

افزایش متغیرهای مقاومتی خاک‌های رس شرق اصفهان توسط فرایند ژئوپلیمر و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن و مقایسه آن با تثبیت خاک همراه سیمان

اسماعیل معصومی^۱، رسول اجل لوثیان^{۱،۲*}، امیرعباس نوربخش^{۱،۳} و میثم بیات^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۳۰)

چکیده

از آنجایی که از خاک رس به نحوی گسترده در اکثر پروژه‌های عمرانی، استفاده می‌شود، موضوع بهسازی خاک‌های رسی دارای اهمیت قابل توجهی است. هدف در این پژوهش بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر بر خواص ژئوپلیمرها و بهبود خواص مکانیکی آنها با استفاده از سرباره کوره بلند اصفهان بوده است. به این منظور از روش طراحی آماری تاگوچی برای مدل کردن ۳ متغیر فرایند (سرباره کوره بلند، آب و عامل قلیایی سدیم هیدروکسید) که هر یک از آنها با ۴ مقدار مختلف در طرح اختلاط استفاده شده‌اند، برای بهینه‌سازی مقاومت فشاری تک‌محوره ژئوپلیمرها استفاده شد. ۱۶ ترکیب ژئوپلیمری تعیین شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب، آماده و مقاومت فشاری تک‌محوره آنها اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده توسط روش آنالیز واریانس مدل‌سازی شده و بعد از آن اثرات متقابل ۳ متغیر ذکر شده بر مقاومت فشاری تک‌محوره ژئوپلیمرها با استفاده از نمودارهای دو بعدی بررسی شد. سپس بهینه‌سازی متغیرها صورت گرفت و مقادیر پیشنهاد شده برای نمونه بهینه در دماهای ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، اعتبار مدل‌ها را تأیید کرد. همچنین در عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) شاهد کاهش تخلخل از زمان ۷ تا ۲۸ روزه خواهد بود که نشان می‌دهد استفاده از روش ژئوپلیمریزاسیون نقش زیادی در تثبیت خاک‌های ضعیف رسی با پلاستیسیته پایین را دارد. همچنین تأثیر الیاف همراه با ژئوپلیمر را برای مسلح کردن آن نیز مورد بررسی داده شد و در ادامه برای ارزیابی بهتر، مقایسه آن با تثبیت خاک با سیمان پرتلند صورت گرفت. نتایج حاکی از آن است که در بهینه‌ترین ترکیب ژئوپلیمر مقاومت باربری خاک رس بیش از ۳۴۰۰ درصد افزایش داشته است. این در حالی است که الیاف نیز همراه ژئوپلیمر با درصد و طول بهینه (۰/۱ درصد وزنی ترکیب ژئوپلیمر و طول ۱۲ میلی‌متر) توانسته مقاومت فشاری تک‌محوره خاک رس را نزدیک به ۴۰۰۰ درصد افزایش دهد که نشان‌دهنده تأثیر بسیار خوب استفاده از الیاف همراه با ژئوپلیمر در این پژوهش بوده است.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، مقاومت تک محوره، خاک رس با پلاستیسیته پایین، سرباره کوره بلند، روش تاگوچی، میکروسکوپ الکترونی روبشی

۱. گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳. گروه سرامیک دانشکده مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: rasajl@sci.ui.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر ژئوپلیمرها به دلیل پتانسیل‌های کاربردی و خواص زیست‌محیطی مطلوبشان مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند. به گونه‌ای که تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف روی آنها در سراسر جهان به چشم می‌خورد. از گذشته تاکنون مواد ساختمانی آلوده کننده محیط زیست نظیر صنایع سیمان و کامپوزیت‌های سیمانی نظر دستداران محیط زیست را به خود جلب کرده‌اند. این صنایع حدود ۷ درصد از گاز CO₂ ورودی به اتمسفر را به خود اختصاص داده‌اند. درحالی که تولید این گاز در صنایع ژئوپلیمری حدود ۸۰ درصد کمتر از تولید آن در صنایع سیمان است (۲۵). تثبیت خاک‌های ضعیف با استفاده از موادی مانند سیمان و آهک همیشه توسط مهندسين مورد بحث قرار گرفته است که می‌توانند بستر کانال‌ها و لایه‌های خاک زیر پی را تقویت کنند (۳، ۷، ۴۲، ۴۵). تثبیت خاک‌های سست در محل به دلیل اقتصادی بودن و کاهش هزینه‌های حمل و نقل و زمانی همیشه برای مهندسين دارای اهمیت ویژه بوده است. همیشه استفاده از آهک و سیمان یکی از مواد مناسب برای تثبیت هر گونه خاک با باربری کم بوده است. با این حال، خاک همراه با آهک دارای انقباض و ترک خوردگی قابل توجهی است و استفاده از آن در بستر جاده‌های پراهمیت ممنوع است (۴ و ۲۰). سیمان پرتلند معمولی نیز تقریباً برای بهبود انواع خاک مناسب است. اما اگر مقدار سیمان در خاک بیش از حد باشد، باعث ایجاد ترک خوردگی ناشی از تبخیر آب در طی فرایند سخت شدن می‌شود (۱۵). همچنین به دلیل پایداری مقاومتی کم به خصوص در شرایط یخ زدگی قادر به تضمین مقاومت، پایداری و دوام ساختار خاک تثبیت شده با سیمان نخواهد بود (۲۱). علاوه بر این، تولید سیمان همیشه مقدار زیادی دی‌اکسید کربن آزاد می‌کند (۴۷). بنابراین، بهبود عملکرد مهندسی خاک‌های طبیعی و دستیابی به هماهنگی بین انسان و طبیعت به مسئله مورد بحث و بررسی در داخل و خارج از کشور تبدیل شده است. ژئوپلیمر نوعی ماده سیمانی سبز با اتصال شبکه سه‌بعدی چهاروجهی [SiO₄]⁴⁻ و

[AlO₄]⁵⁻ است که ثابت شده عملکرد آن در مقاومت اولیه، سختی سریع، نفوذناپذیری خوب، دما و مقاومت شدید در برابر خوردگی شیمیایی بسیار مؤثر است (۸). همچنین از مزایای این ماده مواد اولیه فراوان، قیمت پایین، فرایند تولید ساده و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برخوردار است. با این حال، این مزایا در مواد اولیه ذاتی نیستند، بلکه با طراحی نسبت منطقی مواد اولیه و فعال کننده قلیایی و همچنین فناوری تولید صحیح به دست می‌آیند (۱۱، ۳۳ و ۳۹). ژئوپلیمرها پلیمرهای غیرآلی هستند (۳۱). در سنتز فرایند ژئوپلیمر دو نوع ماده یعنی جامدات آلومینوسیلیکات (خاکستر بادی (FA)، متاکائولین (MK)، رس قرمز کلسیته، گل سرخ (RM)، ژئولیت، خاکستر پوسته برنج (RHA) و غیره) و یک محلول فعال کننده قلیایی استفاده می‌شود (۴۶). تشکیل ژئوپلیمر زمانی اتفاق می‌افتد که جامدات آلومینوسیلیکات با محلول‌های قلیایی (فعال کننده‌ها) وارد واکنش شود (۱۶). [

مطالعات اخیر اشاره زیادی به کارایی و قدرت خاکستر بادی در فرایند ژئوپلیمر داشته است، همچنین گزارش شده است که جایگزینی خاکستر بادی با سرباره کوره بلند در فرایند ژئوپلیمر مقاومت فشاری را تحت شرایط محیطی به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد (۱۰، ۲۹، ۳۲، ۳۵، ۳۸ و ۴۰). سینگ و همکاران بیان کرده‌اند که افزایش مولاریته محلول سدیم هیدروکسید در مخلوط ژئوپلیمر با نسبت ثابت همراه با سرباره کوره بلند مقاومت چشمگیری بر مقاومت خاک رس داشته است (۲۶ و ۳۷). آن‌طور که تونگو و فیلیبس در کتاب الیاف جدید خود اشاره می‌کنند ۴۰۰۰ سال قبل، بشر از الیاف به‌عنوان عنصری تقویت‌گر در خاک استفاده می‌کرده است. همچنین کاربرد الیاف در دیوار چین در ۲۰۰۰ سال قبل مؤید این مطلب است که دانش مهندسين نساجی از قدیم الایام در کنار مهندسين عمران، یاریگر ایشان در ارتقای عمر مفید سازه‌های گوناگون بوده است (۲۲). روش‌های فیزیکی مثل افزودن المان‌های گسسته با توزیع تصادفی همچون استفاده از الیاف طبیعی و مصنوعی، یک روش به‌نسبت موفق در بهبود عملکرد

خاک است. تسلیح خاک با الیاف، بهبود قابل توجه در مقاومت، ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و تغییرات حجم ماتریس (خاک) را به همراه دارد (۹ و ۱۸). معصومی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن همراه با پلیمر پلی‌وینیل‌الکل برای مسلح کردن و افزایش باربری خاک پرداختند به گونه‌ای که در بهینه‌ترین حالت طول و مقدار الیاف و درصد وزنی رزین پلیمری پلی‌وینیل‌الکل مقاومت فشاری خاک بیش از ۶۰۰ درصد افزایش داشته است (۲۳). مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طور قابل توجهی مقدار CBR ماسه و رس مسلح را افزایش می‌دهد (۱۴) و تغییر شکل ناگهانی خاک‌های منبسط شونده کاهش می‌یابد (۴۴). افزایش مقاومت فشاری محصور نشده هم یکی از موارد مورد بحث در مطالعات آزمایشگاهی بوده است (۱۲، ۲۸ و ۴۳) مقاومت کششی بارزترین خصوصیت الیاف است که منجر به افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های خاکی می‌شود (۵، ۶ و ۳۶). افزایش میزان الیاف باعث افزایش سهم الیاف در افزایش مقاومت کششی می‌شود و افزایش طول الیاف این سهم را کاهش می‌دهد (۱ و ۲۳). با افزایش نسبت طول به عرض الیاف، مقاومت پیک و تغییرات حجم کل افزایش می‌یابد. همچنین عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان‌دهنده آن است که الیاف توانسته است توسط شبکه‌های به هم پیوسته دانه‌های خاک را به هم نزدیک کند، که این امر باعث تأخیر در گسیختگی دانه‌ها در بارگذاری است (۲ و ۲۳). روش تاگوچی روشی کارآمد در روش‌های آزمایشی است که حداقل با یک سری آزمایش‌ها نتایج قابل قبولی را ایجاد می‌کند (۱۳، ۱۷ و ۳۴). با استفاده از روش تاگوچی، توابع مختلف پاسخ را می‌توان بر اساس عوامل تعیین شده تخمین زد. نتایج تخمینی به ما کمک می‌کند تا عواملی را که منجر به بهترین نتیجه برای آزمون مورد نظر می‌شود به دست آوریم. با انجام آزمایش‌ها در سطوح مطلوب عوامل و مقایسه نتایج واقعی با مقادیر برآورد شده، دقت طراحی تعیین می‌شود (۲۷). روش تاگوچی در مقایسه با روش‌های عاملی دارای مزایایی از جمله تعداد کمتر آزمون و

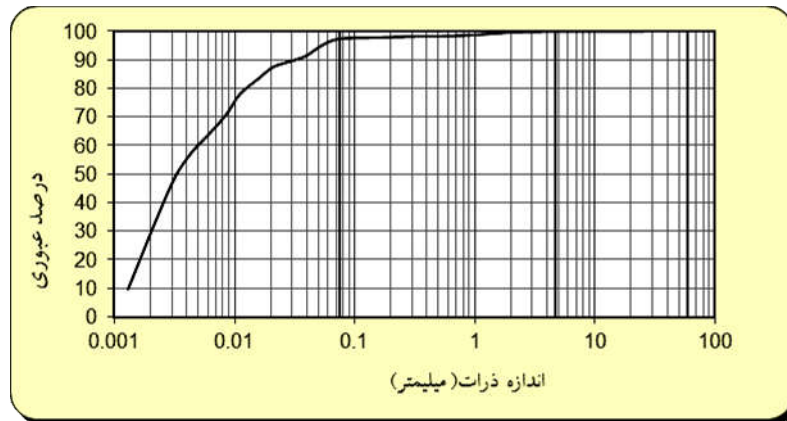
در نتیجه هزینه و زمان آزمایش کمتر، توانایی مطالعه تعاملات و انجام آزمایش‌ها به صورت موازی و در نهایت پیش‌بینی پاسخ بهینه است. به طور کلی، این روش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد و دقت نتایج را افزایش می‌دهد. در این روش، از مزایای روش‌های تک عاملی و فاکتوری استفاده می‌شود. این به این معنی است که آزمایش‌های کمتری استفاده می‌شود و همچنین تعامل بین عوامل را بررسی می‌کند. روش تاگوچی برای بهینه‌سازی از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌کند. نسبت (S/N) به تجزیه و تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی نتیجه مطلوب کمک می‌کند. درحقیقت، نسبت (S/N) به عنوان عملکرد هدف برای بهینه‌سازی عمل می‌کند. مزایای اصلی روش‌های تاگوچی بهره‌وری، مقرون به صرفه بودن، قدرت و سهولت در تفسیر کارایی است (۱۹، ۲۴، ۳۰ و ۳۱).

در این پژوهش در ابتدا مقدار متغیرهای بهینه تأثیرگذار به دست آمده و سپس به اثر بخشی دما و زمان و همچنین درصد و سایز الیاف بر روی ترکیب بهینه ژئوپلیمر پرداخته و در آخر مقایسه با تثبیت کننده‌های سنتی همچون سیمان اشاره شده است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه در این پژوهش خاک رس با پلاستیسیته پایین (CL)، سرباره کوره بلند، الیاف پلی‌پروپیلن، عامل قلیایی سدیم هیدروکسید و سیمان پرتلند است. خاک رس مورد مطالعه با پلاستیسیته پایین و باربری کم در منطقه شرق اصفهان در نزدیکی فرودگاه اصفهان استفاده شده است که در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی و در جدول ۱ مشخصات ژئوتکنیکی خاک بیان شده است همچنین در شکل ۲ نتایج این خاک در آزمون پراش اشعه ایکس نشان داده شده است.

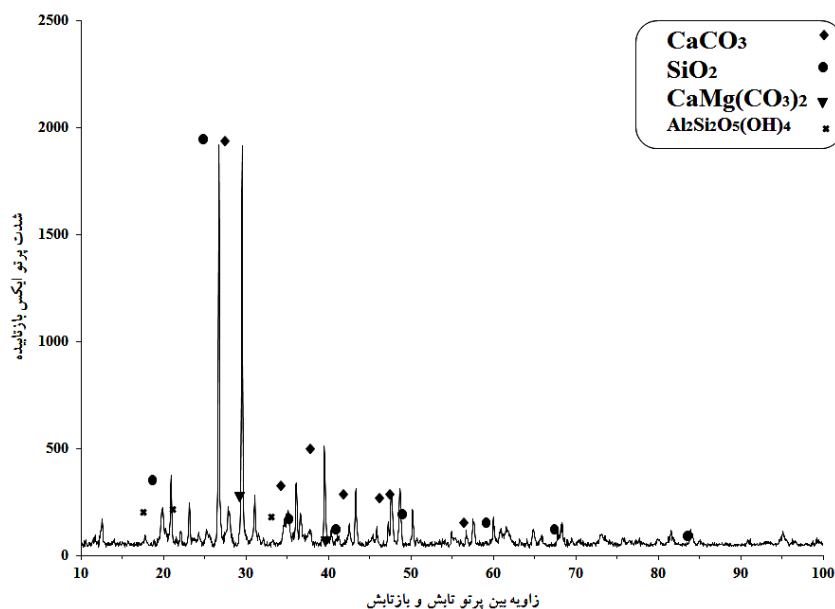
همچنین در این پژوهش از سرباره کوره بلند اصفهان که از ضایعات تولیدی این کارخانه است استفاده شده است که در شکل ۳ نتایج پراش اشعه ایکس بیان شده است. همچنین عامل قلیایی مورد مصرف در این مطالعه سدیم هیدروکسید (NaOH) استفاده شده است. الیاف پلی‌پروپیلن که یکی از ضایعات



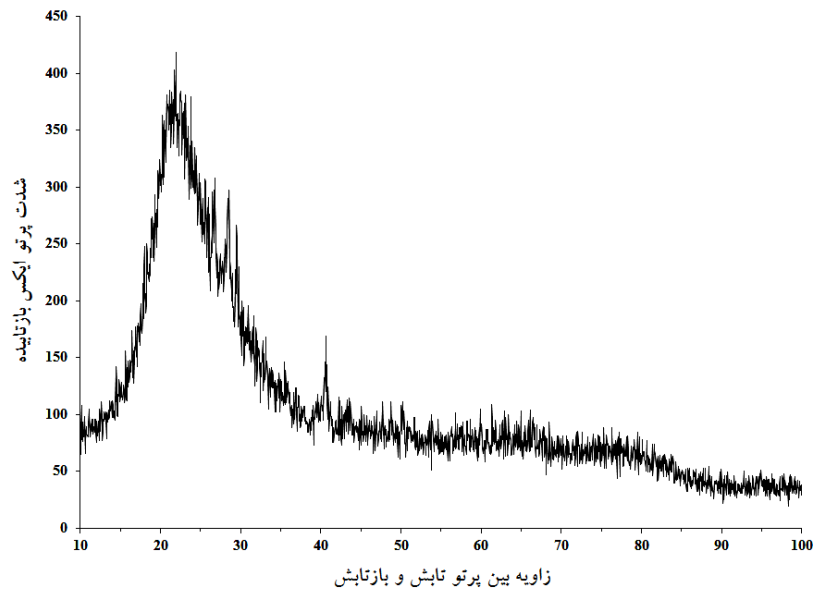
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

استاندارد	مقدار	مشخصات
ASTM-D2487	CL برحسب طبقه‌بندی یونیفاید	طبقه‌بندی
	رس با خاصیت خمیری کم	جنس ذرات
ASTM 854	۲/۷۸	چگالی توده ویژه
ASTM-D4318	۳۸	حدروانی
ASTM-D4318	۲۳	حدخمیری
ASTM-D4318	۱۵	شاخص خمیری



شکل ۲. XRD خاک مورد مطالعه



شکل ۳. XRD سرباره مورد مطالعه

است که می‌توان از این موارد به روش آماری تاگوچی اشاره داشت، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. برای این امر از آرایه L16 در نرم‌افزار مینی‌تب ۱۹ استفاده شده است. بدین منظور از ۳ متغیر آب، سرباره و عامل قلیایی سدیم هیدروکسید که هر یک چهار مقدار در نظر گرفته شده است استفاده می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر بالا و پایین با توجه به مطالعات قبلی در نظر گرفته شده است (۱۹) که در جدول ۳ قابل مشاهده است.

ساخت نمونه‌ها

به‌علت واکنش دادن ژئوپلیمر با مواد فلزی برای تولید قالب در این پژوهش همان گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است از ماده تفلون استفاده شده که دارای ابعاد ۳۸ در ۷۶ میلی‌متر است (ASTM D 2166). در ابتدا مواد به‌صورت خشک با هم ترکیب و سپس آب مورد نیاز به آن اضافه می‌شود و خمیر حاصل در قالب قرار می‌گیرد. در این روش از تراکم استفاده نشده و ۱ دقیقه روی میز ویبره برای خروج هوا قرار می‌گیرد. سپس سر قالب را با سلفون پوشانده و سپس از طوسی زم‌مان مورد

کارخانه‌های نساجی است برای تسلیح، با طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۹ میلی‌متری و درصد‌های وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات الیاف مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

سیمان پرتلند مورد نظر تیپ ۲ از سیمان سپاهان اصفهان تهیه شده است. کلمه سیمان یعنی چسب و منظور از سیمان در مصالح ساختمانی چسبی است که در اثر ترکیب با آب قادر به چسباندن ذرات شن و ماسه (سنگدانه) است و پس از سفت و سخت شدن، در آب جدا نمی‌شوند. به‌همین خاطر به این سیمان، سیمان هیدرولیک گفته می‌شود و اساساً از اکسید کلسیم تشکیل شده است و این اکسید با اکسیدهای سیلیسیوم، آلو مینیوم و آهن ترکیب می‌شود و ترکیب‌های مینرالی یا فازهایی با خاصیت سیمانی را به‌وجود می‌آورد.

روش تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

طراحی آزمایش

در فرایند ژئوپلیمریزاسیون به‌دلیل متغیرهای تأثیرگذار و ایجاد فضای چندبعدی و نیاز به‌دست آوردن نمونه بهینه برای کاهش خطای آزمایشگاهی از روش‌های بهینه‌سازی عددی استفاده شده

جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده [۲۹]

سفيد	رنگ ظاهري
۱	وزن مخصوص (g/cm ³)
۲۳	قطر (میکرون)
۴۰۰	مقاومت کششی (MPa)
۱۶۵-۱۶۰	محدوده ذوب (0c)
بالا	مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها و نمکها

جدول ۳. طراحی آزمایش توسط روش آماری تاگوچی (درصد وزنی خاک)

شماره آزمایش	سرباره (Slag)	سدیم هیدروکسید (NaOH)	آب (H ₂ O)
۱	۱۰	۱۰	۳۰
۲	۱۰	۲۰	۴۰
۳	۱۰	۳۰	۵۰
۴	۱۰	۴۰	۶۰
۵	۲۰	۱۰	۴۰
۶	۲۰	۲۰	۳۰
۷	۲۰	۳۰	۶۰
۸	۲۰	۴۰	۵۰
۹	۳۰	۱۰	۵۰
۱۰	۳۰	۲۰	۶۰
۱۱	۳۰	۳۰	۳۰
۱۲	۳۰	۴۰	۴۰
۱۳	۴۰	۱۰	۶۰
۱۴	۴۰	۲۰	۵۰
۱۵	۴۰	۳۰	۴۰
۱۶	۴۰	۴۰	۳۰

بحث و نتایج

بررسی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش آماری تاگوچی بدین گونه بوده است که با حذف عامل‌های دما و زمان در شرایط دما آزمایشگاه با ۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان عمل‌آوری ۳ روز نتایج آزمایش فشاری محدود نشده زیر حاصل شد که در جدول ۴ نشان داده شده است. نمودارهای دو بعدی در شکل ۵ نشان‌دهنده بازه بهینه مواد

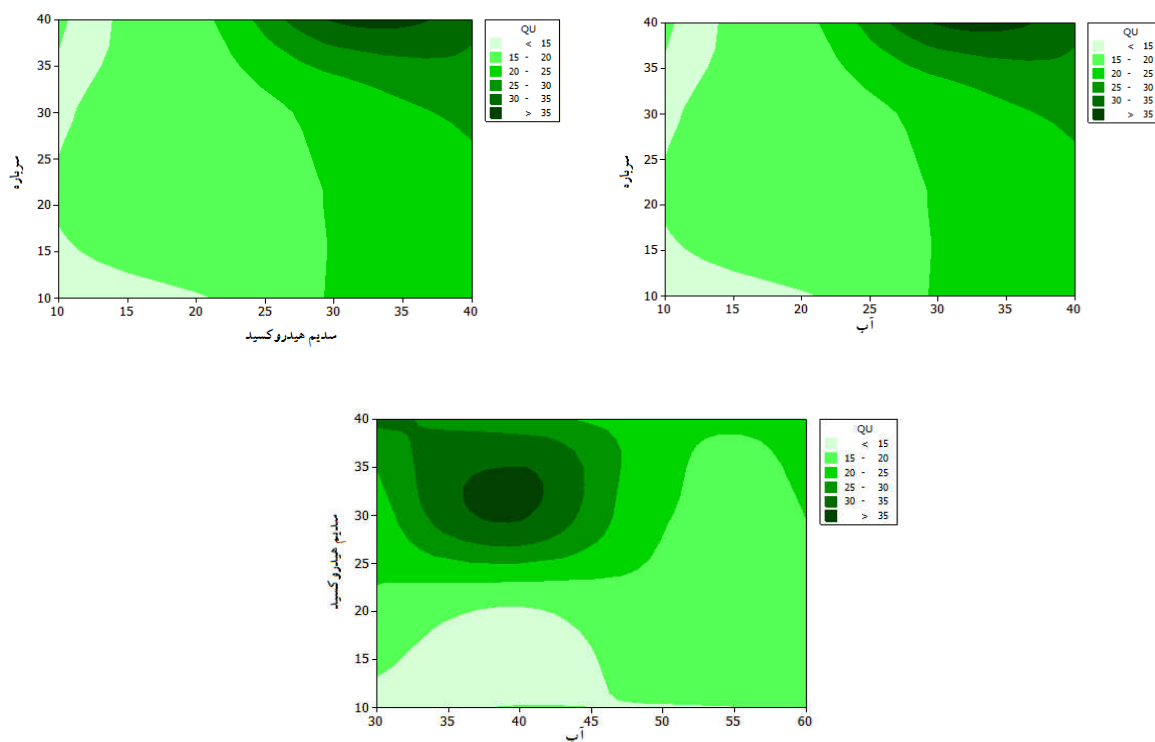
مطالعه (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) کفی قالب باز شده و توسط جک هیدرولیک از قالب خارج شده و برای به‌دست آوردن مقاومت حاصل بر اساس استاندارد با سرعت بارگذاری ۰/۲۳mm/min مورد آزمایش قرار می‌گیرد (۴۰). لازم به ذکر است برای جلوگیری از خطای آزمایشگاهی هر یک از نمونه‌ها ۳ بار تکرار شده و میانگین آنها به‌عنوان نتیجه نهایی اعلام شده است.



شکل ۴. دستگاه تک‌محوره و ساخت نمونه‌ها در قالب از جنس تفلون

جدول ۴. نتایج آزمایش تک‌محوره

شماره نمونه	خاک رس (گرم)	سرباره کوره بلند (گرم)	عامل قلیایی (گرم)	آب (گرم)	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
۱	۱۰۰	۰	۰	۰	۲/۲۷
۲	۱۰۰	۱۰	۱۰	۳۰	۱۲/۳
۳	۱۰۰	۱۰	۲۰	۴۰	۱۴/۵
۴	۱۰۰	۱۰	۳۰	۵۰	۲۰/۳
۵	۱۰۰	۱۰	۴۰	۶۰	۲۱/۳
۶	۱۰۰	۲۰	۱۰	۴۰	۱۵/۲
۷	۱۰۰	۲۰	۲۰	۳۰	۱۹/۱
۸	۱۰۰	۲۰	۳۰	۶۰	۲۰/۱
۹	۱۰۰	۲۰	۴۰	۵۰	۲۱/۷
۱۰	۱۰۰	۳۰	۱۰	۵۰	۱۴/۸
۱۱	۱۰۰	۳۰	۲۰	۶۰	۱۷/۲
۱۲	۱۰۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۱/۴
۱۳	۱۰۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۶/۵
۱۴	۱۰۰	۴۰	۱۰	۶۰	۱۵/۲
۱۵	۱۰۰	۴۰	۲۰	۵۰	۱۸/۵
۱۶	۱۰۰	۴۰	۳۰	۴۰	۳۵/۵
۱۷	۱۰۰	۴۰	۴۰	۳۰	۳۱/۲



شکل ۵. نمودارهای دو بعدی حاصل از روش تاگوچی در برنامه مینی تب (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نمودار صعودی نزولی است که از ۳۰ تا ۴۰ گرم صعودی و سپس نزولی است که نشان می‌دهد با افزایش بیش از ۴۰ گرم آب با کاهش مقاومت همراه است.

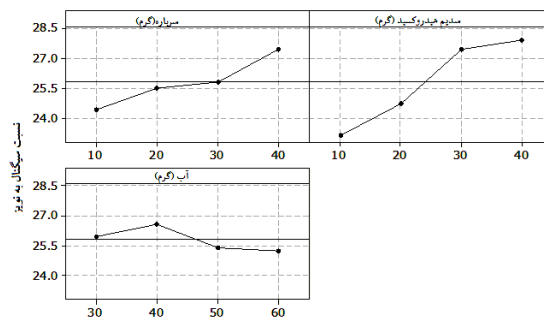
تأثیر زمان و دما بر فرایند ژئوپلیمریزاسیون

با مشخص شدن درصد بهینه، مخلوط مورد بحث در دماهای ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۷ و جدول ۵ مشاهده می‌شود.

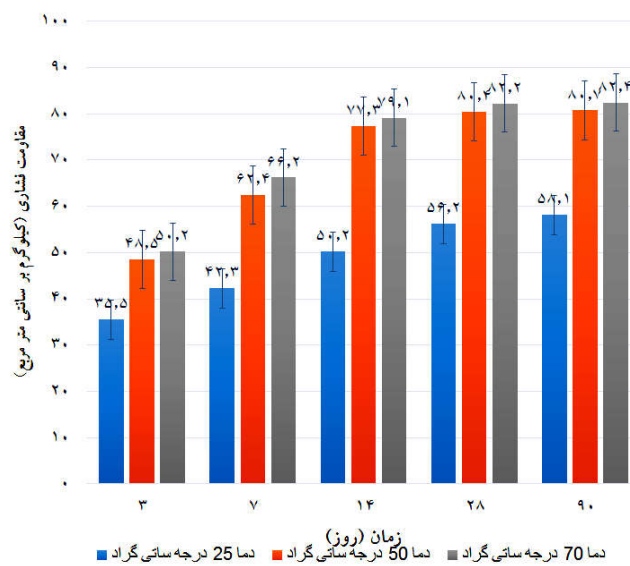
تفاوت چشمگیری بین دمای ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای افزایش باربری خاک شاهد هستیم این در حالی است که با افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش چشمگیری را شاهد نیستیم که نشان‌دهنده بهینه دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای این نوع ترکیب ژئوپلیمری است، همچنین مشاهده می‌شود با افزایش دما از ۳ روز تا ۱۴ روز سرعت رشد مقاومت نمونه بیشتر از ۱۴ تا ۲۸ روز است که

مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد که می‌توان گفت در بازه مقدار درصد وزنی سرباره از ۳۸ تا ۴۰ همراه با ۳۲ تا ۳۷ درصد سدیم هیدروکسید و در بازه مقدار درصد وزنی سرباره ۳۷ تا ۴۰ همراه با ۳۵ تا ۴۰ درصد آب و در بازه ۳۰ تا ۳۵ درصد سدیم هیدروکسید همراه با ۳۷ تا ۴۲ درصد آب بهترین نتایج باربری حاصل شده است.

در شکل ۶ با افزایش سیگنال روی نويز شاهد تأثیرگذاری بهتر ماده مورد نظر در فرایند ژئوپلیمریزاسیون خواهیم بود این نمودار از تحلیل آماری به دست آمده و خروجی نرم‌افزار مینی تب است. با صعودی شدن هر یک تأثیرگذاری مقادیر بیشتر شده و با نزولی شده آن تأثیر آن کمتر می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش سرباره نمودار روند صعودی داشته است که بهترین حالت درصد وزنی ۳۰ تا ۴۰ گرم را نشان می‌دهد. در مورد سدیم هیدروکسید این نمودار صعودی است که بهترین حالت آن در مقادیر ۲۰ تا ۳۰ گرم است ولی در مورد آب این



شکل ۶. نمودار سیگنال تو نویز نسبت به مقدار گرم سرباره، سدیم هیدروکسید و آب، استخراج شده از نرم افزار مینی تب



شکل ۷. تأثیر دما و زمان بر مقاومت باربری ژئوپلیمیریزاسیون (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۵. تأثیر دما و زمان بر مقاومت باربری ژئوپلیمیریزاسیون

ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	زمان (روز)	دما (سانتی گراد)	شماره نمونه
۳۵/۵	۳	۲۵	۱۸
۴۲/۳	۷	۲۵	۱۹
۵۰/۲	۱۴	۲۵	۲۰
۵۶/۲	۲۸	۲۵	۲۱
۴۸/۵	۳	۵۰	۲۲
۶۲/۴	۷	۵۰	۲۳
۷۷/۳	۱۴	۵۰	۲۴
۸۰/۴	۲۸	۵۰	۲۵
۵۰/۲	۳	۷۰	۲۶
۶۶/۲	۷	۷۰	۲۷
۷۹/۱	۱۴	۷۰	۲۸
۸۲/۲	۲۸	۷۰	۲۹

چرخش الیاف روی یکدیگر و روی خود و یا قرار گرفتن قسمتی از الیاف در مسیر ترک شاهد کاهش مقاومت می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده بهینه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن برای مسلح کردن ژئوپلیمر سایز ۱۲ میلی‌متر و ۱/۰ درصد وزنی ژئوپلیمر است.

تأثیر سیمان بر خاک رس با درصدهای مختلف سیمان به‌علت یکی از تثبیت‌کننده‌های سستی خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

در شکل ۱۰ و جدول ۷ مشاهده می‌شود که مقاومت باربری خاک رس همراه با سیمان افزایش می‌یابد، این امر تا مقدار ۸ درصد وزنی چشمگیر است. با توجه به اینکه مقدار ۱۰ درصد وزنی سیمان، خاک رس را با مقاومت باربری چندان زیادی افزایش نداده است پس مقدار بهینه و توجیه‌پذیری آن مقدار ۸ درصد وزنی سیمان است که توانسته مقاومت باربری خاک رس را تا ۲۲/۴۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش دهد.

مقایسه مقاومت باربری ژئوپلیمر و ژئوپلیمر همراه الیاف با

بهینه درصد وزنی ترکیب سیمان

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، خاک رس با پلاستیسیته پایین همراه با سیمان در بهینه‌ترین مقدار که ۸ درصد وزنی خاک رس است، توانسته است مقاومت باربری خاک رس را از ۲/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ۲۲/۴۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش دهد. این در حالی است که در فرایند ژئوپلیمریزاسیون این مقدار به ۷۷/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در بهینه‌ترین حالت ژئوپلیمر همراه با الیاف پلی‌پروپیلن این مقدار به ۹۰/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش داده شده است. که نشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد فرایند ژئوپلیمریزاسیون در بالا بردن مقاومت خاک رس است. همچنین استفاده از الیاف به‌عنوان یک عنصر مسلح‌کننده این فرایند نشان از افزایش مقاومت باربری خاک رس شده است. این امر به دلیل جلوگیری از ترک‌های اعمال شده پس از بارگذاری است. الیاف می‌تواند از ایجاد و پیشرفت ترک‌های ناشی از بارگذاری به شکل قابل قبولی کنترل کند.

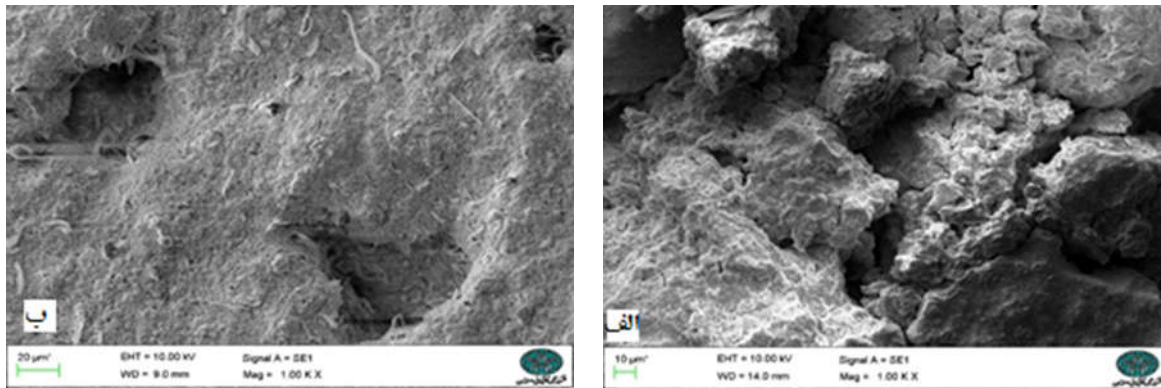
بیانگر این موضوع است که در فرایند ژئوپلیمریزاسیون بیشترین مقاومت در ۱۴ روز اول حاصل می‌شود.

استفاده از بررسی ریزساختاری برای مشاهده پیشرفت فرایند ژئوپلیمریزاسیون از روش‌های قابل اهمیت در اثبات این فرایند است (۱۷). بدین منظور از قطعات مکعبی ۱۰ میلی‌متری از مرکز نمونه‌های ۷ و ۲۸ روز انتخاب شده است. بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در زمان‌های ۷ و ۲۸ روز در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب نشان‌دهنده آن است که در زمان‌های ۷ روز عمل‌آوری نمونه تشکیل ابتدایی کریستال‌های آلومیناسیلیکات و فرم اولیه فرایند ژئوپلیمریزاسیون تشکیل شده است. این در حالی است که تخلخل در نمونه‌های ۷ روزه تا بیش از ۱۰ میکرومتر مشاهده شده و پس از طی زمان به ۲۸ روز نشان‌دهنده تشکیل کامل فرایند ژئوپلیمریزاسیون و کاهش شدید تخلخل خاک است که اهمیت زمان و پیشرفت این فرایند را نشان می‌دهد.

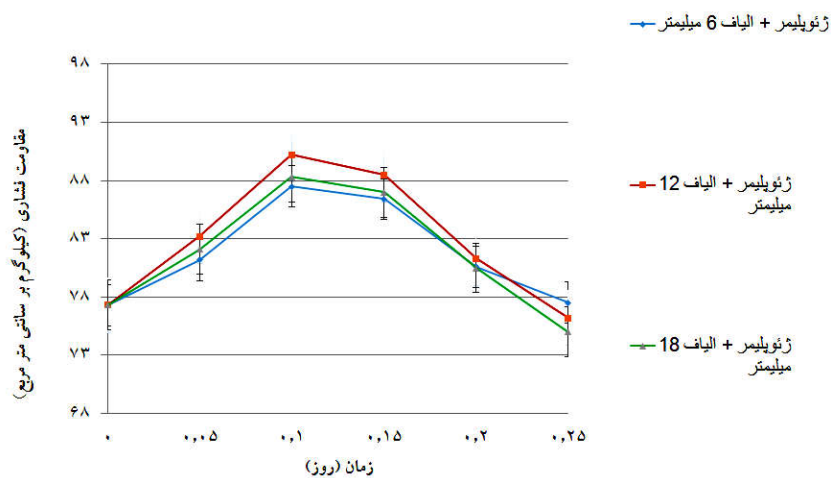
مقایسه نتایج ژئوپلیمر، ژئوپلیمر همراه با الیاف و خاک همراه

با سیمان

در این تحقیق از الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متری با درصد وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ نسبت به مقدار مواد ژئوپلیمر مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل ۹ و جدول ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا ۱/۰ درصد وزنی مقاومت ژئوپلیمر افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد. علت این امر تراکم بیش از حد الیاف روی یکدیگر است که ایجاد پدیده سرش و لغزیدن الیاف روی یکدیگر و کاهش مقاومت را خواهد داشت و همچنین مشاهده می‌شود با افزایش طول الیاف پلی‌پروپیلن از ۶ به ۱۲ میلی‌متر افزایش مقاومت ژئوپلیمر مشاهده می‌شود. علت این امر آن است که طول الیاف ۱۲ نسبت به ۶ میلی‌متر، بهتر می‌تواند دانه‌های خاک را به یکدیگر نزدیک و درگیر کند ولی با افزایش طول الیاف از ۱۲ به ۱۸ میلی‌متر باعث کاهش مقاومت می‌شود. این درحالی است که در طول ۱۸ نسبت به ۱۲ میلی‌متر امکان



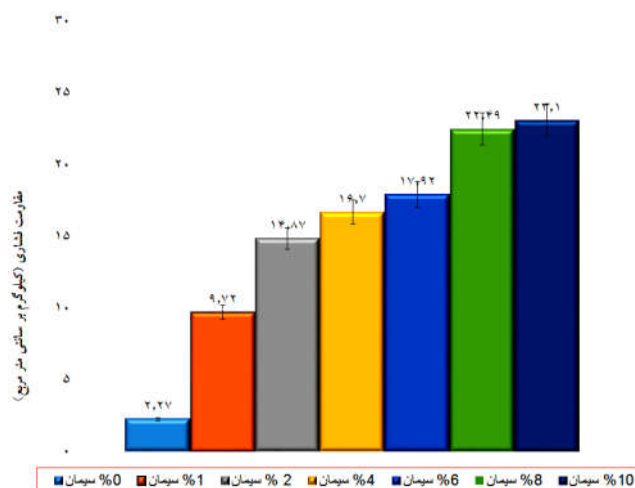
شکل ۸. عکس‌های حاصل از میکروسکوپ روبشی SEM در نمونه با طول عمر ۷ روز (a) و ۲۸ روز (b)



شکل ۹. مقاومت ژئوپلیمر همراه با الیاف پلی پروپیلن در سایزها و اندازه‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۶. مقاومت ژئوپلیمر همراه با الیاف پلی پروپیلن در سایزها و اندازه‌های مختلف

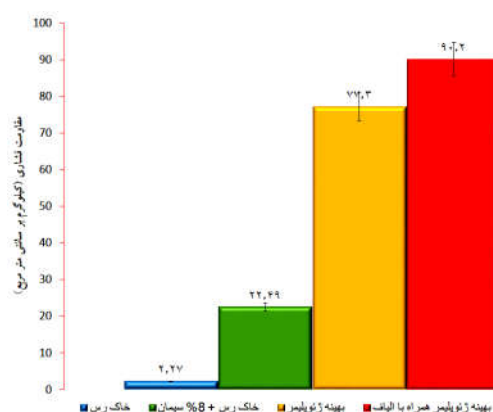
شماره نمونه	درصد الیاف	طول الیاف (میلی‌متر)	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
۳۰	۰/۰۵	۶	۸۱/۲
۳۱	۰/۰۵	۱۲	۸۳/۲
۳۲	۰/۰۵	۱۸	۸۲/۱
۳۳	۰/۱	۶	۸۷/۵
۳۴	۰/۱	۱۲	۹۰/۲
۳۵	۰/۱	۱۸	۸۸/۳
۳۶	۰/۱۵	۶	۸۶/۴
۳۷	۰/۱۵	۱۲	۸۸/۵
۳۸	۰/۱۵	۱۸	۸۷
۳۹	۰/۲۵	۶	۷۷/۵
۴۰	۰/۲۵	۱۲	۷۶/۲
۴۱	۰/۲۵	۱۸	۷۵



شکل ۱۰. مقاومت باربری خاک همراه با درصدهای وزنی مختلف سیمان (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۷. مقاومت باربری خاک همراه با درصدهای وزنی مختلف سیمان

شماره نمونه	سیمان (درصد وزنی خاک رس)	ظرفیت باربری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۴۲	۱	۹/۷۲
۴۳	۲	۱۴/۸۷
۴۴	۴	۱۶/۷
۴۵	۶	۱۷/۹۲
۴۶	۸	۲۲/۴۹
۴۷	۱۰	۲۳/۱



شکل ۱۱. مقایسه خاک رس همراه با سیمان یا ژئوپلیمر و ژئوپلیمر مسلح با الیاف پلی پروپیلن (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتایج

قلیایی با ایجاد فرایند ژئوپلیمریزاسیون توانست در بالا بردن

باربری خاک رس شرق اصفهان مؤثر باشد.

در فرایند ژئوپلیمریزاسیون از دمای ۲۵ تا ۵۰ درجه

پس از تحلیل نمودارهای فوق نتایج زیر به دست آمد.

استفاده از سرباره کوره بلند ذوب آهن اصفهان همراه با عامل

کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش دهد.

با توجه به بررسی‌های فوق علاوه بر میزان مواد ترکیب شده نقش دما و زمان نیز دارای اهمیت بوده است که بایستی برای به دست آمدن بهترین مقاومت باربری در مناطق مشخص و فصول مشخص از این روش استفاده کرد.

بحث

- خاک‌های رسی شرق اصفهان دارای مقاومت پائینی هستند.
- فرایند ژئوپلیمر فرایندی دوستدار محیط زیست است.
- استفاده از سرباره کوره بلند ذوب آهن اصفهان که ضایعات این کارخانه است نتایج مناسبی را برای بالا بردن مقاومت باربری خاک رس به دست آورد.
- روش تاگوچی یک روش آماری مناسب برای مطالعات آزمایشگاهی است.
- فرایند ژئوپلیمریزاسیون مقاومت باربری خاک رس شرق اصفهان را بیش از ۳۴۰۰ درصد افزایش داد.
- سیمان به عنوان یک تثبیت کننده قدیمی مقاومت خاک را نسبت به فرایند ژئوپلیمر آنچنان بالا نبرده است.
- استفاده از الیاف پلی پروپیلن همراه با ژئوپلیمر می‌تواند باعث افزایش مقاومت باربری خاک شود.
- بنابر نتایج گفته شده، عملکرد بسیار قوی به علاوه سهولت در اجرا و صرفه اقتصادی علاوه بر سازگاری با محیط زیست چند متغیر اصلی استفاده از این فرایند به عنوان تثبیت کننده مناسب خاک است.

سپاسگزاری

کلید آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وابسته به وزارت راه و شهرسازی انجام شده که بدین وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را بابت همکاری صورت گرفته اعلام می‌کند.

سانتی‌گراد در زمان ۳ روز عمل‌آوری شاهد افزایش باربری از ۳۵/۵ به ۴۸/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بودیم این درحالی است که از دمای ۵۰ تا ۷۰ افزایش باربری از ۴۸/۵ به ۵۰/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش داشته که نشان می‌دهد با افزایش دما از ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش چشمگیری شاهد نبوده و دمای بهینه این ترکیب ۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

در فرایند ژئوپلیمریزاسیون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مقاومت باربری خاک رس به ترتیب برابر ۴۸/۵، ۶۲/۴، ۷۷/۳ و ۸۰/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع شده که نشان می‌دهد در این دما مقاومت خاک از ۱۴ تا ۲۸ روز تغییرات چشمگیری نمی‌کند و زمان ۱۴ روز عمل‌آوری نمونه در دمای ۵۰ درجه بهینه زمان در این فرایند است.

بررسی الکتروسکوپ روبشی (SEM) روی نمونه‌های ژئوپلیمر در دمای ۲۵ درجه و زمان ۷ و ۲۸ روز حاکی از تشکیل بلورهای ژئوپلیمریزاسیون شده و با افزایش زمان از ۷ به ۲۸ روز کاهش چشمگیر تخلخل در بین دانه‌های خاک مشاهده شده و این موضوع با میزان افزایش استحکام رابطه مستقیم دارد.

مقایسه استفاده از سیمان برای تثبیت خاک و ژئوپلیمر در بهینه‌ترین حالت نشان داده که سیمان با ۸ درصد وزنی توانسته مقاومت خاک را ۲۲/۴۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش دهد این درحالی است که در فرایند ژئوپلیمریزاسیون این افزایش باربری به عدد ۷۷/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است که حاکی از عملکرد بسیار با ارزش فرایند ژئوپلیمریزاسیون نسبت به سیمان در افزایش باربری خاک‌های رسی در شرق اصفهان است.

الیاف پلی پروپیلن به علت مسلح کردن خاک توانسته است مواد ژئوپلیمری را با افزایش مقاومت روبه‌رو کند که بهترین مقاومت را همراه با الیاف ۱۲ میلی‌متری و درصد وزنی ۰/۱ داشته است که توانسته مقاومت باربری خاک رس را به ۹۰/۲

منابع مورد استفاده

1. Abd Al-kaream, K. W., M. Y. Fattah and M. K. H. Hameedi. 2021. Enhancement of the Compressibility and Strength of Soft Clayey Soil by Polypropylene Fibers. *Advances in Mechanics* 9(3): 351-361.
2. Akbar, A., F. Farooq, M. Shafique and F. Aslam. 2021. Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. *Journal of Building Engineering* 33: 101492. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101492>.
3. Andavan, S. and V. K. Pagadala. 2020. A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime. *Materials Today: Proceedings* 22: 1125-1129. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.323>.
4. Bakaiyang, L., J. Madjadoumbaye and Y. Boussafir. 2021. Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. *Case Studies in Construction Materials* e00626. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00626>
5. Cai, Y., B. Shi, C. W. W. Ng and C. Tang. 2006. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87(3-4): 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007>.
6. Chauhan, M. S., S. Mittal and B. Mohanty. 2008. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 26(5): 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.02.001>.
7. Chen, S., R. Hou, C. Ni, J. Wang - Bull Chin Ceram Soc. 2018. Research on the mechanical properties of cemented soil based on triaxial compression tests. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society* 37(12): 4012-4017.
8. Danso, H. and D. Manu. 2020. Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar. *Case Studies in Construction Materials* 12: e00316. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00316>.
9. Davidovits, J. 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis* 35(2): 429-441. <https://doi.org/10.1007/BF01904446>.
10. Deb, P. S., P. Nath and P. K. Sarker. 2014. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design* (1980-2015) 62: 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>.
11. Duxson, P. and J. L. Provis. 2008. Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society* 91(12): 3864-3869. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x>.
12. Expert, C. E. S. 2008. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *American Journal of Applied Sciences* 5(3): 209-220. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.209.220>.
13. Ferdous, W., A. Manalo and T. Aravinthan. 2017. Bond behaviour of composite sandwich panel and epoxy polymer matrix: Taguchi design of experiments and theoretical predictions. *Construction and Building Materials* 145: 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.244>.
14. Freitag, D. R. 1986. Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering* 112(8): 823-826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:8\(823\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(823)).
15. Gaspard, K. 2002. In-place cement stabilized base reconstruction techniques interim report. Louisiana Transportation Research Center.
16. Gharzouni, A., E. Joussein, B. Samet and S. Baklouti. 2015. Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation. *Journal of Non-Crystalline Solids* 410: 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.12.021>.
17. Hadi, M. N., N. A. Farhan and M. N. Sheikh. 2017. Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials* 140: 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131>.
18. Javdanian, H., N. Soltani and G. Shams. 2021. Investigating the monotonic behavior of fiber-reinforced soil under triaxial compression using experimental modeling. *Modeling Earth Systems and Environment* 7(2): 943-952. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00920-9>.
19. Khezarloo, A., M. Tayebi and A. Shafiee. 2021. Evaluation of compressive and split tensile strength of slag based aluminosilicate geopolymer reinforced by waste polymeric materials using Taguchi method. *Materials Research Express* 8(2): 025504. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe101>.
20. Kulanthaivel, B Soundara, S Velmurugan, V.Naveenraj., 2021. Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement. *Materials Today: Proceedings* 45: 507-511. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.107>
21. Lake, C. B., M. A. -M. Yousif and R. J. Jamshidi. 2017. Examining freeze/thaw effects on performance and morphology of a lightly cemented soil. *Cold Regions Science and Technology* 134: 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.11.006>.
22. Maradiya, H. R. and V. S. Patel. 2002. Dyeing performance of disperse dyes based on 2-aminothiazole for cellulose triacetate and nylon fibers. *Fibers and Polymers* 3(1): 43-48. <https://doi.org/10.1007/BF02875368>.
23. Masoumi, E., S. M. A. Forooshani and F. A. Nian. 2021. Problematic soft soil improvement with both

- polypropylene fiber and polyvinyl acetate resin. *Geotechnical and Geological Engineering* 31(1): 143-149. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9575-5>.
24. Mehta, A., R. Siddique, B. P. Singh and S. Aggoun. 2017 Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials* 150: 817-824. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.066>.
 25. Mehta, P. K. 2001. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International* 23(10): 61-66. <https://doi.org/10.1520/CCA10085J>.
 26. Morla, P., R. Gupta, P. Azarsa and A. Sharma. 2021. Corrosion Evaluation of Geopolymer Concrete Made with Fly Ash and Bottom Ash. *Sustainability* 13(1): 398. <https://doi.org/10.3390/su13010398>.
 27. Mortazavi Bak, H. and M. Noorbakhsh. 2021. Application of the Taguchi Method to Enhance Bearing Capacity in Geotechnical Engineering: Case Studies. *International Journal of Geomechanics* 21(9): 04021167. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002133).
 28. Nataraj, M. and K. McManis. 1997. Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics International* 4(1): 65-79. <https://doi.org/10.1680/gein.4.0089>.
 29. Nath, P. and P. K. Sarker. 2014. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials* 66: 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>.
 30. Olivia, M. and H. Nikraz. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980-2015) 36: 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.036>.
 31. Palomo, A., M. Grutzeck and M. Blanco. 1999. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8): 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9).
 32. Phoo-ngernkham, T., A. Maegawa and N. Mishima. 2015. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials* 91: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.001>.
 33. Provis, J. L., G. C. Lukey and J. S. van Deventer. 2005. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. *Chemistry of materials*, 17(12): 3075-3085. <https://doi.org/10.1021/cm050230i>.
 34. Prusty, J. K. and B. Pradhan. 2020. Multi-response optimization using Taguchi-Grey relational analysis for composition of fly ash-ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* 241: 118049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118049>.
 35. Rafeet, A., R. Vinai, M. Soutsos and W. Sha. 2017. Guidelines for mix proportioning of fly ash/GGBS based alkali activated concretes. *Construction and Building Materials* 147: 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.036>.
 36. Ranjan, G., R. Vasani and H. Charan. 1996. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical Engineering* 122(6): 419-426. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:6\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:6(419)).
 37. Revathi, T. and R. Jeyalakshmi. 2021. Fly ash-GGBS geopolymer in boron environment: a study on rheology and microstructure by ATR FT-IR and MAS NMR. *Construction and Building Materials* 267: 120965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120965>.
 38. Saha, S. and C. Rajasekaran. 2017. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 146: 615-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139>.
 39. Samantasinghar, S. and S. P. Singh. 2018. Effect of synthesis parameters on compressive strength of fly ash-slag blended geopolymer. *Construction and Building Materials* 170: 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.026>.
 40. Singh, B., M. R. Rahman and R. Paswan. 2016. Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* 118: 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008>.
 41. Türkmen, İ., R. Gül and C. Çelik. 2008. A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. *Building and Environment* 43(6): 1127-1137. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.005>.
 42. Widodo, T. 2021. Performance of soil composite cement base layers with additive matos soil stabilizer on suka bumi-kedang ipil road section kutai kertanegara East Kalimantan Indonesia. in *Proceedings of the International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6311-3_52.
 43. Yetgin, Ş., Ö. Çavdar and A. Cavdar. 2008. The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials* 22(3): 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>.

44. Yoon, Y. W., S. H. Cheon and D. S. Kang. 2004. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands. *Geotextiles and Geomembranes* 22(5): 439-453. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2003.12.002>.
45. Zhang, D.-w., L. Chen and S.-y. Liu. 2012. Key parameters controlling electrical resistivity and strength of cement treated soils. *Journal of Central South University* 19(10): 2991-2998. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1368-8>.
46. Zhang, Z., J. L. Provis, A. Reid and H. Wang. 2014. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials* 56: 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>.
47. Zhongcheng, M. and W. Lan. 2011. Technical Progress of Emission-reduction and Utilization of Carbon Dioxide in Cement Industry. *Materials Review* 25(19): 150-154.

Increase of Resistance Parameters of Clay Soils in East Isfahan by Geopolymer Process and Reinforced with Polypropylene Fibers and Comparison with Soil Stabilization with Cement

E. Masoumi¹, R. Ajalouian^{1,2*}, A. A. Nourbakhsh^{1,3} and M. Bayat¹

(Received: August 10-2021 ; Accepted: November 21-2021)

Abstract

Since clay is widely used in most construction projects, the issue of improving clay soils has considerable importance. This study aimed to optimize the variables affecting the properties of geopolymer and improve their mechanical properties using Isfahan blast furnace slag. Taguchi's statistical design method was used to model three process variables (blast furnace slag, water, and alkali sodium hydroxide agent) with four different values in the mixing design. Geopolymer was used to optimize the uniaxial compressive strength. Sixteen geopolymer compositions determined by mini-tab software were prepared and their uniaxial compressive strength was measured. The obtained results were modeled by analysis of variance, and then the interactions of the three variables on the uniaxial compressive strength of geopolymer were investigated using two and 3D diagrams. Then, the variables were optimized and the proposed values for the optimal sample were examined at temperatures of 25, 50, and 70°C and at times of 3, 7, 14, and 28 days of operation. A comparison of the results predicted by the models and the results of the experiments confirmed the validity of the models. Also, the scanning electron microscopy (SEM) images showed that the porosity will reduce from 7 to 28 days. It indicated that the use of the geopolymerization method has a significant role in stabilizing weak clay soils with low plasticity. The effect of fibers and geopolymer to reinforce was also investigated and for better evaluation, it was compared with soil stabilization with Portland cement. The results showed that in the most optimal geopolymer composition, the bearing resistance of clay has increased by more than 3400%. Meanwhile, fibers along with geopolymer with optimal percentage and length (0.1% by weight of geopolymer composition and length of 12 mm) were able to increase the uniaxial compressive strength of clay by nearly 4000%, which shows the excellent effect of using cellular fibers parameter with the geopolymer in this research.

Keywords: Soil stabilization, Unrestricted compression test (UCS), Low-plastic clay, Blast furnace slag, Taguchi method, Scanning electron microscope (SEM)

1. Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2. Department of Geology, Faculty of Basic Science, Isfahan University, Isfahan, Iran.

3. Department of Ceramic, Faculty of Materials, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: rasajl@sci.ui.ac.ir