

روش‌های گوناگون تثبیت خاک لایروبی و کربناته

مقاله پژوهشی

مسعود صادق‌پور منفرد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده ساختمان و مسکن، تهران، ایران

ایرج رحمانی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

عطا آقایی آرای، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: I.Rahmani@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۴

صفحه ۴۲-۱۱

چکیده

خاک‌های لایروبی از لایروبی احدائی (حاصل احداث سازه‌های هیدرولیکی) یا لایروبی نگهداری (حاصل نگهداری سازه‌های هیدرولیکی) به دست می‌آیند. با توجه حجم زیاد، بی استفاده رها شدن و آلودگی اندک این خاک‌ها؛ پژوهشگران در اندیشه‌ی به کار گرفتن آن‌ها به عنوان جایگزین خاک هستند. ضعف باربری، ویژگی خردشوندگی و دشوار بودن پیش‌بینی رفتار، برخی از مسایل خاک مشکل آفرین کربناته است. خاک لایروبی غیرکربناته نیز اغلب ویژگی‌های فنی مناسبی ندارد. خلیج فارس با ساحل‌های پوشیده از رسوب‌های کربناته نیز ناگزیر لایروبی می‌گردد. با توجه به اهمیت بسیار زیاد این آبراه در اقتصاد و تامین انرژی جهان، و همچنین مشکل ساز بودن خاک کربناته‌ی موجود در آن (برای نمونه ایجاد مشکل در پی سکوهاستخراج نفت)؛ خاک کربناته‌ی خلیج فارس نیز مانند خاک لایروبی نیازمند بهسازی است. یکی از روش‌های پر کاربرد بهسازی خاک، تثبیت است. جدا از کاربرد مواد نوین (مانند پلیمر و فیبر)، همچنان تثبیت با سیمان و آهک پرکاربردترین روش تثبیت برای انواع گوناگون خاک‌ها هستند. استفاده از خاک تثبیت شده در سازه‌های مهندسی مانند بدنه‌ی راه به عنوان اساس و زیراساس؛ افزون بر ارزش اقتصادی، اهمیت زیست محیطی و فنی نیز خواهد داشت. بهسازی و تثبیت خاک با افزودنی‌ها و روش‌های گوناگون انجام می‌شود. بسته به نوع خاک و مواد موجود در هر منطقه، روش تثبیت مناسب متفاوت است؛ بنابراین نمی‌توان نسخه‌ی یکسانی برای تثبیت خاک‌ها پیشنهاد کرد. این مقاله به خاک‌های کربناته و لایروبی، روش‌های اصلاح و تثبیت آن‌ها؛ و مروری بر برخی تجربه‌های عملی تثبیت این خاک‌ها پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: خاک کربناته، خاک لایروبی، تثبیت، سیمان، سرباره فولاد

۱- مقدمه

آن‌ها استفاده کرد؛ پژوهشگران در سراسر جهان در اندیشه‌ی به کار گرفتن این مصالح به عنوان نوعی خاک هستند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، جنس بیشتر رسوب‌های لایروبی شده در سراسر جهان کربناته است. خاک کربناته رفتار ویژه‌ای دارد و به عنوان خاک مشکل آفرین شناخته می‌شود. برای نمونه می‌توان به ضعف باربری، ویژگی خردشوندگی و دشوار بودن پیش‌بینی رفتار این‌گونه خاک‌ها اشاره کرد. در کل، خاک‌های کربناته، ریزدانه و از نظر پارامترهای مقاومتی ضعیف هستند. ساخت و ساز (راه و

سالانه چند میلیون مترمکعب خاک از بنادر سراسر جهان (برای نمونه ۱۰ تا ۱۵ میلیون مترمکعب در ژاپن) و از جمله ایران، لایروبی می‌شوند؛ تا بندر کماکان در وضعیت مطلوب بماند و کشتی‌هایی که در بندر رفت و آمد می‌کنند دچار مشکل نشده و به گل نشینند. خاک‌های لایروبی موادی هستند که از لایروبی احدائی (حاصل احداث سازه‌های هیدرولیکی) یا لایروبی نگهداری (حاصل نگهداری سازه‌های هیدرولیکی) به دست می‌آیند. با توجه به اینکه تنها نزدیک به ۱۰٪ از این مصالح به گونه‌ای آلوده هستند که نمی‌توان از

۲- خاک‌های کربناته

بیش از ۴۰ درصد بستر دریاها و اقیانوس‌های جهان پوشیده از رسوب‌هایی است که به لحاظ منشا تشکیل (سه گونه‌ی اصلی بیولوژیکی یا زیستی (متداول‌ترین روش شکل‌گیری)، شیمیایی، و مکانیکی)، نوع کانی و رفتار مهندسی با خاک‌های کوارتزی معمول تفاوت عمده دارند؛ این خاک‌ها دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای کربنات کلسیم هستند و کربناته نامیده می‌شوند. منشا آنها به طور معمول پسماندهای موجودات زنده‌ی دریایی است. این گونه خاک‌ها به دلیل ترد بودن، ویژگی شکنندگی ذرات و تغییر حجم زیاد؛ باعث پدید آمدن مشکلات در ساخت و ساز می‌شوند و مساله‌ساز هستند. چندین نمونه از خرابی سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک‌های کربناته (کلسیتی) طی زمین‌لرزه‌های گوام ۱۹۹۳، هاوایی ۲۰۰۶ و هاییتی ۲۰۱۰ گزارش شده است (حسنلوراد، صالح‌زاده و شاه نظری؛ ۱۳۸۸)، (رسولی، ۱۳۹۱) و (محمدپور سلوط، ۱۳۹۴). سازند اصلی ماسه‌های ساحلی؛ آراگونیت، کلسیت، خاک کوارتز مادر، همراه با گچ و انیدریت هستند. مواد چسباننده‌ی اصلی پرکننده‌ی فضا‌های میان ذرات دانه‌ای در ماسه‌های ساحل جنوبی خلیج فارس (که به طور طبیعی سیمانی شده، تحکیم نشده، ناهمگون و غرق در آب شور هستند)؛ آراگونیت و کلسیت منیزیم میکروکریستالی هستند. سیمان آراگونیت به نظر ناپایدار می‌رسد و در محیط دریایی به طور موضعی به کلسیت پایدارتر تبدیل می‌گردد. نسبت به لایه‌های ریزتر و دارای لای بیشتر؛ تمایل لایه‌های درشت‌دانه‌تر و متخلخل‌تر به سیمانه شدن، بیشتر است (Aiban, ۱۹۹۴)، (Shinn, ۱۹۶۹) و (AI-Amoudi, ۱۹۹۲). بخش عمده‌ای از ماسه‌ی کربناته، قابلیت خرد شدگی دارد (حسنلوراد، صالح‌زاده و شاه نظری؛ ۱۳۸۸). برای چیرگی بر آثار خردشدگی ذرات خاک بر روی مقاومت شمع‌های اصطکاکی؛ از شمع‌های تزریقی به کار می‌روند می‌روند (Kim and Siddiki, ۲۰۰۶). رفتار مکانیکی گونه‌های متفاوت خاک‌های کربناته، تحت تأثیر شکل ذرات سازنده‌ی آنهاست. این خاک‌ها به لحاظ اندازه و نوع دانه‌بندی بسیار گسترده هستند. مهمترین ویژگی مکانیکی خاک‌های کربناته، قابلیت فشردگی بالای آن است. این خاک، گاهی تا سه برابر مترامم می‌گردد (رسولی، ۱۳۹۱). شکست ذرات بر روی برخی ویژگی‌های

سازه) بر روی این خاک‌ها دشوار است. مشکل هنگامی دو چندان می‌شود که مصالح قرصه‌ی مناسب در دسترس نباشد. در این وضعیت، بهسازی خاک موجود تنها راه‌حل و گزینه‌ی اقتصادی به شمار می‌رود. بهسازی خاک با روش‌های گوناگون انجام می‌شود. یکی از روش‌های پر کاربرد بهسازی خاک، تثبیت است. تثبیت با روش‌ها و مواد گوناگون انجام می‌شود. روش‌های بهسازی خاک‌های لایروبی و کربناته؛ مانند اصلاح دانه‌بندی، افزودن آهک، سیمان، استفاده از سرباره‌های فولادی و یا دیگر مواد؛ است. در صورت تثبیت این خاک‌ها، مشکلات زیست‌محیطی و همچنین مساله‌ی کمبود منابع قرصه‌ی مناسب در مناطق دور از دسترس به ویژه جزیره‌ها (مانند بوموسی، کیش، قشم، تنب کوچک و بزرگ) تا حد زیادی برطرف می‌شود. بسته به نوع خاک و مواد موجود در هر منطقه، روش تثبیت مناسب متفاوت است؛ بنابراین نمی‌توان نسخه‌ی یکسانی برای تثبیت خاک‌ها پیشنهاد کرد. با وجود این، تثبیت با سیمان و آهک همچنان پرکاربردترین روش تثبیت برای انواع گوناگون خاک‌ها هستند. افزون بر آن، پژوهشگران در تلاش هستند تا مواد تازه‌ی دیگری برای تثبیت و بهسازی خاک‌ها به کار ببرند؛ مانند: پلیمر، فیبر و شایان ذکر است یکی از مهمترین مواد مورد نظر برای تثبیت خاک‌های گفته شده، سرباره‌ی فولاد است که خود محصول جانبی صنایع فولاد می‌باشد. انباشت بیش از اندازه‌ی مصالح لایروبی شده و سرباره‌های فولاد بدون استفاده، در محیط زیست خشکی و دریا مساله‌ی زیست‌محیطی جدی به شمار می‌رود؛ بنابراین، استفاده از این مصالح ضروری و با اهمیت است. بدیهی است به کار گرفتن این محصول جانبی همراه با خاک لایروبی شده یک حالت ایده‌آل و اقدام مناسب زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی به شمار می‌رود. هدف از این مقاله، شناخت نوع، کیفیت و روش‌های بهسازی خاک لایروبی شده و خاک کربناتی با ابزار، مواد و روش‌های سنتی، محصول جانبی صنعت و نوین است. یکی از اهداف مهم این مقاله امکان استفاده خاک‌های لایروبی و کربناته در ساخت روسازی راه در مناطقی مانند جنوب ایران است. در این مناطق؛ منابع قرصه‌ی مناسب در دسترس نیستند و نیاز به ساخت راه، راه‌آهن، بارانداز، پارکینگ، انبار و ... رو به افزایش است.

فیزیکی گوناگون (سه ماسه از ساحل شمالی خلیج فارس در ایران و ماسه‌ی چهارم از شمال انگلستان) بر اساس رویکرد انرژی نشان می‌دهند برای هر ماسه؛ اصطکاک میان ذرات، اتساع و شکست ذرات؛ منجر به مقاومت برشی و کرنش‌های حجمی می‌شود. انرژی مصرف شده برای شکست ذرات و زاویه‌ی شکست ذرات با افزایش فشار همه‌جانبه و انرژی مصرفی کل افزایش می‌یابد. هر چند، بدون توجه به نوع خاک، نسبت «زاویه‌ی شکست ذرات به زاویه اصطکاک داخلی»؛ با افزایش مقدار انرژی مصرفی برای نسبت «شکست ذرات به انرژی مصرفی کل» در نقطه‌ی اوج پاسخ «تنش انحرافی - کرنش محوری» مرتبط است (۲۰۱۴ Hassanlourad, Salehzadeh and Shahnazari). سیمان لازم برای بهسازی ماسه‌ی بادرقتی، ۸٪ تا ۲۰٪ گزارش شده است. این مقدار بالا، منجر به نتایج عالی مقاومت و ظرفیت باربری می‌گردد. افزودن عامل سیمانی به خاک‌های ماسه‌ی بادرقتی موجب چسبندگی و اصطکاک آن می‌گردد (۱۹۹۴ Aiban, Murff, ۱۹۸۷). طبقه‌بندی خاک کربناته چند روش دارد. اگر میزان کربنات بیش از ۴۰ درصد باشد، رفتار خاک دانه‌ای و در موارد دیگر رفتار خاک چسبنده خواهد بود؛ بنابراین بایستی مقدار کربنات همراه با ویژگی‌های نشانه‌ای دیگر مشخص شود (پولوس، ۱۳۸۷).

۳- خاک‌های لایروبی

لایروبی برای نگهداری رودخانه‌ها، بندرها، دریاچه‌ها و حفظ عملکردشان در سطح طبیعی ضروری است (۲۰۱۴ Huang et al.). مصالح لایروبی^۲ موادی هستند که لایروبی شده‌اند یا می‌توانند لایروبی شوند (۲۰۱۶ Drujif). نگهداری کانال‌های آب و ساخت و ساز دریایی در ژاپن، هر ساله منجر به تولید ۱۰ تا ۱۵ میلیون متر مکعب خاک لایروبی شده می‌گردد (۲۰۱۱ Chan, Mizutani, and Kikuchi). خاک‌های لایروبی با دو هدف بدست می‌آیند. مصالح لایروبی که از احداث سازه‌های هیدرولیکی حاصل می‌شوند، مصالح لایروبی احداثی^۳ و مصالح لایروبی که با هدف نگهداری سازه‌های هیدرولیکی بدست می‌آیند، مصالح لایروبی نگهداری^۴ نامیده می‌شوند. درباره‌ی روش‌ها و ابزار مورد استفاده در لایروبی، مراجع (پاک و همکاران، ج ۱،

رسوب‌های کربناته مانند قابلیت تراکم، مقاومت برشی و نفوذپذیری؛ تاثیر دارد. انرژی ورودی نقش مهمی در رفتار شکست ذرات خاک‌های بررسی شده دارد. در خاک کربناته کرنش محوری اثر عمده‌ای بر مقدار شکست دارد (۲۰۱۳ Shahnazari and Rezvani). کرنش محوری کمتر از ۵٪ منجر به شکست ذرات در این خاک‌ها نمی‌شود (۲۰۱۴ Shahnazari, Salehzadeh and Rezvani). زاویه اصطکاک در خاک‌های کربناته از سه بخش تشکیل شده است: زاویه اصطکاک میان ذرات خاک، زاویه‌ی اتساع و زاویه‌ی شکست ذره. بخش شکست ذره تابع سختی، ساختار و شکل هندسی ذرات است. ذرات شکسته در هنگام آزمایش‌های زهکشی شده، حجم نمونه را کاهش می‌دهند؛ و موجب پدید آمدن فشار منفذی مثبت در آزمایش‌های زهکشی نشده می‌گردند. میان شکست نسبی ذرات و نسبت انرژی مصرف شده برای شکستن ذرات، سازگاری خوبی وجود دارد (۲۰۱۴ Hassanlourad, Salehzadeh and Shahnazari, ۲۰۰۸) و (Shahnazari, Hassanlourad, Salehzadeh and Shahnazari, ۲۰۰۸).

سالمات پژوهشگران سرگرم مطالعه‌ی ارتباط میان مؤلفه‌های آغازین خاک مانند اصطکاک میان ذرات، تخلخل، قابلیت خردشدگی و شکل دانه‌ها، تنش همه‌جانبه، مقاومت برشی و اتساع در حین اعمال تنش برشی هستند؛ مانند مطالعات Taylor (۱۹۴۸)، Newland و Alley (۱۹۵۷)، Rowe (۱۹۶۲)، Lee و Seed (۱۹۶۷) و Bolton (۱۹۸۶). نتایج بدست آمده نشانگر این است که مقاومت برشی ماسه‌های کربناته با بالا رفتن مقدار اتساع، بیشتر می‌شود. کاهش نرخ اتساع ناشی از بالا رفتن تنش همه‌جانبه است. در خاک کربناته، بالا رفتن تنش همه‌جانبه باعث خرد شدن دانه‌ها و کاهش نرخ اتساع می‌شود. در ماسه‌ی دارای دانه‌ی میله‌ای، تیزگوشه و ضعیف (مانند رسوب‌های دریایی، آتشفشانی و کربناتی) و گرانیته‌های هوازده؛ دانه‌ها بسیار زیاد خرد می‌شوند و در تنش‌های کوچک، نرخ اتساع کم نیز رخ می‌دهد (۱۹۷۹ Miura and O-hara, ۱۹۸۹)، (Noorany, Ueng, Tzou and Lee, ۱۹۸۸) و (۲۰۰۲ Indraratna and Salim). نتایج بررسی مقاومت برشی زهکشی شده‌ی چهار ماسه‌ی کربناته‌ی دارای ویژگی‌های

شیخ انصاری، ۱۳۷۷). اگر خاک لایروبی تثبیت گردد؛ کاربردهای گوناگونی مانند ایجاد بوستان‌ها و تفرج‌گاه‌ها، ایجاد و تغذیه‌ی ساحل^۱، استفاده در کشاورزی، باغبانی، جنگلداری، آبی‌ پروری، استفاده در محل معادن یا محل تخلیه‌ی زائدات جامد، استفاده در ساخت‌وساز و کاربردهای صنعتی، ایجاد زیستگاه و استفاده‌ی چند منظوره؛ خواهد داشت (پاک و همکاران، ج ۲، ۱۳۹۰). برای به‌کارگیری مصالح لایروبی باید سرعت مصرف متناسب با حجم زیاد مواد لایروبی شده باشد (Porbaha, Hanzawa and Shima, ۱۹۹۹). یکی دیگر از کاربردهای خاک لایروبی تثبیت‌شده، استفاده در لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر است. ویژگی‌های مکانیکی اندازه‌گیری شده‌ی مخلوط تثبیت‌شده به عنوان لایه‌ی اساس و زیر اساس مناسب است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی اثربخشی تثبیت با آهک و سیمان است (۲۰۰۹ Dubois et al.,).

۴- روش‌های بهسازی

۴-۱- تعریف تثبیت

اصلاح و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی خاک برای تامین یک رشته اهداف، تثبیت نامیده می‌شود. برخی روش‌های گوناگون تثبیت خاک‌ها؛ روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیک (روباندن گیاه) و الکتریکی هستند (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲).

۴-۲- اهداف تثبیت

مهمترین هدف‌های تثبیت خاک، عبارتند از: یافتن کاربرد مفید برای خاک لایروبی؛ افزایش دوام و مقاومت باربری خاک؛ کاهش نفوذپذیری، تورم، انقباض، رطوبت و دامنه‌ی خمیری خاک؛ پیش‌گیری از فرسایش خاک، کاهش ضخامت لایه‌های روسازی، ایجاد لایه‌های اساس و زیراساس با توان باربری بیشتر، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود، آماده‌سازی محوطه برای ساخت و ساز، غبارنشانی، صرفه‌جویی در مصرف مصالح و انرژی و پیشبرد تندتر کارهای اجرایی (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲).

(۱۳۹۰) و (USACE, ۲۰۱۵) نکات جامعی ارائه کرده‌اند. برای لایروبی باید بررسی‌های گوناگون و گاه متفاوتی انجام گردد؛ برای نمونه لازم است، بررسی زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، هیدرولیکی، باتیمتری و زیست محیطی انجام شود (پاک نژاد، ۱۳۸۶). مواد لایروبی شده جنس ثابتی ندارند. بنابراین، برای شناسایی آن‌ها، چندین روش به کار می‌رود. گزینش روش مناسب نیاز به شناخت شرایط موجود می‌باشد (پاک و همکاران، ج ۱، ۱۳۹۰). برای طبقه‌بندی مواد لایروبی، اغلب روش متحد^۲ (متکی بر ویژگی‌های ساختاری) به کار می‌رود (پاک و همکاران، ج ۲، ۱۳۹۰). به لحاظ آلوده بودن؛ خاک لایروبی در دو دسته جای می‌گیرد: آلوده و غیر آلوده (پاک و همکاران، ج ۲، ۱۳۹۰). افزون بر صنایع موجود در باریکه‌ی ساحلی، دیگر منابع آلوده‌سازی رسوب‌ها؛ فاضلاب‌های شهری، کشتی‌های تجاری، نفتکش‌ها و سکوهای نفتی هستند (Deluca and Grassle, ۱۹۹۳). ۲۵ تا ۳۰ درصد کل مواد لایروبی شده در کشورهای صنعتی؛ و ۱۰٪ در کل جهان، آلوده هستند. بنابراین، بیشتر خاک‌های لایروبی آلوده نیستند (پاک و همکاران، ج ۲، ۱۳۹۰). حتی خاک لایروبی شده از بنادر پر تردد جهان را نیز می‌توان با هزینه‌های کم و بدون نیاز به تثبیت و فرآوری، به کار گرفت. برای نمونه؛ خاک لایروبی شده از دو بندر رادس و قابس در تونس (که از لحاظ دانه‌بندی و میزان آلودگی با همدیگر تفاوت دارند) آلودگی‌هایی مانند فلزهای سنگین (مانند جیوه و آرسنیک) دارند، اما با این وجود؛ رسوب‌های بندر رادس بدون هر گونه بهسازی می‌توانند به کار روند (Bel Hadj Ali و همکاران (۲۰۱۴) (Bel Hadj Ali et al., ۲۰۱۴)). در مناطقی که آلودگی محرز شده و در عین حال لایروبی نیز اجتناب‌ناپذیر است، هدف اصلی باید جلوگیری از انتشار آلودگی باشد. رسوب‌های آلوده را می‌توان به یک مکان دفع مطمئن منتقل، و با لایه‌ای از مواد پاک و تمیز مانند ماسه پوشاند (Bray, Bates and Land, ۱۹۹۶). یا با روش‌هایی آلودگی آن را تا حد مجاز کاهش داد.

۳-۱- کاربردهای خاک‌های لایروبی شده

حجم خاک لایروبی بسیار زیاد است؛ بنابراین، کاربرد بهینه‌ی آن اهمیت روز افزون دارد (پاک و همکاران، ج ۲، ۱۳۹۰). باید همواره به حفظ تعادل میان حفاظت از محیط زیست و مزایای استفاده از خاک لایروبی اندیشید (پاک و

۴-۳- سازوکار تثبیت خاک

سازوکار تثبیت می‌تواند از تشکیل ترکیب‌های تازه (پیوسته شدن ذرات ریزتر خاک) تا ایجاد پوشش بر روی سطح ذرات توسط تثبیت‌کننده (برای محدود کردن حساسیت رطوبتی)؛ تغییر کند. تثبیت شیمیایی شامل مخلوط کردن یا تزریق ترکیب‌های شیمیایی فعال مانند سیمان پرتلند، آهک، خاکستر بادی، کلرید کلسیم و سدیم یا با مصالح ویسکو الاستیک مانند قیر؛ است. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی می‌توانند به سه گروه تقسیم شوند:

- تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند آهک شکفته، سیمان پرتلند و خاکستر بادی؛
- تثبیت‌کننده‌های محصول جانبی صنعت مانند غبار کوره‌ی سیمان^۷، غبار کوره‌ی آهک^۸؛
- تثبیت‌کننده‌های نوین مانند روغن‌های سولفونیک، کلرید آلومینیوم، آنزیم‌ها، پلیمرها و ترکیبات پتاسیم (۲۰۰۹ Little and Nair).

۴-۳-۱- سازوکار تثبیت‌کننده‌های سنتی

تثبیت‌کننده‌های سنتی^۹ بر واکنش‌های پوزولانی^{۱۰} و تبادل کاتیون^{۱۱} تکیه دارند (Little and Nair, ۲۰۰۹). سازوکار

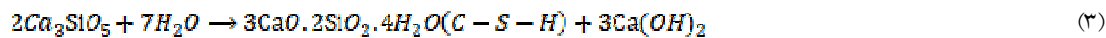
تثبیت خاک به نوع تثبیت‌کننده‌ی به کار رفته بستگی دارد. روند کلی تثبیت در حضور آب می‌تواند در ۴ فرآیند خلاصه گردد:

- تبادل کاتیون
- لخته شدن و انباشتگی^{۱۲}
- هیدراسیون سیمانی^{۱۳}
- واکنش پوزولانی.

در مورد خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان، همه‌ی چهار فرآیند یادشده رخ خواهد داد؛ در حالی که در مورد خاک‌های تثبیت‌شده با آهک، هیدراسیون سیمانی وجود نخواهد داشت. برای مخلوط‌های خاک-آهک، تبادل کاتیون و لخته شدن-انباشتگی واکنش‌های اصلی هستند؛ که پس از اختلاط، فوری رخ می‌دهند. هنگامی که pH در خاک به ۱۲/۴ می‌رسد (برابر با pH آهک اشباع در آب)؛ قابلیت حلالیت سیلیکا و آلومینا به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین، تا هنگامی که درون مخلوط، از آهک کلسیم کافی باقی مانده باشد؛ و pH کمینه ۱۲/۴ بماند؛ واکنش پوزولانی ادامه خواهد داشت. واکنش‌های پوزولانی پایه بدین صورت هستند:



توصیف گردد؛ در حالی که هیدراسیون کلسیم-آلومینات‌ها تا حدی پیچیده‌تر است:



لخته شدن-انباشتگی نیز فوری پس از مخلوط کردن خاک و سیمان رخ می‌دهد؛ و منجر به کاهش ویژگی خمیری خاک می‌گردد. آهک ساخته شده در هنگام هیدراسیون سیمان، به افزایش چسبندگی میان ذرات خاک در واکنش‌های پوزولانی؛ کمک می‌کند (Abu-Farsakh, Dhakal and Chen, ۲۰۱۵).

هیدراسیون سیمان به نسبت تند است و موجب مقاومت‌گیری فوری خاک می‌شود. رفتار هیدراسیون کلسیم-سیلیکات‌ها در سیمان می‌تواند توسط روابط زیر

بیشتر هیدراسیون تری کلسیم سیلیکات (Ca_3SiO_5) در هنگام چند روز نخست رخ می‌دهد و منجر به مقاومت‌گیری اساسی می‌شود. هیدراسیون دی کلسیم سیلیکات (Ca_2SiO_4) در مقاومت آغازین خاک-سیمان مشارکت کمی دارد؛ اما مشارکت قابل توجهی در مقاومت خمیر سیمان عمل آمده دارد. همانند مخلوط‌های آهک-سیمان، تبادل کاتیون و

۴-۳-۲- سازوکار تثبیت‌کننده‌های محصول جانبی صنعت

۴-۴-۱- آهک

آهک یکی از کهن‌ترین و همچنان یکی از متداول‌ترین افزودنی‌های به‌کار رفته برای بهسازی خاک‌هاست (۲۰۰۸ Muhunthan and Sariosseiri). بهسازی با آهک، فعالیت ساخت و ساز را به سه روش آسان می‌کند (۲۰۰۴ Mallela, Quintus and Smith). نخست، کاهش حد روانی^{۱۹} و افزایش حد خمیری^{۲۰} منجر به کاهش قابل توجه نشانه‌ی خمیری^{۲۱} شده و کاهش نشانه‌ی خمیری، کارایی^{۲۲} بیشتر خاک بهسازی شده را آسان می‌کند. دوم، به عنوان نتیجه‌ی واکنش شیمیایی میان خاک و آهک؛ مقدار رسوب‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه تراکم خاک‌های خیلی مرطوب آسان می‌گردد. سوم، افزودن آهک موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش چگالی خشک بیشینه می‌گردد؛ بنابراین، افزایش فوری مقاومت منجر به ایجاد یک بنیاد استوار^{۲۳} می‌گردد. این بنیاد، جایجایی پذیری تجهیزات را آسان می‌کند (۲۰۰۸ Muhunthan and Sariosseiri).

متداول‌ترین انواع آهک عبارتند از:

(آ) آهک زنده^{۲۴} (CaO)

(ب) آهک شکفته^{۲۵} (Ca(OH)_۲)

(پ) آهک زنده‌ی دولومیتی^{۲۶} (CaO+MgO)

(ت) آهک شکفته‌ی دولومیتی^{۲۷} (Ca(OH)_۲ یا Mg(OH)_۲)

توان تثبیت آهک زنده بیش از آهک شکفته است؛ همچنین، مصرف دوغاب آهک نسبت به پودر، مقاومت بیشتری به دست می‌دهد. تثبیت خاک ریزدانه‌ی مرطوب با آهک؛ موجب افزایش باربری، جایجایی و قابلیت تراکم؛ و کاهش ویژگی خمیری و درصد انقباض می‌شود (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲). تثبیت با آهک زیان‌های ذاتی خود را دارد؛ مانند کربناسیون، حمله‌ی سولفات‌ها و آثار زیست محیطی (۲۰۱۴ Taha Jawad et al.). مقاومت مصالح بهسازی شده با کلسیت با موارد زیر افزایش می‌یابد: مقاومت ذاتی ذره‌ها (دانه‌ها)، چگالی، کاهش اندازه‌ی ذرات دانه‌های میزبان، پیش اندود کردن دانه‌ها با کلسیت، گردگوشه بودن و تیز گوشه نبودن ذرات خاک (۲۰۰۲ Ismail et al.). هنگامی که طبیعت خاک نرم و چسبیده باشد؛ برای بهسازی آن اغلب، تثبیت با آهک به کار می‌رود (۱۹۹۶ Puppala, Mohammad and Allen). آهک برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با دامنه خمیری بزرگ‌تر از ۱۰ و رس دارای نشانه

همانند تثبیت‌کننده‌های سنتی، سازوکار اصلی تثبیت در بسیاری از تثبیت‌کننده‌های محصول جانبی صنعت^{۲۸}، واکنش‌های پوزولانی و تبادل کاتیون است. LKDها ممکن است به خاطر حضور پوزولان‌ها واکنش پوزولانی داشته باشند؛ یا ممکن است به خاطر نبود پوزولان‌ها یا کیفیت پایین، پوزولان‌های موجود در LKD، با یکدیگر واکنش ندهند. ریزدانه‌های موجود در گازهای خروجی تولید سیمان پرتلند بیشتر از LKD، شامل پوزولان‌های واکنش‌زا هستند. بنابراین، واکنش‌زایی پوزولانی بهتری دارند (۲۰۰۹ Little and Nair).

۴-۳-۳- سازوکار تثبیت‌کننده‌های نوین

سازوکار تثبیت با تثبیت‌کننده‌های نوین^{۱۵} بسته به نوع تثبیت‌کننده بسیار متغیر است. برای نمونه، قیر سنگدانه‌ها و خاک را توسط پوشاندن آنها و گسترش پیوند چسبندگی میان ذرات و چسبانده‌ی قیری؛ آب بند^{۱۶} می‌کند. سازوکار تثبیت دیگر تثبیت‌کننده‌های نوین مانند روغن‌های سولفونیک، آنزیم‌ها، تثبیت‌کننده‌های یونی و دیگر تثبیت‌کننده‌ها به طور مفصل در مرجع (۲۰۰۲ Petry and Little) آمده است. هنگامی که وجود مقادیر سولفات دارای قابلیت حلالیت بالا در خاک، قابلیت کاربرد تثبیت‌کننده‌های سنتی را محدود کند؛ تثبیت‌کننده‌های نوین در تثبیت نقش خواهند داشت (۲۰۰۹ Little and Nair).

۴-۴- تثبیت‌کننده‌های سنتی

افزودنی آهک و سیمان بهترین و ارزان‌ترین مواد مورد استفاده در تثبیت هستند. افزودنی بعدی خاکستر بادی و سرباره‌ی کوره‌ی بلند^{۱۷} است. برای تثبیت، حباب هوا و دانه‌های پلی استایرن گسترش یافته^{۱۸} هم به کار رفته‌اند؛ که در نتیجه‌ی استفاده از آنها چگالی کاهش می‌یابد و نشست کم می‌شود (۲۰۱۶ Drujif). پر کاربردترین مواد شیمیایی به کار رفته برای تثبیت، آهک و سیمان هستند. برای نمونه، هر کدام از این مواد شیمیایی در ۱۴ ایالت در آمریکا به کار می‌روند. بنابراین ۲۸٪ ایالت‌ها از آهک و ۲۸٪ از سیمان استفاده می‌کنند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت بیش از نیمی از ایالت‌ها از آهک و یا سیمان برای تثبیت استفاده می‌کنند (۲۰۱۶ Bandara, Jensen and Binoy).

کم، برای تثبیت با سیمان مناسبتر هستند. در کل، عمل‌آوری خاک‌های تثبیت‌شده با آهک و آهک - خاکستر بادی؛ خیلی آرام‌تر از خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان است (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲)، (۲۰۱۵ Abu-Farsakh, Dhakal and Chen, (Engineering manual 1110-3-137, ۱۹۸۴)، (Chen, Currin, Allen and ۱۹۷۶) و (ACI 230.1R-90., ۱۹۹۰). گزارش کمیته‌ی ۲۳۰ ACI (۱۹۹۰) بیان می‌کند که بهسازی با سیمان موجب تغییرات در چگالی خشک بیشینه و مقدار رطوبت بهینه می‌گردد؛ اما سمت و سوی تغییرات قابل پیش‌بینی نیست. اما اغلب پژوهش‌ها معتقدند تثبیت با سیمان موجب افزایش رطوبت بهینه؛ کاهش چگالی خشک بیشینه؛ کاهش قابل ملاحظه‌ی نشانه خمیری و پتانسیل تورم؛ افزایش قابل توجه مقاومت، ضریب ارتجاعی و مقاومت در برابر آثار رطوبت و یخ‌زدن - ذوب یخ؛ می‌شود. رفتار مصالح تثبیت‌شده با سیمان نسبت به مصالح تثبیت نشده تردتر است. Bergado و همکاران (۱۹۹۶) درباره‌ی اثر تثبیت با سیمان بر تغییر رفتار رس نرم از وضعیت دارای تحکیم عادی^{۲۸} به بیش‌تحکیم یافته^{۲۹} گزارش می‌دهند (Muhunthan ۲۰۰۸ and Sariosseiri, (Bergado et al., ۱۹۹۶)، (طباطبایی، ۱۳۸۵) و (ACI 230.1R-90., ۱۹۹۰). یون سولفات موجود در آب به کار رفته برای تثبیت خاک با سیمان، نباید بیش از ۵۰۰ ppm باشد (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲) و (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۲). به طور معمول، A-۱، A-۲، A-۳ مناسب‌ترین خاک برای تثبیت با سیمان هستند؛ به شرطی که مقدار گذرنده از الک نمره ۲۰۰ در آن‌ها کمتر از ۳۵٪ باشد. خاک‌های آلی برای تثبیت با سیمان مناسب نیستند (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲). مقدار متداول سیمان مصرفی برای اهداف تثبیت از ۵٪ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک متغیر هستند (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸). در جدول ۱ مقدار سیمان لازم برای تثبیت خاک‌های گوناگون آمده است.

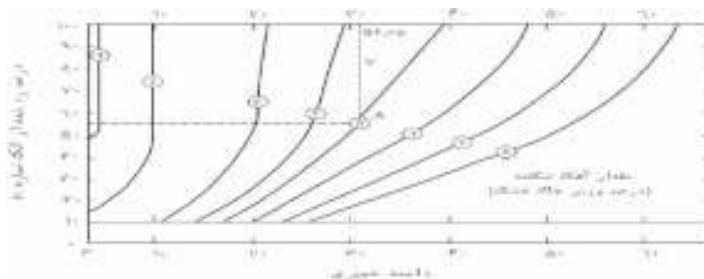
خمیری بیش از ۳۵، مناسب؛ و برای تثبیت خاک‌های دارای بیش از ۲٪ مواد آلی و بیش از ۵٪ سولفات قابل حل در آب؛ مناسب نیست. اغلب خاک‌های غیرآلی، به جز A-۱ را می‌توان با آهک تثبیت نمود (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲).

مقدار آهک لازم برای تثبیت خاک به ویژگی‌های مصالح مورد نیازی که تثبیت می‌گردد و درجه‌ی تثبیت لازم بستگی دارد. برای اهداف اصلاحی، به طور معمول ۲٪ تا ۳٪ وزن خشک خاک کافی است (Das, ۱۹۹۰) و (Maher et al., ۲۰۰۵). Grim و Eades (۱۹۶۶) پیشنهاد کرده‌اند که مقدار کمینه‌ی آهک لازم برای تثبیت یک خاک، مقداری است که می‌تواند pH را دست کم ۱۲/۴ نگاه دارد (۱۹۶۶). Eades and Grim, برای واکنش‌های پوزولانی، مقادیر بیشتر لازم است؛ و بنابراین، مقاومت‌گیری رخ می‌دهد. برای اهداف تثبیت، به طور معمول، ۵٪ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک به کار می‌رود (Das, ۱۹۹۰). برای تعیین آهک بهینه‌ی لازم برای تثبیت خاک، چندین روش وجود دارد (Bergado et al., ۱۹۹۶). روش PH، روش نشانه خمیری، روش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، روش مقاومت فشاری تک محوری و روش آشتو (حلاج شوشتری، ۱۳۹۲). مقادیر پیشنهادی آهک برای تثبیت لایه‌های گوناگون خاک به کار رفته در بدنه‌ی راه بر اساس روش آشتو در شکل ۱ آمده است. Hilt و Davidson (۱۹۶۰) (Hilt and Davidson, ۱۹۶۰) برای تعیین مقدار آهک بهینه رابطه‌ی زیر را پیشنهاد داده‌اند:

$$(5) \quad \text{مقدار آهک بهینه} = \frac{\text{میزان رسی}}{35} + 1/25$$

۴-۲-۴- سیمان

تثبیت با سیمان واکنش شیمیایی پدید می‌آورد. در کل، هر خاک دارای کمتر از ۲٪ مواد آلی یا pH بیشتر از ۵/۳ و «سولفات قابل حل در آب» اندک، می‌تواند با سیمان تثبیت گردد. خاک‌های دانه‌ای و مصالح رسی دارای نشانه خمیری



شکل ۱. درصد توصیه شده‌ی آهک برای تثبیت خاک بستر، زیراساس و اساس (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۲).

جدول ۱. مقدار سیمان مورد نیاز برای خاک (بر اساس طبقه‌بندی آشتو) (PCA, ۱۹۹۲) و (نشریه ۳۶۸، ۱۳۸۲) با تغییر.

مقدار سیمان برای آزمایش‌های تر و خشک شدن و یخ‌بندان - ذوب (درصد وزنی)	حدود معمول سیمان مورد نیاز		برآورد درصد وزنی سیمان (برآورد مقدار سیمان برای آزمایش وزن مخصوص - درصد رطوبت (درصد وزنی))	رده‌ی خاک	
	درصد وزنی	درصد حجمی		یونیفاید	آشتو
۷ - ۵ - ۳	۵ تا ۳	۷ تا ۵	۵	GW, GP, GM, SW, SP, SM	A-1-a
۸ - ۶ - ۴	۸ تا ۵	۹ تا ۷	۶	GM, GP, SM, SP	A-1-b
۹ - ۷ - ۵	۹ تا ۵	۱۰ تا ۷	۷	GM, GC, SM, SC	A-2
۱۱ - ۹ - ۷	۱۱ تا ۷	۱۲ تا ۸	۹	SP	A-3
۱۲ - ۱۰ - ۸	۱۲ تا ۷	۱۲ تا ۸	۱۰	CM, ML	A-4
۱۲ - ۱۰ - ۸	۱۳ تا ۸	۱۲ تا ۸	۱۰	ML, MH, CH	A-5
۱۴ - ۱۲ - ۱۰	۱۵ تا ۹	۱۴ تا ۱۰	۱۲	CL, CH	A-6
۱۵ - ۱۳ - ۱۱	۱۶ تا ۱۰	۱۴ تا ۱۰	۱۳	OH, MH, CH	A-7

۴-۳-۴- خاکستر بادی

خاکستر بادی محصول جانبی سوختن ذغال سنگ^{۳۰} در نیروگاه‌ها^{۳۱} است. ترکیبات خاکستر بادی شامل سیلیکا، آلومینا و اکسیدها و مواد قلیایی گوناگون است؛ بنابراین به عنوان مصالح پوزولانی در نظر گرفته می‌شوند (۱۹۹۰ Das, متداول‌ترین اجزای سازنده‌ی خاکستر بادی عبارتند از: $CaO, MgO, MnO, Fe_2O_3, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, Na_2O, K_2O, P_2O_5, SO_3$ و کربن‌های آلی. راهنمای انتخاب خاکستر بادی به عنوان عامل تثبیت‌کننده را می‌توان در ASTM C ۵۹۳ یافت (Muhunthan and ۲۰۰۸ Sariosseiri, بر اساس ترکیب شیمیایی دو نوع خاکستر بادی وجود دارد؛ تیپ «C» و تیپ «F». خاکستر بادی تیپ C شامل مقدار قابل توجهی آهک زنده است. این نوع خاکستر بادی، واکنش‌های پوزولانی و سیمانی پدید می‌آورد. خاکستر بادی کم‌رنگ‌تر نشان دهنده‌ی حضور مقدار زیاد اکسید کلسیم و خاکستر بادی تیره‌تر نشانگر مقدار زیاد مواد آلی است (Cockrell et al., ۱۹۷۰). خاکستر بادی می‌تواند ویژگی‌های مهندسی خاک را بهتر کند. هرچند، باید توجه شود که ویژگی‌های خاکستر بادی خیلی متغیر است و به ویژگی‌های شیمیایی ذغال سنگ و فن‌آوری سوزاندن بستگی دارد (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸).

۴-۵-۵- تثبیت‌کننده‌های محصول جانبی صنعت

۴-۵-۱-۱- سرباره

سرباره‌ی فولاد^{۳۲}، محصول جانبی صنایع فولاد است. استفاده از افزودنی سرباره‌ی فولاد منجر به افزایش ویژگی‌های مقاومت برشی یعنی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می‌گردد. سرباره انواع گوناگونی دارد؛ مانند سرباره‌ی کوره‌ی قوس الکتریکی^{۳۳}، سرباره‌ی فولادی دارای اساس اکسیژن^{۳۴}، سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و سرباره‌ی کوره‌ی بلند. این مواد، دور ریز به شمار می‌روند. سرباره‌ی GGBS به طور معمول جایگزین خوبی برای سیمان است. تا ۹۰٪ سیمان پرتلند را می‌توان با GGBS جایگزین کرد؛ که از سیمان پرتلند ارزان‌تر است. افزون بر سرباره، ذغال شسته^{۳۵} نیز از محصولات جانبی صنعت است و بهره‌گیری دوباره و موثر از آن از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی سودمند است (Drujif, ۲۰۱۶). (۲۰۱۴), (Kotsewara Rao, Sravani and Bharath, ۲۰۱۸), (Manimaran, Santhosh and Ravichandran, ۲۰۱۵), (Poh, Ghataora and ۲۰۰۶) و (Tasalloti et al., ۲۰۰۶), (Ghazireh,

۴-۵-۲- غبار کوره‌ی آهک (LKD) و غبار کوره‌ی

سیمان (CKD)

LKD محصول جانبی تولید آهک و CKD محصول جانبی تولید سیمان پرتلند است. LKD به طور معمول ۳۰ تا ۴۰ درصد آهک (زنده یا همراه با پوزولان‌های درون غبار) دارد. منبع این پوزولان‌ها اغلب سوخت به کار رفته برای تامین انرژی است. به طور کل، CKD شامل ۳۰ تا ۴۰ درصد CaO و ۲۰ تا ۲۵ درصد مواد پوزولانی است (Little and Nair, ۲۰۰۹). به طور تقریبی، سالانه ۱۲ میلیون تن CKD در ایالات متحده تولید می‌شود. نزدیک به ۸/۳ میلیون تن CKD تولید شده، سالانه در ساخت سیمان مصرف می‌گردد؛ ۳/۷ میلیون تن باقیمانده نیز تخلیه و انباشته می‌گردد (۲۰۰۸). مساحت سطحی ویژه (طباطبایی، ۱۳۸۵). این ویژگی، CKD را برای جذب آب سطح ذرات خاک توانمند کرده و به ویژه در گام‌های آغازین تراکم (اصلاح) سودمند است. افزودن CKD و سیمان منجر به افزایش مقدار رطوبت بهینه و کاهش چگالی خشک بیشینه می‌گردد. نشانه خمیری در آغاز افزایش می‌یابد، اما در درصدهای بالاتر افزودنی، این عدد کاهش می‌یابد. افزون بر آن، بهسازی با CKD منجر به بهبود قابل توجه مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب ارتجاعی می‌شود. باید توجه کرد که این افزایش برای خاک‌های تثبیت‌شده با CKD، از آنچه توسط افزودن سیمان حاصل می‌گردد؛ به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸).

۴-۶- تثبیت‌کننده‌های نوین

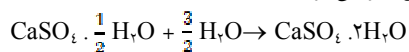
به طور کلی، تثبیت‌کننده‌های نوین به خاطر زمان عمل‌آوری کوتاه‌تر و نیاز کمتر به تجهیزات ویژه و مهارت ساخت ویژه؛ به تازگی محبوبیت یافته‌اند. گروه‌های اصلی این تثبیت‌کننده‌ها عبارتند از: نمک‌ها^{۳۱}، اسیدها^{۳۷}، آنزیم‌ها^{۳۸}، لیگنوسولفونات‌ها^{۳۹} (لیگنین سولفونیک: پلیمرهای پلی الکترولیت آنیونی محلول در آب؛ که محصول جانبی تولید خمیر چوب با استفاده از خمیر چوب سولفیت است.)، قیرآبه‌ها^{۴۰}، پلیمرها^{۴۱}، صمغ گیاهی^{۴۲} و ژئوفیبر^{۴۳} (۲۰۰۸). (Muhunthan and Sariosseiri,

۴-۶-۲- گچ

گچ به شکل خالص، سولفات کلسیم است؛ یک ماده‌ی معدنی که می‌تواند آهکی^{۴۸} شود. سولفات کلسیمی که به

روند تثبیت با قیر به انرژی‌های سطحی سنگدانه یا خاک و چسباننده‌ی قیری^{۴۴} بستگی دارد. خاک‌های دارای مساحت سطحی خیلی بالا را نمی‌توان با قیر تثبیت کرد؛ و کاربرد تثبیت‌کننده‌های قیری به طور معمول به مصالح دانه‌ای مانند شن‌ها و ماسه‌ها و شاید برخی ماسه‌های لای‌دار محدود می‌گردد. (Little and Nair, ۲۰۰۹). سازوکار تثبیت خاک با قیر، نسبت به سازوکار تثبیت با آهک و سیمان تفاوت دارد. چون قیر خنثی و چسبنده است؛ بنابراین، فقط موجب اتصال ذرات خاک قیر اندود به یکدیگر و افزایش مقاومت آن می‌شود (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲). بر خلاف تثبیت با آهک، سیمان و خاکستر بادی؛ استفاده از قیرآبه موجب واکنش پوزولانی نمی‌گردد. بنابراین، مقاومت‌گیری فقط بر اساس پیوستگی ذرات رخ می‌دهد. با تراکم بیشتر، نتایج بهتری حاصل می‌گردد (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸). تثبیت با قیرآبه (قیر امولسیون)، بیشتر برای خاک‌های درشت‌دانه عملی است؛ هر چند این روش می‌تواند برای تثبیت خاک‌های ریزدانه نیز به کار رود. با افزایش مقدار قیرآبه، تمایل خاک برای جذب سطحی آب کاهش می‌یابد. در مقایسه با دیگر نمونه‌های تثبیت شده با دیگر عوامل تثبیت‌کننده، هنگامی که نمونه‌ی تثبیت شده با قیرآبه در شرایط مرطوب آزمایش شود؛ مقاومت فشاری تک‌محوری کمترین کاهش را خواهد داشت (Santoni, Tingle ۲۰۰۴). اگر نشانه خمیری خاک‌های ماسه‌ای کمتر از ۱۲٪ و مقدار ریزدانه‌ی آن کمتر از ۲۵٪ باشد؛ به آسانی می‌تواند با قیرآبه تثبیت شود (طباطبایی، ۱۳۸۵). مقدار متداول قیرآبه برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای، ۲٪ تا ۶٪ وزن خشک خاک است. قیرآبه‌ی زودشکن^{۴۵} برای تثبیت خاک‌های ریزدانه مناسب‌تر از قیرآبه‌های کند شکن^{۴۶} و دیرشکن^{۴۷} است. مقدار متداول قیرآبه‌ی مورد نیاز برای تثبیت ریزدانه‌ها ۴٪ تا ۸٪ وزن خشک خاک است. نوع و مقدار قیرآبه به شدت به نوع خاک و دیگر پارامترهایی همچون وضعیت آب‌وهوای منطقه بستگی دارد (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸).

میانگین، پلاستر ساخت تقریباً نیمی از یک مولکول آب را بلوری (کریستال) می‌کند؛ و به مجرد هیدراسیون، منجر به واکنش زیر می‌گردد (Druijf, ۲۰۱۶):



۴-۶-۵- بتونیت

بتونیت^۶ یک رس دارای ویژگی خمیری بالاست؛ که اغلب با توانایی اش در باز نگهداشتن گمانه‌ها شناخته می‌شود. این ماده حد روانی مخلوط را افزایش می‌دهد. انواع متداول آن بتونیت سدیم و بتونیت کلسیم هستند. حد روانی بتونیت سدیم نسبت به بتونیت کلسیم بالاتر است. به طور معمول، حد روانی مصالح لایروبی خیلی کمتر از بتونیت است و مقدار رطوبتش خیلی بیشتر از حد روانی است. حد روانی هنگامی می‌تواند با استفاده از بتونیت بهبود یابد؛ که حد روانی مخلوط و مقدار رطوبت در مقدار بتونیت معین، یکسان باشد. در مورد ویژگی‌های نشست بتونیت، دیده شده است که تاثیر محیط قلیایی بر رفتار رسوب بتونیت کم است (Hendriks, ۲۰۱۶) و به همین دلیل می‌توان آن را به خوبی در ترکیب با سیمان، GGBS و آهک مورد استفاده قرار داد. بتونیت نفوذپذیری مخلوط مواد تثبیت‌شده را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، هنگام نیاز به جمع‌آوری آلاینده‌های موجود در مواد لایروبی می‌تواند سودمند باشد (Druijf, ۲۰۱۶).

۴-۶-۶- پرکننده‌ی دانه‌ای

پرکننده‌های دانه‌ای^۷ مانند ماسه نیز می‌تواند به عنوان افزودنی برای مصالح لایروبی به کار رود. اصل کاری این افزودنی‌ها افزایش مقدار رطوبت ماده‌ی خشک مصالح و بنابراین، کاهش مقدار رطوبت کل است. از آنجا که ذرات درشت، بیشتر غیرچسبند هستند؛ این ذرات تمایل به کاهش حد روانی مصالح دارند. به خاطر این ویژگی‌ها، برای تثبیت مصالح لایروبی، مقادیر زیادی تثبیت‌کننده‌های بی اثر (مانند پرکننده‌های دانه‌ای) لازم است (Druijf, ۲۰۱۶).

طور کامل آهکی شده است نیز به عنوان انیدریت^۹ شناخته می‌شود. گچ یک انیدریت است؛ بدین معنا که می‌تواند تا دو مولکول آب؛ به عنوان آب بلوری شدن^{۱۰} داشته باشد. به طور (۶)

۴-۶-۳- خاکستر زیستی

چند مطالعه درباره‌ی خاکستر زیستی^{۱۱} برای بررسی امکان‌پذیر بودن استفاده از آن در تثبیت خاک‌های نرم انجام شده است (Horpibulsuk et al., ۲۰۱۲). ترکیبات خاکستر زیستی می‌تواند خیلی متفاوت باشد؛ در کل ترکیب شیمیایی آن با دیگر خاکسترهایی که به طور متداول به کار می‌روند (مانند خاکستر بادی)، همپوشانی اندکی دارد. خاکستر زیستی به تنهایی آزموده نشده است (بدون سیمان یا آهک). هنگامی که برای بهسازی رس خاکستر زیستی همراه با سیمان به کار می‌رود، افزودن ۲۵٪ سیمان (درصد وزنی) موجب اثر پراکندگی بهینه^{۱۲} می‌گردد (Druijf, ۲۰۱۶).

۴-۶-۴- حباب هوا و دانه‌های EPS

یکی از مواد به کار رفته در تثبیت خاک‌ها، حباب هوا و دانه‌های EPS^{۱۳} (Expanded Polystyrene): پلی استایرن گسترش یافته (گریدهای یونولیت) است. حباب هوا در پروژه‌ی باند پرواز D توکیو، پروژه‌ی جزیره‌ی بندر کوبه و پروژه‌ی فرودگاه مرکزی ژاپن به کار رفته است (۲۰۱۲ Watabe et al., ۲۰۱۱)، (Watabe, Noguchi and Mitarai, al., ۲۰۰۳) و (Kitazume and Satoh, ۲۰۰۳). حباب هوا همراه با دیگر افزودنی‌ها برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک، به کار می‌رود؛ همچنین برای کاهش فشار جانبی زمین^{۱۴}، تحکیم نشست، جابجایی جانبی خاک و احیای زمین نیز کاربرد دارد مواد حباب ساز^{۱۵} همان‌هایی هستند که به طور معمول در صنعت بتن به کار می‌روند. این مواد برای مصالح لایروبی تثبیت شده با سیمان مناسب هستند. مقدار کاربردی حباب هوا به عنوان درصدی از حجم مصالح لایروبی در نظر گرفته می‌شود. هدف و شیوه‌ی کاربرد دانه‌های EPS مانند حباب هواست. ، یکی از زیان‌های دانه‌های EPS در مقایسه با حباب هوا (که مایع می‌باشد) جامد بودن دانه‌های EPS و تمایل آن‌ها به شناور شدن است (Druijf, ۲۰۱۶).

۴-۶-۷- تثبیت کننده‌ی پلیمری

پیچیدگی فرآیند پلیمرشدن^{۶۴} چالش مهم تثبیت کننده‌های پلیمری خاک است. همچنین؛ ممکن است روند کاربرد عملی پلیمرهای مایع گوناگون تفاوت قابل ملاحظه داشته باشد (Rezaeimalek, Huang and Bin-Shafique, ۲۰۱۷).

در بعضی انواع خاک‌ها، تثبیت کننده‌های سستی بی اثر هستند و حتی اثر منفی دارند؛ و در برخی شرایط قابل استفاده نیستند. برای نمونه، در خاک‌های دارای مقدار زیاد سولفات معدنی، واکنش میان کلسیم و سولفات می‌تواند موجب تشکیل ماده‌ی معدنی اترینگایت^{۵۸} ($2\text{Ca}\cdot\text{Al}(\text{OH})_6\cdot(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) و انبساط فزاینده می‌شود. برخی کمبودهای مرتبط با تثبیت کننده‌های سیمانی خاک را می‌توان با جایگزین‌های غیرمتعارف مانند رزین‌ها^{۵۹}، فوم‌ها^{۶۰}، قیرآبه‌های نفتی^{۶۱}، آنزیم‌ها، اسیدها، محصولات جانبی صنعت^{۶۲} و مصالح دورریز^{۶۳}؛ حل کرد. پلیمرهای مایع، از جمله پیش‌سازهای پلیمری مختلف، قیرآبه‌ها و رزین‌ها؛ در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند و توسط فراهم کردن چسبندگی و پیوستگی میان ذرات؛ از لحاظ افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری، کاهش روانگرایی خاک، و بهبود مقاومت در برابر عمل هوازدگی نتایج رضایت‌بخشی نشان داده‌اند. تنوع ساختار شیمیایی و

۴-۶-۸- مسلح سازی با فیبر

استفاده از فیبرهای پلی‌پروپیلن به اندازه‌ی تار مو^{۶۵} در کاربردهای ژئوتکنیکی به خاطر قیمت قابل رقابت‌شان در مقایسه با دیگر مواد تثبیت کننده؛ پذیرفته شده است (۲۰۰۸ Muhunthan and Sariosseiri). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فیبرهای پلی‌پروپیلن در جدول ۲ آمده است. این فیبرها دارای مقاومت شیمیایی بالا هستند و می‌توانند در شرایط دمای بالا استفاده شوند. افزون بر آن، مخلوط کردن فیبرها موجب کاهش فشار تورم و حجم انقباض می‌شود. همچنین، طول و مقدار فیبرها خیلی زیاد تحت تاثیر سطح بهسازی است (۲۰۰۰ Puppala and Musenda).

جدول ۲. ویژگی‌های فیبرهای پلی‌پروپیلن (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸) با تغییر.

وزن مخصوص	مقاومت کششی (MPa)	مدول (MPa)	نقطه ذوب		نقطه اشتعال		جذب	مقاومت به اسید و نمک	مقاومت قلیایی	رسانایی الکتریکی
			(°C)	(°F)	(°C)	(°F)				
۰/۹۱	۷۵۸/۴۵ تا ۵۵۱/۶	۳۵۰۲/۶۶	۱۶۲	۳۲۴	۵۹۳	۱۱۰۰	ندارد	زیاد	زیاد	کم

۴-۶-۹- نمک (کلرید سدیم)

افزودن نمک منجر به افزایش ضریب برجهندگی می‌شود. این کار برای استفاده در بستر روسازی راه‌ها در بلند مدت مفید خواهد بود (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸). بهبود قابل ملاحظه‌ی CBR، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم رس تجاری (BB۱)؛ خاک، ماسه و شن رودخانه‌ی آیر^{۶۶} تثبیت شده با نمک را گزارش کرده‌اند (Singh and Das, ۱۹۹۹).

ساختار و اثر محیطی) در مقایسه با ماسه‌ی تثبیت نشده، بهبود قابل ملاحظه می‌یابد. از جمله، می‌توان به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده اشاره کرد. از نظر زیست محیطی نیز استفاده از چسباننده‌ی Fa-RmLG برای تثبیت خاک بدون خطر است (۲۰۱۸ Do et al.).

۴-۶-۱۱- محلول تبادل یونی CBR⁺

تاکنون در بیشتر پروژه‌های اجرایی در ایران روش کار برای استفاده از ماده‌ی تثبیت کننده‌ی یونی CBR⁺، انجام آزمایش‌های تبادل یونی شیمیایی بوده است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول تبادل یونی CBR⁺ در جدول ۳ آمده است. استفاده از محلول CBR⁺، باربری خاک‌های

۴-۶-۱۰- تثبیت کننده‌ی تازه‌ی بدون سیمان

با استفاده از چسباننده‌ی بدون سیمان (مشکل از خاکستر بادی (Fa)، گل سرخ (Rm)، آهک (L) و گچ (G) با نام Fa-RmLG) ویژگی‌های ماسه دریایی لایروبی شده‌ی تثبیت شده (مقاومت، سختی، ظرفیت مقاومت هیدرولیک، زیر

قابل قبول است. نکته‌ی مهم این است که مقدار کاربردی این تثبیت‌کننده در کارهای عملی دارای مقدار بهینه است و استفاده‌ی بیش از حد از آن موجب کاهش مقاومت خاک تثبیت شده می‌گردد (Ziaie Moayed, Khatami ۲۰۱۷) and Allahyari).

رسی را افزایش می‌دهد؛ این افزایش در خاک دارای PI کمتر، بیشتر است. اگرچه چرخه‌های انجماد-ذوب و خشک-تر باربری خاک را کاهش می‌دهند، ولی مقاومت نمونه خاک رس تثبیت شده با CBR^{±۴} پس از اعمال چرخه‌های یاد شده به طور قابل توجهی بیش از نمونه‌های تثبیت نشده و در حد

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول تثبیت‌کننده‌ی یونی CBR^{±۴} (Ziaie Moayed, Khatami and ۲۰۱۷) Allahyari).

شکل ظاهری	بو	حالت فیزیکی	نقطه انجماد	نقطه جوش	pH	وزن مخصوص	حلالیت در آب
مایع غلیظ قهوه‌ای رنگ	مانند گوگرد	مایع غلیظ	کمتر از -۱۰°C	۱۰۰°C	۹	۰/۹۴	٪۱۰۰

۴-۶-۱۲- مالچ

یکی از روش‌های ترکیبی برای تثبیت مواد لایروبی، استفاده از روش جداسازی طبیعی^{۶۰} (فرآیند جداسازی مخلوط مایعات ناپیوسته یا یک مخلوط مایع و جامد مانند یک سوسپانسیون. یا حذف مایع سبک‌تر و واضح تر طی یک فرایند که در آن مایعات با چگالی‌های گوناگون جدا شوند) برای کاهش مقدار رطوبت رسوب‌های ریزدانه است. افزون بر آن؛ برای بهبود دانه‌بندی و مسلح کردن اسکلت دانه‌های رسوب، به آن ماسه‌ی لایروبی افزوده می‌شود. سرانجام، ویژگی‌های مخلوط توسط آمیختن با چسباندنده‌ها (سیمان و یا آهک) بهبود می‌یابد (Dubois et al., ۲۰۰۹).

در تثبیت با استفاده از ترکیب آهک و خاکستر بادی؛ واکنش‌های تثبیت در استفاده از خاکستر بادی، تابع ضریب هیدراسیون است؛ که به صورت نسبت درصد مقدار CaO به مجموع درصد مقادیر SiO_۲، Al_۲O_۳ و Fe_۲O_۳ در یک ترکیب خاکستر بادی معین می‌باشد. Kamon و Nontananadh (۱۹۹۱) پیشنهاد کرده‌اند که برای رخ دادن واکنش‌ها، ضریب هیدراسیون باید بزرگتر از ۱/۷ باشد (Kamon and Nontananadh, ۱۹۹۱):

$$(۷) \frac{\text{درصد CaO}}{\text{درصد SiO}_2 + \text{درصد Al}_2\text{O}_3 + \text{درصد Fe}_2\text{O}_3} \geq 1/7 = \text{ضریب هیدراسیون}$$

رابطه‌ی بالا می‌تواند برای تعیین سهم خاکستر بادی و آهک در طرح اختلاط به کار رود. برای نمونه اگر یک نوع معین از خاکستر بادی دارای ضریب هیدراسیون ۱/۰ باشد؛ برای برآورده کردن رابطه‌ی ۷، باقی‌مانده باید با افزودن آهک تامین گردد. گزارش شده است که رابطه‌ی بالا اغلب مقدار آهک را بیشتر از مقدار لازم برای تثبیت محاسبه می‌کند (۱۹۹۷)

در این روش تثبیت؛ در اثر واکنش شیمیایی ماسه‌ی آهکی (کربناته) با مالچ (اسید فسفریک رقیق)، نوعی سیمان (دی‌هیدرات فسفات دی‌کلسیم^{۶۱}) درجا به دست می‌آید و منجر به ایجاد یک پوسته‌ی سخت کربنات یا فسفات کلسیم می‌گردد. واکنش رخ داده میان ماسه‌ی آهکی و PA رقیق شده، منجر به پدید آمدن سیمان DCPD می‌گردد. این سیمان، ذرات ماسه‌ی واکنش نداده را به یکدیگر می‌چسباند و منجر به ساخت یک پوسته‌ی سخت کربنات کلسیم می‌گردد. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشانگر این نکته است که در صورت استفاده از مقدار مناسب اسیدفسفریک؛ پوسته‌ی تشکیل شده مقاومت مکانیکی و ایستادگی مناسبی در برابر فرسایش^{۶۲} دارد؛ و در برابر باد پایدار می‌ماند. محدودیت این روش عدم امکان انجام آن به طور پیوسته می‌باشد؛ چون پوشش‌های گیاهی و طرح‌های احیای دوباره را محدود می‌کند (Ketabi et al., ۲۰۱۷).

۴-۷- تثبیت با ترکیبی از مواد تثبیت‌کننده

با توجه به تفاوت خاک‌های موجود و عدم انطباق خاک‌های طبیعی با روش‌های تثبیت کنونی، گاهی بیش از یک تثبیت‌کننده به کار می‌رود. برخی از موارد آن عبارتند از: خاکستر بادی و آهک^{۶۳}؛ آهک و سیمان؛ آهک و قیرآبه؛ سیمان و قیرآبه؛ آهک، سیمان و خاکستر بادی (Rios, ۲۰۱۶) و (Viana da Fonseca and Sagar Bangaru, ۲۰۰۸) و (Muhunthan and Sariosseiri, ۲۰۰۸)، (۱۳۸۲، ۲۶۸) و (Engineering manual 1110-3-137, ۱۹۸۴).

نیست. بهترین و دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی UCS، مدل BP-ANN دارای ۱-۸-۵ لایه و مدل EPR با تابع تانژانت هیپربولیک (مناسب برای انتخاب درصد بهینه‌ی تثبیت‌کننده یا اهداف کنترلی QC یا QA در پروژه‌های اختلاط خاک در عمق^۴) است (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲) و (Ghorbani, A. and Hasanzadehshooiili, ۲۰۱۸).

۴-۱۰- تجارب پیشین تثبیت خاک‌ها

تثبیت با سیمان یکی از متداول‌ترین روش‌های تثبیت است. این روش برای انواع خاک‌ها کاربرد دارد. پژوهشگران زیادی بر روی روش‌های گوناگون تثبیت کار کرده‌اند. در بیشتر موارد، تثبیت و بهسازی خاک به شدت به محیط و خاک در دسترس وابسته است. بنابراین، نمی‌توان نسخه‌ی یکسانی برای تثبیت تمامی انواع خاک‌ها تجویز کرد. در جدول ۴ برخی پژوهش‌های انجام شده درباره‌ی تثبیت خاک آمده است. با توجه به این جدول می‌توان دید که بیش از ۶۰٪ خاک بررسی شده برای تثبیت، رس و لای است. نزدیک به ۳۲٪ ماسه، کمتر از ۶٪ نیز شن برای تثبیت و بهسازی مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته است. همچنین، با توجه به پرکاربرد بودن سیمان و آهک در کارهای عملی و اجرایی؛ بیش از ۳۶٪ پژوهش‌ها از یک یا چند تثبیت‌کننده‌ی سنتی استفاده کرده‌اند. کمتر از ۲۹٪ از پژوهش‌های بررسی شده تلاش کرده‌اند یک یا چند تثبیت‌کننده‌ی نوین را برای تثبیت خاک به کار ببرند. در این میان، کمتر از ۱۲٪ مطالعات نیز از محصولات جانبی صنعت استفاده کرده‌اند. نزدیک به ۲۰٪ پژوهش‌ها به استفاده از ترکیب انواع تثبیت‌کننده‌ها پرداخته‌اند. پرکاربردترین تثبیت‌کننده‌ی مطالعه شده پس از انواع تثبیت‌کننده‌های نوین (۲۰/۴۹ درصد)، سیمان است که در ۱۳٪ پژوهش‌ها به تنهایی و بدون ترکیب با دیگر افزودنی‌ها؛ استفاده شده است.

(Nicholson and Ding, برای بدست آوردن مخلوط موثری از آهک و خاکستر بادی، مقدار خاکستر بادی باید از ۱۰٪ تا ۱۵٪ و آهک باید از ۲٪ تا ۸٪ باشد. اما نسبت‌های متداول مخلوط برای آهک از ۳٪ تا ۴٪؛ برای خاکستر بادی از ۱۰٪ تا ۱۵٪؛ و ۰/۵٪ تا ۱/۵٪ برای سیمان می‌باشد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که یک ساعت تاخیر بین اختلاط و تراکم، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب برجهنگی مصالح تثبیت شده با آهک - خاکستر بادی می‌گردد (White and ۲۰۰۵) Gnanendran,).

۴-۸- انتخاب افزودنی

انتخاب تثبیت‌کننده باید بر اساس اثربخشی یک تثبیت‌کننده‌ی معین برای بهسازی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باشد. انتخاب افزودنی مناسب برای تثبیت خاک باید مواردی همچون سازگاری و دانه‌بندی خاک؛ کانی‌شناسی و ترکیب (شیمیایی) خاک؛ ویژگی‌های مهندسی مورد نظر؛ هدف از بهسازی؛ سازوکار تثبیت؛ و شرایط محیطی و اقتصاد مهندسی را در نظر بگیرد. (Little ۲۰۰۹ and Nair,).

۴-۹- پیش‌بینی ویژگی‌های خاک تثبیت شده

Ghorbani و Hasanzadehshooiili (۲۰۱۸) برای پیش‌بینی UCS (مقاومت فشاری تک‌محوری) و CBR (نسبت باربری کالیفرنیا^۱) برای ماسه‌های سولفاته‌ی لای‌دار تثبیت شده با میکروسلیس - آهک از مدل‌های BP-ANN (شبکه عصبی ساختگی (مصنوعی) واپس‌گرا^۲) و EPR (برازش چندجمله‌ای فرگشتی (تکاملی)^۳) استفاده کرده‌اند. این نوع ماسه به طور معمول در نقاط بیابانی ایران یافت می‌شود؛ مقاومت کافی ندارد و شامل مقدار کمی لای و سولفات است؛ بنابراین، برای ساخت راه و پی مناسب

جدول ۴. پژوهش‌های انجام شده درباره‌ی تثبیت خاک

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۱	Dunn and Salem, ۱۹۷۱	ماسه	قیرآبه کاتیونی	چسبندگی، مقاومت اصطکاکی، اثر روش تثبیت بر مقاومت، اثر مقدار و نوع امولسیون، گرانروی قیر، دانه‌بندی ماسه، مقدار رطوبت داخلی، نوع فیلر و زمان عمل‌آوری
۲	Akili and Monismith, ۱۹۷۸	ماسه	سیمان و قیرآبه کاتیونی دیرشکن (CSS-۱)	ویژگی‌های تغییرشکل ماندگار
۳	Fatani and Sultan, ۱۹۸۲	ماسه‌ی روان	قیر گوگرد	باربری
۴	Haston and ۱۹۸۵ Wohlgemuth,	CL	آهک	

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۵	McManis and Arman, ۱۹۸۹	A-۳ و A-۲-۴	خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک‌محوری، دوام (تر و خشک شدن)
۶	Baghdadi, ۱۹۹۰	رس کائولینیت	CKD	
۷	Zaman, Laguros and Sayah, ۱۹۹۲	رس	CKD	
۸	Aiban, ۱۹۹۴	ماسه‌ی بادرقتی (A-۳) SP	سیمان پرتلند و کربنات کلسیم	مقاومت، سختی، مدول تانژانت، گرنش حجمی پسماند
۹	Chang, ۱۹۹۵	Lateritic soil خاک ریزدانه	خاکستر بادی آهک	مقاومت فشاری تک‌محوری
۱۰	Achampong, ۱۹۹۶	CH و CL	سیمان آهک	مقاومت فشاری تک‌محوری، ضریب برجهندگی
۱۱	Al-Abdul Wahhab and Asi, ۱۹۹۷	مارن (A-۲-۴) و ماسه‌ی روان (A-۳) (A)	قیرآبه‌ی دیرشکن و قیر محلول‌کنندگی و آهک و سیمان	مقاومت برشی و مقاومت در برابر آب زیرزمینی
۱۲	Misra, ۱۹۹۸	رس	خاکستر بادی	
۱۳	Sabbagh, ۱۹۸۸	ماسه‌ی روان یکتواخت	آهک و قیر	ویژگی‌های ویسکوپلاستیک
۱۴	Prusinski and Bhattacharia, ۱۹۹۹	رس	سیمان آهک	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR، انقباض
۱۵	Porbaha, Hanzawa and Shima, ۱۹۹۹	خاک لایروبی بستر دریا	-	-مقاومت برشی -مقاومت به نفوذ مخروط
۱۶	Singh and Das, ۱۹۹۹	رس تجاری (BB۱)	نمک	CBR، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم
۱۷	Ata and Vipulanandan, ۱۹۹۹	ماسه‌های سیلیکاته	تزریق دوغاب سیلیکات سدیم	عوامل موثر بر ویژگی‌های مکانیکی و خزشی مقاومت در برابر اسیدها، بازها، نمک‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌ها
۱۸	Little, ۲۰۰۰	خاک ریزدانه	آهک	مقاومت فشاری تک‌محوری، ضریب برجهندگی، TST
۱۹	Miller and Azad, ۲۰۰۰	CH و CL و ML	CKD	
۲۰	Miller and Zaman, ۲۰۰۰	شیل و ماسه	CKD	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR
۲۱	Qubain, Seksinsky and Li, ۲۰۰۰	CL	آهک	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR
۲۲	Zia and Fox, ۲۰۰۰	Loess	خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR
۲۳	Puppala and Musenda, ۲۰۰۰	رس اروینگ ^{۷۵} و رس آنتونیو ^{۷۶}	فیبرهای پلی پروپیلن دارای طول یک اینچ (۲/۵ سانتی‌متر) تا دو اینچ (۵ سانتی‌متر)	مقاومت فشاری تک‌محوری
۲۴	Okumura et al., ۲۰۰۰	خاک‌های دور ریز	حباب‌های هوا یا دانه‌های پلی استایرن ^{۷۷}	
۲۵	Tang, Miyazaki and Tsuchida, ۲۰۰۰	خاک لایروبی	سیمان	مقاومت فشاری تک‌محوری
۲۶	Tang, Miyazaki and Tsuchida, ۲۰۰۱	خاک لایروبی	سیمان	مقاومت فشاری تک‌محوری

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۲۷	Motz and Geiseler, ۲۰۰۱	سنگدانه شکسته	سرباره	ظرفیت باربری
۲۸	Santoni and Tingle, ۲۰۰۲	ماسه‌ی مرطوب	فیبرهای پلی پروپیلن دارای طول دو اینچ	
۲۹	Senol et al., ۲۰۰۲	رس	خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR
۳۰	Ismail et al., ۲۰۰۲	مصالح متخلخل مانند GW	آهک (کلسیت)	پاسخ خاک‌های گوناگون به روند سیمانی شدن و ساز و کار پیوند آن‌ها
۳۱	Parsons and Milburn, ۲۰۰۳	ML و CL و CH و SM	آهک، سیمان، CFA تثبیت کننده‌ی آنزیمی	مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول، دوام (بخ زدن و ذوب، تر و خشک شدن)
۳۲	Kim and Siddiki, ۲۰۰۴	A-۴ و A-۶ و A-۷	آهک LKD	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR، پایداری حجمی، ضریب برجهنگی
۳۳	Prabakar, Dndorkar ۲۰۰۴ and Morchhale,	MH و OL و CL	خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR، پارامترهای مقاومت برشی
۳۴	Santoni, Tingle and Nieves, ۲۰۰۴	ماسه‌ی لای‌دار	سویل - سمنت ^{۷۸}	مقاومت فشاری تک‌محوری
۳۵	Arora and Aydilek, ۲۰۰۵	SM	خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR، ضریب برجهنگی، دوام (بخ زدن و ذوب)
۳۶	Barbu and McManis, ۲۰۰۵	ML و CL	آهک، سیمان	مقاومت فشاری تک‌محوری، سه محوری چرخه‌ای
۳۷	Little, Connor and Carlson, ۲۰۰۵	خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده ائولین ^{۷۹} و فلوویال ^{۸۰}	پلیمر سویل - سمنت	CBR اثر چرخه‌های یخ زدن - ذوب یخ
۳۸	Hillbrich and Scullion, ۲۰۰۶	A-۳	سیمان	ضریب برجهنگی، مدول لرزه‌ای
۳۹	Osinubi and Nwaiwu, ۲۰۰۶	CL	آهک	
۴۰	Puppala, Punthutaecha and Vanapalli, ۲۰۰۶	CH	آهک با فیبر پلی پروپیلن	مقاومت فشاری تک‌محوری، ورم آزاد
۴۱	Poh, Ghataora and Ghazireh, ۲۰۰۶	رس چینی انگلیسی و MM	سرباره‌ی ریزدانه‌ی BOS و دو فعال‌کننده (آهک زنده ^{۸۱} و متاسیلیکات سدیم)	مقاومت فشاری تک محوری پایداری حجمی
۴۲	Consoli et al., ۲۰۰۷	ماسه	سیمان	سختی آغازین مدول برشی آغازین G، مقاومت فشاری تک‌محوری (q _u) و تنش انحرافی اوج q (c' و φ')
۴۳	حسن‌نوراد، صالح زاده و شاه نظری؛ ۱۳۸۸	ماسه کرناته‌ی جزیره کیش	تزریق دوغاب سیلیکات سدیم همراه با افزودنی‌هایی مانند فرم‌آمید و آلومینات سدیم	قابلیت اصلاح مقاومت فشاری تک محوری مدول مماسی آغازین کرنش لحظه گسیختگی
۴۴	Consoli et al., ۲۰۰۹	ماسه یکنواخت	سیمان	پارامترهای کنترل کننده سختی و مقاومت
۴۵	Solanki, Khoury and Zaman, ۲۰۰۹	دو مورد CL، CH و CL-ML از	آهک، خاکستر بادی تیپ C (CFA) و غبار	ویژگی‌های مقاومت و سختی (مقاومت فشاری تک محوری، ضریب برجهنگی، M _E)

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
		اوکلاهاما	کوره‌ی سیمان (CKD)	حساسیت رطوبتی و تورم سه‌بعدی
۴۶	Dubois et al., ۲۰۰۹	خاک لایروبی	جداسازی طبیعی اصلاح دانه‌بندی آهک	قابلیت کاربرد رسوب‌های دریایی را به عنوان مصالح لایه‌ی اساس روسازی
۴۷	Sun et al., ۲۰۱۰	ماسه لایروبی	«سیمان کوره‌ی آهن‌گدازی نوع B (سیمان) و «تثبیت‌کننده‌ی گچی ختنی (^{۸۲}GS)» تزریق دوغاب ^{۸۳} سیلیکات سدیم	اثر ویژگی فیزیکی دانه‌ها بر رفتار برشی و مقاومت ماسه‌ی تزریق شده (مانند چگالی نسبی آغازین (پیش از تحکیم)، دوغاب، فشار همه‌جانبه و بارگذاری)، قابلیت تراکم، رفتار برشی، پارامترهای مقاومت برشی، قابلیت تغییرشکل و شکست ذره
۴۸	Jaubertie et al., ۲۰۱۰	لای استوایی ^{۸۴} لایروبی	آهک و سیمان	مقاومت فشاری تک‌محوری CBR
۴۹	موسوی‌پور، ۱۳۹۰	ماسه بادی با دانه‌بندی یکنواخت	سیمان	نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مقاومت فشاری ملات سیمان شناسایی مقدار رس در خاک
۵۰	Consoli et al., ۲۰۱۱	رس لای‌دار رس ماسه‌دار	سیمان	نسبت تخلخل سیمان و اثر کنترل‌کننده‌ی آن بر مقاومت فشاری تک‌محوری
۵۱	Seng and Tanaka, ۲۰۱۱	رس	سیمان	ویژگی‌های خاک بهسازی شده در گام‌های آغازین سخت شدن (زمان گیرش) مقاومت برشی و مدول برشی؛
۵۲	Wang, Zentar and Abriak, ۲۰۱۱	خاک لایروبی	سیمان	ویژگی‌های مقاومت و تورم ^{۸۵} ، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی غیرمستقیم
۵۳	Chan, Mizutani, and Kikuchi, ۲۰۱۱	رس دریایی لایروبی (CH)	سرباره فولاد	مقاومت، نسبت ریزدانه‌های سرباره، رطوبت آغازین و پایانی
۵۴	Taheri and Tatsuoka, ۲۰۱۲	شن	سیمان	روابط تنش - کرنش
۵۵	Taheri et al., ۲۰۱۲	شن	سیمان	مقاومت اوج
۵۶	Consoli et al., ۲۰۱۲	ماسه‌ی لای‌دار خیلی خوب دانه‌بندی شده (SM)	سیمان	نسبت تخلخل به مقدار سیمان ($\eta/(C_{iv})$)، نسبت تخلخل به مقدار سیمان اصلاح شده $\eta/(C_{iv})^{exponent}$
۵۷	Limeira, Agulló and Etxeberria, ۲۰۱۲	ماسه دریایی لایروبی شده	سیمان فیبرهای پلی پروپیلن ^{۸۶}	روانی، چسبندگی، مقاومت فشاری، مقاومت برشی، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی، مقاومت کششی بارسلون و مقاومت کششی خمشی)
۵۸	Siham et al., ۲۰۱۳	ماسه دریایی لایروبی شده	سیمان و هیدروکسید کلسیم	ویژگی‌های تراکمی، ظرفیت باربری
۵۹	Taha Jawad et al., ۲۰۱۴	انواع گوناگون خاک	آهک اکسید یا هیدروکسید منیزیم به عنوان جایگزین آهک	مقاومت، دوام و کارایی ترکیب

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۶۰	Kotsewara Rao, ۲۰۱۴ Sravani and Bharath,	رس های دریایی	سرباره ی فولاد دارای ۴۸٪ تا ۵۰٪ آهک	ویژگی های مقاومتی
۶۱	Huang et al., ۲۰۱۴	خاک لایروبی دارای رطوبت زیاد (CH)	آهک و سیمان	ویژگی خمیری CBR
۶۲	عابدی و یوسفی راد، ۱۳۹۴	ماسه لایروبی و شن	اصلاح نمودار دانه بندی به روش حذفی	دانه بندی، تراکم و CBR نقطه ای (۱۰، ۳۰ و ۶۵ ضربه)
۶۳	Tasalloti et al., ۲۰۱۵	ماسه، مخلوط ذغال شسته و سرباره	سرباره BOS	تراکم و مقاومت نفوذ مخروط دینامیکی ^{۸۷}
۶۴	Chan and Shahri, ۲۰۱۶	خاک لایروبی دریا ML, MH, CH و ML	-	ویژگی های زمین شناسی
۶۵	Rios, Viana da ۲۰۱۶ Fonseca and Sagar Bangaru,	ماسه ی رس دار	ژئوپلیمر آهک آهک و خاکستریادی	مقاومت فشاری تک محوری کشش غیرمستقیم اندازه ی موج لرزه ای با مبدل فراصوت
۶۶	Drujif, ۲۰۱۶	خاک لایروبی	افزودنی های گوناگون (مانند: سیمان و حباب هوا و دانه های EPS)	حدود اتزبرگ و تعیین مقدار رطوبت
۶۷	Ziaie Moayed, ۲۰۱۷ Khatami and Allahyari,	خاک رسی	محلول تبادل یونی CBR ^۴	باربری تعیین میزان تبادل یونی خاک ها بوسیله انجام یک آزمایش شیمیایی
۶۸	Ketabi et al., ۲۰۱۷	خاک ماسه آهکی (آرگونیتی)	مایع مالچ اسید فسفریک ^{۸۸} رقیق	فرسایش پذیری
۶۹	Lopez-Querol et al., ۲۰۱۷	SP (A-۳)	سیمان	چگالی خشک بیشینه رطوبت بهینه CBR
۷۰	Kang et al., ۲۰۱۷	رس دریایی	سیمان	استحکام فوری
۷۱	Kang, Tsuchida and ۲۰۱۷ Kim,	رس دریایی لایروبی	سیمان	اثر عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری و سختی
۷۲	Rezaeimalek, Huang ۲۰۱۷ and Bin-Shafique,	ماسه	پلیمر (متیلن دی فنیل دی ایزو سیانات) ^{۸۹}	ارزیابی روش عمل آوری و طرح اختلاط پلیمر فعال شونده با رطوبت مقاومت فشاری شکل پذیری
۷۳	Rezaeimalek et al., ۲۰۱۷	ماسه و رس چاق	پلیمر دی ایزو سیانیت دی فنیل متیلن	مقایسه ی عملکرد کوتاه مدت و بلند مدت بررسی اثربخشی پلیمر مایع (به عنوان تثبیت کننده ی خاک) مقاومت فشاری تک محوری (UCS) تورم
۷۴	مظاهری، پاکنهاد و ترکمن، ۱۳۹۷	ML	تغییر دانه بندی مصالح	مقاومت برشی توسط آزمایش برش مستقیم ۳۰×۳۰
۷۵	هاشمی طباطبایی و همکاران،	مصالح زیراساس	سرباره فولاد مخلوط	آزمایش ارزش ماسه ای، سایش لوس آنجلس، CBR.

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
	۱۳۹۷	(A-۱-a)	با خاکستر	درصد افت وزنی با سولفات سدیم، وزن مخصوص ویژه، دانسیته حداقل و حداکثر، برش مستقیم بزرگ مقیاس، مقاومت فشاری و تورم
۷۶	Do et al., ۲۰۱۸	ماسه دریایی لایروبی شده	چسباننده ی بدون سیمان با استفاده از خاکستر بادی (Fa)، گل سرخ (Rm)، آهک (L) و گچ (G) با نام Fa-RmLG	مقاومت، سختی، ظرفیت مقاومت هیدرولیک، زیر ساختار و اثر محیطی
۷۷	Shinsha and Kumagai, ۲۰۱۸	رس دریایی لایروبی	سیمان	مقاومت نرمال تک محوری زاویه ی اصطکاک داخلی مقاومت برشی
۷۸	Manimaran, Santhosh and Ravichandran, ۲۰۱۸	خاک بستر متورم شونده (CH)	سرباره کوره بلند (GGBS)	عدد CBR، تورم آزاد، زمان عمل آوری
۷۹	Zhang et al., ۲۰۱۸	ماسه ی لای دار	سیمان، سرباره	آزمایش سانتریفیوژ برای بدست آوردن نمودار آب نگهداری خاک (SWRC)، نسبت های گوناگون چسباننده و زمان های عمل آوری گوناگون بر مقاومت فشاری تک محوری و SWRC
۸۰	Thanh Hang Nguyen et al., ۲۰۱۹	لای و رس با ویژگی خمیری کم و لای بسیار خمیری	آهک	اثر زمان عمل آوری، یخ زدن و ذوب یخ مقاومت فشاری تک محوری
۸۱	Abdullah, Shahin and Walske, ۲۰۱۹	رس	ژئوپلیمر	ارزیابی دقیق رفتار ژئومکانیکی انواع خاک های تثبیت شده، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری زهکشی نشده تحکیم شده
۸۲	Ramani Sujatha and Saisree, ۲۰۱۹	MH-CH	بیوپلیمر مبتنی بر صمغ (guar gum)	چگالی خشک، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک محوری
۸۳	Yaghoubi et al., ۲۰۱۹	رس دریایی نرم	ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی و سرباره	اثر تغییر مقدار رطوبت و دما، چرخه های تر و خشک شدن، زمان و روش اختلاط بر مقاومت فشاری تک محوری، ریزساختار و کانی شناسی
۸۴	Ikeagwuani, Obeta and Agunwamba, ۲۰۱۹	خاک پنبه سیاه (BCS) رس چاق (A-۷-۶)	خاک اره، آهک	حد روانی، اختلاف تورم آزاد، شاخص خمیری، CBR و وزن مخصوص
۸۵	Muhammad and Siddiqua, ۲۰۱۹	ماسه لای دار	مخلوط بتونیت، کلرید منیزیم و محلول قلیایی	ویژگی های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی؛ اثر روش عمل آوری، حدود اتربرگ، تراکم، pH و مقاومت فشاری تک محوری، بررسی ریز ساختار
۸۶	Liu et al., ۲۰۱۹	CL و CH	ترکیب سرباره فولاد، سیمان و متاکائولین	رفتار مقاومت خاکهای تثبیت شده مقادیر گوناگون رس، آب و دوره های عمل آوری متفاوت، مقدار آب آزاد
۸۷	Sabrin, Siddiqua, and Muhammad, ۲۰۱۹	(SM) A-۴	ژئوپلیمرهای فعال قلیایی (قلیایی سازی)	اثر دما و دوره ی عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیک (E50) و ریزساختار خاک

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
			منیزیم بنتونیت)	بستر، طیف سنجی پراکندگی انرژی (EDS) و تحلیل گرماسنجی (TGA)
۸۸	Kang et al., ۲۰۱۹	رس لایروبی نرم CH-OH	BOS	مقاومت فشاری تک محوری، اثر زمان عمل آوری، جریان (Flow)، برش پره (LVS)، SEM و EDS
۸۹	Oluwatuyi, Ojuri and Khoshghalb, ۲۰۲۰	رس کائولین آلوده به نفت خام	آهک و سیمان	بررسی اثر تثبیت بر ویژگی‌های ژئومحیطی خاک مقاومت فشاری تک محوری، قابلیت تراکم، یرش مستقیم، Leaching، بررسی زمان عمل آوری
۹۰	Phanikumar, ۲۰۲۰ Ramanjaneya Raju,	رس منبسط شونده	لجن آهک (lime) (sludge) و سیمان	FSI، LL، PI، ویژگی‌های مهندسی (ویژگی‌های مقاومتی، رفتار تنش - کرنش در دوره‌های عمل آوری متفاوت) و CBR
۹۱	and Venda Oliveira ۲۰۲۰ Rosa,	رس لای دار	کربنات کلسیم (CaCO ₃)	مقاومت فشاری تک محوری
۹۲	Zhang et al., ۲۰۲۰	لای	لیگنین بازیافتی	بررسی اثر محیط نامطلوب مقاومت فشاری تک محوری، پایداری رطوبتی، تر و خشک شدن
۹۳	Thomas and ۲۰۲۰ Rangaswamy,	رس نرم	نانو سیلیس، بیو آنزیم و سیمان	آزمایش سه محوری سیکلی مدول برشی، نسبت میرایی، مدول برشی کرنش کوچک (G _{max})
۹۴	Mozejko and ۲۰۲۰ Francisca,	رس	سرباره	اثر رطوبت و زمان عمل آوری بر مقاومت، مدول تغییر شکل، اندازه ذرات و تغییر شکل
۹۵	Almajed et al., ۲۰۲۰	ماسه	سیمان و رسوب کربناتی آنزیم دار (EICP)	اثر نوع خاک بر مقاومت ترکیب تثبیت شده با روش‌های گونگون، بررسی امکان آمیختن EICP و سیمان برای تثبیت خاک زمان عمل آوری، مقاومت تک محوری
۹۶	MolaAbasi et al., ۲۰۲۰	ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده	سیمان و زئولیت	زمان عمل آوری، مقاومت تک محوری دوام (تر و خشک شدن) و آزمایش سه محوری زهکشی نشده
۹۷	Yu et al., ۲۰۲۰	رس نرم	ژئوپلیمر (پودر) متاسیلیکات سدیم (بدون آب)	ویژگی‌های مقاومتی خاک تثبیت شده بررسی اثر نسبت مدول، مقدار فعال کننده، رطوبت و زمان عمل آوری
۹۸	Eyo, Ng'ambi and ۲۰۲۰ Abbey,	رس	سیمان، سرباره، افزودنی مبتنی بر نانو فن آوری و خاکستر پودر شده	مقاومت فشاری تک محوری، تورم تک بعدی با ادنومتر
۹۹	Rivera et al., ۲۰۲۰	A-۴	ژئوپلیمر برپایه‌ی خاکستر بادی	مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت خمشی و دوام (تغییر حجم و کاهش جرم در چرخه‌های تر و خشک شدن)
۱۰۰	Zhu et al., ۲۰۲۰	رس نرم	ترکیب سیمان اکسی سولفات منیزیم، فوم سیلیکا و کلینکر اصلاح شده با اسید سیتریک	رفتار مکانیکی خاک تثبیت شده، زمان عمل آوری مقاومت فشاری تک محوری، تحکیم یک بعدی، فشاری سه محوری محدود نشده زهکشی نشده

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۱۰۱	Correa-Silva et al., ۲۰۲۰	CL	چسبنده قلیایی پایدار مبتنی بر سرباره فعال شده با NaOH	ارزیابی رفتار ژئومکانیکی خاک تثبیت شده و زمان عمل‌آوری، ویژگی‌های مکانیکی، نسبت بیش تحکیمی، زوال سختی و شکست سطوح سه محوری
۱۰۲	Wang et al., ۲۰۲۰	رس آلوده به سرب و روی	سرباره و اکسید کلسیم منیزیم	ویژگی‌های فیزیکی و ریزساختاری خاک تثبیت شده، مقاومت فشاری تک محوری و Leaching. دمای عمل‌آوری
۱۰۳	Gissila Gidday and ۲۰۲۰ Mittal,	خاک رسی لای‌دار	آهک	مقاومت فشاری تک محوری، CBR و زمان عمل‌آوری
۱۰۴	Salimi and Ghorbani, ۲۰۲۰	رس کائولینیت	سرباره‌ی فعال شده با اکسید کلسیم و اکسید منیزیم نیمه فعال و ژئوپلیمر	عمل‌آوری در دمای متفاوت، pH، رسانایی الکتریکی، تحکیم تک بعدی، مقاومت فشاری تک محوری نشست، طاقت و سختی (جذب انرژی و مدول سکانت)
۱۰۵	Obianyo, Onwualu and ۲۰۲۰ Soboyejo,	خاک lateritic	آهک و خاکستر استخوان گاو	روش‌های عمل‌آوری گوناگون، مقاومت فشاری، ریزساختار و ریخت‌شناسی (morphology)
۱۰۶	Pooni et al., ۲۰۲۰	خاک منبسط شونده (A-۷-۶) CL	سیمان سولفوآلومینات کلسیم (CSA)	ساز و کار تثبیت، اثر نرخ عمل‌آوری، ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت و تغییرات محیطی
۱۰۷	Chindaprasirt et al., ۲۰۲۰	خاک لاتریتی (lateritic soil)	پسماند کاربرد کلسیم (CCR)	مقاومت، ضریب ارتجاعی، CBR، اثر زمان عمل‌آوری و غوطه‌وری
۱۰۸	Eyo, Ng'ambi and ۲۰۲۰ Abbey,	رس	سرباره، مواد سیمانی و افزودنی RC (مبتنی بر زنولیت/ فلزهای قلیایی)	ویژگی‌های ژئوتکنیکی، شاخص ویژگی، تغییر شکل تورمی اودئومتر، مقاومت فشاری تک محوری، ریزساختار و اثر عمل‌آوری
۱۰۹	Lang, Li and Chen, ۲۰۲۰	رس لای دار	سیمان و خاکستر بادی	ستون تشدید (مدول برشی، نسبت میرایی)، رفتار دینامیکی در کرنش کوچک، بررسی ریزساختار (microstructure)
۱۱۰	Liu et al., ۲۰۲۰	ماسه SP	الیاف کوتاه (از جمله پلی پروپیلن، بازالت و الیاف شیشه) و پلیمر پلی اورتان	عملکرد مکانیکی مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، ریزساختار، مقاومت و تردی
۱۱۱	Jitha, Sunil Kumar and ۲۰۲۰ Raghunath,	رس چاق و رس با ویژگی خمیری متوسط	سیمان، آهک، خاکستر بادی و ملات ژئوپلیمر، سرباره‌ی بسیار ریز	مطالعات پارامتری مقاومت فشاری، برشی، کششی
۱۱۲	He et al., ۲۰۲۰	خاک لایروبی CH	بقایای سودا (SR)، سرباره کاربرد (CS) و سرباره کوره بلند (GGBS)	مقاومت فشاری تک محوری، دوره‌ی عمل‌آوری، دوام (تر و خشک شدن)
۱۱۳	Adeyanju et al., ۲۰۲۰	رس	خاکستر پوسته برنج (RHA) و غبار کوره سیمان (CKD)	مقاومت مکانیکی خاک بستر

ردیف	پژوهش	خاک	روش / عامل تثبیت	پارامتر بررسی شده
۱۱۴	James, ۲۰۲۰	خاک منبسط شونده CH	گل پرس نیشکر و آهک	ویژگی‌های خمیری، رفتار تورم - انقباض، مقاومت فشاری تک محوری، ویژگی های کانی شناسی و ریزساختار
۱۱۵	Zhang et al., ۲۰۲۰	ماکادم، خاک منبسط شونده و ماسه هوازده	ماده اتصال دهنده بازسازی شده پایدار (RBM)	فرآیند هیدراتاسیون، رفتار مکانیکی و ویژگی‌های ریزساختاری، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت در برابر آب شستگی، مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب
۱۱۶	Liu et al., ۲۰۲۰	لای، رس	لیگنین بدون گوگرد (SFL)	مقاومت فشاری تک محوری، حدود اتربرگ، مقاومت الکتریکی و pH اثر زمان عمل آوری، بررسی سازوکار تثبیت، کانی شناسی، گروه عملکرد و ویژگی ریزساختار
۱۱۷	Chowdary, ۲۰۲۰ Ramanamurty and Pillai,	رس نرم	سرباره و الیاف پلی پروپیلن	مقاومت فشاری تک محوری، دوام (تر و خشک شدن)
۱۱۸	Sai Nikhil, ۲۰۲۰* Ravichandran and Divya Krishnan,	رس چاق (CH)	پودر Wollastonite (متاسیلیکات کلسیم)	مقاومت فشاری تک محوری، اثر زمان عمل آوری، چگالی خشک بیشینه و رطوبت بهینه
۱۱۹	Igor et al., ۲۰۲۰*	لوم و لوم ماسه‌ای	سرباره، غبار حاصل از پاک کننده های گاز تولید متالورژی و ماسه‌های ریز قرصه‌های محلی	ویژگی‌های اصلی مقاومتی، مقاومت
۱۲۰	Abdullah et al., ۲۰۲۱	رس کائولین	ژئوپلیمر بر پایه‌ی خاکستر بادی و سرباره	رفتار خاک تثبیت شده در بارگذاری سیکلی / دینامیکی سه محوری
۱۲۱	Hosseinpour et al., ۲۰۲۱	رس	بیوپلیمر (فرآیندهای بیولوژیکی به عنوان فناوری های سبز)	مقاومت فشاری تک محوری، اثر زمان عمل آوری
۱۲۲	Zeng et al., ۲۰۲۱	رس چاق لایروبی شده	سیمان و فسفات گچ (phosphogypsum)	مقاومت فشاری تک محوری مقدار رطوبت، چگالی، pH و مدول تغییر شکل

*: در دست انتشار

۵- نتیجه گیری

تثبیت شده بیان شده‌اند. در پایان به تجارب پیشین تثبیت خاک‌های کربناته و لایروبی پرداخته شده است. در این بخش کوشش شده است تا حد امکان پژوهش‌های انجام شده در این حوزه ذکر شود.

با توجه به گستردگی خاک‌های کربناته در سراسر جهان و همچنین نیاز روز افزون به لایروبی؛ آشکار است نتایج این پژوهش کاربرد گسترده‌ای برای استفاده از خاک‌های کم مقاومت موجود دارد. نتایج این پژوهش مروری را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- با توجه به ضعف ذاتی، کمبود مقاومت و مشکل آفرین بودن خاک‌های کربناته و لایروبی در سراسر جهان؛ لازم است این خاک‌ها به روشی بهسازی و تثبیت شوند.

بخش بزرگی از خاک‌ها در سراسر جهان، به ویژه در بستر دریاها و اقیانوس‌ها کربناته است. این پژوهش نخست به خاک‌های کربناته، دسته‌بندی و ویژگی‌های این خاک‌ها پرداخته است. سپس به مصالح بدست آمده از پروژه‌های لایروبی پرداخته شده است. مصالح لایروبی در سراسر جهان ویژگی‌های متفاوتی دارند. افزون بر تفاوت ویژگی‌ها، ممکن است خاک لایروبی شده دارای انواع آلودگی باشد. در این بخش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین آلودگی مواد لایروبی شده ارایه شده است. کاربردهای گوناگون این خاک‌ها نیز ارایه شده است. پس از آن روش‌های بهسازی و تثبیت آمده است. اهداف و سازوکار تثبیت خاک توسط تثبیت‌کننده‌های پرکاربرد متداول و دیگر تثبیت‌کننده‌ها و همچنین انتخاب افزودنی و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک

- نمی‌باشد. بنابراین تثبیت با سیمان وابستگی کمتری به وضعیت خاک دارد.
- تثبیت با سرباره (که دور ریز صنایع فولاد است) نیز یک روش کاربردی می‌باشد. این روش به ویژه برای تثبیت خاک ریزدانه به شیوهی اصلاح دانه‌بندی با سرباره‌ی درشت‌دانه سودمند است.
- مهمترین و پرکاربردترین تثبیت‌کننده‌ی نوین قیر است. استفاده از قیر خالص و به ویژه قیرآبه (قیر امولسیون) روز به روز پرکاربردتر می‌شود.
- گچ، خاکستر زیستی، دانه‌های EPS، بتونیت، فیبر، پلیمر، نمک و مالچ از جمله دیگر مواد تثبیت‌کننده‌ی نوین هستند. هر کدام از این مواد با روش ویژه‌ی خود اقدام به تثبیت خاک برای کاربردهای متفاوت می‌کنند.
- دیگر تثبیت‌کننده‌های نوین به کار رفته؛ پرکننده‌ی دانه‌ای، تثبیت‌کننده‌ی تازه‌ی ابتکاری بودن سیمان و محلول CBR⁺ است.
- برخی مواقع یک تثبیت‌کننده به تنهایی نمی‌تواند ویژگی‌های مورد نظر را به خاک بدهد. در این مواقع از ترکیب چند تثبیت‌کننده استفاده می‌شود؛ مانند ترکیب آهک و خاکستر بادی.

۶- سپاسگزاری

این تحقیق با کمک مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد که بدینوسیله از آنها تشکر و قدردانی می‌کنیم.

- منشا اصلی خاک‌های کربناته پسماندهای موجودات زنده دریایی است؛ و مقداری سیمان‌شدگی دارند. مهمترین ویژگی این خاک‌ها خردشدگی دانه‌هاست.
- خاک‌های لایروبی انواع گوناگون دارند. نزدیک به ۹۰٪ از این خاک‌ها آلودگی چندانی ندارند و می‌توان برای استفاده از آن‌ها در کاربردهای گوناگون برنامه‌ریزی کرد.
- استفاده از خاک لایروبی منجر به تحقق دو هدف در یک زمان می‌شود: دفع خاک‌های لایروبی با کمترین آسیب زیست‌محیطی و به‌کارگیری سودمند این خاک‌ها.
- انتخاب روش تثبیت هر خاک به نوع، جنس و هدف از تثبیت بستگی دارد.
- تثبیت‌کننده‌های گوناگون خاک را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد: سنتی (آهک، سیمان و خاکستر بادی)، محصول جانبی صنعت (غبار کوره‌ی آهک، غبار کوره‌ی سیمان و سرباره) و نوین (مواد پلیمری، روغن‌های سولفونیک، کلرید آلومینیوم و ...). تفاوت عمده‌ی تثبیت‌کننده‌ها سازوکار تثبیت توسط آن‌هاست.
- علیرغم پیشرفت‌های گسترده در روش‌ها و مواد تثبیت خاک، آهک و سیمان پرکاربردترین مواد تثبیت‌کننده هستند.
- تعیین میزان آهک بهینه برای تثبیت، روش‌های گوناگونی دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها، به ویژه برای کارهای راهسازی؛ روش آشتو است.
- با توجه به مشکلات و معایب آهک، و با توجه به فراوانی، ویژگی‌های مناسب و تولید گسترده‌ی سیمان؛ تثبیت با سیمان کاربرد گسترده‌ای یافته است. سازوکار تثبیت با سیمان مانند تثبیت با آهک است؛ اما مواد پوزولانی لازم برای تثبیت، در سیمان وجود دارند و نیازی به تامین آنها از خاک

۷- پانویس‌ها

- 1 Parent
- 2 DM: Dredged Material
- 3 Capital Dredging
- 4 Maintenance Dredging
- 5 USCS
- 6 Beaches & Beach Nourishment
- 7 CKD: Cement Kiln Dust
- 8 LKD: Lime Kiln Dust
- 9 Traditional Stabilizers
- 10 Pozzolanic Reaction
- 11 Cation Exchange
- 12 Flocculation & Agglomeration
- 13 Cementitious Hydration
- 14 By-product Stabilizers
- 15 Non Traditional Stabilizers
- 16 Waterproof
- 17 GGBS: Ground Granulated Blast Slag
- 18 EPS: Expanded PolyStyrene
- 19 Liquid Limit
- 20 Plastic Limit
- 21 Plasticity Index
- 22 Workability
- 23 Stable Platform

-
- 24 Calclitic Quick Lime
 - 25 Hydrated High Calcium Lime
 - 26 Dolomitic Quick Lime
 - 27 Dolomitic Hydrated Lime (Monohydrated Dolomitic Lime)
 - 28 Normally Consolidated
 - 29 Overconsolidated
 - 30 Coal combustion
 - 31 Power plants
 - 32 SS: Steel Slag
 - 33 EAF: Electric Arc Furnace Slag
 - 34 BOS: Basic Oxygen Steel Slag
 - 35 CW: Coal Wash
 - 36 Salt
 - 37 Acid
 - 38 Enzyme
 - 39 Lignosulfonates
 - 40 Emulsion
 - 41 Polymer
 - 42 Tree resin
 - 43 Geofiber
 - 44 Asphalt binder
 - 45 Rapid Curing
 - 46 Medium Curing
 - 47 Slow Curing
 - 48 Calcined
 - 49 Anhydrite
 - 50 Crystallization
 - 51 Biomass Ash
 - 52 Optimal dispersion effect
 - 53 Air Faom & EPS Beads
 - 54 Lateral earth pressure
 - 55 Foaming agents
 - 56 Bentonite
 - 57 Inert Filler
 - 58 Mineral - Ettringite
 - 59 Resins
 - 60 Foams
 - 61 Petroleum Emulsions
 - 62 Industrial Byproducts
 - 63 Waste Materials
 - 64 Polymerization
 - 65 Hair sized polypropylene fibers
 - 66 River Aire
 - 67 DCPD: Di Calcium Phosphate Dihydrate
 - 68 Erosion
 - 69 LFA: Lime Fly Ash
 - 70 Natural decantation
 - 71 California Bearing Ratio
 - 72 Back Propagation Artificial Neural Network
 - 73 Evolutionary Polynomial Regression
 - 74 Deep Soil Mixing
 - 75 Irving
 - 76 San Antonio
 - 77 Polystyrene Beads
 - 78 Soil-Sement Engineering Formula®
 - 79 Eolian
 - 80 Fluvial
 - 81 Quicklime
 - 82 GS: Gypsum Neutral Stabilizer
 - 83 Grout
 - 84 Estuarine Silt
 - 85 Swell
 - 86 PF: Polypropylene Fibers
 - 87 DCPT: Dynamic Cone Penetration Test
 - 88 PA: Phosphoric Acid
 - 89 MDI: Methylene Diphenyl Diisocyanate

۸- مراجع

- آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، نشریه شماره ۲۳۴، تجدید نظر اول؛ (۱۳۹۲)، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، مرکز اسناد، مدارک و انتشارات، چاپ سوم، ویراست ۲.
- پاک، ع. و شیخ انصاری، ع.ر.، (۱۳۷۷)، "نقش و اهمیت مسائل محیط زیستی در پروژه‌های لایروبی"، سومین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، تهران.
- پاک، ع. رحمانی، ا. مقدم، م. و درخشان نیک، پ.، (۱۳۹۰)، "لایروبی - جلد اول: آشنایی یا جنبه‌های فنی و اجرایی"، پژوهشکده حمل و نقل، بخش پژوهشی حمل و نقل و تکنولوژی دریایی، تهران.
- پاک، ع. رحمانی، ا. مقدم، م. و درخشان نیک، پ.، (۱۳۹۰)، "لایروبی - جلد دوم: راهنمای ارزیابی آثار زیست محیطی"، پژوهشکده حمل و نقل، بخش پژوهشی حمل و نقل و تکنولوژی دریایی، تهران.
- پاک نژاد، ع. (۱۳۸۶)، "طرح و اجرای پروژه‌های لایروبی"، شرکت طرح نو اندیشان، تهران، ص. ۱۳۶.
- پولوس، اچ، جی، (۱۳۸۷)، "ژئوتکنیک دریایی"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، مترجم: روشن ضمیر، محمدعلی، چاپ یکم.
- حسنلو، م. صالح زاده، ح. و شاه نظری، ح.، (۱۳۸۸)، "اصلاح خاکهای ماسه‌ای کربناته با استفاده از تزریق شیمیایی"، نشریه مهندسی عمران امیر کبیر، سال ۴۱، تابستان، شماره ۱، ص ۹۵-۱۰۴.
- حلاج شوشتری، م.، (۱۳۹۲)، "تعیین و ارزیابی CBR و ضریب برجهندگی لایه‌های تثبیت شده روسازی راه (مطالعات موردی استان خوزستان)"، دانشگاه پیام نور واحد شمیرانات؛ گروه علمی مهندسی عمران؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ زمستان.
- "دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها"، (۱۳۸۲)، نشریه شماره ۲۶۸؛ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- رسولی، م.ر.، (۱۳۹۱)، "بررسی مقایسه‌ای رفتار برشی سه محوری ماسه کربناته و کوارتزی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران.
- طباطبایی، ا.م.، (۱۳۸۵)، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ دوازدهم، تهران.
- عابدی، ی. و یوسفی‌راد، م.، (۱۳۹۴)، "اصلاح و بهینه‌سازی دانه‌بندی خاک جهت بهبود ظرفیت باربری"، نخستین کنفرانس سراسری معماری و مهندسی عمران، بصورت الکترونیکی، پردیس بین‌الملل توسعه ایده هزاره.
- محمدپور سلوط، ر. (۱۳۹۴)، "بررسی مدل رفتاری ماسه‌ی کربناته و تخمین پارامترهای حالت آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران؛ گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده فنی مهندسی؛ گروه مهندسی عمران.
- مظاهری، ا.ر. پاکنهاد، م. و ترکمن، م.، (۱۳۹۷)، "بهسازی سطحی خاک‌های سیلتی با تغییر دانه‌بندی مصالح و ارائه طرح اختلاط بهینه"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، سال ۴۱، جلد ۴۸، شماره ۱، پیاپی ۹۰، ص. ۱۰۳ - ۱۰۸.
- موسوی‌پور، خ.، (۱۳۹۰)، "تثبیت خاک ماسه بادی با سیمان پرتلند معمولی"، دانشگاه هرمزگان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، گرایش مکانیک خاک و پی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ اسفند.
- هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرای، ع.، کاتبی، ب. و سلامت، ا.س.، (۱۳۹۷)، "استفاده از سرباره فولاد مخلوط با خاکستر جهت تثبیت لایه زیراساس جاده"، فصلنامه مهندسی ساختمان و علوم مسکن، دوره دوازدهم، شماره ۲۲، بهار، ص ۱۳-۱۹.
- Abdullah, H. H., Shahin, M. A. and Walske, M. L., (2019), "Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag", *Soils and Foundations*, No. 59, December 2019, pp. 1906-1920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.005>.
- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., Walske, M. L. and Karrech, A., (2021), "Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag", *Transportation Geotechnics*, Vol. 26, Jan. 2021, 100430. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100430>
- Abu-Farsakh, M., Dhakal, S. and Chen, Q., (2015), "Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading", *Soils and Foundations*, 55(3), pp.504-516.
- Achampong, F., (1996), "Evaluation of Resilient Modulus for Lime and Cement Stabilized Synthetic Cohesive Soils," Ph.D. Thesis, Wayne State University, Detroit, MI.
- ACI 230.1R-90., (1990), "State-of-the-Art report on soil Cement", *ACI Material Journal*, 87 (4).
- Adeyanju, E., Austin Okeke, C., Akinwumi, I. and Busari, A., (2020), "Subgrade Stabilization using Rice Husk Ash-based Geopolymer (GRHA) and Cement Kiln Dust (CKD)", *Case Studies in Construction Materials*, December 2020, e00388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00388>.

- AI-Amoudi, O.S.B., (1992), "Studies on soil-foundation interaction in the sabkha environment of Eastern Province of Saudi Arabia", Ph.D. diss., Dep. Civ. Eng., King Fahd Univ. Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.
- Aiban, S.A., (1994), "A study of sand stabilization in eastern Saudi Arabia", *Engineering Geology* 38, pp. 65-79.
- Akili, W. and Monismith, C.L., (1978), "Permanent deformation characteristics of cement-emulsion stabilized sand", *Proc. AAPT*, 47, pp. 252-265.
- Al-Abdul Wahhab, H. I. and Asi, I. M., (1997), "Improvement of Marl and Dune Sand for Highway Construction in Arid Areas", *Building and Environment*, No. 32, May 1997, pp. 271-279. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00067-4).
- Almajed, A., Abbas, H., Arab, M., Alsabhan, A., Hamid, W., Al-Salloum, Y., (2020), "Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based Methods for Ecofriendly Stabilization of Different Types of Natural Sands", *Journal of Cleaner Production*, No. 274, 20 November 2020, 122627. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122627>.
- Arora, S. and Aydilek, A. H., (2005), "Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials." *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 6, pp.640 – 649.
- Ata, A. and Vipulanandan, C., (1999), "Factors Affecting Mechanical and creep Properties of Silicate-Grouted Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 10, pp. 868-876.
- Baghdadi, Z.A., (1990), "Utilization of kiln dust in clay stabilization." *J. King Abdulaziz Univ.: Eng Sci*, 2, pp.53 – 163.
- Bandara, N., Jensen, E. and Binoy, T.H., (2016), "Performance Evaluation Of Subgrade Stabilization With Recycled Materials", Mdot Research Project No. Or14-009, Mdot Contract No. 2013-0065, Department of Civil and Architectural Engineering Lawrence Technological University, February 29.
- Barbu, B., and McManis, K., (2005), "Study of Problematic Silts Stabilization," *Proceedings of Transportation Research Board 2005 Annual Meeting (CD-ROM)*, Transportation Research Board, Washington DC.
- Bel Hadj Ali, I., Lafhaj, Z., Bouassida, M. and Said, I., (2014), "Characterization of Tunisian marine sediments in Rades and Gabes harbors", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 391-401.
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., and Balasubramaniam, A. S., (1996), "Soft ground improvement", ASCE Press.
- Bolton, M. D., (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands", *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78.
- Bray, R.N., Bates, A.D. and Land, J.M., (1996), "dredging: a Handbook for Engineers, Chapter 13: Dredging and the environment", Second edition, Science Direct, pp.371-387.
- Chan, C., Mizutani, T. and Kikuchi, Y., (2011), "Reusing Dredged Marine Clay By Solidification With Steel Slag: A Study Of Compressive Strength", *International Journal Of Civil And Structural Engineering* Vol. 2, No 1, pp. 270-279.
- Chan, C.M. and Shahri, Z., (2016), "geo-characterisation of dredged marine soils for potential reuse assessment in civil engineering applications", *arpn journal of engineering and applied sciences*, Vol. 11, No. 11, June, pp. 7193- 7197.
- Chang, D. T., (1995), "Resilient Properties and Microstructure of Modified Fly Ash-Stabilized Fine Grained Soils," *Transportation Research Record*, 1486, pp.88 – 96.
- Chindaprasirt, P., Kampala, A., Jitsangiam, P. and Horpibulsuk, S., (2020), "Performance and evaluation of calcium carbide residue stabilized lateritic soil for construction materials", *Case Studies in Construction Materials*, No. 13, December 2020, e00389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00389>
- Chowdary, B., Ramanamurty, V. and Pillai, R. J., (2020), "Fiber reinforced geopolymer treated soft clay – An innovative and sustainable alternative for soil stabilization", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 32, Part 4, pp. 777-781. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.574>.
- Cockrell, C. F., Muter, R. B., Leonard, J. W. and Anderson, R. E., (1970), "Application of flotation for recovery of calcium constituents from limestone modified fly ash", *West Virginia University, Coal Resource Bureau and School of Mines*.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., and Heineck, K. S., (2007), "Key parameters dictating for strength control of artificially cemented soils." *J. Geotech, Geoenviron, Eng.*, 133, 2, pp.197-205.
- Consoli, N.C., da Fonseca, A.V., Silva, S.R., Cruz, R.C. and Fonini, A., (2012), "Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils", *Geotechnique* 62, No. 2, pp.177-183.
- Consoli, N.C., Rosa, A.D., Corte, M.B., da Silva Lopes Jr, L. and Consoli, B.S., (2011), "Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays", *journal of materials in civil engineering, asce*, august, 23, pp. 1249-1254.

- Consoli, N.C., Viana da Fonseca, A., Cruz, R.C. and Heineck, K.S., (2009), "Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, asce, september, pp. 1347-1353.
- Correa-Silva, M., Miranda, T., Rouainia, M., Araújo, N., Glendinning, S. and Cristelo, N., (2020), "Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags", No. 267, 10 September 2020, 122017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122017>.
- Currin, D. D., Allen, J. J., and Little, D. N., (1976), "Validation of soil stabilization index system with manual development." Report No. FJSRL-TR-0006, Frank J. Seisler Research Laboratory, United States Air Force Academy, Colorado.
- Das, B. M., (1990), "Principle of foundation engineering", PWS-KENT publishing company, Boston.
- Deluca, M. P. and Grassle, J. F., (1993), "Future alternatives via international port of New York and New Jersey", pp.16-17.
- Do, T.M., Kang, G., Vu, N., and Kim, Y., (2018), "Development of a new cementless binder for marine dredged soil stabilization: Strength behavior, hydraulic resistance capacity, microstructural analysis, and environmental impact", *Construction and Building Materials* 186, pp.263-275.
- Drujif, B., (2016), "The use of additives to English dredged material", M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, the Wrocław University of Science and Technology, and the University of Miskolc.
- Dubois, V., Dubois, N.E., Zentar, Z. and Ballivy, G., (2009), "The use of marine sediments as a pavement base material", *Waste Management* 29, pp. 774-782.
- Dunn, C.S. and Salem, M.N., (1971), "Influence of processing procedures on strength of sand stabilized with cationic bitumen emulsion", *Highway Res. Rec.*, 351, pp. 50-65.
- Eades, J. L. and Grim, R. E., (1966), "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization." *Highway Research Record*, Washington, D.C., 139, pp.61-75.
- Engineering manual 1110-3-137., (1984), "Soil stabilization for pavements mobilization construction", Department of the Army, Corps of Engineers office of the chief of engineers.
- Eyo, E. U., Ng'ambi, S. and Abbey, S. J., (2020) "Incorporation of a nanotechnology-based additive in cementitious products for clay stabilisation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, No. 12, October 2020, pp. 1056-1069. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.018>.
- Eyo, E. U., Ng'ambi, S. and Abbey, S. J., (2020), "Performance of clay stabilized by cementitious materials and inclusion of zeolite/alkaline metals-based additive", *Transportation Geotechnics*, No. 23, June, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100330>.
- Fatani, M.N. and Sultan, H.A., (1982), "Dune sand-aggregate mixes and dune sand-sulfur mixes for asphalt concrete pavements", *Transp. Res. Rec.*, 843, pp.72-79.
- Ghorbani, A. and Hasanzadehshooili, H., (2018), "Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing", *Soils and Foundations* 58 (1), pp. 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002>.
- Gissila Gidday, B. and Mittal, S., (2020), "Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime", *Heliyon*, No. 6, February, e03384. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03384>.
- Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H., (2008), "Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects", *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 6, No. 2, pp. 108-119.
- Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H., (2014), "Drained Shear Strength of Carbonate Sands Based on Energy Approach", *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9.
- Haston, J.S. and Wohlgemuth, S.K., (1985), "Experiences in the selection of the optimum lime content for soil stabilization." *Texas Civil Engineer*, November 1985, pp.17-20.
- He, J., Shi, X. K., Li, Z. X., Zhang, L., Feng, X. Y. and Zhou, L. R., (2020), "Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, No. 242, 10 May, 118126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118126>.
- Hendriks, H. C., 2016, "The effect of PH and the solids composition on the settling and self-weight consolidation of mud", Delft: Delft University of Technology.
- Hillbrich, S. L., and Scullion, T., (2006), "A Rapid Alternative for Laboratory Determination of Resilient Modulus Input Values on Stabilized Materials for the AASHTO M-E Design Guide," In *Transportation Research Board 2006 Annual Meeting*, CD-ROM Publication.
- Hilt, G.H. and Davidson, D.T., (1960), "Lime fixation in clayey soils", *Bulletin No. 304*, *Highway Research Record*, Washington, D.C., pp.20-32.
- Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddepong, A., Chinkulkijniwat, A., & Liu, M. D., (2012), "Strength development in blended cement admixed saline clay", *Applied Clay Science* 55, pp.44-52.

- Hosseinpour, Z., Najafpour, G. D., Latifi, N., Morowvat, M.H. and Manahilohd, K. N., (2021), "Synthesis of a biopolymer via a novel strain of *Pantoea* as a soil stabilizer", *Transportation Geotechnics*, Vol. 26, Jan. 2021, 100425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100425>.
- Huang, Y., Dong, C., Zhan, X. and Guan, Y., (2014), "Experimental Study on the Improvement of High Water Content Dredged Material by Cement and by Quicklime", *Advanced Materials Research*, No. 878, pp. 714-719.
- Igor, R., Irina, P., Eduard, P. and Maria, R., (2020), "The role of the composite modifier in the stabilization of the soil base", *Materials Today: Proceedings*, Available online 10 September 2020 In Press, Corrected Proof. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.152>.
- Ikeagwani, C. C., Obeta, I. N. and Agunwamba, J. C., (2019), "Stabilization of black cotton soil subgrade using sawdust ash and lime", *Soils and Foundations*, No. 59, February 2019, Pages 162-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.10.004>.
- Indraratna, B. and Salim, W., (2002), "Modeling of Particle Breakage of Coarse Aggregate Incorporating Strength and Dilatancy", *Journal of Geotechnical Engineering*, ICE, Vol. 155, No. 4, pp. 243-252.
- Ismail, M.A., Joer, H.A., Merit, A., and Randolph, M.F., 2002, "Cementation of Porous Material Using Calcite", *Geotechnique*, Vol. 52, No. 5, pp. 313-324.
- James, J., (2020), "Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, No. 12, April, pp. 395-402. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.10.005>.
- Jaubertie, R., Rendell, F., Rangedard, D. and Molez, L., 2010, "Stabilisation of estuarine silt with lime and/or cement", *Applied Clay Science* 50, pp.395-400.
- Jitha, P. T., Sunil Kumar, B. and Raghunath, S., (2020), "Strength development and masonry properties of geopolymer stabilized soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes", *Construction and Building Materials*, No. 250, 30 July, 118877, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877>.
- Kamon, M. and Nontananandh, S., (1991), "Combining industrial wastes with lime for soil stabilization", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), pp.1-17.
- Kang, G., Aristo Cikmit, A., Tsuchida, T., Honda, H. and Kim, Y. S., (2019), "Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag", *Construction and Building Materials*, No. 203, 10 April, pp. 501-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.106>.
- Kang, G., Tsuchida, T. and Kim, Y., (2017), "Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages", *Construction and Building Materials* 132, pp. 71-84.
- Kang, G., Tsuchida, T., Tang, T.X. and Kalim, T.P., (2017), "Consistency measurement of cement-treated marine clay using fall cone test and Casagrande liquid limit test", *Soils and Foundations*, 57 (5), pp. 802-814. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.010>
- Ketabi, H., Fahmi, A., Samadi Kafil, H. and Hajjalilue Bonab, M., (2017), "Stabilization of calcareous sand dunes using phosphoric acid mulching liquid", *Journal of Arid Environments*, 148, pp. 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.011>.
- Kim, D. and Siddiki, N.Z., (2006), "Simplification Of Resilient Modulus Testing For Subgrades", *Fhwa/In/Jtrp-2005/23*, Final Report, Joint Transportation Research Program, Project No. C-36-52S, File No. 6-20-18, SPR- 2633, Indiana Department Of Transportation And The U.S. Department Of Transportation Federal Highway Administration, School Of Civil Engineering, Purdue University, February.
- Kim, D., and Siddiki, N., (2004), "Lime Kiln Dust and Lime – A Comparative Study in Indiana." *Transportation Research Board 2004 Annual Meeting*, CD-ROM Publication, Paper No. 04-4147.
- Kitazume, M., & Satoh, T., (2003), "Development of a pneumatic flow mixing method and its application to Central Japan International Airport construction", *Ground Improvement*, pp.139-148.
- Kotsewara Rao, D., Sravani, G. and Bharath, N., (2014), "A laboratory Study on the Affect of Steel Slag for Improving the Properties of Marine Clay for Foundation Beds", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 7, July.
- Lang, L., Li, F. and Chen, B., (2020), "Small-strain dynamic properties of silty clay stabilized by cement and fly ash", *Construction and Building Materials*, No. 237, 20 March 2020, 117646. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117646>.
- Lee, K. L. and Seed, H. B., (1967), "Drained Strength Characteristics of Sand", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp. 117-141.
- Limeira, J., Agulló, L. and Etxeberria, M., (2012), "Dredged marine sand as construction material", *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 16, No. 8, September, pp.906-918.
- Little, D.L., (2000), "Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates." *Mixture Design and Testing Protocol for Lime Stabilized Soils*, 3, National Lime Association report, (<http://www.lime.org/SOIL3.PDF>).

- Little, L., Connor, B. and Carlson, R. F., (2005), "Tests of soil stabilization products, phase 1", University of Alaska Fairbanks.
- Little, N.D. and Nair, S., (2009), "Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials", The National Academies Press, Nchrp Web-Only Document 144, Texas Transportation Institute, August.
- Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Prasanna Kanungo, D., Wang, Y., Bu, F., Chen, Z. and Shi, X., (2020), "Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer", *Construction and Building Materials*, No. 253, 30 August 2020, 119164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119164>.
- Liu, L., Zhon, A., Deng, Y., Cui, Y., Yu, Z. and Yu, C., (2019), "Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays", *Construction and Building Materials*, No. 211, 30 June, pp. 909-918. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.256>
- Liu, Y., Chang, M., Wang, Q., Wang, Y., Liu, J., Cao, C., Zheng, W., Bao, Y. and Rocchi, I., (2020), "Use of Sulfur-Free Lignin as a novel soil additive: A multi-scale experimental investigation", *Engineering Geology*, No. 269, May, 105551. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105551>.
- Lopez-Querol, S., Arias-Trujillo, J., GM-Elipse, M., Matias-Sanchez, A. and Cantero, B., (2017), "Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized English sand", *Construction and Building Materials* 153, pp.374–384.
- Maher, M., Marshall, C., Harrison, F. and Baumgaertner, K., (2005), "Context sensitive roadway surfacing selection guide", FHWA-CFL/TD-05-004.
- Mallela, J., Quintus, H. V., and Smith, K., (2004), "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", The National Lime Association.
- Manimaran, A., Santhosh, S. and Ravichandran, P.T., (2018), "characteristics study on sub grade soil blended with ground granulated blast furnace slag", *Rasayan J. Chem.*, Vol. 11, No. 1, pp. 401-404.
- McManis, K. L. and Arman, A., (1989), "Class C Fly Ash as a Full or Partial Replacement for Portland Cement or Lime." *Transportation Research Record*, 1219, pp.68 – 81.
- Miller, G.A. and Azad, S., (2000), "Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust." *Construction and Building Materials*, 14, pp.89 – 97.
- Miller, G.A. and Zaman, M., (2000), "Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a soil stabilizer," *Transportation Research Record*, 1714, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C., pp.25-32
- Misra, A., (1998), "Stabilization Characteristics of Clays Using Class C Fly Ash." *Transportation Research Record*, 1611, pp.46 – 54.
- Miura, N. and O-hara S., (1979), "Particle-crushing of a Decomposed Granite Soil under Shear Stress", *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, pp. 1-14.
- MolaAbasi, H., Naderi Semsani, S., Saberian, M., Khajeh, A., Li, J. and Harandi, M., (2020), "Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro- and macro-level approach", *Journal of Cleaner Production*, No. 267, 10 September, 122209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122209>.
- Motz, H. and Geiseler, J., (2001), "Products of steel slags an opportunity to save natural resources", *Waste Management*. 21, pp. 285-293.
- Mozejko, C. A. and Francisca, F.M., (2020), "Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag", *Construction and Building Materials*, No. 239, 10 April 2020, 117901. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117901>.
- Muhammad, N. and Siddiqua, S., (2019), "Stabilization of silty sand using bentonite magnesium-alkalinization: Mechanical, physicochemical and microstructural characterization", *Applied Clay Science*, No. 183, 15 December, 105325. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105325>.
- Muhunthan, B. and Sariosseiri, F., (2008), "Interpretation of Geotechnical Properties of Cement Treated Soils", The Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, July 2008, Research Report, FHWA Contract DTFH61-05-C-00008, Compaction Control of Marginal Soils in Fills.
- Murff, J.D., (1987), "Pile capacity in calcareous sands: State of the art", *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 113(GT5), pp. 490-507.
- Newland, P. L. and Allely, B. H., (1957), "Volume Changes in Drained Triaxial Tests on Granular Materials", *Geotechnique*, Vol. 7, No. 1, pp. 17-34.
- Nicholson, P. G. and Ding, M., (1997), "Improvement of tropical soils with waste ash and lime." *American Society for Testing Materials*, Vol. 1257, pp.195-204.
- Noorany, I., (1989), "Classification of Marine Sediments", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 115, No. 1, pp. 23-37.

- Obianyo, I. I., Onwualu, A. P. and Soboyejo, B. O., (2020), "Mechanical behaviour of lateritic soil stabilized with bone ash and hydrated lime for sustainable building applications", *Case Studies in Construction Materials*, No. 12, June 2020, e00331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00331>.
- Okumura, T., Noda, S., Kitazawa, S. and Wada, K., (2000), "New ground material made of dredged soil for port and airport reclamation projects", Nakase and Tsuchida (eds) *Coastal Geotechnical Engineering in Practice*.
- Oluwatuyi, O. E., Ojuri, O. O. and Khoshghalb, A., (2020), "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, No.12, February, pp. 160-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.010>.
- Osinubi, K.J., and Nwaiwu, C.M.O., (2006), "Compaction delay effects on properties of lime-treated soil," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, No.2, pp. 250-258.
- Parsons, R. L., and Milburn, J. P., (2003), "Engineering behavior of Stabilized Soils," *Transportation Research Record* 1837, pp.20 – 29.
- Petty, T. M., and Little, D. N., (2002), "Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavement and Lightly Loaded Structures-History, Practice and Future." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6.
- Phanikumar, B. R., Ramanjaneya Raju, E., (2020), "Compaction and strength characteristics of an expansive clay.
- Poh, H.Y., Ghataora, G.S. and Ghazireh, N., (2006), "Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines", *Journal of materials in civil engineering, asce / march/april*, pp. 229-240.
- Pooni, J., Robert, D., Giustozzi, F., Setunge, S., Xie, Y.M. and Xia, J., (2020), "Novel use of calcium sulfoaluminate (CSA) cement for treating problematic soils", *Construction and Building Materials*, No. 260, 10 November 2020, 120433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120433>.
- Porbaha, A., Hanzawa, H. and Shima, M., (1999), "Technology of air-transported stabilized dredged fill. Part 1: pilot study", *Ground Improvement* 3, pp. 49-58.
- Portland Cement Association, (1992), "Soil-Cement Laboratory Handbook." Portland Cement Association, Illinois.
- Prabakar, J., Dndorkar, N. and Morchhale, R. K., (2004), "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils," *Construction and Building Materials*, 18, pp.263 – 267.
- Prusinski, J. R. and Bhattacharia, S., (1999). "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils", *Transportation Research Record*, 1632, pp.215 – 227.
- Puppala, A. J. and Musenda, C., (2000), "Effects of fibers reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils", *Transportation Research Board*, Washington D.C., (1736), pp.134-140.
- Puppala, A. J., Punthutaecha, K. and Vanapalli, S. K., (2006), "Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils", *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, 132 (6), pp. 736-751. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:6\(736\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:6(736)).
- Puppala, A.J., Mohammad, L.N. and Allen, A., (1996), "Engineering Behavior of Lime-Treated Louisiana Subgrade Soil", *transportation research record* 1546, pp. 24-31.
- Qubain, B.S., Seksinsky, E.J. and Li, J., (2000), "Incorporating subgrade lime stabilization into Pavement Design", *Transportation Research Record* 1721, Paper No. 00-0608, National Research Council, Washington D. C., pp. 3-8.
- Ramani Sujatha, E. and Saisree, S., (2019), "Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil", *Soils and Foundations*, No. 59, December, pp. 2155-2166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.012>.
- Rezaeimalek, S., Nasouri, A., Huang, J., Bin-Shafique, S., and T. Gilazghi, S., (2017), "Comparison of short-term and long-term performances for polymer-stabilized sand and clay", *Journal of traffic and transportation engineering (nglish edition)*, 4 (2) : pp.145 -155.
- Rezaeimalek, S., Huang, J. and Bin-Shafique, S., (2017), "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization", *Construction and Building Materials* 146, pp.210–220.
- Rios, S., Viana da Fonseca, A. and Sagar Bangaru, S., (2016), "Silty Sand Stabilized with Different Binders", *Procedia Engineering*, Vol. 143, pp. 187–195.
- Rivera, J. F., Orobio, A., Cristelo, N. and Mejía de Gutiérrez, R., (2020), "Fly ash-based geopolymers as A4 type soil stabilizer", *Transportation Geotechnics*, No. 25, December, 100409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100409>.
- Rowe, P. W., (1962), "The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*", The Royal Society, Vol. 269, No. 1339.
- Sabbagh, A.O., (1988), "Design and viscoelastoplastic characterization of a lime-dune sand-asphalt mix", *Proc. 3rd IRF Middle East Reg. Meet., Riyadh*, pp.175-177.

- Sabrin, S., Siddiqua, S. and Muhammad, N., (2019), "Understanding the effect of heat treatment on subgrade soil stabilized with bentonite and magnesium alkanization", *Transportation Geotechnics*, No. 21, December, 100287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100287>.
- Sai Nikhil, P., Ravichandran, P. T. and Divya Krishnan, K., (2020), "Stabilisation and characterisation of soil using wollastonite powder", *Materials Today: Proceedings*, Available online 18 June 2020, In Press, Corrected Proof, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.489>.
- Salimi, M. and Ghorbani, A., (2020), "Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers", *Applied Clay Science*, No. 184, January 2020, 105390. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390>.
- Santoni, R. L. and Tingle, J. S., (2002), "Building roads on soft and silty soils", www.almc.army.mil/alog/issues/JanFeb02/MS698.htm – 18k.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Nieves, M., (2004), "Accelerated strength improvement of silty sand using nontraditional additives", 1936, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., pp. 34-42.
- Seng, S. and Tanaka, H., (2011), "Properties of Cement-Treated Soils During Initial Curing Stages", *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 5, pp. 775-784, Oct. 2011.
- Senol, A., Bin-Shafique, Md. S., Edil, T.B. and Benson, C.H., (2002), "Use of Class C Fly Ash for Stabilization of Soft Subgrade." Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul Technical University, Turkey.
- Shahnazari, H. and Rezvani, R., (2013), "Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study", *Engineering Geology* 159, pp. 98–105.
- Shahnazari, H., Salehzadeh, H., Rezvani, R., and Dehnavi, Y., (2014), "The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), pp.975-983.
- Shinn, E.A., (1969), "Submarine lithification of Holocene carbonate sediments in the Persian Gulf. *Sedimentology*", 12, pp.109-144.
- Shinsha, H. and Kumagai, T., (2018), "Material properties of solidified soil grains produced from dredged marine clay", *Soils and Foundations* 58 (3), pp. 678-688.
- Siham, K., Fabrice, B., Vincent, D. and Nor Edine, A., (2013), "Beneficial use of marine dredged sand and sediments in road construction", *Arab J Sci Eng.*, pp. 1-8.
- Singh, G. V. and Das, B. M., (1999), "Soil stabilization with sodium chloride" *Transportation Research Board*, (1673), pp.46-55.
- Solanki, P., Khoury, N.N. and Zaman, M.M., (2009), "Engineering Properties of Stabilized Subgrade Soils for Implementation of the AASHTO 2002 Pavement Design Guide", final report – fhwa-ok-08-10, odot spr item number 2185, June.
- Stabilised with Fly-ash Based Geopolymer Incorporating Ground Granulated Slag", *Transportation Geotechnics*, (2020), Available online 2 September, 100430, In Press, Journal Pre-proof, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100430>.
- Stabilised with lime sludge and cement", *Soils and Foundations*, No. 60, February 2020, pp. 129–138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007>.
- Sun, K., Nakano, M., Yamada, E. and Asaoka, A., (2010), "Mechanical Behavior of Compacted Geomaterial Changed from the Dredged Soil in Nagoya Port by Mixing with Some Stabilizers", *GeoShanghai 2010 International Conference, Ground Improvement and Geosynthetics*. China.
- Taha Jawad, I., Taha, M.R., Majeed, Z.H. and Khan, T.A., (2014), "Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 8(4), pp.510-520.
- Taheri, A. and Tatsuoka, F., (2012), "Stress-strain relations of cement-mixed gravelly soil from multiple-step triaxial compression test results", *Soils and Foundations*, 52(4), pp.748–766.
- Taheri, A., Sasaki, Y., Tatsuoka, F. and Watanabe, K., (2012), "Strength and deformation characteristics of cemented-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression", *Soils and Foundations* 52 (1), pp.151–170.
- Tang, Y.X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T., (2000), "Advanced reuses of dredging by cement treatment in practical engineering", Nakase and Tsuchida (eds) *Coastal Geotechnical Engineering in Practice*.
- Tang, Y.X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T., (2001), "Practices of Reused Dredgings by Cement Treatment", *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 5, pp. 129-143.
- Tasalloti, S.M.A., Indraratna, B., Chiaro, G. and Heitor, A., (2015), "Field investigation on compaction and strength performance of two coal wash-BOS slag mixtures", In M. Iskander, M. T. Suleiman, J. Anderson & D. F. Laefer (Eds.), *Geotechnical Special Publication*, pp. 2359-2368.
- Taylor, D. W., (1948), "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York.

- Thanh Hang Nguyen, T., Cui, Y.-J., Ferber, V., Herrier, G., Ozturk, T., Plier, F., Puiatti, D., Salager, S. and Minh Tang, A., (2019), "Effect of freeze-thaw cycles on mechanical strength of lime-treated fine-grained soils", *Transportation Geotechnics*, No. 21, December, 100281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100281>.
- Thomas, G. and Rangaswamy, K., (2020), "Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 137, October, 106324, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106324>.
- U.S. Army Corps of Engineers, (2015), "Engineering and Design dredging and dredged material management", manual no. em 1110-2-5025, department of the army, Washington, dc. 20314-1000, 31 July.
- Ueng, T. S., Tzou, Y. M. and Lee, C. J., (1988), "The Effect of End Resistant on Volume Change and Particle Breakage of Sands in Triaxial Tests", *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP-977, pp. 679-691.
- Venda Oliveira, P. J. and Rosa, J. A. O., (2020), "Confined and unconfined behavior of a silty sand improved by the enzymatic biocementation method", *Transportation Geotechnics*, No. 24, September, 100400, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100400>.
- Wang, D., Zentar, R. and Abriak, N.E., (2011), "Strength and Swelling Properties of Solidified Dredged Materials", *Advanced Materials Research*, Vols. 261-263, pp 812-815.
- Wang, F., Shen, Z., Liu, R., Zhang, Y., Xu, J. and Al-Tabbaa, A., (2020), "GMCs stabilized/solidified Pb/Zn contaminated soil under different curing temperature: Physical and microstructural properties", *Chemosphere*, No. 239, January 2020, 124738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124738>
- Watabe, Y., Noguchi, T., & Mitarai, Y., (2012), "Use of Cement-Treated Lightweight Soils Made from Dredged Clay", *Journal of ASTM International*, pp.1-10.
- Watabe, Y., Saeguse, H., Shinsha, H., & Tsuchida, T., (2011), "Ten year follow-up study of airfoamtreated lightweight soil", *Ground improvement* 164, pp.189-200.
- White, W. G. and Gnanendran, C. T., (2005), "The influence of compaction method and density on the strength and modulus of cementitiously stabilized pavement material." *The International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), pp.97-110.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Miri Disfani, M., Horpibulsuk, S., Darmawan, S. and Wang, J., (2019), "Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay", *Applied Clay Science*, January, (2019), pp. 33-42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.005>.
- Yu, J., Chen, Y., Chen, G. and Wang, L., (2020), "Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization", *Engineering Geology*, No. 264, January 2020, 105316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105316>.
- Zaman, M., Laguros, J. G. and Sayah, A. I., (1992), "Soil stabilization using cement kiln dust," *Proceedings of 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, Dallas, Texas, pp.1 -5.
- Zeng, I. I., Bian, X., Zhao, L., Wang, Y. J. and Hong, Z.-S., (2021), "Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China", *Geomechanics for Energy and the Environment*, No. 25, March 2021, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2020.100195>.
- Zhang, T., Liu, S., Zhan, H., Ma, C. and Cai, G., (2020), "Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials", *Journal of Cleaner Production*, No. 248, 1 March 2020, 119293, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119293>.
- Zhang, W. L., McCabe, B. A., Chen, Y. L. and Forkan, T. J., (2018), "Unsaturated behaviour of a stabilized marine sediment: A comparison of cement and GGBS binders", *Engineering Geology*, No. 246, 28 November 2018, pp. 57-68. doi:10.1016/j.enggeo.2018.09.020.
- Zhang, X., Li, W., Tang, Z., Wang, X. and Sheng, D., (2020), "Sustainable regenerated binding materials (RBM) utilizing industrial solid wastes for soil and aggregate stabilization", *Journal of Cleaner Production*, No. 275, 1 December 2020, 122991. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122991>.
- Zhu, J. F., Xu, R. Q., Zhao, H. Y., Luo, Z. Y., Pan, B. J. and Rao, C. Y., (2020), "Fundamental mechanical behavior of CMMOSC-S-C composite stabilized marine soft clay", *Applied Clay Science*, No. 192, July 2020, 105635. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105635>.
- Zia, N. and Fox, P.J., (2000), "Engineering Properties of Loess-Fly Ash Mixtures for Roadbase Construction", *Transportation Research Record* 1714, Paper No. 00-0886, National Research Council, Washington D. C., pp 49-56.
- Ziaie Moayed, R., Khatami, S. M. H. and Allahyari, F., (2017), "Effect of Using Ion Exchange Solution in Increasing Bearing Capacity of Clayey Soils with Various Plasticity Index (PI)", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2), pp.305-311.

Various Methods of Stabilizing Dredged and Carbonated Soils

Masoud Sadeghpour Monfared, M.Sc., Grad., Building & Housing Research Center, Tehran, Iran.

Iraj Rahmani, Assistant Professor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: I.Rahmani@bhrc.ac.ir

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

Dredged soils are obtained from capital dredging (resulting from the construction of hydraulic structures) or maintenance dredging (from the maintenance of hydraulic structures). Due to the large volume, uselessness and low pollution of these soils; researchers are exploring using these materials as soil alternatives. Poor bearing capacity, fragmentation characteristic, and difficult behavior prediction; are some problems of carbonated soils. Also non-carbonated dredged soils often don't have proper technical characteristics. The Persian Gulf has coasts covered with carbonated sediments, also forced to dredge. Due to the great importance of this waterway in the world economy and energy supply, as well as the problematic nature of its carbonated soil (for example, creating problems for oil extraction platforms); The Persian Gulf's carbonated soil, like dredged soil, needs to be improved. One of the most widely used soil improvement methods is stabilization. Besides the use of new materials (such as polymer and fiber), stabilization by cement and lime are still the most common stabilization methods for variety of soils. In addition to economic value, it will also be environmental and technical importance to consider the possibility of using it in engineering structures such as road bodies as base and subbase. Soil improvement is done in various additives and methods. Depending on the type of soil and materials in each area, the appropriate stabilization method varies; therefore, the same prescription for soil stabilization cannot be proposed. This paper focuses on carbonated and dredged soils, their stabilization methods; and reviews some practical experiences of stabilizing them.

Keywords: Carbonated soil, Dredged Soil, Stabilization, Cement, Steel Slag