در حالت دوم، برای ساخت نمونه با محلول فعال‌ساز II، مواد خام و اضافی ژئوپلیمر به صورت خشک به همراه نسبت مناسب پسماند کاربیدکلسیم با هم مخلوط و سپس آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت نمونه‌ها به رطوبت بهینه، به مخلوط اضافه شده است.

نمونه‌ها به روش تراکم استاندارد با استفاده از چکش با وزن ۴ کیلوگرم، که بر هر لایه ۴ بار از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها می‌شود، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و در دما و رطوبت محیط بدون پوشش پلاستیکی نگهداری شدند. دو نمونه‌ی کنترل نیز جهت مقایسه‌ی نتایج با استفاده از ۷٪ و ۱۵٪ سیمان، استفاده شده‌اند. در جدول ۲، نسبت‌های وزنی افزودنی مواد خام و اضافی ژئوپلیمر، کاربیدکلسیم و شرایط مختلف عمل آوری شرح داده شده و وضعیت نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است و فلوجارت آماده‌سازی نمونه برای هر دو حالت در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

Al_2O_3 باید دست‌کم برابر با ۷٪، میزان SiO_2 باید برابر با بیشینه‌ی ۴٪ و LOI برابر با بیشینه‌ی ۱۰ باشد، که مطابق نتایج به دست آمده، برای خاکستر پوسته‌ی برنج به ترتیب برابر ۷۲٪، ۱۲٪ و ۸٪ LOI خاکستر برابر ۸ است و برای باطله‌ی معدن سنگ آهن به ترتیب برابر ۹۲/۵۵، ۲۰٪ و ۶/۶۵ بوده است.

۴.۲. محلول فعال‌ساز قلیایی

در پژوهش حاضر، از دو نوع محلول قلیایی I و II برای ساخت ژئوپلیمر استفاده شده است. محلول نوع I، سدیم هیدروکسید به صورت پولاکی شکل است، که ابتدا تکه‌های سدیم هیدروکسید در آب داخل یک ظرف شیشه‌ی به آرامی حل می‌شود تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواخت با غلظت ۱۰ مولار حاصل شود. به دلیل بالا بودن حرارت اولیه‌ی محلول سدیم هیدروکسید، پس از گذشت ۲۴ ساعت از محلول داخل ظرف شیشه‌ی در دمای محیط می‌توان از آن استفاده کرد.

محلول نوع II، پسماند کاربیدکلسیم است، که یک فرآورده‌ی جانبی حاصل از تولید گاز استیلن است.

جزء اصلی آن $(Ca(OH)_2)$ است، که می‌تواند طی واکنش پوزولانی با مواد سیلیسی واکنش نشان دهد، که محصولی شبیه به آن‌چه که از روند هیدراتاسیون سیمان به دست می‌آید، باشد. همچنین پسماند کاربیدکلسیم با استفاده از مطالعات صورت گرفته، به دلیل pH بالای آن، خاصیت ترکیب در ژئوپلیمر را دارد، که توانسته تا حدودی در مقاومت خاک متأثر باشد و می‌توان از آن به عنوان ماده‌ی فعال‌کننده در ترکیب ژئوپلیمر استفاده کرد. درصد استفاده شده‌ی پسماند کاربیدکلسیم در پژوهش حاضر، ۷٪ است، که دلیل انتخاب آن با توجه به مطالعات پیشین و میزان درصد بهینه‌ی مؤثر پسماند کاربیدکلسیم (۷٪) بوده است.^[۲۸-۲۶،۲۱]

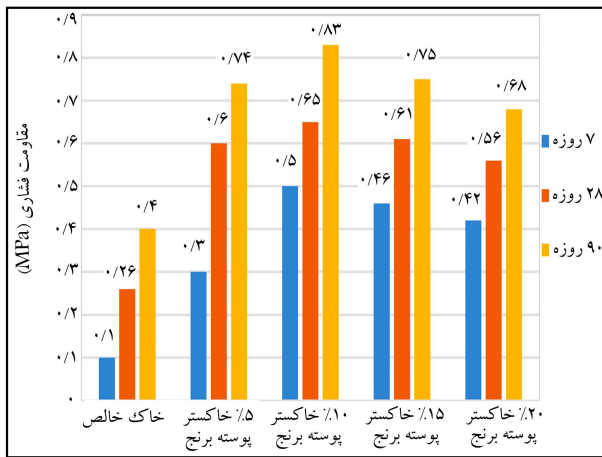
۳. آماده‌سازی نمونه و روش‌ها

در نوشتار حاضر، تثبیت خاک به دو صورت انجام شده است: در حالت اول، خاک و خاکستر پوسته‌ی برنج به تنهایی به عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر و در حالت دوم، علاوه بر خاکستر پوسته‌ی برنج از باطله‌ی معدن سنگ آهن به عنوان افزودنی به ماده‌ی خام ژئوپلیمر استفاده می‌شود، تا تأثیر ماده‌ی اضافی در ژئوپلیمر مشخص شود.

درصد ترکیب مواد برای خاکستر پوسته‌ی برنج، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و برای باطله‌ی معدن سنگ آهن، ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد بوده است، که در جدول ۲ به طور خلاصه بیان شده است. خاک و خاکستر پوسته‌ی برنج به ترتیب از الک ۴۰ # و ۲۰ # و باطله‌ی معدن سنگ آهن نیز به دلیل خردایش سنگ در معدن فقط از الک ۵۰ # جهت جدا کردن سنگ‌ریزه‌ها عبور داده شدند. نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر از میانگین ۳ نمونه برگرفته شده است. بر اساس استاندارد ASTM - D2166، در نمونه‌های با کمینه‌ی قطر ۳۰ میلی‌متر (۱/۳ اینچ)، باید

جدول ۳. نام گذاری نمونه های حاوی محلول قلیایی سدیم هیدروکسید.

دسته	رده	ترکیب	خاکستر پوسته ی برنج	باطله ی معدن سنگ آهن	سیمان	فعال کننده	
۱	A۱	A۱۱		٪۶			
		A۱۲	٪۵	٪۱۲			
		A۱۳		٪۱۸			
		A۱۴		٪۲۴			
	A۲	A۲۱			٪۶		
		A۲۲	٪۱۰	٪۱۲			
		A۲۳		٪۱۸			
		A۲۴		٪۲۴		سدیم هیدروکسید (۱۰ مولار)	
	A۳	A۳۱			٪۶		
		A۳۲	٪۱۵	٪۱۲			
		A۳۳		٪۱۸			
		A۳۴		٪۲۴			
A۴	A۴۱			٪۶			
	A۴۲	٪۲۰	٪۱۲				
	A۴۳		٪۱۸				
	A۴۴		٪۲۴				
۲	B۱	B۱۱		٪۶			
		B۱۲	٪۵	٪۱۲			
		B۱۳		٪۱۸			
		B۱۴		٪۲۴			
	B۲	B۲۱			٪۶		
		B۲۲	٪۱۰	٪۱۲			
		B۲۳		٪۱۸			
		B۲۴		٪۲۴		پسماند کاربید کلسیم (٪۷)	
	B۳	B۳۱			٪۶		
		B۳۲	٪۱۵	٪۱۲			
		B۳۳		٪۱۸			
		B۳۴		٪۲۴			
B۴	B۴۱			٪۶			
	B۴۲	٪۲۰	٪۱۲				
	B۴۳		٪۱۸				
	B۴۴		٪۲۴				
۳	OPCV	-	-	-	٪۷	-	
	OPC۱۵	-	-	-	٪۱۵	-	



شکل ۸. مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با خاکستر پوسته‌ی برنج و محلول II.

به نمونه A24 و برابر ۱/۵۳ مگاپاسکال بوده است. با توجه به روند افزایشی در زمان عمل‌آوری ۷ تا ۹۰ روز، روند به‌صورت صعودی است، که مطابق انتظار بوده و نتایج آزمایش، اندازه‌گیری و در قالب نمودار ارائه شده‌اند.

۲.۴. محلول II

۱.۲.۴. تأثیر ماده‌ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری خاک

در بخش کنونی، نیز بر اساس استاندارد ASTM – D2166 [29] آزمون مقاومت فشاری محدود نشده‌ی تک‌محوری بر روی نمونه‌های ژئوپلیمر - پسماند کاربیدکلسیم انجام شده است.

نمونه‌ها مطابق قبل، در دوره‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند و اثر افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده توسط ژئوپلیمر در شکل ۸ مشاهده می‌شود. انتخاب درصد مناسب کاربیدکلسیم پسماند مطابق مطالعات پیشین صورت گرفته است، که کاربیدکلسیم ۷٪، بهترین نتیجه را داشته و شرایط مناسب‌تری برای توسعه‌ی فرایند ژئوپلیمریزاسیون فراهم ساخته است. [21, 28-26]

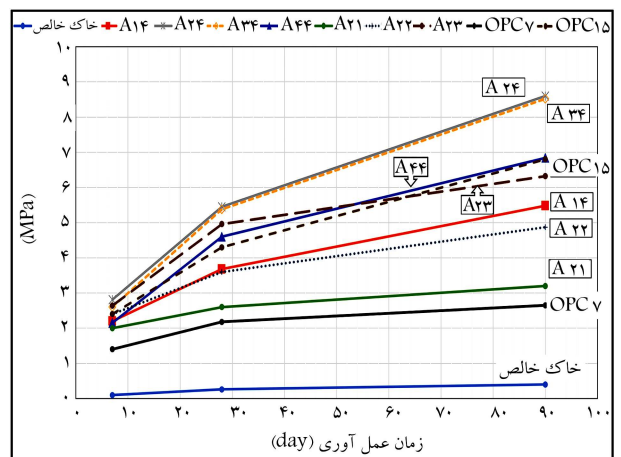
با توجه به فرمول شیمیایی کاربیدکلسیم پسماند و نتایج آنالیز XRF، کاربیدکلسیم مقدار زیادی $Ca(OH)_2$ دارد، از این رو در فرایند ژئوپلیمریزاسیون نقش بسیاری دارد و باعث تشکیل بهتر C-S-H در خاک می‌شود. بنابر پژوهش فجویی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [30]، بر روی تثبیت خاک به‌وسیله‌ی پسماند کلسیم‌کاربید و خاکستر بادی، میزان $Ca(OH)_2$ موجود در کاربیدکلسیم در هر دو مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه با حضور و عدم حضور خاکستر بادی، افزایش داشته و میزان $Ca(OH)_2$ در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه پایین‌تر بوده است، که ناشی از مصرف آن در واکنش پوزولانی است و همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار پسماند کاربیدکلسیم به بیش از ۷٪، مقدار $Ca(OH)_2$ تقریباً ثابت مانده است.

با توجه به پژوهش اخیر، دلیل کاهش روند رشد مقاومت پس از ۲۸ روز می‌تواند این باشد که با ترکیب شدن $Ca(OH)_2$ پسماند کاربیدکلسیم با مواد پوزولانی استفاده شده و $Ca(OH)_2$ به‌صورت مازاد در ترکیب باقی مانده است، که جذب ذرات خاک شده و این خود باعث کاهش میزان $Ca(OH)_2$ در واکنش پوزولانی شده است، که علت کاهش روند افزایش مقاومت ۹۰ روزه‌ی نمونه‌ها نسبت به ۲۸ روزه‌هاست.

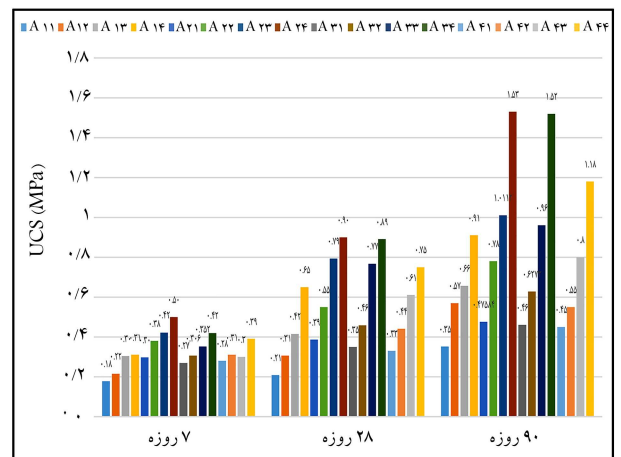
۲.۲.۴. تأثیر افزودن باطله‌ی معدن سنگ آهن به ژئوپلیمر در مقاومت

فشاری خاک

میزان تأثیر افزودن باطله‌ی معدن سنگ آهن به‌عنوان ماده‌ی کمکی در ژئوپلیمر



شکل ۶. تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در مقاومت فشاری.



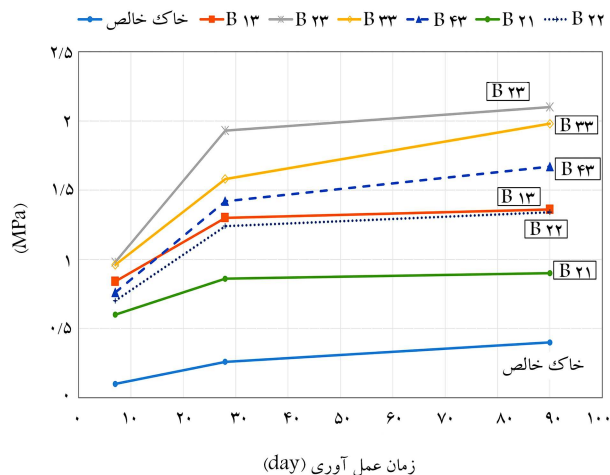
شکل ۷. مقاومت کششی غیرمستقیم ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های تثبیت شده‌ی حاوی فعال‌کننده‌ی سدیم هیدروکسید.

ژل‌های ژئوپلیمری و افزایش انسجام و یکپارچگی نمونه افزایش یافته و این امر سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به گذشت زمان عمل‌آوری شده است. با توجه به شیب نمودارها در بازه‌های زمانی متفاوت می‌توان مشاهده کرد که سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها در بازه‌ی ۷ تا ۲۸ روز قابل توجه است و پس از آن در بازه‌ی زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز، سرعت رشد نمونه‌ها به نسبت آن بازه، کاهش پیدا کرده است. بیشترین مقاومت کسب‌شده توسط نمونه‌ی A24 بوده است، که مقاومت خاک را ۲۱/۵ برابر افزایش داده است.

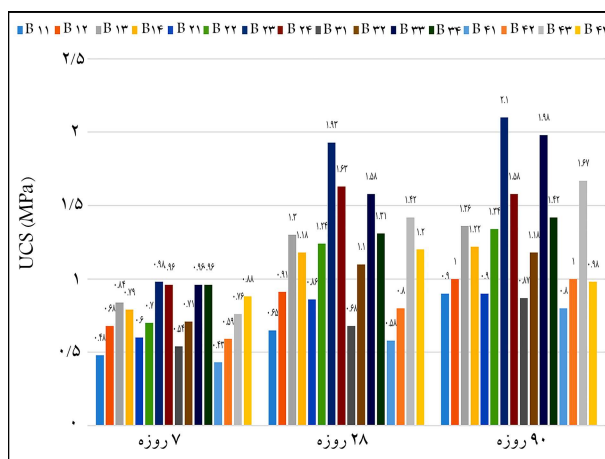
۴.۱.۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم خاک تثبیت شده با

محلول I

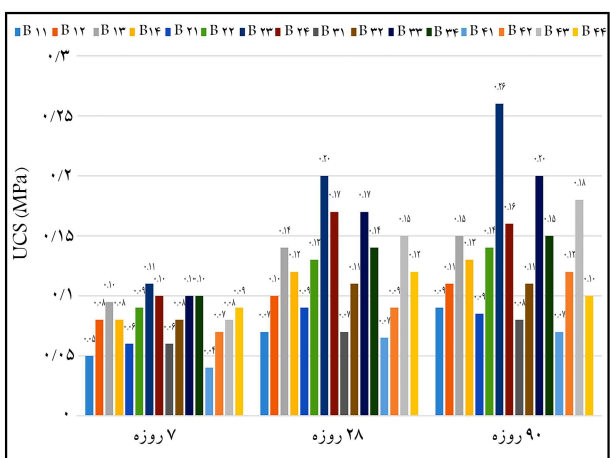
با توجه به شکل ۷ می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و تا مقدار ۱۰٪ خاکستر پوسته‌ی برنج، روند صعودی داشته و پس آن با افزایش مقدار خاکستر پوسته‌ی برنج، روند کاهش پیدا کرده است، که می‌تواند به این دلیل باشد که تا مقدار ۱۰٪ خاکستر پوسته‌ی برنج، ذرات به‌صورت یک پارچه در خاک ترکیب و موجب پیوستگی و چسبندگی بهتر مواد می‌شوند، اما در صورت اضافه شدن بیشتر از ۱۰٪، جایگزین ذرات خاک می‌شوند و باعث ایجاد توده و لخته‌های خاکی می‌شوند، که خود باعث ایجاد حفره و فضای متخلخل در خاک و نیز کاهش مقاومت می‌شود. با توجه به نمودارها، بیشترین مقاومت مربوط



شکل ۱۰. تأثیر زمان عمل‌آوری در رشد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با محلول II.



شکل ۹. مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های تثبیت شده حاوی پسماند کاربیدکلسیم.



شکل ۱۱. مقاومت کششی غیرمستقیم ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های تثبیت شده با فعال‌کننده‌ی پسماند کاربیدکلسیم.

نمودار نمونه‌ها، بیشترین سرعت رشد مقاومت در نمونه‌های ژئوپلیمری مربوط به بازه‌ی ۷ روزه‌ی اول و پس از آن مربوط به بازه‌ی ۷ تا ۲۸ روزه بوده است. پژوهش‌گران پیشین نیز نشان داده‌اند که بیشترین میزان اثرگذاری واکنش ژئوپلیمری، در بازه‌ی عمل‌آوری ۷ روزه‌ی اول اتفاق می‌افتد. [۳۱، ۲۸، ۱۰] نمونه‌ی B ۲۳ بیشترین مقاومت را داشته و روند صعودی طول دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ تا ۹۰ روز را حفظ کرده است.

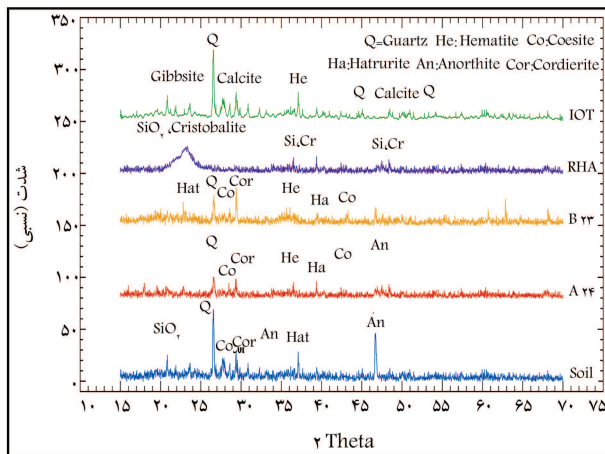
۴.۲.۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم خاک تثبیت شده با محلول II

بر اساس نمودار شکل ۱۱ می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و تا میزان ۱۰٪ خاکستر پسته‌ی برنج، روند صعودی داشته و پس از آن با افزایش مقدار خاکستر پسته‌ی برنج، روند کاهش پیدا کرده است؛ که مطابق مطالب بیان شده در بخش ۲.۲.۴ با افزایش مقدار خاکستر پسته‌ی برنج و باطله‌ی معدن سنگ آهن در ترکیب، مواد اضافه جایگزین ذرات خاک و باعث ایجاد فضای متخلخل در خاک می‌شوند، که باعث کاهش مقاومت می‌شود. با توجه به نمودارها، مقاومت کششی خاک حاوی ۱۰٪ خاکستر پسته‌ی برنج و ۱۸٪ باطله‌ی معدن سنگ آهن در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز، بیشترین مقاومت (برابر ۲۶٪ مگاپاسکال) را داشته است. با توجه به پژوهش‌های پیشین، زمان عمل‌آوری

بررسی شده است، که برای امکان بررسی دقیق‌تر، نمودارها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۹ مشاهده می‌شوند، که مطابق آن می‌توان نتیجه گرفت از دلایل افزایش مقاومت با افزودن خاکستر پسته‌ی برنج به خاک تا مقدار ۱۰٪، مواد اشاره شده فضاهای خالی بین دانه‌های خاک را پر کرده و عمل تراکم نیز اصطکاک بین ذرات خاک و خاکستر پسته‌ی برنج را افزایش داده است، ولی با افزایش بیشتر خاکستر پسته‌ی برنج دیگر جایی برای پر کردن فضای خالی بین ذرات خاک نبوده و خاکستر پسته‌ی برنج رفته‌رفته جایگزین دانه‌های خاکی شده‌اند، که قابلیت تراکم کمتری داشته و در نتیجه مقاومت فشاری خاک کاهش یافته است. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که تا مقدار ۱۰٪ خاکستر پسته‌ی برنج، گنجایش آن در نمونه به طور یکنواخت است و ترکیب مقاوم‌تری را ایجاد می‌کند، ولی افزایش بیشتر مقدار ذکر شده، سبب لخته شدن خاکستر پسته‌ی برنج در خاک می‌شود، که خود باعث به وجود آمدن یک فضای خالی بین ماتریس خاک و یا به عبارت دیگر، باعث افزایش تخلخل خاک می‌شود، که در نتیجه شکست زود هنگام اتفاق می‌افتد و مقاومت فشاری خاک کاهش می‌یابد. همچنین عوامل اشاره شده باعث ایجاد تنش موضعی و تخلخل بسیار زیاد خاک می‌شود و نیروی اعمال شده به نمونه به‌طور نامساوی به حجم خاک وارد می‌شود؛ لذا نمونه، گسیختگی درونی پیدا می‌کند و مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد.

۳.۲.۴. تأثیر زمان عمل‌آوری در رشد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با محلول II

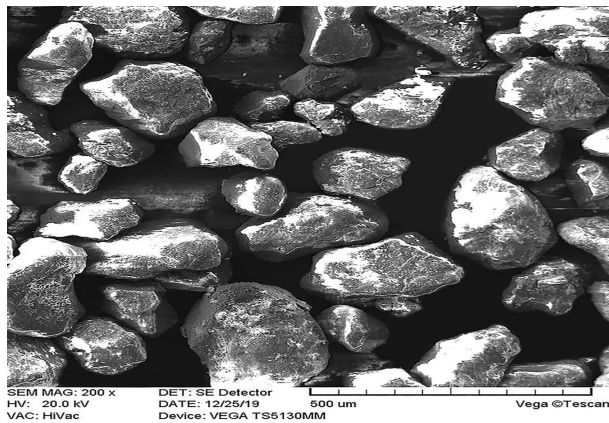
در بخش حاضر، تأثیر عامل مؤثر زمان عمل‌آوری در رشد مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی کاربیدکلسیم به صورت نمودار مقایسه‌ی (شکل ۱۰) بررسی شده است. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که سرعت رشد مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری در سنین پایین عمل‌آوری (کمتر از ۲۸ روز) نسبت به سنین بالای عمل‌آوری بیشتر است. در شکل ۱۰، سرعت رشد مقاومت نمونه‌ها در برابر افزایش زمان عمل‌آوری به ترتیب برای نمونه‌های تثبیت شده‌ی ژئوپلیمری حاوی مقادیر متغیر خاکستر پسته‌ی برنج و باطله‌ی معدن سنگ آهن در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد خاک تثبیت نشده در طول زمان عمل‌آوری افزایش یافته است، که بیان‌گر تأثیر مثبت تثبیت خاک توسط ژئوپلیمر خاکستر پسته‌ی برنج - پسماند کاربیدکلسیم است. با توجه به رفتار و شیب



شکل ۱۳. نمودار آنالیز XRD خاک، ژئوپلیمر و خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA) و باطله‌ی معدن سنگ آهن (IOT).

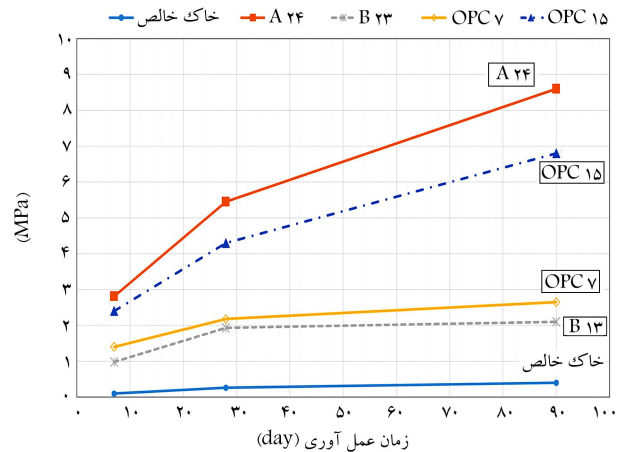
جدول ۴. فرمول شیمیایی کانی‌های شناسایی شده در نمونه‌ها.

Quartz	SiO_2
Hematite	Fe_2O_3
Hatrurite	$Ca_7Si_5O_{18}$
Coesite	SiO_2
Cordierite	$Mg_2Al_2Si_2O_{10}$
Anorthite	$CaAl_2Si_2O_7$
Cristobalite	SiO_2
Calcite	$CaCO_3$
Gibbsite	$Al(OH)_3$



شکل ۱۴. تصویر SEM خاک تثبیت نشده با بزرگ‌نمایی $\times 200$.

با مقایسه‌ی خاک، باطله‌ی معدن سنگ آهن و نمونه‌های تثبیت شده‌ی A24 با B23 در زاویه‌ی 2θ برابر با 26 تا 27 درجه، شدت کوآرتز کاهش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی حل شدن کوآرتز در محلول فعال کننده است. کوآرتز در نمونه‌ی A24 بیشتر از نمونه‌ی B23 کاهش داشته است، که می‌تواند تأثیر نوع ماده‌ی فعال‌کننده‌ی استفاده شده در تثبیت باشد. به‌طورکلی الگوهای نمونه‌های A24 و B23 (به جز چند مورد) آمورف هستند و در نمونه‌ی B23 در زاویه‌های 63 و



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و خاک خالص.

۷ تا ۲۸ روز، روند افزایشی داشته و بعد از ۲۸ روز، سرعت روند افزایشی، کاهش یافته است.

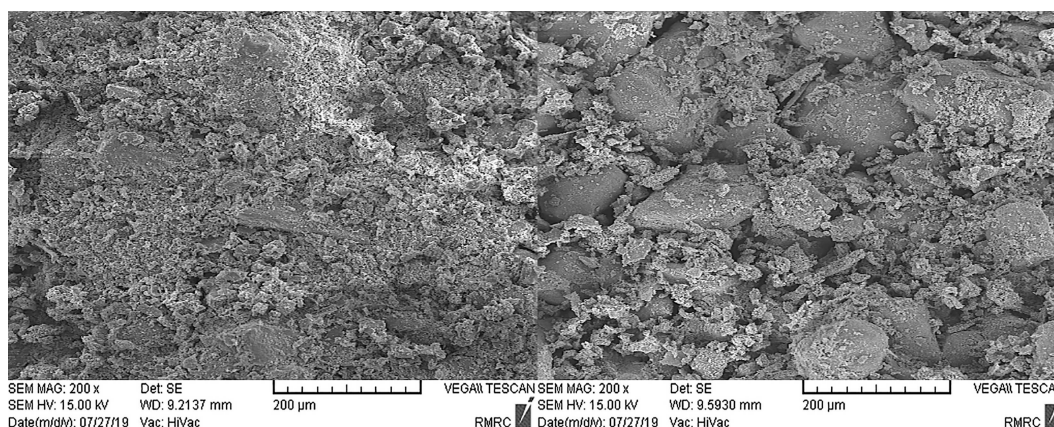
۴.۴. مقایسه‌ی نتایج ژئوپلیمر با دو محلول قلیاساز

نمونه‌های منتخب A24 و B23 (به دلیل مقاومت‌تر بودن نسبت به خاک) و خاک تثبیت نشده و سیمان در شکل ۱۲ مقایسه شده‌اند. با توجه به نمودار مذکور می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌ی A24، بیشترین مقاومت را نسبت به نمونه‌ی سیمانی و نمونه‌ی B23 داشته است، که گویای مقاومت‌تر بودن آن با توجه به مباحث گفته شده است و در ادامه، در بخش آنالیز XRD به صورت ریزساختاری بررسی شده‌اند.

۵.۴. آنالیز XRD

از آنالیز XRD به عنوان یک شاخص کمی جهت مطالعه‌ی وضعیت ریزساختاری نمونه‌های منتخب تثبیت شده‌ی ژئوپلیمری (A24 و B23) استفاده شده است. طیف‌های به دست آمده از تحلیل، با استفاده از نرم‌افزار Xpert HighScore شناسایی شدند. با توجه به شکل ۱۳، آنالیز در بازه‌ی 2θ در محدوده‌ی ۰ تا ۷۰ درجه انجام شده است. به‌طورکلی در آنالیز XRD، تحلیل بر اساس مکان، شدت و تغییرات قله‌ها در طی واکنش شیمیایی انجام می‌گیرد. به این صورت که حذف یا کاهش شدید یک قله، نشان‌دهنده‌ی تأثیر آن ماده در ترکیب و حذف کانی مرتبط است.^[۳۲] مطابق الگوهای به دست آمده، عمده‌ی تغییرات در ساختار کانی‌ها در بازه‌ی 2θ بین زاویه‌های ۲۰ تا ۳۰ درجه، پراش اشعه‌ی ایکس اتفاق افتاده است. با توجه به شکل مذکور می‌توان مشاهده کرد که عمده‌ی کانی‌های موجود در نمونه‌ها عبارتند از: Cordierite, Anorthite Quartz, Hatrurite, Hematite, Coesite.

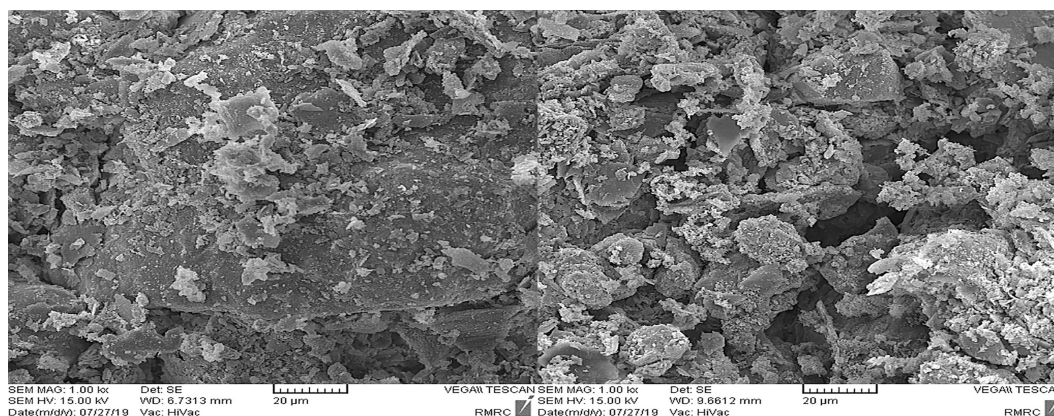
در باطله‌ی معدن سنگ آهن، کلسیت^{۱۲} و گیبسیت^{۱۳} نیز مشاهده می‌شود که به ترتیب غنی از کلسیم، آلومینیوم و آهن است و همچنین در خاکستر پوسته‌ی برنج، کریستوبالیت^{۱۴} و SiO_2 مشاهده شده است، که کریستوبالیت نشان‌دهنده‌ی وجود سیلیس با ساختار منظم است و می‌توان از آن به عنوان ماده‌ی کمکی استفاده کرد. فرمول شیمیایی کانی‌های موجود در نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق الگوهای به دست آمده، قله‌های خاک در نمونه‌های تثبیت شده مشاهده می‌شوند، با این تفاوت که از شدت آن‌ها کاسته شده و در زاویه‌ی 2θ بین ۲۵ تا ۳۵ درجه قابل مشاهده‌اند و نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت افزودنی‌ها به خاک و مصرف مقداری از خاک طی واکنش شیمیایی فعال‌کننده‌ی قلیایی است.



ب) نمونه‌ی A۲۴، با بزرگنمایی ۲۰۰x.

الف) نمونه‌ی B۲۳؛

شکل ۱۵. تصویر SEM.



ب) نمونه‌ی A۲۴ با بزرگنمایی ۱kx.

الف) نمونه‌ی B۲۳؛

شکل ۱۶. تصویر SEM.

B۲۳ همگن‌تر و همچنین حفره‌های کمتری دارد و با توجه به آنالیز XRD به دست آمده، که نشان‌دهنده‌ی آمورف‌تر بودن نمونه‌ی A۲۴ نسبت به نمونه‌ی B۲۳ است. تشکیل محصولات ژئوپلیمری در نمونه‌ی A۲۴ نسبت به نمونه‌ی B۲۳ بیشتر رخ داده است، که این امر باعث تثبیت بیشتر مواد در نمونه‌ی A۲۴ و در نتیجه افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی B۲۳ بیشتر شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۵ و ۱۶، میزان تخلخل و ناپوستگی در سطح نمونه‌ی A۲۴ بسیار کاهش داشته و سطح همگن با ساختار چگال‌تر ناشی از افزایش درجه‌های اتصال بین ذرات خاک و ژل‌های ژئوپلیمر در نمونه‌ی مذکور بوده است. تفاوت نمونه‌های A۲۴ و B۲۳، فقط محلول فعال‌کننده‌ی قلیایی است، که دلیل ضعف در رشد مقاومت نمونه‌ی حاوی پسماند کلسیم کربید، با توجه به افزایش Ca(OH)_2 موجود در کربیدکلسیم در طی واکنش ژئوپلیمریزاسیون، عمل عکس داشته و با ترکیب شدن هر چه بیشتر مواد پوزولانی، Ca(OH)_2 مازاد در ترکیب جذب ذرات خاک شده و مقاومت خاک کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل ۱۵ - الف، در نمونه‌ی کربیدی (B۲۳) دانه‌های خاک کامل مشخص است، که نشان می‌دهد علاوه بر تشکیل محصول ژئوپلیمری، به اندازه‌ی کافی فضای بین خاک پوشش داده نشده و باعث ضعف نمونه شده است. اما در نمونه‌ی A۲۴ کاملاً سطح خاک و فضای بین آن پوشش داده شده است، که نمونه‌ی مقاوم‌تری نیز حاصل شده است.

۶۹ درجه، دو قله‌ی جدید مشاهده می‌شود که در بقیه‌ی نمونه‌ها وجود ندارد، که می‌تواند به این دلیل باشد که نمونه‌های مورد بررسی در سن ۹۰ روزه بودند و امکان تشکیل ماده‌ی کریستالی جدیدی وجود دارد، که علت ضعف نمونه‌ی B۲۳ نسبت به نمونه‌ی A۲۴ است.

۶.۴. آنالیز SEM

در شکل ۱۴، خاک تثبیت نشده (شکل‌های ۱۵ و ۱۶) و به ترتیب نمونه‌های منتخب A۲۴ و B۲۳ پس از عمل‌آوری ۹۰ روزه بررسی شده‌اند. تحلیل‌های صورت‌گرفته از SEM، نشان‌دهنده‌ی میزان تأثیر خاکستر پسته‌ی برنج، باطله‌ی معدن سنگ آهن در نقش تثبیت خاک ماسه‌ی است، که در این نمونه‌ها ۷٪ کربیدکلسیم پسماند ثابت و سدیم هیدروکسید به عنوان محلول فعال‌کننده و ترکیب‌های ۱۰٪ برای خاکستر پسته‌ی برنج و ۲۴٪ برای باطله‌ی معدن سنگ آهن در نمونه‌ی حاوی محلول فعال‌ساز I و ۱۸٪ باطله‌ی معدن سنگ آهن برای نمونه‌ی حاوی محلول فعال‌ساز II استفاده شده است. آنالیزهای SEM انجام شده توسط مرکز پژوهش متالورژی رازی شعبه‌ی اصفهان و دستگاه FESEM TESCAN VEGA۳ صورت گرفته است. همان‌طور که از تصاویر مشخص است، ساختار نمونه‌ی A۲۴ نسبت به نمونه‌ی

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از دو محلول سدیم هیدروکسید و پسماند کاربیدکلسیم به‌عنوان فعال‌ساز ژئوپلیمر بر پایه‌ی خاکستر پوسته‌ی برنج و باطله‌ی معدن سنگ آهن جهت بهبود خواص مکانیکی خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) استفاده شده است. با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر، این نتایج به دست آمده است:

- با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری حاوی سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تثبیت شده افزایش یافته است، که نشان‌دهنده تکمیل واکنش‌های پوزولانی است.

- افزودن مقدار خاکستر پوسته‌ی برنج به مقدار ۱٪ و باطله‌ی معدن سنگ آهن تا مقدار ۲۴٪ با محلول سدیم هیدروکسید سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده برای هر سه دوره‌ی زمان عمل‌آوری می‌شود. همچنین افزایش باطله‌ی معدن سنگ آهن تا مقدار ۱۸٪ برای نمونه‌ی حاوی

پسماند کاربیدکلسیم تا زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود.

- برای نمونه‌ی ژئوپلیمری A۲۴، مقاومت فشاری محدود نشده برای دوره‌های عمل‌آوری ۲۸، ۷ و ۹۰ روز به ترتیب ۲۸/۱، ۲۰/۹ و ۲۱/۵ برابر مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل خاک تعیین شده است.

- برای نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی پسماند کاربیدکلسیم، مقدار درصد بهینه‌ی استفاده از پسماند کاربیدکلسیم به‌عنوان حلال قلیایی برابر ۷٪ تعیین شده و مقاومت فشاری محدود نشده‌ی نمونه‌ی منتخب تثبیت شده با قلیای مذکور B۲۳ برای دوره‌های عمل‌آوری ۲۸، ۷ و ۹۰ روز به ترتیب ۹/۸، ۷/۴ و ۵/۲۵ برابر مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل خاک تعیین شده است.

- بررسی تصاویر SEM، تشکیل ژل‌های ژئوپلیمر را در نمونه‌های تثبیت شده به‌صورت کیفی تأیید کرده است. همچنین نتایج بررسی‌های ریزساختاری با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، که بیان‌کننده‌ی بهبود رفتار مکانیکی (افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم) نمونه‌های تثبیت شده‌ی ژئوپلیمری نسبت به نمونه‌ی کنترل بودند، تطابق خوبی داشته است.

پانویس‌ها

1. Joseph Davidovits
2. Viktor Glukovsky
3. Zhang
4. iron ore tailing
5. engineered cementitious composites
6. Lignin
7. Jaturapitakkul
8. Basha
9. Gemma Rodríguez de Sensale's
10. Behak
11. Toufigh
12. Calcite
13. Gibbsite
14. Cristobalite
15. Cordierite

منابع (References)

1. Toufigh, V., Barzegari Dehaji, M. and Jafari, K. "Experimental investigation of stabilisation of soils with Taftan pozzolan", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **24**(9), pp. 1339-1362 (2018).
2. Gartner, E. "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" Cements", *Cement and Concrete Research*, **34**(9), pp. 1489-1498 (2004).
3. Matthews, H.D., Gillett, N.P., Stott, P.A. and et al. "The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions", *Nature*, **459**(7248), pp. 829-832 (2009).

4. Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*, 2nd Geopolymer Edition, Institute Saint-Quentin, France (2008).
5. Davidovits, Geopolymers, J. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **37**(8) pp. 1633-1656 (1991).
6. Davidovits, J. "Properties of geopolymer cements", *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev, Ukraine, **1**, pp. 131-149 (1994).
7. Sindhunata, J.S.J., Van Deventer, G.C. and Lukey and Xu, H. "Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **45**(10), pp. 3559-3568 (2006).
8. Davidovits, J. "Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions", *Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005*, Geopolymer Institute (2005).
9. Pascual, A.B., Tognonvi, M.T. and Tagnit-Hamou, A.J.I.j.o.R.i.E. "Waste glass powder-based alkali-activated mortar", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **3**(13), pp. 15-19 (2014).
10. Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T. and et al. "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer", *Construction and Building Materials*, **47**, pp. 1468-1478 (2013).
11. Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. "Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂", *Cement and Concrete Research*, **37**(4), pp. 512-518 (2007).

12. Li, C., Sun, H., Yi, Z. and et al. "Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 1: the recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting", *J. Hazardous Material*, **174**(1-3), pp. 71-77 (2010).
13. Li, C., Sun, H., Yi, Z. and et al. "Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: the residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material", *J. Hazardous Material*, **174**(1-3), pp. 78-83 (2010).
14. Liu, Y., Du, F., Yuan, L. and et al. "Production of lightweight ceramisite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor", *Journal of Hazardous Materials*, **178**(1), pp. 999-1006 (2010).
15. Xiong, C., Li, W., Jiang, L. and et al. "Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO₃ to improve sulfate resistance of pastes", *Construction and Building Materials*, **150**, pp. 66-76 (2017).
16. Huang, X., Ranade, R., Ni, W. and et al. "Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates", *Construction and Building Materials*, **44**, pp. 757-764 (2013).
17. Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B. "Cementing material from calcium carbide residue-rice husk ash", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **15**(5), pp. 470-475 (2003).
18. Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B. and et al. "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement", *Construction and Building Materials*, **19**(6), pp. 448-453 (2005).
19. Rodriguez de Sensale, G. "Strength development of concrete with rice-husk ash", *Cement and Concrete Composites*, **28**(2), pp. 158-160 (2006).
20. Behak, L., *Soil Stabilization with Rice Husk Ash*, in: Rice - Technology and Production Book (2017).
21. Bilondi, M.P., Toufigh, M.M. and Toufigh, V. "Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer", *Construction and Building Materials*, **183**, pp. 417-428 (2018).
22. Bilondi, M.P., Toufigh, M.M., Toufigh, V.J.C. and et al. "Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils", **170**, pp. 302-313 (2018).
23. ASTM D422. "In: standard test method for particle-size analysis of soils (withdrawn 2016)", ASTM International, West Conshohocken, PA (2007).
24. ASTM D698. "In: standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", ASTM International, West Conshohocken, PA (2012).
25. ASTM C618-19. "In: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA (2019).
26. Kampala, A., Horpibulsuk, S., Chinkulijniwat, A. and et al. "Engineering properties of recycled calcium carbide residue stabilized clay as fill and pavement materials", *Construction and Building Materials*, **46**, pp. 203-210 (2013).
27. Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C. and et al. "Calcium carbide residue: alkaline activator for clay-fly ash geopolymer", *Construction and Building Materials*, **69**, pp. 285-294 (2014).
28. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A. and et al. "Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash", *Soils and Foundations*, **53**(4), pp. 477-486 (2013).
29. ASTM D2166. "In: standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", ASTM International, West Conshohocken, PA (2016).
30. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C. and Chinkulkijniwat, A. "Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**(2), pp. 184-193 (2012).
31. Hoy, M., Rachan, R., Horpibulsuk, S. and et al. "Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement-Fly ash geopolymer", *Construction and Building Materials*, **144**, pp. 624-634 (2017).
32. Sabbagh Gol, M. and Toufigh, V. "Feasibility study of sandy soil stabilization with glass powder and natural pozzolan based geopolymer", *Amirkabir J. Civil Eng*, **51**(1), pp. 169-182 (2019).