مروری بر روش‌های شیمیایی تثبیت خاک

مقاله علمی - پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
مصطفی حق طلب جورقانی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
سینا رشنو، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسندگان مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
صفحه۱۶۶-۱۵۱

چکیده

ضعف خاک در ظرفیت باربری، کمبود خواص مکانیکی مطلوب، خاصیت تورم‌زایی و ... . این مسائل و روش‌ها، ترفندهای جدیدی را نیاز داشتند که با تکامل دانش مهندسی و ظهور فناوری‌های نو در علم ژئوتکنیک به این مهم نائل آمدند. روش‌های مختلف برای بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه موردنظر جهت بهسازی، دسترسی محلی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، فاکتورهای زیست‌محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که شناخت منطقه و بررسی انواع خاک‌هایی که ایجاد مشکل می‌کنند نیز از ضرورت و اهمیت بالایی برخوردار است. در بسیاری از موارد خاک موجود در محل ساختگاه برای استفاده مناسب نیست. در این شرایط می‌توان با راهکارهای مناسبی این مشکل را رفع نمود. یکی از این راهکارها تثبیت شیمیایی خاک است. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی با ایجاد واکنش‌های شیمیایی و دگرگون ساختن ساختار و پیوند بین ذرات خاک باعث تثبیت و تقویت خاک می‌شوند. در این نوع واکنش‌ها ذرات خاک به کلی ماهیت خود را از دست داده و به ماده‌ای با مشخصات جدید تبدیل می‌شوند. در این مقاله ابتدا سعی شده است که علاوه برآشنایی با انواع خاک‌های مشکل‌ساز به بررسی مهم‌ترین روش‌های تثبیت و به سازی خاک و انواع روش‌های تثبیت شیمیایی خاک پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تثبیت شیمیایی، آنزیم، قیر، آهک و سیمان، خاکستر

۱- مقدمه

در هنگام اجرای برخی از پروژه‌ها خاک موجود در محل دارای مشخصات مناسبی برای اجرای پروژه نیست. در این شرایط می‌توان تمهیداتی به شرح زیر را مدنظر قرار داد (لینکوهی، ۱۳۹۱).

- تغییر محل پروژه
- تعویض مصالح طبیعی نامناسب پی با مصالح مناسب
- همساز کردن طراحی با شرایط نامناسب پی (پی‌های شناور، عمیق، مسطح شدن شیب‌ها و...
-اصلاح خصوصیات مهندسی خاک موجود (بهسازی خاک)

انتخاب محل مناسب برای پروژه عموماً از شرایط مناسب ژئوتکنیکی محل تبعیت نمی‌کند و در اکثر مواقع انتخاب به عوامل دیگری ازجمله نزدیک بودن به مواد اولیه، زیربناهای مناسب اقتصادی و نیروی انسانی کارآمد در محل بستگی دارد. در صورت تأمین این عوامل در محدوده جغرافیایی خاص، آنگاه می‌توان شرایط ژئوتکنیکی را در این محدوده تأثیر داد و به انتخاب محل مناسب‌تر اقدام نمود (قیاسی و همکاران۱۴۰۲،۱۴۰۱،۱۴۰۰،۱۳۹۹).

برداشت مصالح نامناسب پی و جایگزینی آن با مصالح

مناسب هنگامی عملی و میسر است که حجم عملیات تعویض کم بوده و مصالح مناسب در فاصله‌ای معقول قرار داشته باشند و در مقایسه اقتصادی با سایر گزینه‌ها در شرایط بهتری قرار گیرد. با افزایش حجم خاک نامناسب، برداشت آن در مقایسه با سایر روش‌ها غیراقتصادی‌تر می‌شود (Ghiassian, Holtz, 2017).

هماهنگ کردن طراحی با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب خاک در اکثر موارد مقدور است اما باید از نظر اقتصادی و زمانی با سایر گزینه‌ها مقایسه شود و در صورت برتر بودن انتخاب شود(لینکوهی، ۱۳۹۱). یکی از بهترین راهکارها بهسازی خاک است که در هنگام اجرای پروژه باید مورد بررسی قرار گیرد. بهسازی خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مهندسی آن برای تأمین یک رشته اهداف از پیش تعیین‌شده اطلاق می‌شود. ویژگی‌های اصلی بهسازی به شرح زیر است: (Ghiassian, Holtz, 2017).

- زمین، درجا اصلاح می‌شود.
- مشخصات فنی ژئوتکنیکی آن به سطح قابل قبول می‌رسد.
- زمین بخشی از سیستم خاک-سازه می‌گردد.
-روش‌های کنترل و تأیید در کار انجام‌شده موجود است.

۲- پیشینه تحقیق

وحید دستجردی (۱۳۸۹) پژوهشی را با عنوان ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک چسبنده-اصطکاکی مسلح به ژئوگرید و تثبیت آن انجام داده است. یافته‌های نتایج ایشان حاکی از آن است که استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای بهبود عملکرد پی‌های سطحی طی دو دهه اخیر، توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بین ژئوسنتتیک‌های موجود، ژئوگریدها به سبب صلبیت و مقاومت کششی زیاد کاربرد بیشتری در امر مسلح‌سازی خاک‌ها دارند. ژئوگریدها بار پی را در سطح وسیع‌تر و در عمق بیشتری به خاک انتقال می‌دهند که نتیجه آن افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی و افزایش سختی خاک خواهد بود. در تحقیق حاضر به مسئله ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک چسبنده اصطکاکی مسلح پرداخته شده است. در این راستا، آزمایش‌ها بر روی خاک دانه‌ای و چهار سری خاک چسبنده اصطکاکی انجام شده و تأثیر چسبندگی به‌عنوان پارامتری تأثیرگذار بر بازدهی تسلیح و ظرفیت باربری پی، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر متغیرهایی مانند عمق اولین لایه تسلیح، طول لایه تسلیح، فاصله قائم لایه‌های تسلیح و تعداد لایه‌ها بر ظرفیت باربری مورد مطالعه قرار گرفته و مقادیر بهینه این متغیرها برای رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری پیشنهاد شده است. در ادامه تأثیر چسبندگی خاک بر پارامترهای بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه برافزایش ظرفیت باربری، جنبه دیگر مسلح کردن خاک، کاهش نشست پی و افزایش سختی خاک است که این موضوع در حالات مختلف در این تحقیق بررسی شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، مشخص گردید که افزایش درصد خاک ریزدانه و یا به‌عبارت‌دیگر افزایش چسبندگی خاک در یک درصد تراکم ثابت، ظرفیت باربری را افزایش داده و بازدهی تسلیح را کاهش داده است، درنتیجه بازدهی تسلیح در خاک دانه‌ای نسبت به خاک چسبنده اصطکاکی بیشتر است. همچنین مشاهده شد که تغییر نوع رس افزوده شده به ماسه تأثیر چندانی بر بازدهی تسلیح ایجاد نمی‌نماید. نتایج بررسی‌ها نشان داد هنگامی‌که از یک لایه مسلح‌کننده استفاده شود، عمق مدفون بهینه‌ای برای تسلیح وجود دارد که در این عمق ظرفیت باربری بیشینه خواهد شد. این عمق در این تحقیق B۰/۲۵ به دست آمد (B: عرض شالوده مدل). با افزایش چسبندگی خاک این عمق افزایش یافته و به B۰/۳۵ رسید؛ به عبارت دیگر با افزایش چسبندگی، عمق بهینه اولین لایه تسلیح افزایش خواهد یافت. با ثابت نگه‌داشتن لایه مسلح‌کننده در عمق بهینه مشاهده شد که افزایش طول لایه تسلیح ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، اما این افزایش بعد از طول بحرانی تغییر زیادی ندارد. طول بحرانی برای خاک دانه‌ای B4 به دست آمد و با افزایش چسبندگی خاک این طول در خاک چسبنده اصطکاکی کاهش یافت و به B3 رسید؛ بنابراین با افزایش چسبندگی خاک، طول بحرانی تسلیح کاهش خواهد یافت. همچنین بدون توجه به نوع خاک، فاصله قائم بهینه لایه‌های تسلیحB ۰/۳۵حاصل شد. نتایج آزمایش‌های مدل نشان داد که در خاک چسبنده اصطکاکی با افزایش تعداد لایه‌ها تا چهار لایه، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و بعد از این تعداد لایه، افزایش چندانی در ظرفیت باربری مشاهده نمی‌گردد. علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، در خاک دانه‌ای مسلح‌کردن سختی خاک را تا ۳/۵ برابر و در خاک چسبنده اصطکاکی تا ۲/۱ برابر حالت غیرمسلح افزایش خواهد داد. مسلح‌کردن تأثیر زیادی در کاهش نشست پی داشته است. تأثیر این کاهش با افزایش فشار وارد بر پی بیشتر نمایان می‌شود . مقدس نژاد فریدون، (۱۳۹۶) در مقاله

خود با عنوان تثبیت خاک با استفاده از سیمان آب‌زدا جهت استفاده در پروژه‌های راه‌سازی به این نتیجه دست‌یافت که خاک‌های ماسه‌ای و رسی بخش وسیعی از خاک‌های شمال کشور را تشکیل می‌دهند. اغلب خاک‌های رسی در این مناطق اگرچه در حالت خشک مقاومت خوبی دارند، در حالت اشباع، تضعیف‌شده و مقدار تورم قابل‌توجهی را متحمل می‌گردند. خاک‌های ماسه‌ای مناطق ساحلی که به ماسه‌بادی معروفاند، در حالت محدودشده قابلیت باربری قابل‌توجهی دارند، ولی در حالت محدود نشده درصورتی‌که در مسیر جریان آب قرار بگیرند، به دلیل دانه‌بندی یکنواخت و نداشتن چسبندگی، شسته می‌شوند. در این تحقیق اثرات سیمان آب‌زدا بر خصوصیات رفتاری این خاک‌ها، با اثرات سیمان نوع ۲ و آهک مقایسه شده است. برای تولید سیمان آب‌زدا، در مرحله آسیاب کلینکر سیمان پرتلند معمولی، حدود ۲ درصد اسید چرب به آن اضافه می‌گردد. این تغییر باعث افزایش دوام در برابر رطوبت و تأخیر هیدراسیون تا زمان اختلاط کامل می‌گردد. در عملیات تثبیت ابتدا ماده تثبیت‌کننده بر روی لایه موردنظر پخش‌شده سپس عملیات اختلاط آغاز می‌گردد. بنابراین در صورت استفاده از سیمان معمولی با توجه به وجود رطوبت در خاک بخشی از سیمان قبل از شروع عملیات اختلاط هیدراته شده و درصد سیمان هیدراته نشده که با خاک مخلوط می‌گردد کمتر از مقدار بهینه تعیین‌شده است. بنابراین در صورت تائید اثرات مفید سیمان آب‌زدا بر خصوصیات رفتاری خاک، استفاده از این سیمان با توجه به هزینه‌های تولید یکسان آن با سیمان معمولی مفیدتر است. آزمایش‌های مورداستفاده در این تحقیق شامل حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و CBR می‌باشند. نتایج حاکی از اثرات بسیار مناسب سیمان آب‌زدا بر خصوصیات مقاومتی و اثرات متوسط آن بر خصوصیات خمیری خاک‌ها می‌باشند.

ذوالفقاری‌فر (۱۳۹٤) در مقاله خود با عنوان بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک در روسازی راه به این نتیجه دست‌یافت که تثبیت خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مهندسی آن برای تأمین یک‌رشته اهداف از پیش تعیین‌شده اطلاق می‌شود. تثبیت خاک‌ها به طرق گوناگون نظیر روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیک (رویاندن گیاه) و روش الکتریکی امکان‌پذیر است. برخی از خاک‌ها به علت مشخصات فنی نامطلوب و یا دارا بودن مقادیر قابل‌توجهی رس یا لای برای عملیات راه‌سازی نامرغوب محسوب می‌شود. با توجه به حضور گسترده خاک‌های ریزدانه رسی در سطح کشور، مشکلات زیادی در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی وجود دارد؛ که نیازمند تثبیت قبل از ساخت‌وساز بوده است. هدف اصلی از تثبیت خاک تأمین مقاومت خواسته‌شده با حداقل ضخامت خاک ممکن است. روش تثبیت خاک و مصالح در راه‌سازی به‌منظور بهبود کیفیت مصالح بکار می‌رود؛ تا مصالحی با مشخصات مناسب برای بکار بردن در لایه‌های روسازی به دست آید. هدف این پژوهش بررسی روش‌های اصلاح یا تثبیت خاک تثبیت با آهک، سیمان و قیر بوده است. نتایج نشان داد سیمانیکی از موادی است که از آن برای تثبیت خاک‌ها و مصالح سنگی استفاده می‌شود. از سیمان همچنین برای تثبیت رویه‌های شنی و بهسازی آن‌ها برای آمدوشدهای زیاد استفاده می‌شود و معمولاً هر نوع خاکی نظیر شن و ماسه، خاک‌های ماسه‌ای، خاک‌های لای دار و خاک‌های رسی با حد روانی کم را می‌توان با استفاده از سیمان تثبیت نمود. آهک ماده دیگری است که از آن برای تثبیت خاک‌ها استفاده می‌گردد. به کار بردن آهک شکفته برای تثبیت خاک‌های شنی رس دار سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود. افزایش مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک به علت ترکیب دوغاب آهکی با کانی‌های رسی و تشکیل سیلیکات و آلومینات کلسیم است که سبب چسباندن دانه‌های خاک و سنگ به یکدیگر می‌شود.

فلاح (۱۳۹٤) در مقاله خود با عنوان تثبیت و اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه بادی با بهره گرفتن از دوغاب پلیمری به این نتیجه دست یافت که هدف از انجام این تحقیق بهبود خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های ماسه‌بادی است. چون یکی از مشکلات عمده ماسه‌بادی، مقاومت کم آن تحت شرایط رطوبت طبیعی و اشباع است، یک مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی تأثیر افزودن پلیمر پلی وینیل الکل در بهبود خواص ژئوتکنیکی ماسه بادی انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم نشان داد که افزودن این پلیمر تا ۲/۰ درصد وزنی، وزن مخصوص خشک حداکثر را افزایش می‌دهد و در رطوبت بهینه تغییر قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌شود. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان داد که با افزایش درصد پلیمر، مقاومت CBR نمونه‌ها به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد به‌نحوی‌که در نمونه‌های ساخته‌شده با ۵/۰ درصد وزنی پلیمر، مقدار CBR به ۱۸۵ رسید؛ این مقدار بیش از ۵/۷ برابر CBR

برای خاک بدون مواد افزودنی است. با توجه به حلالیت پلیمر فوق در آب، برای حفاظت از مخلوط خاک و پلیمر در برابر آب شستگی از سیمان استفاده شد. آزمایش‌ها نشان داد که با افزودن ۲ درصد سیمان به مخلوط فوق هم بر مقاومت نمونه‌ها افزوده‌شده و هم پایداری آن‌ها در برابر آب شستگی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم نشان داد، افزودن پلیمر همچنین باعث افزایش چشمگیری در مقاومت برشی نمونه‌ها می‌شود. البته شکست خاک در این حالت، به‌صورت شکست ترد و ناگهانی مشاهده گردید. برای جلوگیری از این حالت و شکل‌پذیرتر کردن نمونه‌ها از الیاف تایر استفاده شد. مقدار بهینه الیاف موردنیاز در این حالت برابر با ٦/٠ درصد وزنی به دست آمد. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نیز نشان دادند که افزودن پلی وینیل الکل مقاومت فشاری و برشی خاک را به میزان بسیار قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین مشخص شد ترکیب هم‌زمان پلیمر، سیمان و الیاف به خاک بیشترین تأثیر را در اصلاح خصوصیات ماسه‌بادی دارد. به‌عنوان نمونه در ترکیب ٤/٠ درصد پلی وینیل الکل، ۲ درصد سیمان و ٦/٠ درصد الیاف تایر با ماسه‌بادی، مقاومت فشاری نمونه به ۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسید؛ درحالی‌که مقاومت فشاری برای ماسه‌بادی با ۲ درصد سیمان، تنها ۳/۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود.

یوسفی و همکاران (۱۳۹۲) مقاله‌ای را با عنوان بررسی مروری تأثیر ژئوسنتتیک‌ها بر افزایش ظرفیت باربری و نشست پی‌های نواری روی خاک‌های ماسه‌ای و رسی تحت نیروهای لرزه‌ای انجام داده است. نتایج پژوهش ایشان به شرح زیر است.

با قرارگیری ژئوسنتتیک‌ها تنش‌های داخلی ناشی از بار خارجی باعث ایجاد نیروی اصطکاکی بین خاک و مسلح کننده، می‌شود که نتیجه تنش‌ها از طریق این عامل منتقل می‌گردد. خاک و مصالح تسلیح کننده در برابر تغییر شکل‌های جانبی مقاومت می‌کند و موجب افزایش باربری خاک می‌گردد. در این مقاله به بررسی کاربرد ژئوتکستایل در مسلح کردن خاک‌های سست و اثر متغیرهای موجود همانند تعداد لایه‌ها، فاصله لایه‌ها از هم عمق قرارگیری لایه‌ها و غیره تحت اثر بار دینامیکی ناشی از زلزله منجیل پرداخته‌شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان‌دهنده این مطلب است که وجود ژئوگرید در خاک تحت شرایطی سبب کاهش نشست خاک مسلح در بارگذاری‌های ناشی از زلزله می‌گردد. افزایش عمق اولین لایه ژئوگرید و همچنین فاصله لایه‌های زیرین ژئوگرید تا مقدار بهینه، سبب کاهش نشست و از آن به بعد موجب افزایش نشست پی می‌شود و پس از رسیدن به یک عمق ماکزیمم، دیگر تأثیری بر کاهش نشست پی نخواهد داشت. با افزایش عرض ژئوگرید و همچنین تعداد لایه‌های ژئوگرید تا مقدار بهینه، نشست کاهش می‌یابد و پس‌ازآن، افزایش عرض و تعداد لایه‌های ژئوگرید، تأثیری برنشست پی نخواهند داشت.

ترابی (۱۳۹۲) پژوهشی را با عنوان ارزیابی ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر شیب خاکی مسلح و بررسی اثر مقیاس‌گذاری بر آن انجام داده است. یافته‌های پژوهش ایشان حاکی از آن است که با وارد کردن عناصر تسلیح به خاک ظرفیت باربری شیب خاکی افزایش و نشست خاک بستر پی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر کارهای انجام شده در مورد شیب خاکی محدود شده است. همچنین عدم استفاده از قوانین مقیاس در اکثر مطالعات تجربی انجام شده درزمینه سازه‌های خاکی مسلح به چشم می‌خورد. تحقیق حاضر به مسئله ظرفیت باربری پی واقع بر شیب خاکی مسلح و اثر مقیاس بر پاسخ سیستم خاک مسلح پرداخته است. در این راستا تست‌های ظرفیت باربری در مقیاس کوچک روی شیب خاکی مسلح به ژئوتکستایل با مقاومت کم انجام شده است و تأثیر پارامترهای نظیر فاصله اولین لایه از کف پی، فاصله بین لایه‌ها، تعداد لایه‌ها، فاصله پی از لبه شیب، تراکم نسبی خاک، مقاومت کششی لایه تسلیح و عرض پی بر رفتار ظرفیت باربری و نشست پی واقع بر شیب خاکی بررسی شده‌اند و پارامترهای بهینه پیشنهاد گردیده‌اند. همچنین به‌منظور بررسی اثر مقیاس بر پاسخ ظرفیت باربری و مقادیر بهینه مربوط به چینش تسلیح از نرم‌افزار تحلیلی المان محدود استفاده شده است.

اومار و همکاران (۱۹۹۳) اثرات نسبت عرض به طول (B/L) شالوده را بر روی (BCR) با ژئوگرید تقویت‌کننده مورد بررسی قرار دادند (ASTM, 2000). آن‌ها از چهار مدل شالوده با ابعاد ۷٦/۲ × ۷٦/۲ میلی‌متر، ۷٦/۲ × ۱۵۲/٤ میلی‌متر، ۷٦/۲ × ۲۲۸/٦ میلی‌متر که به ترتیب برابر با نسبت عرض به طول‌های ۱، ۰/۵ و ۰/۳۳۳ می‌باشند، استفاده کردند. از یک جعبه با عرض ۰/۹۱ متر، طول ۰/۹۱ متر و عمق ۰/۹۱ متر به‌عنوان شالوده مستطیلی مورداستفاده قرار گرفت، درحالی‌که آزمون‌های مدل بر شالوده نواری در جعبه‌ای با عرض ۳۰٤/۸

میلی‌متر، طول ۱/۱ متر و عمق ۹۱۴ میلی‌متر انجام گرفت. خاک زیر پی از ماسه سیلیکای گرد گوشه ریزدانه یکنواخت با اندازه مؤثر ذرات (D_{10}) برابر با ۰/۳۴ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (C_u) برابر با ۱/۵۳ و ضریب انحنای (C_c) برابر با ۱/۱۰ تشکیل‌شده بود. آزمون‌های مدل در وزن مخصوص خشک متوسط برابر با کیلونیوتن بر مترمکعب ۱۷/۱۴ (٪۷۰ =D_r) انجام گرفتند. زاویه اصطکاک متناظر تعیین‌شده از آزمون برش مستقیم حدود ۴۱ درج بود. نتایج آزمون‌های مدل نشان دادند که عمق تأثیر مسلح کننده با افزایش نسبت عرض به طول (B/L) شالوده کاهش می‌یابد. این مقدار برای شالوده نواری حدود ۲B و برای شالوده مربعی حدود ۱/۲B بود. عمق تأثیر، عمق کلی مسلح کننده است که زیر این مقدار نرخ افزایش (BCR) با افزودن لایه‌های مسلح کننده ناچیز است. همچنین حداکثر (BCR) با افزایش B/L شالوده برای نسبت‌های u/B و h/B برابر ۰/۳۳ و ۰/۳۳ با طرح بهینه مسلح کننده کاهش یافت. Omar و همکاران (۱۹۹۳) همچنین روابط تجربی ۱ الی ۳را برای طرح بهینه مسلح کننده‌ها پیشنهاد کردند.

$$\frac{d_{cr}}{B}=\begin{cases}۲-۱.۴(\frac{B}{L}) & (۰\le\frac{B}{L}\le۰.۵)\\ ۱.۴۳-۰.۲۶(\frac{B}{L}) & (۰.۵\le\frac{B}{L}\le۱)\end{cases} \quad (۱)$$

$$\frac{b_{cr}}{B}=۸-۳.۵(\frac{B}{L})^{۰.۵۱} \quad (۲)$$

$$\frac{l_{cr}}{B}=۳.۵(\frac{B}{L})+\frac{L}{B} \quad (۳)$$

که در آن d_{cr} عمق تأثیر ژئوگرید جایگزین شده، b_{cr} و l_{cr} عرض و طول مؤثر ژئوگرید می‌باشند. (BCR) نهایی حداکثر در مطالعه آن‌ها در محدوده ۳ تا ۴/۵ به دست آمد، درحالی‌که B/L از ۰ تا ۱۰ متغیر بود (منصوری، ۱۳۹۲).

Das و Omar (۱۹۹۴) اثرات عرض شالوده بر (BCR) آزمون‌های مدل روی ماسه مسلح شده با ژئوگرید را مورد مطالعه قرار دادند (ASTM, 2000). شش اندازه مختلف شالوده نواری مدل با عرض‌های ۵۰/۸ میلی‌متر، ۷۲/۲ میلی‌متر، ۱۰۱/۶ میلی‌متر، ۱۲۷ میلی‌متر، ۱۵۲/۴ میلی‌متر، ۱۷۷/۸ میلی‌متر در آزمون‌های مدل مورداستفاده قرار گرفت. طول تمام شالوده‌ها برابر ۳۰۴/۸ میلی‌متر است.

آزمون‌های مدل در جعبه‌ای با ابعاد متر ۱/۹۶ (طول) × ۰/۳۰۵ متر (عرض) × ۰/۹۱۴ متر (ارتفاع) انجام شدند. خاک زیر پی متشکل از ماسه با اندازه مؤثر ذرات (D_{10}) برابر با ۰/۳۴ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (C_u) برابر با ۱/۵۳ و ضریب انحنای (C_c) برابر با ۱/۱۰ بود. ماسه با دانسیته نسبی ۵۵٪، ۶۵٪ و ۷۵٪ به درون جعبه ریخته شد.

از نتایج آزمایش، مشاهده کردند که نسبت نشست (s/B) در بار نهایی، برای خاک غیر مسلح در حدود ۶–۸٪ و ۱۶–۲۳٪ برای RSF در بار نهایی بود. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که بزرگی نسبت ظرفیت باربری (BCR) با کاهش چگالی نسبی از ۲/۵~۴/۱ تا ۳~۵/۴ افزایش یافت. بر اساس نتایج آزمایش، به این نتیجه رسیدند که بزرگی BCR با افزایش عرض شالوده از ۴/۱~۵/۴ به ۲/۵~۳ کاهش یافت (ASTM, 2000)

Yetimoglu و همکاران (۱۹۹۴) ظرفیت باربری شالوده‌های مستطیلی را بر ماسه مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از هر دو مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی بررسی نمودند (ASTM, 2000). آزمون‌های مدل در جعبه فولادی به عرض ۷۰ سانتی‌متر، طول ۷۰ سانتی‌متر و عمق ۱۰۰ سانتی‌متر انجام شدند. یک صفحه فلزی مستطیلی شکل به طول ۱۲۷ میلی‌متر، عرض ۱۰۱/۵ میلی‌متر و ضخامت ۱۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان شالوده مدل مورداستفاده قرار گرفت. خاک زیر پی متشکل از ماسه یکنواخت با اندازه مؤثر ذرات (D_{10}) برابر با ۰/۱۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (C_u) برابر با ۲/۳۳ و ضریب انحنای (C_c) برابر با ۰/۷۶ تشکیل شده بود. آزمون‌های مدل در وزن مخصوص خشک متوسط برابر با کیلونیوتن بر متر مکعب ۱۷/۱۶ (٪۷۰~۷۳ = D_r) انجام گرفتند. زاویه اصطکاک متناظر تعیین‌شده از آزمون برش مستقیم حدود ۴۱ درجه بود.

نتایج آزمایش نشان داد که نسبت نشست (S/B) در گسیختگی برای تمام ماسه‌های مسلح شده و نشده در حدود ۰/۰۳~۰/۰۵ بود، درحالی‌که BCR از ۱/۸ تا ۲/۹ متغیر بود؛ بنابراین به نظر می‌رسد نشست شالوده در حالت گسیختگی تحت تأثیر قابل‌توجه تقویت‌کننده ژئوگرید قرار ندارد. این مشاهدات از نتایج آزمایش با نتایج Das و Omar (۱۹۹۴) متفاوت است. بر اساس هر دو نتایج آزمون مدل و مطالعه عددی، یافته‌های زیر گزارش‌شده‌اند:

–نسبت فاصله بهینه لایه بالایی (u/B) در ماسه مسلح شده با یک‌لایه و چندلایه مسلح کننده، به ترتیب، حدود ۰/۳ تا ۰/۲۵ به دست آمد.

–نسبت فاصله بهینه قائم (h/B) بین لایه‌های مسلح‌کننده بر اساس تعداد لایه‌های مسلح کننده برابر ۰/۲ تا ۰/۴ تعیین شد.

–عمق مؤثر تقریباً ۱/۵B و نسبت عرض مؤثر (l /B) مسلح کننده‌ها در حدود ۴/۵ بود.

۳- هدف از بهسازی

هدف از بهسازی خاک تأمین یک یا تعدادی از موارد زیر است (روشندل، ۱۳۹۸).

- استفاده‌های مؤثر از قرضه‌های جانبی
- اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت
- افزایش دوام خاک
- افزایش مقاومت باربری خاک
- کاهش نفوذپذیری
- کاهش تورم و انقباض خاک
- کاهش رطوبت خاک
- کاهش دامنه خمیری خاک
- جلوگیری از فرسایش خاک
- کاهش ضخامت لایه‌های روسازی
- ایجاد لایه‌های اساس و زیراساس باقابلیت باربری بیشتر
- بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود
- آماده‌سازی محوطه‌ای برای اجرای آسان‌تر عملیات ساختمانی
- کاهش گردوغبار
- صرفه‌جویی در مصرف مصالح
- صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- تسریع در عملیات اجرایی

در کمتر پروژه عمرانی است که نگرانی از جنس بستر پروژه عمرانی جهت دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی لازم، دغدغه‌ای را برای مهندسان ایجاد نکرده باشد. در پروژه‌های کلان ساختمانی، راه‌سازی، سدسازی، تونل و ... مهندسان به‌ناچار بسترهایی از جنس‌های مختلف (خاکی و سنگی) با مقاومت‌ها و پارامترهای مختلفی روبرو می‌شوند. خاک‌های مختلف خواص مکانیکی، تورم‌زایی، ظرفیت باربری و نشست پذیری مختلفی دارند. بعضاً با توجه به گستره‌ی پروژه‌ها امکان اجرای یک‌لایه غیراقتصادی با ضوابط اجرایی و مالی پروژه همخوانی ندارد، لذا شناخت انواع خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه و تثبیت آن‌ها با مصالح مناسب اهمیت فراوانی پیدا می‌کند. روش‌های مختلف جهت بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه موردنظر جهت بهسازی، دسترسی محلی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، فاکتورهای زیست‌محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می‌شوند. خاک‌ها می‌بایست با توجه به نقاط ضعف و راه مناسب جبران آن بهسازی شوند؛ برای مثال مقادیر زیادی لای و رس برای عملیات عمرانی مضر تلقی می‌شوند و به سبب پارامترهای خمیری و مکانیکی مطلوب پنداشته نمی‌شوند، لذا با روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی و ... مناسب، این نوع خاک را تثبیت می‌کنند. هدف این مقاله آشنایی اجمالی با مهم‌ترین خاک‌های مشکل‌ساز و مهم‌ترین روش‌های بهسازی و تثبیت آن است.

٤- روش تحقیق

نمونه‌های موردتحقیق قرارگرفته شده، از نمونه خاک‌های ثبت‌شده در وزارت راه و شهرسازی کشور انتخاب‌شده است که در حیطه زمین‌شناسی و جغرافیایی کشور ایران قرار دارد. روش‌های بیان‌شده، عموماً از روش‌های استاندارد بین‌المللی و مورد تائید، انتخاب‌شده است.

۵- انواع خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه‌های عمرانی

شناخت انواع خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه‌های عمرانی اهمیت فراوانی دارد، چراکه باعث می‌شود بهترین راه تثبیت و بهسازی را برای هر نوع خاص خاک انتخاب کنیم. به‌طورکلی خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه‌های عمرانی را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

الف) خاک‌های ریزدانه (خاک دستی)

ب) خاک‌های انبساطی (منبسط شونده)

ج) خاک‌های رمبنده (فروریزشی)

د) خاک‌های نرم و شل (آبگونه شونده)

توجه: خاک‌های آلوده به مواد شیمیایی و نفتی را می‌توان در گروه خاک‌های دستی تقسیم‌بندی کرد.

۵-۱-خاک‌های ریزدانه (خاک دستی)

با توجه به اینکه در حاشیه مناطق شهری نیاز به زمین جهت انجام فعالیت‌های عمرانی شهری، غیرقابل اجتناب است، ممکن است زمین‌هایی نیز مورداستفاده قرار بگیرند که قبلاً به‌عنوان مکانی برای دفن زباله مورداستفاده قرارگرفته می‌شدند. زباله‌های مختلف ممکن است ناشی از حفاری‌های شهری و غیرشهری، ضایعات ساختمانی، پسماندهای صنعتی و معدنی،

آلودگی‌های نفتی و زباله‌های شهری (زباله‌های تر و خشک روزمره، لوازم قدیمی، قطعات خودروهای فرسوده و...) باشند. گاهی به این نوع خاک، خاک دستی نیز اطلاق می‌شود. مشکل عمده این نوع خاک‌ها، انباشتن این مصالح بدون در نظر گرفتن تمهیدات خاصی جهت تجزیه یا تحکیم زباله‌هاست که با لایه‌ای خاک به ضخامت ۰,۶ تا ۳,۰ متر، سطح آن‌ها را می‌پوشانند. مشکلات مهمی ازجمله ضعف باربری، تغییرات حجم و ناپایداری داخلی بعد از بارگذاری این نوع خاک‌ها بروز پیدا می‌کند. گاها نشست بعضی خاک‌ریزهای شنی حدوداً ۲,۰٪ ارتفاع، خاک‌های ماسه‌ای حدوداً ۶,۲٪ ارتفاع و خاک‌های ریزدانه حدوداً ۶,۱۶٪ ارتفاع است. مشکل نگران‌کننده اینجاست که این نشست‌ها طی وزن خود زباله‌ها و خاک‌ریزها در مدت‌زمان طولانی (۱۰ تا ۲۰ سال) اتفاق می‌افتد و ممکن است قبل از تراکم نسبی، پروژه‌ای عمرانی روی آن شروع شود. مطمئناً به دلیل خواص فیزیکی متنوع زباله‌ها و روش‌های مختلف قرارگیری خاک‌ریز، نشست‌ها ناهمسان و غیریکنواخت خواهد بود. لازم است که از روش‌های مناسبی که بعداً ذکر خواهد شد، به تثبیت و به سازی این نوع خاک پرداخته شود.

۵-۲- خاک‌های انبساطی (منبسط شونده)

این خاصیت عموماً در خاک‌های ریزدانه رسی دیده می‌شود. خاک‌های انبساطی دارای مقدار زیادی کانی مونت موریلونیت است که با جذب آب، پتانسیل تورمی و انبساطی بالایی دارند. این نوع خاک با از دست دادن آب منقبض می‌شود. تغییرات حجمی خاک‌های منبسط شونده را می‌توان مشکل‌سازترین خاصیت منفی خاک‌ها رسی در اینجا دانست .رس‌ها معمولاً اندازه کلوئیدی (۰۰۰,۱ میلی‌متر) دارند؛ پس سطح مخصوص آن‌ها بسیار زیاد بوده و قادرند سطح زیادی آب را به خود جذب کنند. آب‌وهوا و اقلیم، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار روی خاک‌های منبسط شونده است، زیرا در مناطق مرطوب که سطح ایستایی آب نزدیک زمین است، این مشکل کمتر دیده می‌شود. در مناطق خشک که سطح ایستایی آب، پایین است و تأثیر کمی روی رطوبت خاک در نواحی سطحی دارد. این خاک‌ها را می‌توان به طریقی عمل آورد که تغییرات حجمی آن محدود شود؛ مثال از طریق کنترل رطوبت و یا تثبیت با مواد افزودنی.

۵-۳- خاک‌های رمبنده (فروریزشی)

هنگامی که این خاک‌ها در شرایط بارگذاری همراه با غرقاب شدن و یا ارتعاش قرار می‌گیرند، عامل ایجاد پیوند بین ذرات آن‌ها از بین رفته و باوجود تخلخل زیاد ساختمان درونی‌شان می‌شکند، پس نشست زیادی را به دنبال خواهند داشت. این نوع خاک‌ها تا زمانی که رطوبتشان تغییر نکند، مشکل زیادی برای سازه‌های عمرانی ایجاد نمی‌کنند. این نوع خاک‌ها اغلب بادرفت می‌باشند که محدوده دانه‌بندی آن در محدوده لای قرار داشته و تراکم صحرایی پایینی دارند. معمولاً برای تثبیت این نوع خاک‌ها از مواد افزودنی شیمیایی استفاده می‌شود.

۵-٤- خاک‌های نرم و شل (سست)

از ویژگی عمده این نوع خاک‌ها، مقاومت کم و ناپایداری حجمی آن‌ها است. برای نمونه خاک‌هایی مثل ماسه و لایه‌ای شل، رس‌های نرم با رطوبت بالا و خاک‌های آلی را می‌توان نام برد. از ویژگی‌های این خاک‌ها رطوبت زیاد و تحکیم عادی یافته آن‌ها است. روانگرایی ماسه و لای‌ها را که از تراکم کمی برخوردارند، می‌توان جزء این دسته قرار داد.

ثبیت شیمیایی خاک

برای بهسازی خاک روش‌های مختلفی وجود دارد. در این تثبیت خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی خاک و تسریع در انجام عملیات راه‌سازی می‌شود. تجربه نشان داده است که افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه مرطوب نه‌تنها موجب بروز چندین واکنش شیمیایی بین خاک و آهک می‌شود بلکه باعث می‌شود که مخلوط تولیدشده دارای مقاومت باربری بیشتر، قابلیت تراکم و جابجایی بهتر، درصد انقباض و خاصیت خمیری کمتری نسبت به خاک طبیعی اولیه باشد (وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل‌ونقل، ۱۳۹٤).

آهک اصولاً برای تثبیت خاک‌های ریزدانه که دامنه خمیری آن‌ها بزرگ‌تر از ۱۰ و خاک‌های رسی خیلی خمیری (PI>۳۵) مناسب است و اثر آن بر خاک‌هایی که مقدار ریزدانه آن‌ها کم است، کمتر است. در ضمن آهک برای تثبیت خاک‌هایی که حاوی مقدار بیش از دو درصد مواد آلی و همچنین حاوی مقدار بیش از نیم درصد سولفات قابل‌حل در آب می‌باشند مناسب نیست. آزمایش‌ها انجام‌شده بر روی خاک‌های آلی نشان داده است که اگر به‌اندازه ۲۰درصد وزن خشک خاک، گچ به آهک زنده یا آهک شکفته اضافه شود می‌توان خاک‌های آلی را نیز با آهک تثبیت کرد، مشروط بر

آنکه رطوبت طبیعی این خاک‌ها زیاد نباشد(Croney, Croney, 2016)، تجربه نشان داده است خاک‌هایی که PH آن‌ها کمتر از ۷ است و یا حاوی مقدار بیش از یک درصد مواد آلی کربن دار هستند و واکنش خوبی با آهک ندارند.

پژوهش به روش تثبیت شیمیایی خاک پرداخته‌شده است. مقاومت هر خاک به پیوند بین ذرات خاک وابسته است. این مقاومت را در دو مقیاس کوچک و بزرگ می‌توان بهبود داد. در مقیاس کوچک (مقیاس میکروسکوپی) مقاومت را باید از طریق ایجاد عاملی برای پیوند بین ذرات بالا برد. این عمل را می‌توان به روش‌های گوناگونی انجام داد. این روش‌ها تحت عنوان تثبیت خاک معرفی می‌شوند. در مقیاس بزرگ (مقیاس ماکروسکوپی) با استفاده از لوازم و تجهیزاتی باید پیوند بین ذرات را استحکام بخشید که غالباً به این روش مسلّح سازی (تسلیح) خاک گفته می‌شود. از تثبیت‌کننده‌ها می‌توان به موادی همچون تثبیت‌کننده‌های شیمیایی و تثبیت‌کننده‌های فیزیکی اشاره کرد. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی با ایجاد واکنش‌های شیمیایی و دگرگون ساختن ساختار و پیوند بین ذرات خاک باعث تثبیت و تقویت خاک می‌شوند. در این نوع واکنش‌ها ذرات خاک به‌کلی ماهیت خود را ازدست‌داده و به ماده‌ای با مشخصات جدید تبدیل می‌شوند. ازجمله این تثبیت‌کننده‌ها می‌توان به مصالحی چون آهک، سیمان، قیر و مواد دیگر اشاره کرد (آقایاری و دیگران، ۱۳۹۱).

تثبیت با آهک

آهک زنده ماده‌ای است با رنگ متمایل به سفید با درجه ذوبی بین ۲۵۸۰ تا ۲۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، وزن مخصوص آهک زنده بین ۳/۱ تا ۳/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است. وزن مخصوص آهک پس از شکفته شدن به ۲/۲ تا ۲/٤ گرم بر سانتیمتر مکعب کاهش می‌یابد. استفاده از هر یک از انواع آهک محاسن و معایبی دارد(Hunter,2020).

آهک شکفته با بیشتر شدن مقدار آب تغییر حالت داده و از حالت‌جامد به خمیری و از خمیری به مایع (دوغاب آهک) تبدیل می‌شود. ازآنجایی‌که آهک شکفته از امتزاج آب با آهک زنده به‌دست‌آمده است، خاصیت جذب رطوبت کمتری نسبت به آهک زنده دارد و به همین دلیل کار کردن با آن ساده‌تر بوده و به‌راحتی انبار و نگهداری می‌شود. به‌طورکلی آهک زنده ماده تثبیت‌کننده مؤثرتری نسبت به آهک شکفته است و اگر به‌صورت دوغاب به خاک اضافه شود مقاومت بیشتری را نسبت به هنگامی‌که به‌صورت پودر اضافه می‌شود ایجاد می‌کند(Hunter,2020).

تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک

آهک انواع مختلفی دارد که متداول‌ترین آن‌ها عبارتند از:

الف) آهک زنده (CaO)

ب)آهک شکفته ($Ca(OH)2$)

ج) آهک زنده دولومیتی ($CaO + MgO$)

د)آهک شکفته دولومیتی ($Ca(OH)2$ یا $Mg(OH)2$)

آهک زنده ماده‌ای است بارنگ متمایل به سفید، دارای درجه ذوب بین ۲۵۸۰ تا ۳۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و وزن مخصوص بین ۳,۱ تا ۳,۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب که به‌شدت با آب واکنش داده و تولید حرارت می‌کند و تبدیل به آهک شکفته (آهک مرده) می‌شود. این واکنش با تغییر حجم به میزان ۲,۵ تا ۳ برابر و نیز تغییر در وزن مخصوص آهک زنده و کاهش آن به مقدار ۲,۲ تا ۲,٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب همراه است. با افزودن آب‌آهک شکفته از حالت‌جامد به خمیری و از خمیری به مایع (دوغاب آهک) تبدیل می‌شود. میزان آهک مصرفی به عوامل متعددی از قبیل جنس خاک، جنس آهک، نحوه استفاده از مصالح، شرایط جوی منطقه هدف از تثبیت خاک و هزینه‌ی انجام عملیات بستگی دارد و معمولاً مقدار آن بین ۰,۵ تا ۸ درصد وزن خشک خاک متغیر است.

آهک اصولاً برای تثبیت خاک‌های ریزدانه که دامنه خمیری آن‌ها بزرگ‌تر از ۱۰ و خاک‌های رسی خیلی خمیری ($PI>35$) مناسب‌تر است.

به‌طورکلی خاک‌هایی که در طبقه‌بندی یونیفاید در گروه‌های SP-SC, CH-, CL, MH, GW-GC, GP-GC, GM-GC, SM-SC, SC, SM, SW-SC و یا در طبقه‌بندی اشتو در گروه‌های A7 -A6- A5- A4و A2 قرار دارند قابلیت تثبیت شدن با آهک را دارا هستند.

فعل و انفعالات شیمیایی خاک و آهک

در جریان تثبیت خاک با آهک سه نوع فعل‌وانفعال شیمیایی بین خاک و آهک در مجاورت با آب به وقوع می‌پیوندد که عبارتند از: الف) واکنش تبادل یونی و واکنش تجمع-تراکم ب) کربناته شدن ج) واکنش پوزولانی

جدول ۱. بررسی معایب و محاسن روش های مختلف پخش آهک

تثبیت با استفاده از سیمان

سیمان دارای ۶۰ تا ۶۵ درصد آهک است (Rolling,2001) در تثبیت خاک با آهک فعالیت پوزولانی برای فعل‌وانفعال شیمیایی خاک با آهک از طریق ترکیبات موجود در خاک تأمین می‌شود درصورتی‌که مواد پوزولانی برای تثبیت خاک با سیمان به صورت بالقوه در سیمان وجود دارد و از طریق خاک تأمین نمی‌گردد. آب مصرفی برای تثبیت خاک باسیمان نباید حاوی بیش از ppm ۵۰۰ یون سولفات باشد. مکانیزم تثبیت خاک با سیمان مشابه مکانیزم تثبیت خاک با آهک اس (Little et al, 1987).

نتایج تحقیقات محققان نشان داد که افزودن سیمان به خاک سبب افزایش سختی و رفتار شکننده خاک و بهبود خصوصیات مهندسی آن می‌شود. بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان اساساً به علت سخت شدن سیمان در نتیجه هیدراتاسیون سیمان و تشکیل مواد سیمانی اضافی بین سیمان هیدراته شده و ذرات رس موجود در خاک است. به طرق مختلف مکانیزم واکنش خاک با سیمان تعریف شده است، اما اعتقاد به این است که سیمانی که با آب به خاک رس اضافه می‌شود منجر به فرآیند هیدراتاسیون می‌شود. در شکل ۱ به بررسی تثبیت خاک با سیمان با توجه به تصویر زیر می‌پردازیم .

تثبیت خاک با سیمان

❖ **خاکهای ریزدانه: میزان سیمان در این خاک‌ها بستگی به خاصیت خمیری دارد**

هر چه خاک ریز باشد ⟸ درصد سیمان

میزان سیمان مصرفی در ای خاک ها بین ۷ تا ۲۰ درصد خشک خاک است.

❖ **خاک‌های ماسه‌ای : میزان سیمان در این خاک‌ها بستگی به درصد تخلخل دارد**

هر چه خاک متخلخل تر باشد ⟸ درصد سیمان

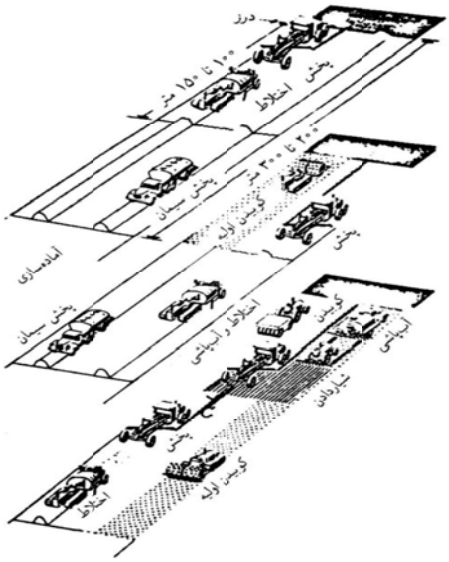
❖ **خاک‌های شنی: میزان سیمان لازم بستگی به درصد مواد ریز دانه دارد .**

میزان سیمان مصرفی در این خاک‌ها بین ۲ تا ٦ درصد وزن خشک خاک است.

شکل ۱. بررسی عوامل مختلف در تثبیت سیمان توسط خاک

عملیات تثبیت خاک با استفاده از وسایل متداول راه‌سازی نظیر گریدر، غلتک، شخم‌زن، کامیون کمپرسی و آب‌پاش انجام می‌شود. عملیات اجرای تثبیت خاک شامل شیار دادن خاک و خرد کردن کلوخه‌های آن، پخش سیمان، اختلاط خاک و سیمان، پخش آب، اختلاط خاک و سیمان و آب و کوبیدن و متراکم کردن خاک تثبیت‌شده با سیمان و عمل آوردن آن است.

از آنجا که سیمان ماده‌ی زود گیری است باید طول راه به قطعات کوچکی تقسیم شود تا بتوان تمام عملیات تثبیت خاک از جمله کوبیدن و متراکم کردن نهایی خاک را قبل از گرفتن سیمان به پایان رساند. این طول معمولاً بین ۱۰۰ تا ٤٥٠ متر بوده و بستگی به روش انجام عملیات، دما و رطوبت هوا، ضخامت لایه، نوع و تعداد ماشین‌آلات و تجربه فنی افراد دارد. در شکل۲ به بیان واضح عملیات تثبیت خاک با استفاده از وسایل فوق الذکر پرداخته شده است.



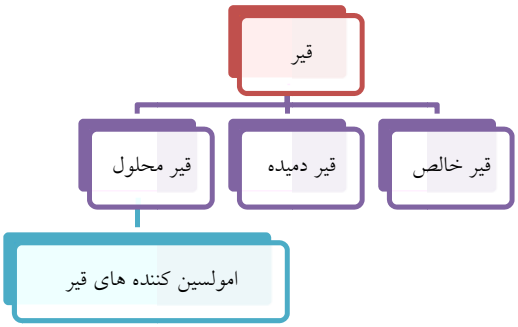
شکل۲. بررسی عوامل مختلف در تثبیت سیمان

تثبیت خاک با قیر

استفاده از قیر برای اندود کردن مصالح سنگی و چسباندن آن‌ها به یکدیگر، تثبیت شن‌های روان، اندود نمودن و غیرقابل نفوذ کردن کانال‌های آبرو، پوشش بام‌ها، کف ساختمان‌ها و رویه راه‌ها در برابر آب سال‌هاست که با موفقیت انجام می‌شود. این ماده به دلیل داشتن دو خاصیت مهم یعنی غیرقابل نفوذ بودن در برابر آب و چسبنده بودن، یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی و راه‌سازی است.

مکانیزم تثبیت خاک ها با قیر بر خلاف مکانیزم تثبیت خاک‌ها با آهک یا سیمان است. بدین معنی که افزایش مقاومت و تغییر در خواص خمیری خاک‌ها با آهک یا سیمان درنتیجه واکنش شیمیایی و پوزولانی انجام می‌شود، در صورتی که قیر یک ماده خنثی است و باعث تغییر در خواص خمیری خاک‌ها نمی‌شود بلکه به علت داشتن خواص چسبندگی فقط باعث اتصال دانه‌ها و ذرات خاک قیراندود شده با یکدیگر می‌شود. ازاین‌جهت هراندازه که مخلوط خاک و قیر متراکم‌تر شود استقامت باربری آن نیز بیشتر می‌شود. استفاده از مخلوط‌های قیری در مناطقی که در معرض ریزش فراورده‌های نفتی نظیر بنزین، نفت، گازوئیل و یا روغن‌ها قرار دارند توصیه نمی‌شود. در این‌گونه مناطق اگر تثبیت خاک با قیر همچنان مورد نظر باشد بهتر است که سطح خاک تثبیت‌شده با قیر با اجرای یک‌لایه غیر حساس در برابر فراورده‌های نفتی محافظت شود (Little et al, 1987).

در شکل۳ تقسیم بندی انواع قیر به نمایش در آمده است.



شکل۳. تقسیم بندی انواع قیر

خاک‌های ماسه‌ای: به خوبی قابل تثبیت شدن با قیر هستند.

قیر مصرفی: قیر خالص، قیر زودگیر و امولسیون

مقدار قیر: ۲تا۶ درصد وزن خشک خاک

خاک‌های شنی: در صورتی که؛

(مقدار ریز دانه< ۱۵٪ pI< ۱۲٪) قابل تثبیت با قیر است.

قیر مصرفی: قیر خالص با کندروانی کم قیر زودگیر

مقدار قیر: ۲ تا ۶ درصد وزن خشک خاک

خاک‌های ریز دانه در صورتی قابل تثبیت با قیر هستند که بتوان آنها را از حالت کلوخه خارج و دانه‌های آن را قیر اندود کرد.

تثبیت خاک با قیر سبب کاهش خاصیت آب مکندگی خاک می‌شود. هر چه میزان قیر بیشتر باشد خاصیت آب مکندگی کمتر است.

تثبیت خاک با خاکستر

خاکستر ذغال سنگ یکی از فرآورده‌هایی است که عمدتاً به دو گروه خاکستر ته کوره [1] و خاکستر نرم بادی[2] تقسیم می‌شود. خاکستر ته کوره دارای دانه‌بندی درشت شبیه شن ریز و ماسه است و خاکستر نرم بادی که از طریق سیستم گردگیر کوره‌های مخصوص سوزاندن ذغال سنگ جمع‌آوری می‌شود دارای دانه‌بندی ریز است که ۱۰۰٪ آن از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند(معاونت امور فنی دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، ۱۳۷۵). خاکستر ذغال حاوی ۱تا ۳۵ درصد آهک(CaO)، ٤ تا ۲۰ درصد اکسید آهن(Fe2O3)، ۳۵ تا ۶۰ درصد سیلیکات(SiO2) و ۱۰ تا ۳۰ درصد آلومینات(Al2O3) است. سایر کانی‌های موجود در خاکستر ذغال سنگ عبارتند از: اکسید منیزیم (MgO)، اکسید سدیم (Na2O)، اکسید پتاسیم(K2O)، تری اکسید سولفور (SO3)، اکسید تیتانیوم (TiO2)، اکسید منگنز (MnO) و کربن(C) (بارزی، وفائیان، ابطحی،۱۳۸۹).

از خاکستر به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های قیری و یا برای بهبود خواص خمیری و فیزیکی خاک‌ها به همراه و یا حتی بدون آهک و سیمان بر اساس ارزیابی‌های اقتصادی و در نظر گرفتن فاصله حمل این ماده به محل مصرف استفاده می‌شود. دستورالعمل ۵۹۳ ASTM C مراحل ارزیابی خاکستر را به‌منظور استفاده با آهک برای تثبیت خاک‌ها و دستورالعمل ۳۱۱ ASTM C نحوه نمونه‌برداری و آزمایش خاکستر را به‌منظور استفاده با سیمان یا آهک برای تثبیت خاک‌ها و همچنین استفاده در بتن سیمانی تشریح کرده است.

تثبیت خاک با استفاده از آنزیم

بسیاری از روش‌های بهسازی که به‌طور عمومی به‌کاربرده می‌شوند، هم شامل مصرف انرژی مکانیکی و هم شامل افزودن

مواد ساخته‌شده توسط انسان به خاک است که هر دو گزینه به‌طور ذاتی دارای هزینه‌های مصرف انرژی بالایی می‌باشند (Dejong et al, 2010) و همچنین سیمان شدگی مصنوعی، همانند استفاده از سیمان پرتلند و آهک در تزریق دوغاب‌های سیمانی، مستلزم افزودن موادی با خاصیت قلیایی بالا به خاک است که باعث آلودگی خاک می‌گردد(Fritzges,2005). بسیاری از دوغاب‌های شیمیایی نیز که به‌طور عمومی مورداستفاده قرار می‌گیرند، سمی بوده و ممکن است دارای تأثیرات جدی و مهمی بر روی سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشد.(Karol, 2003)

لذا با توجه مشکلات ذکر شده، تثبیت شیمیایی با روش کاهش آنزیم (تزریق بیولوژیکی) اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در این روش از نوعی سیمان شدگی بیوشیمیایی که سیستم رسوب برجا کلسیت نام دارد، استفاده می‌گردد.

رسوب سیمان کلسیتی از طریق تزریق سوسپانسیون حاوی سلول باکتریایی و محلول واکنشگر که شامل اوره و کلرید کلسیم است، به داخل فضاهای خالی صورت می‌گیرد. تحت شرایط مطلوب زیست‌محیطی، باکتریPasterurii اوره را به‌عنوان منبع انرژی مصرف کرده و باعث تولید آمونیاک و دی‌اکسید کربن می‌گردد و باعث افزایش PH در محیط مجاور می‌شود(آقایاری و دیگران، ۱۳۹۱).

$$CO(NH2)2+H2O2NH3+CO2 \quad (٤)$$

هم‌زمان با هیدرولیزشدن آنزیمی اوره، دو واکنش دیگر به‌طور طبیعی در حضور آب انجام می‌شود و باعث می‌شود که آمونیاک و دی‌اکسید کربنی که به‌وسیله اوره آزاد شده است، به یون آمونیوم و اسیدکربنیک تبدیل شود.

$$2NH3 + H2O \rightleftharpoons 2NH^{-}4 + 2OH^{-} \quad (٥)$$

$$CO2 + OH^{-} \rightleftharpoons HCO^{-}3 \quad (٦)$$

افزایش PH که در محیط روی می‌دهد، باعث می‌گردد تا یون‌های کلسیم موجود در محلول که از طریق حل شدن کلرید کلسیم در آب حاصل‌شده‌اند، با یون‌های اسیدکربنیک و یون‌های هیدروکسید موجود در محلول واکنش داده و منجر به رسوب سیمان کلسیتی شوند.

$$Ca2+ HCO^{-}3 + OH^{-} \quad H2 O + CaCO3 \quad (٧)$$

به دنبال این فرایند، باندهایی از سیمان کلسیتی در فضاهای خالی موجود بین دانه‌های خاک تشکیل می‌شوند و باعث چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و درنتیجه افزایش مقاومت مکانیکی خاک می‌شوند.

٦-نتیجه‌گیری

امروزه متخصصان از روش‌های متعددی برای بهسازی و تثبیت جهت بهبود خواص خاک استفاده می‌کنند تا خاک بتواند همه تنش وارده به آن را تحمل کند. به‌صورت عمده روش‌های بهسازی در سه گروه اصلی تقسیم می‌شود که شامل روش‌های شیمیایی، روش‌های مکانیکی و روش‌های فیزیکی است. در این پژوهش به معرفی برخی از روش‌های بهسازی خاک‌ها با استفاده از تثبیت شیمیایی پرداخته‌شده است. در روش تثبیت شیمیایی خاک‌ها با افزودن ماده و یا مواد شیمیایی که باعث واکنش شیمیایی با خاک می‌شوند، انجام می‌شود. تعیین نوع و درصد ماده تثبیت‌کننده شیمیایی بستگی به رده خاک هدف تثبیت دارد. در این پژوهش به معرفی روش‌هایی چون تثبیت با آهک، سیمان، قیر، خاکستر و آنزیم پرداخته شده است و نکاتی در مورد هر یک از این روش‌ها ارایه شده است.

۷-مراجع

-آقایاری، ع. باغبانیان، ع.ر. احمدی، ع. هاشم الحسینی، ح.، (۱۳۹۱)، "مطالعات آزمایشگاهی بررسی تأثیر استفاده از روش‌های بیولوژیکی در بهسازی خاک‌های ریزشی"، نشریه تخصصی مقاوم‌سازی و بهسازی در ایران.

-بارزی، ش. وفائیان، م. ابطحی، م.، (۱۳۸۹)، "تثبیت خاک‌های دانه‌ای با پلیمرهای مایع"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، ایران.

-ترابی، ع.، (۱۳۹۲)،"ارزیابی ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر تثبیت خاکی مسلح و بررسی اثر مقیاس‌گذاری"، ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۷۸.

-دستجردی، و (۱۳۸۹)، "ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک چسبنده اصطکاکی مسلح به ژئوگرید و تثبیت آن"، محل انتشار: سومین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران.

-ذوالفقاری‌فر، س. ی.، (۱۳۹٤)، "بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک در روسازی راه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد

دانشگاه تهران.

-"راهنمای تثبیت لایه‌های خاک‌ریز و روسازی راه"، (۱۳۹٤)، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل‌ونقل.

-روشندل، ب.ا.، (۱۳۹۸)، "بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک و مصالح سنگی روسازی راه"، ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۸۳.

-طباطبایی، ا.م.، (۱۳۹۷)، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ نهم.

-فلاح، م.، (۱۳۹٤)، "تثبیت و اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌بادی با بهره گرفتن از دوغاب پلیمری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد تفت.

-لیتکوهی، س.، (۱۳۹۱)، "بهسازی خاک در ایران گذشته، حال و آینده"، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، پژوهشگاه نیرو، تهران.

-"مشخصات فنی عمومی راه"، (۱۳۷۵)، نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی دفتر تحقیقات و معیارهای فنی.

-مقدس‌نژاد ، ف.، (۱۳۹٦)، "تثبیت خاک با استفاده از سیمان آب‌زدا جهت استفاده در پروژه‌های راه‌سازی"، محل انتشار: پنجمین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران.

-منصوری، م.، (۱۳۹۲)، "مروری بر تاثیر ژئوسنتیک‌ها برافزایش ظرفیت باربری و نشست‌هایی نواری روی خاک‌های تثبیت‌شده ماسه‌ای، ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۹۲.

-ASTM (2000), “Test method for unconfined compressive strength of cohesive soil”, Vol. 04.08, pp. 2166-2187.

-ASTM ,(2000), “Test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils”, 1883-87, Vol. 04.08, pp.248-255.

-ASTM, (2000), “Method for particle size analysis of [r] soils”, D421-58, Vol.04.08, pp.91-97.

-ASTM, (2000), “standard test method for freezing [NO] and thawing compacted soil- cement mixtures”, D560, Vol.04.01, pp.463-464.

-ASTM, (2000), “Test method for particle sizeanalysis of soils”, D422-87, Vol. 04-08, pp.91-97D.

-ASTM, (2000), “Test method for specific gravity of [t] soils”, D854-87, Vol. 04.08, pp.168-17.

-Bhattacharja, S. and Bhatty, j.I., (2003), “Stabilization of Soils by Portland cement or Lime – A critical Review of Literature”, PCA R&D serial, No. 2066, Portland cement Association, inois USA.

-Bhattacharja, s. and Todres, H.A.,2003, [-NN], “Stabilisation of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature” , PCA R&D serial No.2066.

-Croney, D., Croney P., (2016), “Design and performance of road pavement”, (Third ed.), McGraw Hill book co.

-Dejong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C., Nelson, D.C., (2010), “Biomediated soil improvement”, Ecological Engineering 36(2), pp. 197-210.

-Diamond, S. and Kinter, E.B., (1965), “Mechanisms of [N] soil-lime stabilization”, Highway Research record92, pp.83-10.

-Fritzges, M.B., (2005), “Biologically Induced Improvement of The Response of Sands”, Master’s thesis, University of Massachusetts, Amherts, MA, 111.

-Ghiasi, V., and Mostafaeifar, A., (2023), Assessment of the effects of geosynthetics on geotechnical soils behavior. Road, 31(115), 67-80. doi: 10.22034/road.2022.323429.2015.

-Ghiasi, V., and Kamalabadi Farahani, M., (2022), "Feasibility study of soil pollution removal using the electrokinetic method". Road. doi: 10.22034/road.2022.323983.2018.

-Ghiasi, V., and Eskandari, S., (2022), “Improvement of Alluvial Soils Using Cement Injection Method. Road”. doi: 10.22034/road.2022.323689.2016.

-Ghiasi, V., and Madah, S., (2022), "Investigation of increasing shear strength of dispersive clays using additives", Road. doi: 10.22034/road.2022.324512.2023.

-Ghiasi, V., and Farzan, A, (2019), "Numerical study of the effects of bed resistance and groundwater conditions on the behavior of geosynthetic reinforced soil walls", Arab J Geosci 12, 729.

-Ghiassian, H., Holtz, D., H., (2017), "Geosynthetic cellular systems (GCS) in coastal application", Report University of Washington, Dept. of Civ. & Envir. Eng., September.

-Hunter, D., (2020), "Lime- induced heave in sulfate bearing clay soils", Journal of geotechnical engineering, ASCE, Vol. 114, No.2.

-Karol, R.H., (2003), "Chemical Grouting and Soil Stabilization", NewYork, Marcel Dekker, 8.

-Little, D.N., Thompson, R. L., Terrell, R.L., Epps, J. L., Borenberg, E. J., (1987), "Soil Stabilization for Roadways and Airfields" AFESC Final Riport, U.S.A.

-Prusinski, J.R., Bhattacharja, S., (2018), "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils", TRR NO.1652.

-Rolling, M. P., (1996), "Geotechnical materials in construction", McGraw Hill book Co.

-Little, D.N., Males, E., Pursininski, J.R., Stewart, B., (2001), "Cementations stabilization", TRR.

-Ghiasi, V., and Tavagho Hamedani, H., (2022), "A review of soil improvement with waste and recycled materials and its impact on soil parameters", Road.
doi: 10.22034/road.2022.324228.2019.

-Ghiasi, V., and Zakavi, I., (2022), "Geosynthetics of stone columns- A review". Road.
doi: 10.22034/road.2022.333550.2033

-Ghiasi, V., and Molaei Tari, P., (2022), "Geotechnical design of landfills and solutions for their construction in different soils". Road.
doi: 10.22034/road.2022.324326.2020

-Ghiasi, V., and Nazhdghorbani, A., (2022), "An overview of the use of fly ash for soil stabilization", Road.
doi: 10.22034/road.2022.333556.2034.

-Ghiasi, V., and Molaei Tari, P, (2023), "Investigating the potential application of biochar on soil water retention properties (SWRC) with different textures in geotechnical engineering structures". Road, (), -. doi: 10 .22034/road.2023.353589.2073.

-Ghiasi, V., and Dashti famili, S, (2023), "A Review of the Factors That Cause Sinkholes and the Effect of Soil Type on Its Formation". Road, 31(114), pp.15-32.
doi: 10.22034/road.2022.323699.2017.

-Ghiasi, V., and Najafi, F, (2022), "Investigation of liquefiable soils improvement methods". Road, 30(110), pp.41-56.
doi: 10.22034/road.2023.112863.

An Overview of Chemical Soil Stabilization Methods

Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.
Mostafa Haghtalab Joraghani, Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.
Sina Rashno, M.Sc., Student, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT
Weakness of soil in bearing capacity, lack of desirable mechanical properties, swelling properties, etc. These issues and methods required new tricks that were achieved with the evolution of engineering knowledge and the emergence of new technologies in the field of civil engineering. Different methods for soil improvement are selected according to the importance of the project, primary soil type, area of the area to be improved, local access to materials, equipment and specialized personnel, environmental factors, engineers' experiences, economic issues and time allowed to complete the project. It should be noted that knowing the area and studying the types of soils that cause problems is also very necessary and important. In many cases, the soil at the construction site is not suitable for use. In this situation, this problem can be solved with appropriate solutions. One of these solutions is chemical stabilization of soil. Chemical stabilizers stabilize and strengthen soil by creating chemical reactions and altering the structure and bonding between soil particles. In this type of reaction, soil particles completely lose their nature and become a substance with new characteristics. In this article, first, in addition to getting acquainted with the types of problematic soils, the most important methods of soil stabilization and soil formation and various methods of chemical soil stabilization are examined.

Keywords: Chemical Stabilization, Enzyme, Bitumen, Lime and Cement, Ash