کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن، آهک و پودر سنگ ضایعاتی برای تثبیت خاک رسی

نادر عباسی[1*]، آرش حیدری پاکرو[2] و رضا بهراملو[3]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۷)

چکیده

استفاده از مواد افزودنی به‌عنوان اصلاح‌کننده ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک‌ها یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تثبیت و بهسازی خاک است که از دیرباز نیز مورد توجه بوده است. با اضافه‌کردن یک یا چند ماده افزودنی به خاک و انجام تمهیدات مورد نیاز، در اثر وقوع واکنش‌های شیمیایی ویژگی‌های مهندسی خاک بهبود می‌یابد. انتخاب نوع و میزان ماده افزودنی، بستگی به عواملی متعددی نظیر؛ نوع خاک، هدف تثبیت، ویژگی ذاتی مواد افزودنی، و ... داشته و در هر پروژه‌ای با توجه جنبه‌های فنی و اقتصادی قابل بررسی و تعیین است. در این تحقیق، اثر کاربرد همزمان سه نوع افزودنی شامل؛ آهک، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری تک‌محوری یک نوع خاک رسی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چهار سطح مختلف آهک (۰، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی خاک) و چهار سطح متفاوت پودر سنگ ضایعاتی (۰، ۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک) و با درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن در پنج سطح (۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی خاک) به یک خاک رسی با خاصیت خمیری زیاد (CH) افزوده شد. سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های مختلف شامل خواص پلاستیسیته، خصوصیات تراکمی و مقاومت فشاری تک‌محوری آنها تعیین شد. نتایج نشان داد که تثبیت نمونه‌ها با آهک و پودر سنگ ضایعاتی و مسلح کردن آنها با الیاف پلی‌پروپیلن ضمن تأثیر بر حدود آتربرگ، موجب کاهش رطوبت بهینه تراکم و وزن واحد حجم خشک بیشینه آنها می‌شود. همچنین افزودن همزمان سه ماده پودر سنگ ضایعاتی، آهک و الیاف پلی‌پروپیلن با ترکیب به‌ترتیب ۵، ۵ و ۱ درصد وزنی خاک باعث افزایش ۸ برابری مقاومت فشاری خاک تیمار شده نسبت به خاک شاهد شد. علاوه بر این زمان عمل‌آوری نیز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌های تیمار شده داشت. به‌طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه حدود دو برابر مقاومت نمونه‌های ۷ روزه بوده است.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، تراکم هاروارد، سازه‌های آبی، خواص مهندسی خاک، مقاومت فشاری

۱. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲. گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی
۳. تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nader_iaeri@yahoo.com

مقدمه

ضعیف بودن خواص مکانیکی نظیر ظرفیت باربری و مقاومت فشاری خاک‌های رسی و همچنین ناشناخته بودن برخی دیگر از خواص فیزیکی و مکانیکی آنها باعث ایجاد مشکلات جدی در پروژه‌های عمرانی به‌ویژه سازه‌های آبی احداث شده روی این خاک‌ها می‌شود. نظر به برنامه‌های توسعه‌ای کشور در احداث پروژه‌های زیربنایی نظیر شبکه‌های آبیاری و زهکشی و وجود چنین خاک‌هایی در نقاط مختلف کشور، بهسازی و تقویت خواص آنها به‌منظور کاهش هزینه‌های اجرایی در مرحله ساخت و هزینه‌های بهره‌برداری پس از ساخت امری ضروری بوده و به‌عنوان راهکار مناسب برای جلوگیری از مشکلات احتمالی است. در سال‌های اخیر با گسترش احداث پروژه‌های عمرانی از جمله شبکه‌های آبیاری و زهکشی، مشکلات متعددی نیز نظیر نشست بستر سازه‌های توزیع و انتقال آب و تخریب پوشش بتنی کانال‌های آبیاری به‌وجود آمده است. تحقیقات متعدد انجام شده در این خصوص نشان داده است که علت اصلی این مشکلات توجه نکردن به مسائل ژئوتکنیکی بستر و خواص مهندسی خاک‌ها بوده است (۱ و ۱۵). از این‌رو تثبیت و بهسازی خاک‌های سست و ضعیف بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

تثبیت و یا بهسازی خاک یک اصطلاح کلی است که برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا ترکیبی از آنها که برای بهبود خواص خاک به‌کار می‌رود، اطلاق می‌شود (۱۶). از جمله روش‌های اصلاح و تثبیت خاک می‌توان به اقداماتی نظیر؛ تراکم، تسلیح، کنترل زهکشی، افزودن مواد شیمیایی، طبیعی یا ترکیبی از هر نوع روش فیزیکی و شیمیایی اشاره کرد (۱۴). بهبود خواص خاک ممکن است برحسب نیاز به‌منظور تقویت مشخصه خاصی از خاک نظیر؛ کنترل نشست، افزایش مقاومت فشاری و یا بهبود مقاومت در برابر نیروهای محیطی صورت گیرد. بهبود ویژگی‌های خاک ممکن است برحسب نیاز در پروژه‌های عمرانی به‌منظور افزایش میزان باربری خاک، افزایش مقاومت فشاری، کاهش نشست، مقاومت در مقابل فرسایش به‌کار رود. تاکنون از مواد و افزودنی‌های بسیار متنوعی از جمله آهک، سیمان، مواد شیمیایی و پلیمری برای تثبیت خاک استفاده شده است (۱۰ و ۱۱). البته عوامل مختلفی در تعیین نوع ماده افزودنی برای تثبیت خاک مؤثر است. نوع خاک و عناصر شیمیایی موجود در خاک نقش بسیار مهمی در این خصوص دارد (۲). تاکنون از مواد طبیعی و مصنوعی متعددی برای بهسازی خاک استفاده شده است. این مواد دارای طیف وسیعی از نظر جنس، شکل و ویژگی‌های رفتاری هستند. این مواد می‌توانند از ساده‌ترین ماده مثل خاک طبیعی، آهک، سیمان و مواد پوزولانی تا جدیدترین فناوری‌ها نظیر پلیمرهای شیمیایی، مواد نانویی و حتی پسماندهای کارخانه‌های مختلف متفاوت باشند. امروزه استفاده مجدد از مواد و مصالح ضایعاتی صنعتی و معدنی که به بازیافت مشهور است به‌دلیل حفظ منابع اقتصادی و زیست‌محیطی همواره مورد توجه پژوهشگران و متخصصین ژئوتکنیک کشور قرار گرفته است.

نوروزیان و همکاران (۱۳) با بررسی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب روی مقاومت فشاری خاک رسی نشان دادند افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی سبب افزایش حدود پنج برابری مقاومت فشاری در حالت اشباع و ۱/۵ برابری آن در حالت رطوبت طبیعی می‌شود. کریمی و همکاران (۹) تأثیر کاربرد خاکستر لجن فاضلاب نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خاکستر باگاس نیشکر و آهک به خاک رسی، وزن واحد حجم خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. ترکیب ۸ درصد خاکستر باگاس نیشکر با خاک رسی، باعث افزایش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری خاک شده است. عباسی و همکاران (۳) نشان دادند با افزودن نانو رس به خاک می‌توان خاک را تثبیت و پتانسیل واگرایی آن را به میزان زیادی کاهش داد. عباسی و مهدیه (۴) نشان دادند

افزایش آهک و پوزلان به‌تنهایی و توأمان به‌طور معنی‌داری باعث تقویت خواص و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود ولی تأثیر کاربرد توأم آنها بسیار چشمگیر بوده به‌طوری که امکان افزایش مقاومت فشاری تا ۱۶ برابر خاک طبیعی وجود دارد. پودر سنگ ضایعاتی نیز یکی از مصالح و پسماندهای کارگاه‌های سنگبری است که به‌هنگام برش سنگ‌های معدنی شمش و تبدیل آن به قطعات کوچک‌تر به وجود می‌آید. به‌طوری که در معادن و صنایع سنگبری حدود ۳۰ درصد از سنگ شمش معدنی به شکل پودر از آن جدا شده و با آبی که برای خنک کردن تیغه‌های الماسی استفاده می‌شود، ترکیب شده و به‌صورت گل سنگ به‌سمت حوضچه‌های آرامش هدایت شده و پس از ته‌نشینی در این حوضچه‌ها و تخلیه آن به‌وسیله پمپ‌ها، بارگیری شده و در مکان‌های مشخص شده در طبیعت رها می‌شوند. این کار باعث ایجاد گردوغبار در منطقه و بروز مشکلات زیست محیطی دیگری می‌شود (۱۲). موسی و مگدی (۱۲) طی تحقیقی به بررسی استفاده عملی از پودر سنگ ضایعاتی یا گل سنگ در صنایع مهندسی پرداخته و اثرات پودر سنگ را بر آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم پراکتور استاندارد و مقاومت فشاری محصور نشده سه نوع خاک رس بررسی کرد. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش گفته‌شده، افزودن پودر سنگ ضایعاتی به هر سه نوع خاک رسی، اثر افزایشی بر حداکثر وزن مخصوص خشک و کاهشی بر رطوبت بهینه داشته است. همچنین افزودن پودر سنگ ضایعاتی به هر سه خاک باعث کاهش حد روانی LL و کاهش شاخص خمیری PI آنها می‌شود و در نهایت پس از ترکیب خاک‌ها با پودر سنگ مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌ها افزایش می یابد. الجولانی (۷) به بررسی عملکرد پودر سنگ و آهک بر مقاومت، ضریب CBR و مقاومت خاک پرداخته و نتیجه‌گیری کرد که با استفاده از افزودن نسبت ۳۰ درصدی پودر سنگ ضایعاتی و آهک، زاویه اصطکاک داخلی خاک در حدود ۵۰ درصد افزایش و ضریب چسبندگی خاک در حدود ۶۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین افزودن ۳۰ درصدی همزمان پودر سنگ و آهک باعث افزایش ضریب CBR از ۵/۲ درصد به ۱۶ و ۱۸ درصد می‌شود. روحبخش و کلانتری (۱۷) نشان دادند که استفاده از مخلوط آهک و پودر سنگ موجب افزایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) به‌میزان ۲۴۴ درصد و کاهش قابل توجه دامنه خمیری خاک رسی می‌شود. همچنین در این مطالعه مشخص شد افزودن توأمان آهک و پودر سنگ به ترتیب به‌میزان ۷ و ۹ درصد وزنی، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده به‌میزان ۲/۲ برابر نسبت به نمونه تیمار شده تنها با آهک می‌شود. علاوه بر این در این مطالعه افزایش مدول الاستیسیته نمونه تثبیت شده با آهک و پودر سنگ و درنتیجه ترد و شکننده بودن آن به‌عنوان نقطه ضعف تثبیت خاک با ترکیب آهک و پودر سنگ معرفی شد (۱۷).

سیوریکایا و کاراکا (۱۸) طی پژوهش خود با عنوان بازیافت ضایعات برش خورده سنگ‌های طبیعی برای ایجاد ثبات خاک رسی به بررسی تثبیت خاک‌های رسی با انواع پودر سنگ‌های تراورتن، مرمر دولومیتی وگرانیتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر سنگ ضایعاتی باعث افزایش وزن واحد حجم، کاهش حد روانی و شاخص خمیرایی و نیز افزایش حد خمیری می‌شود. کای و همکاران(۸) طی تحقیق خود، پیشنهاد به‌کار بردن الیاف پلی‌پروپیلن به‌منظور کاهش اثر شکنندگی خاک تثبیت شده به‌وسیله آهک را اعلام کردند. آنها با استفاده از ترکیب سه سطح آهک ۲ ،۵ و ۸ درصد وزنی خاک و سه سطح از الیاف پلی‌پروپیلن ۰/۲۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۵ درصد وزنی خاک به انجام آزمایش‌های مورد نظر خود پرداختند. آنها در این تحقیق با تقسیم‌بندی ۹ گروه فیبر- آهک برای تیمار خاک طی سه دوره زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به تأثیر این ترکیبات با خاک بر مقاومت فشاری محصور نشده پرداخته و با بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده به این

نتیجه رسیدند که بیشترین حد مقاومت برابر ۰/۸۸ مگاپاسکال برای نمونه ۲ درصد آهک + ۵ درصد الیاف بوده که ۹/۸۰ برابر نمونه تثبیت نشده آن است. عبدی و رهبر (۶) طی تحقیقی به بررسی اثر همزمان تثبیت خاک‌های رسی با آهک و تسلیح شده با الیاف بر مقاومت کششی و فشاری پرداختند. ایشان در این تحقیق از کائولنیت به‌عنوان خاک ریزدانه و سه سطح ۱، ۳ و ۵ درصدی آهک و هفت سطح ۰/۰۵، ۰/۱ ،۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ درصدی الیاف پلی‌پروپیلن و سه زمان عمل‌آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه استفاده کردند. آزمایش‌ها بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری با سرعت ۰/۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و به‌صورت کنترل کرنش انجام شده است. در نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه حداقل مقاومت فشاری برای آهک ۱ درصد، ۹۶۲/۸ کیلوپاسکال و حداکثر مقاومت برای نمونه با ۵ درصد آهک و ۰/۳۵ درصد الیاف، ۲۰۶۰ کیلوپاسکال به‌دست آمده که به‌ترتیب بیانگر افزایش ۱۰۰ و ۳۲۹ درصدی بوده است.

با عنایت به موارد عنوان شده و نظر به محدود بودن نتایج تحقیقات انجام شده درخصوص تأثیر توأمان تسلیح و تثبیت خاک، تحقیق در این خصوص ضروری به‌نظر می‌رسید. لذا این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر توأمان تسلیح با الیاف پلی‌پروپیلن و تثبیت با آهک و پودر سنگ ضایعاتی بر مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های رسی با خمیرایی زیاد و با درنظر گرفتن این فرضیه که افزودن آهک و پودر سنگ ضایعاتی در بهبود مقاومت فشاری خاک رس مؤثر است، انجام شد.

مواد و روش‌ها

خاک

خاک مورد آزمایش در این تحقیق از نوع خاک رس با حد خمیری زیاد (CH) بوده و از منابع قرضه مورد استفاده برای زیرسازی بستر شبکه‌های آبیاری و زهکشی در منطقه پارس‌آباد مغان در استان اردبیل برداشت شده است. آزمایش‌های شناسایی خاک شامل دانه‌بندی با الک و هیدرومتری، تراکم پراکتور استاندارد و حدود آتربرگ روی آن صورت پذیرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در جدول (۱) و نمودار دانه بندی خاک در شکل (۱) ارائه شده است. برای انجام آزمایش تراکم، خاک را از الک ۴شماره عبور داده شده و مطابق استاندارد ASTM D698 آزمایش تراکم پراکتور استاندارد روی نمونه‌ها برای به‌دست آوردن حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه انجام شد.

آهک

آهک مورد استفاده در این پژوهش آهک ساختمانی بود که قبل از استفاده از الک شماره ۴۰ (۰/۴۲ میلی‌متر) عبور و مورد آزمایش شناسایی با روش XRF قرار گرفت. این آزمایش در آزمایشگاه پرتو X سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد که نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

پودر سنگ ضایعاتی

پودر سنگ مورد استفاده در این پژوهش از پسماند حاصل از برش سنگ‌های تراورتن حاجی‌آباد محلات تهیه شد. بدین ترتیب که ابتدا پودر سنگ از پای دستگاه برش به‌صورت همراه با آب سیستم خنک کننده خارج و در یک حوضچه جمع‌آوری می‌شود. در این پژوهش از مصالح خشک شده حوضچه رسوب لجن پودر سنگ یک کارگاه سنگبری در منطقه اندیشه کرج نمونه‌برداری شد. این مصالح پس از عبور دادن از الک شماره ۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. پودر سنگ مورد استفاده در این پژوهش نیز مورد آزمایش شناسایی با روش XRF قرار گرفت. این آزمایش در آزمایشگاه پرتو X سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد که نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده

الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی در این پژوهش از شرکت تولیدی

الف) دستگاه تراکم هاروارد

ب) نمونه ساخته شده با قالب تراکم هاروارد

ج) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد استفاده

شکل ۱. تجهیزات ساخت و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱. مشخصات فیزیکی- شیمیایی خاک رس مورد استفاده

مشخصات خاک	مشخصات تراکمی		حدود آتربرگ			مشخصات شیمیایی	
واحد	وزن واحد حجم خشک بیشینه (g/cm^3)	رطوبت بهینه	حد روانی LL	حدخمیری PL	شاخص خمیری	حد انقباض SL	pH	EC (dS/m)
مقادیر	۱/۴۶	۲۵	۵۹	۲۹	۳۰	۱۵/۷۰	۸/۶۰	۸/۸۷

جدول ۲. مشخصات درصدهای عناصر موجود در آهک مورد استفاده

نام ماده	ناخالصی‌ها	L.O.I	AL_2O_3	Mgo	Cao	Sio_2
آهک	۰/۴	۲۷	۰/۴	۵/۳	۶۵/۳	۱/۶
پودر سنگ	۱/۷	۳۸/۱	۱/۹	۰/۸	۴۹/۲	۸/۳

میسون (سهام عام) تهیه شد که دارای مشخصاتی مطابق جدول (۳) است. این الیاف در طول‌های مختلف و در بسته‌های ۲۵ کیلوگرمی به بازار عرضه می‌شوند که در این پژوهش از الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر استفاده شده است.

روش ساخت نمونه‌های آزمایشی

با توجه به اینکه در این پژوهش برای ارزیابی اثر مواد افزودنی بر کیفیت خاک تثبیت شده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری استفاده شده است، برای ساخت

جدول ۳. ویژگی‌های الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده

مشخصات	رنگ ظاهری	طول (m)	قطر (میکرون)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت در برابر اسید، باز و نمک‌ها
مقدار	سفید	۱۲	۲۳	۴۰۰	۰/۹۱	بسیار زیاد

نمونه‌های آزمایشی از قالب تراکم هاروارد، که دارای ابعاد مشابهی با نمونه آزمایشی مورد نیاز برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری است، استفاده شد. بدین ترتیب که ترکیب مورد نظر پس از اختلاط کامل با رطوبتی معادل رطوبت بهینه تراکم و با انرژی معادل با انرژی تراکم استاندارد پراکتور در قالب متراکم شدند. مطابق شکل (۱ – الف)، دستگاه تراکم هاروارد دارای یک وزن چکش به وزن ۵۲۸ گرم، یک قالب استوانه‌ای به قطر ۳/۵ و ارتفاع ۷ سانتی‌متر است. با استفاده از این دستگاه برای حصول انرژی معادل انرژی پراکتور استاندارد نمونه خاک و یا مخلوط خاک با مواد افزودنی، در ۵ لایه و هر لایه با ۱۶ ضربه چکش متراکم می‌شود (۵ و ۱۳)

در این پژوهش، برای ساخت نمونه‌های آزمایشی حاوی خاک، آهک، پودر سنگ ضایعاتی و الیاف پلی‌پروپیلن، ابتدا پودر سنگ ضایعاتی به‌صورت خشک با خاک مخلوط، سپس آهک خشک به ترکیب آنها افزوده شد. سپس با پهن کردن مقداری از الیاف پلی‌پروپیلن روی خاک، بخشی از رطوبت بهینه مورد نیاز به‌آرامی و تا حدی که الیاف کاملاً در خاک پخش شده و به‌هم نچسبند، اضافه شد. این عمل تا پایان یافتن الیاف تعیین شده در ترکیب تکرار شد. در هر تکرار با دو کاردک ترکیب فوق را تا حدی که الیاف و رطوبت کاملاً در همه نقاط ترکیب به‌صورت یکسان پخش شود، به‌هم زده شد. علت اضافه کردن تدریجی آب و اختلاط لایه به لایه مواد این بود که درصورت افزودن یکباره آب، الیاف به‌جای چسبیدن به خاک و آهک به یکدیگر چسبیده و سبب غیریکنواختی مخلوط می‌شود. پس از اختلاط کامل مواد به خاک و به‌منظور تعیین مقاومت فشاری مخلوط‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از قالب استاندارد تراکم هاروارد تهیه شد. سپس نمونه‌های تهیه شده برای حفظ رطوبت و عمل‌آوری در داخل نایلونی پیچیده و علامت‌گذاری شد. نمونه‌ای از نمونه آزمایشی ساخته شده در شکل (۱– ب) نشان داده شده است.

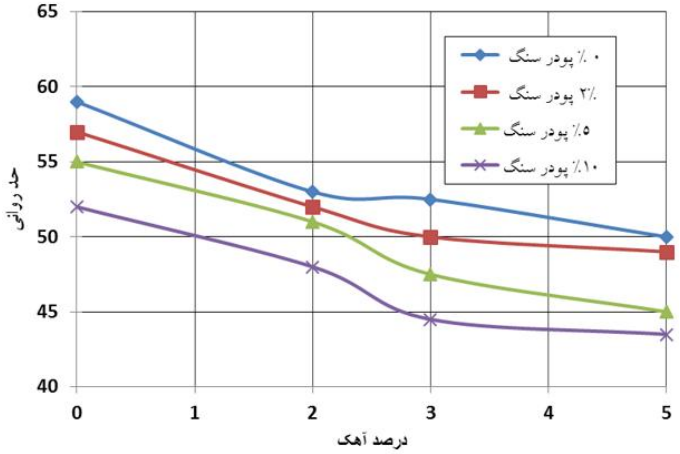
آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

برای انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها پس از طی سن عمل‌آوری از پوشش نایلونی خارج و پس از توزین و یادداشت مشخصات ظاهری، در دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. در این پژوهش آزمایش به شیوه کرنش کنترل‌شونده و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفته و بر طبق استاندارد ASTM D2166-98 انجام شد. شکل (۱– ج) دستگاه آزمایش تک‌محوری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

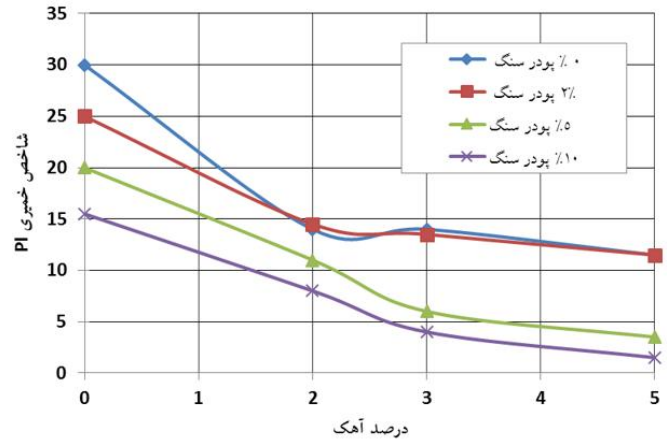
نتایج و بحث

بررسی تأثیر افزودن مخلوط آهک و پودر سنگ ضایعاتی بر خواص پلاستیسیته

برای بررسی تأثیر افزودن مخلوط آهک و پودر سنگ ضایعاتی بر خواص پلاستیسیته از آزمایش حدود آتربرگ استفاده شد. نتیجه آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ روی نمونه‌های حاوی آهک و پودر سنگ ضایعاتی در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. بر اساس نمودارهای شکل (۲) ملاحظه می‌شود که هرچه مقادیر آهک و پودر سنگ در نمونه‌ها افزایش یافته، از مقدار حد روانی آنها کاسته شده است. همچنین در شکل (۳)



شکل ۲. نمودار تأثیر مقدار آهک به‌ازای سطوح مختلف مخلوط پودر سنگ بر حد روانی

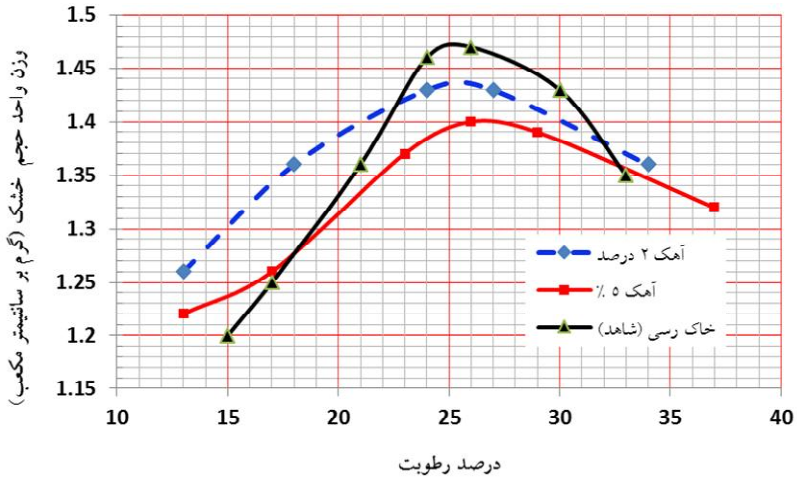


شکل ۳. نمودار تأثیر مقدار آهک به‌ازای سطوح مختلف مخلوط پودر سنگ بر شاخص خمیری

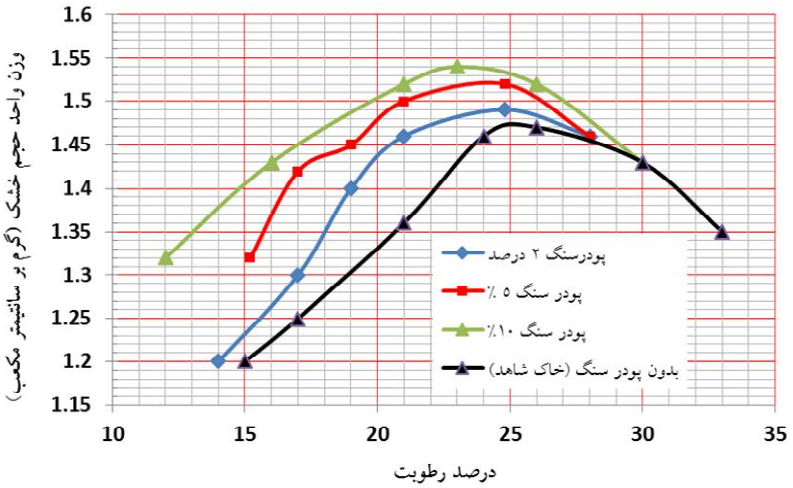
تأثیر سطوح مختلف آهک و پودر سنگ بر شاخص خمیری نمونه‌ها ارائه شده است. بر اساس این نمودار ملاحظه می‌شود که هر چه مقادیر آهک و پودر سنگ در نمونه‌ها افزایش یافته، شاخص خمیری (PI) نیز کاهش یافته است. مطابق این نمودار با اختلاط ۵ درصد آهک و ۱۰ درصد پودر سنگ به خاک شاهد ، شاخص خمیری آن از حدود ۳۰ درصد به کمتر از ۵ درصد تقلیل می‌یابد.

بررسی تأثیر افزودن مخلوط آهک، الیاف پلی‌پروپیلن و پودر سنگ ضایعاتی بر مشخصات تراکمی

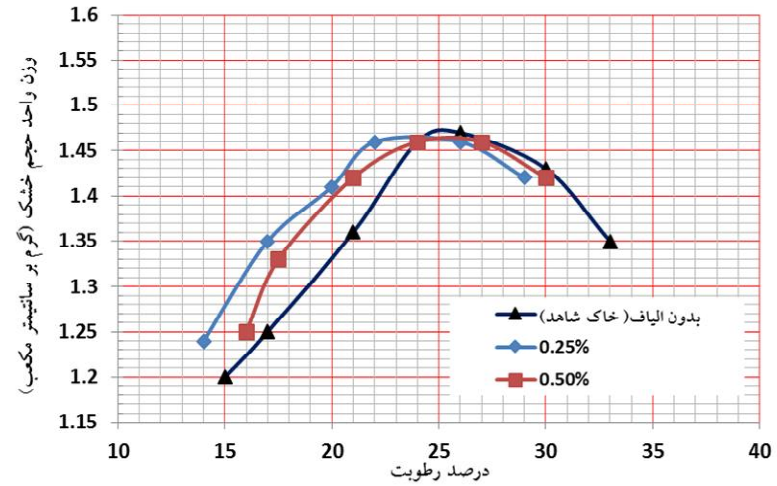
تأثیر افزودن آهک ، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن بر پارامترهای تراکمی خاک یعنی وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌شود که افزودن آهک به خاک، به‌دلیل قابلیت جذب آب بیشتر آهک نسبت به خاک، رطوبت بهینه خاک را اندکی افزایش و وزن واحد حجم خشک بیشینه را کاهش می‌دهد (شکل ۴- الف). در حالی که افزودن پودر سنگ و الیاف به‌دلیل قابلیت جذب آب کمتر آنها نسبت به خاک رسی تا حدودی رطوبت بهینه را کاهش و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را افزایش می‌دهند (شکل ۴- ب و ۴- ج). با توجه به شکل‌ها، رطوبت بهینه مخلوط‌های مختلف در دامنه ۲۳ تا ۲۶ درصد متغیر است. از آنجایی که در عمل تهیه نمونه خاک با رطوبتی دقیقاً برابر با رطوبت بهینه حاصل از آزمایش میسر نیست، معمولاً در



الف) تأثیر آهک بر مشخصات تراکمی



ب) تأثیر پودر سنگ بر مشخصات تراکمی



ج) تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات تراکمی

شکل ۴. تأثیر سطوح مختلف آهک، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات تراکمی خاک

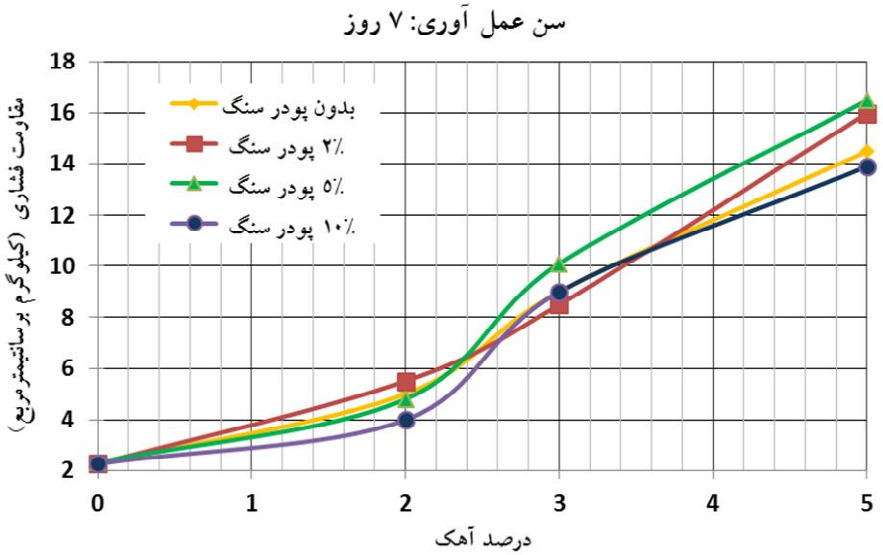
پروژه‌های مربوط به عملیات خاکی برای رطوبت بهینه رواداری حدود ۲ درصد مجاز شناخته می‌شود. در این پژوهش نیز با درنظر گرفتن این موضوع رطوبت بهینه همه مخلوط‌ها مقداری متوسط و معادل رطوبت بهینه خاک رس یعنی ۲۵ درصد درنظر گرفته شد. این موضوع با نتایج تحقیقات مشابه انجام شده نیز مطابقت دارد (۹ و ۱۳).

مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده با آهک و پودر سنگ ضایعاتی

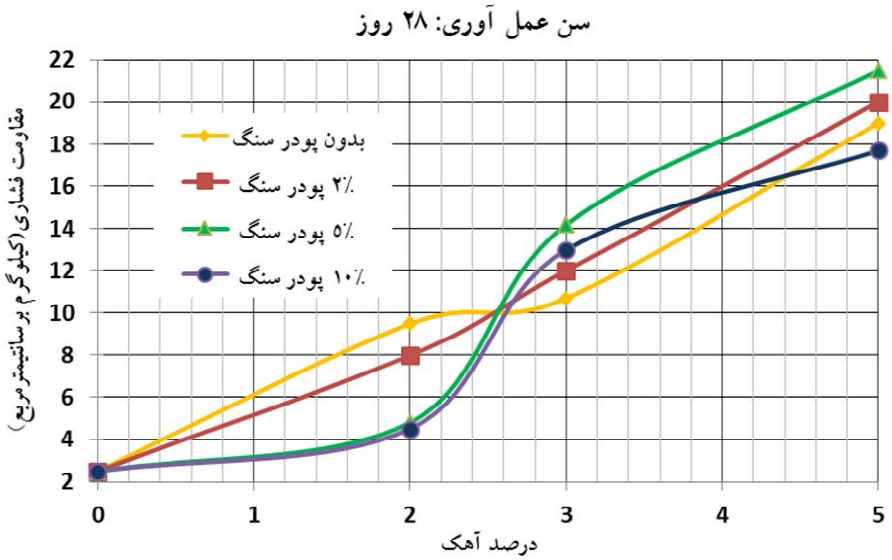
نتایج حاصل از بررسی‌های مربوط به تأثیر افزودن آهک و پودر سنگ ضایعاتی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، در نمونه‌های ساخته شده با مقدار آهک تا ۲ درصد وزنی خاک، افزودن پودر سنگ ضایعاتی تا سطح ۲ درصد وزنی تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته ولی در بلندمدت و با شروع فرایند پوزولانی افزایش مقدار پودر سنگ ضایعاتی در ترکیب نمونه‌ها باعث کاهش مقدار مقاومت فشاری شده است. دلیل آن پایین بودن درصد آهک موجود در ترکیب نمونه‌ها در مقابل این حجم از پودر سنگ است. با افزایش سطح آهک تا ۳ درصد وزنی مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها تا اختلاط همزمان پودر سنگ تا سطح ۵ درصد وزنی افزایش می‌یابد که این افزایش مقاومت در نمونه‌های عمل‌آوری شده در مدت ۲۸ روز به‌علت ایجاد فرایند پوزولانی آهک با ذرات خاک رس است. با بیشتر شدن درصد پودر سنگ از مقدار ۵ درصد وزنی دچار افت مقاومت فشاری در هر دو شکل (۵) و (۶) می‌شود. علت آن وجود بیش از اندازه حجم ذرات پودر سنگ در ترکیب نمونه‌ها است. با افزودن درصد بیشتر از آهک در ترکیب نمونه‌های ساخته شده از سطح ۳ درصد به ۵ درصد وزنی مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقدار افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ روزه برابر ۶۵ درصد به‌دست آمده است. علت آن افزایش حجم فعل و انفعالات شیمیایی آهک با خاک رس و همچنین افزایش تبادلات کاتیونی در کوتاه‌مدت است. در مورد نمونه های ۲۸ روزه، به‌دلیل توسعه فرایند پوزولانی آهک با ذرات خاک با افزایش مقدار درصد آهک، تشکیل ژل سیمانته که خود مانند محصولات سیمانی دارای خواص چسبندگی بالا بوده و پیوند ذرات رس را به یکدیگر بیشتر کرده است. تشکیل این ژل باعث رشد ۸۰ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۳ درصد وزنی می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود افزودن پودر سنگ ضایعاتی تا سطح ۵ درصد وزنی باعث رشد ۱۳درصد مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه می‌شود. دلیل این افزایش این است که استفاده از ذرات پودر سنگ باعث افزایش وزن واحد حجم خشک، که خود عامل مقاومتی است، و درنهایت رشد مقاومت فشاری شده است. با افزایش درصد اختلاط پودر سنگ ضایعاتی به مقادیر بیش از ۵ درصد باعث افت مقاومت فشاری می‌شود که علت آن وجود بیش از اندازه ذرات پودر سنگ ضایعاتی که در اصل فاقد هر گونه چسبندگی بوده و از میزان چسبندگی ایجاد شده توسط آهک نیز می‌کاهد (شکل ۷). بررسی نمودارها نشان از تأثیر پودر سنگ ضایعاتی در افزایش میزان مقاومت فشاری خاک دارد. حداکثر مقدار افزایش مقاومت، رشدی در حدود ۱۲/۵۰ درصد در نمونه حاوی الیاف، آهک و پودر سنگ به‌ترتیب برابر با صفر، ۵ و ۵ درصد برای هر دو مدت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به مقاومت فشاری خاک شاهد را ایجاد کرده است.

تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان تسلیح‌کننده بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد آهک در مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به‌ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های



شکل ۵. منحنی‌های تأثیر همزمان پودر سنگ و آهک بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه

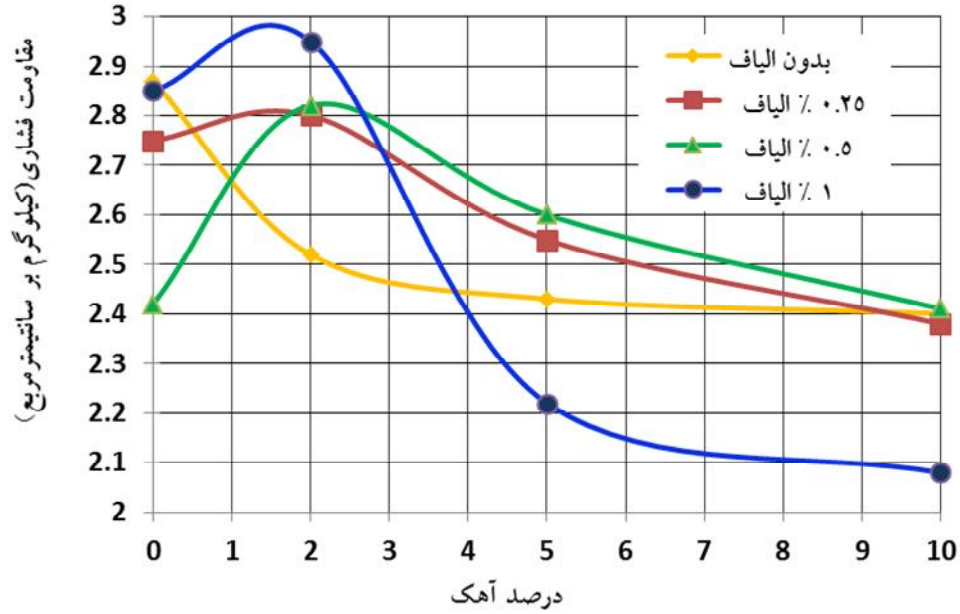


شکل ۶. منحنی‌های تأثیر همزمان پودر سنگ و آهک بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه

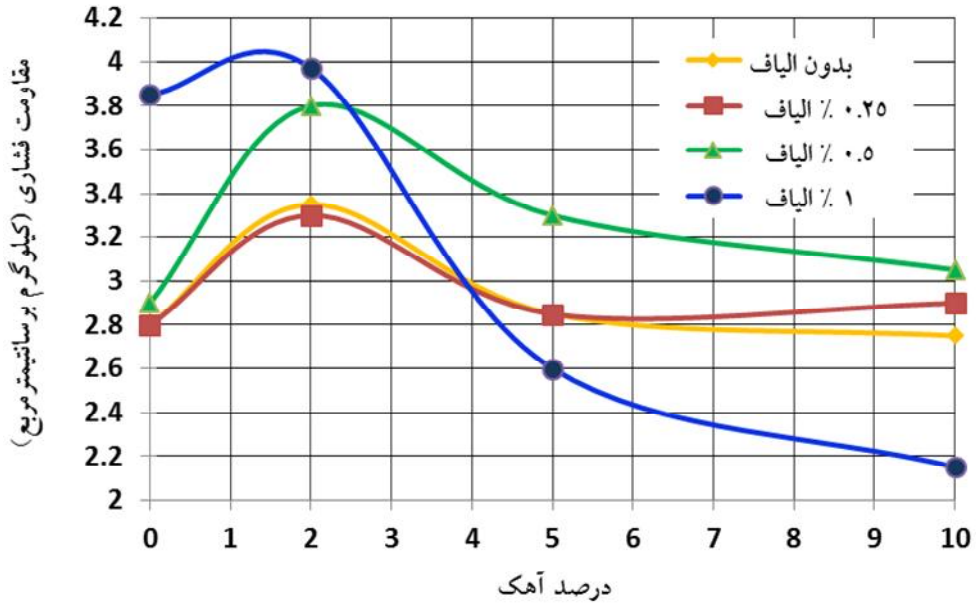
گفته‌شده به‌وضوح می‌توان مشاهده کرد که مخلوط خاک – پودر سنگ و خاک- پودر سنگ- الیاف طی زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و بدون به‌کارگیری آهک نتوانسته افزایش محسوسی را در مقاومت فشاری نمونه‌ها ایجاد کند. به عبارتی دیگر این مواد به‌دلیل نداشتن خاصیت چسبانندگی نه تنها افزایش در مقاومت فشاری نداشته‌اند بلکه موجب کاهش چسبندگی ذرات رسی تا حدودی موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های تیمار شده می‌شوند.

بررسی تأثیر توأمان سه ماده آهک، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری

همان‌طور که در بخش‌های قبلی به تفصیل بیان شد، مصالح پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن به‌تنهایی تأثیری در مقاومت فشاری نداشته و یا حتی موجب کاهش آن می‌شوند. ولی



شکل ۷. نمودار تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد آهک در مدت عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۸ . نمودار تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد آهک در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه

افزودن آهک به‌دلیل خاصیت چسبانندگی به‌تنهایی موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. همچنین ملاحظه شد کاربرد توأمان این مصالح تأثیر مضاعفی بر مقاومت فشاری دارند. به طوری که مخلوط آهک و پودر سنگ موجب تثبیت و الیاف پلی‌پروپیلن نیز موجب تسلیح مخلوط و در مجموع افزایش مشخصات فنی و مقاومت فشاری خاک می‌شوند. بر این اساس و با توجه به نتایج آزمایش‌های مختلف ترکیب بهینه مخلوط برای کسب میزان مقاومت فشاری حداکثری شامل ۵

درصد آهک، ۵ درصد پودر سنگ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن تعیین شد. زمان عمل‌آوری نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است به‌طوری که با کاربرد توأمان سه ماده و در ترکیب بهینه آنها یعنی ۵ درصد آهک، ۵ درصد پودر سنگ و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به‌ترتیب حدود ۸ و ۷ برابر افزایش می‌یابد.

این موضوع با یافته‌های سایر پژوهشگران تا حدودی مطابقت دارد. به‌طوری که افزودن پوزولان‌های مختلف در کنار آهک موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. میزان افزایش مقاومت فشاری با افزودن خاکستر لجن فاضلاب و آهک سبب افزایش حدود ۵ برابری مقاومت فشاری (۱۳) و با کاربرد آهک و پوزولان طبیعی (۴) سبب افزایش حدود ۱۶ برابری مقاومت فشاری شده است. در پژوهش مشابه انجام شده که طی آن تنها از آهک و پودر سنگ استفاده شده است، افزودن ۷ درصد وزنی آهک و ۹ درصد وزنی پودر سنگ ضایعاتی به خاک موجب افزایش حدود ۲ برابری در مقاومت فشاری شده است (۱۶). درحالی که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با به‌کارگیری عمل تسلیح (الیاف پلی‌پروپیلن) در کنار عوامل تثبیت (پودر سنگ و آهک) اثربخشی بهسازی به‌مراتب بیشتر و تا ۸ برابر خاک طبیعی افزایش داشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت کابرد سه ماده آهک، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن به‌لحاظ تثبیت و تسلیح همزمان اثربخشی زیادی در بهسازی خاک‌های رسی داشته و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه در اصلاح و بهسازی خاک‌های ضعیف رسی در اغلب پروژه‌های عمرانی به‌ویژه بستر کانال‌های انتقال آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از پودر سنگ ضایعاتی علاوه بر بهبود خواص خاک و جایگزینی با مصالح گران‌قیمت‌تری مثل سیمان و آهک و اقتصادی کردن پروژه‌ها، تأثیر مثبتی نیز در مدیریت پسماند و ضایعات کارخانه‌های سنگبری که اثرات سوء زیست محیطی را به‌دنبال دارند، خواهد گذاشت.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از مجموع بررسی‌های به‌عمل آمده و آزمایش‌های انجام شده نتیجه‌گیری‌های زیر قابل استنتاج هستند:

۱) آهک و پودر سنگ موجب کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری و درنتیجه خاصیت خمیرایی خاک می‌شوند. لذا در مواقعی که خمیرایی زیاد باعث بروز مشکلاتی است می‌توان با افزودن پودر سنگ به خاک خاصیت خمیرایی خاک را کاهش داد.

۲) پودر سنگ با کاهش درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک خاک موجب بهبود مشخصات تراکمی می‌شود. لذا می‌توان از این ماده ضایعاتی برای بهبود کیفیت تراکم در اغلب پروژه‌های عمرانی استفاده کرد.

۳) حداکثر میزان تأثیر مستقیم آهک در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌ازای ۵ درصد آهک رخ می‌دهد. با این مقدار آهک مقاومت فشاری ۷ روزه حدود ۴ برابر و مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدود ۵ برابر افزایش می‌یابد.

۴) پودر سنگ ضایعاتی به‌همراه آهک می‌تواند موجب افزایش میزان مقاومت فشاری شود. حداکثر مقدار افزایش مقاومت، رشدی در حدود ۱۲/۵۰ درصدی با کاربرد ۵ درصد پودر سنگ و ۵ درصد آهک بوده است

۵) تسلیح نمونه‌های تثبیت شده خاک با آهک و پودر سنگ ضایعاتی با درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن روی میزان مقاومت نمونه‌ها مؤثر است.

۶) ترکیب بهینه مخلوط برای کسب میزان مقاومت فشاری حداکثری شامل ۵ درصد آهک، ۵ درصد پودر سنگ و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن تعیین شد.

۷) استفاده توأمان سه ماده و در ترکیب بهینه آنها یعنی ۵ درصد آهک، ۵ درصد پودر سنگ و ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به‌ترتیب حدود ۸ و ۷ برابر افزایش می‌یابد.

۸) کابرد سه ماده آهک، پودر سنگ و الیاف پلی‌پروپیلن به لحاظ تبیت و تسلیح همزمان از اثربخشی زیادی در بهسازی

خاک‌های رسی دارد.

۹) پودر سنگ ضایعاتی می‌تواند به‌عنوان یک ماده ساختمانی جایگزین برای بخشی از مقدار سیمان و یا آهک در اصلاح و بهسازی خاک‌های ضعیف رسی در اغلب پروژه‌های عمرانی به ویژه بستر کانال‌های انتقال آب مورد استفاده قرار گیرد.

۱۰) استفاده از پودر سنگ ضایعاتی در پروژه بهسازی خاک علاوه بر مزیت اقتصادی، نقش مؤثری نیز در مدیریت پسماند و ضایعات کارخانجات سنگبری که اثرات سوء زیست‌محیطی را به دنبال دارند، خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

1- Abbasi, N., R. Bahramloo and M. Movahedan. 2015. Strategic planning for remediation and optimization of irrigation and drainage networks: A case study for Iran. Agriculture and Agricultural Science Procedia, Elsevier 4: 211-221. doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.025

2- Abbasi, N. and M. H. Nazifi. 2013. Assessment and modification of Sherard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 31: 337-346.

3- Abbasi, N., A. Farjad and S. Sepehri. 2017. The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. doi.org/10.1007/s10706-017-0330-9.

4- Abbasi, N. and M. Mahdieh. 2018. Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime. *International Journal of Geo-Engineering* 9(4): 1-12. https://doi.org/10.1186/s40703-018-0072-4.

5- Abedi Koupai J, K. Norouzian and N. Abbasi. 2015. Evaluation of durability and stability of clay soils stabilized using hydrated lime nearby hydraulic structures. *Journal of Water and Soil Science* 19(73): 249-261.

6- Abdi, M. R. and M. Rahbar Arbani. 2015. Investigation of the simultaneous effect of stabilization with lime and synthetic fibers on tensile and compressive strength of clay soils. 10th International Congress on Civil Engineering. Tabriz, 5-7 May 2015. (In Farsi).

7- Al-joulani, N. 2012. Effect of stone powder and lime on strength, compaction and CBR properties of fine soils. *Jordan Journal of Civil Engineering* 6(1): 1-16.

8- Cai, Y., B. Shi, Ch. W. Ng and Ch. Tang. 2006. Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87(3): 230-240. doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007.

9- Karimi, A., N. Abbasi and M. Siavoshnia. 2018. Stabilization of clayey soils using Bagasse fly ash and lime. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(1): 1-12.

10- Movahedan, M., N. Abbasi and M. Keramati. 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science* 1(2): 81-86.

11- Movahedan, M., N. Abbasi and M. Keramati. 2015. Experimental investigation of polyvinyl acetate polymer application for wind erosion control of soils. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology*) 25(3): 606-616.

12- Mousa, A and E. Magdi. 2010. The use of cutting-stone-slurry-waste in engineering practice. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences* 25(1): 29-33.

13- Nourouzian K., N. Abbasi and J. Abedinikoupaei. 2018. Use of sewage sludge ash and hydrated lime to improve the engineering properties of clayey soils. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences* 36(3): 1575-1586.

14- Rahimi H. and N. Abbasi and H. Shantia. 2011. Application of geomembrane to control piping of sandy soil under concrete canal lining (case Study: Moghan irrigation project, Iran). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 60: 330-337. DOI: 10.1002/ird.574.

15- Rahimi H. and N. Abbasi. 2007. Failure of concrete canal lining on fine sandy soils (A case study for Saveh project). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 57: 83-92. DOI: 10.1002/ird.350.

16- Rahimi, H. and N. Abbasi. 2017. Geotechnical Engineering, Problematic Soils. University of Tehran Press. 3rd Edition.

17- Roohbakhshan, A. and Kalantari, B. 2017. Stabilization of clayey soil with lime and wash stone powder. *Civil and Environmental Engineering* 48(4): 163-165

18- Sivrikaya, O. and Z. karaca. 2014. Recycling waste from natural stone processing plants to stabilize clayey soil. *Environmental Earth Sciences* 71(10): 4397-4407.

19- Zaghian, Sh., A. Hajiannia and B. Nadi. 2014. Evaluation of bearing capacity of sandy soils treated by stone powders with scrap of stony factories. 1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2-3 December 2014. University of Shahid Rajaee. Tehran, Iran. (In Farsi).

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 2, Summer 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Application of Polypropylene Fibers, Lime and Stone Powder Waste on the Stabilization of Clay Soil

N. Abbasi[1*], A. Heydari Pakroo[2] and R. Bahramloo[3]

(Received: December 26-2018; Accepted: December 8-2019)

Abstract

The use of additives to modify the physical, chemical and mechanical properties of soil and soil stabilization is one of the most common methods that have a history. By adding one or more additives to the soil and carrying out the required measures, the engineering properties of soils could be improved due to chemical reactions. Selecting the type and amount of additive depends on several factors such as: soil type, stabilization purpose, additives inherent characteristics, etc.; these are determined based on the technical and economic aspects of the projects. In this study, the effects of the simultaneous use of three types of additives including lime, stone powder and polypropylene fibers on the unconfined compressive strength of a clayey soil were investigated. To do this, four different levels of lime (0, 2, 3 and 5 percent by weight of soil) and four different levels of stone powder waste (0, 2, 5 and 10 percent by weight of soil) and Polypropylene fibers with different percentages in five levels of 0, 0.25, 0.5 and 1 percent by weight of soil were added into a high plastic clay soil classified as CH. Then, some physical and mechanical characteristics of different mixtures including plasticity, compaction and unconfined compressive strength were determined. The results showed that the samples were stabilized with lime and stone powder waste and reinforcement them with polypropylene fibers modified Atterberg Limits, optimum moisture and maximum dry density of the mixtures. Also, it was found that a combination of waste stone powder, lime and polypropylene fibers containing 5, 5 and 1 percent by weight of soil increased the unconfined compressive strength 8-fold, as compared to the natural soil. The curing time also had a significant impact on the compressive strength of the treated samples in which the 28-day compressive strength of was found to be about 2 times of the 7-day samples.

Keywords: Unconfined Compressive Strength, soil improvement, irrigation canal lining, Harvard compaction test

1. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.
3. Agricultural and Natural Resource Center of Hamadan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamadan, Iran.
*: Corresponding author, Email: nader_iaeri@yahoo.com