



مروری اجمالی بر مهمترین روش های بهسازی و تثبیت خاکهای مختلف

مسعود عاطفی فرد

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان، باشگاه پژوهشگران و نخبگان، کاشان، ایران
Masouda92@yahoo.com

مهدی خیری

کارشناسی عمران
Mahdikhy71@yahoo.com

سعید داوودی

کارشناسی عمران
S71d71@yahoo.com

علی آزاد فلاح

کارشناسی عمران
Ali.Azadfalah@yahoo.com

سعید بهنیا

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان
S.Behnia690@yahoo.com

چکیده

سال ها پیش، مهندسان در عملیات های عمرانی مختلف، همواره با مشکلات و موانع زیادی روبرو بودند. اولین قسمتی که سازه های عمرانی با آن در ارتباط اند، بستر است و مشکلات نیز از همینجا شروع شدند. مشکلات عمده خاک ها از یک طرف و تجربه کم مهندسان و کمبود امکانات فنی از طرف دیگر موجب ضعف و مشکلاتی در سازه های عمرانی شد. ضعف خاک در ظرفیت باربری، کمبود خواص مکانیکی مطلوب، خاصیت تورم زایی و... این مسائل و روش ها، ترفند های جدیدی را نیاز داشتند که با تکامل دانش مهندسی و ظهور فناوری های نو در رشته عمران به این مهم نائل آمدند. روش های مختلف جهت بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه مورد نظر جهت بهسازی، دسترسی محلی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، فاکتورهای زیست محیطی، تجارب مهندسان،

مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می شوند. لازم به ذکر است که شناخت منطقه و بررسی انواع خاک هایی که ایجاد مشکل می کنند نیز از ضرورت و اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله سعی شده است که علاوه بر آشنایی با انواع خاک های مشکل ساز به بررسی مهمترین روش های تثبیت و بهسازی خاک پرداخته شود.

واژگان کلیدی: بهسازی، خاک رمبنده، خاک شل، خاک انبساطی، خاک دستی.

مقدمه

در کمتر پروژه عمرانی است که نگرانی از جنس بستر پروژه عمرانی جهت دارا بودن ویژگی های مکانیکی و شیمیایی لازم، دغدغه ای را برای مهندسان ایجاد نکرده باشد. در پروژه های کلان ساختمانی، راهسازی، سدسازی، تونل و... مهندسان به ناچار بسترهایی از جنس های مختلف (خاکی و سنگی) با مقاومت ها و پارامتر های مختلفی روبرو می شوند. خاک های مختلف خواص مکانیکی، تورم زایی، ظرفیت باربری و نشست پذیری مختلفی دارند. بعضا با توجه به گستره ی پروژه ها امکان اجرای یک لایه غیر اقتصادی با ضوابط اجرایی و مالی پروژه همخوانی ندارد، لذا شناخت انواع خاک های مشکل ساز در پروژه و تثبیت آن ها با مصالح مناسب اهمیت فراوانی پیدا می کند. روش های مختلف جهت بهسازی خاک با توجه به اهمیت پروژه، جنس خاک اولیه، وسعت منطقه مورد نظر جهت بهسازی، دسترسی محلی به مصالح، تجهیزات و نیروهای متخصص، فاکتورهای زیست محیطی، تجارب مهندسان، مسائل اقتصادی و زمان مجاز برای تکمیل پروژه انتخاب می شوند. خاک ها می بایست با توجه به نقاط ضعف و راه مناسب جبران آن بهسازی شوند؛ برای مثال مقادیر زیادی لای و رس برای عملیات عمرانی مضر تلقی می شوند و به سبب پارامتر های خمیری و مکانیکی مطلوب پنداشته نمی شوند، لذا با روش های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی و... مناسب، این نوع خاک را تثبیت می کنند. هدف این مقاله آشنایی اجمالی با مهمترین خاک های مشکل ساز و مهمترین روش های بهسازی و تثبیت آن است.

روش تحقیق

نمونه های مورد تحقیق قرار گرفته شده، از نمونه خاک های ثبت شده در وزارت راه و شهرسازی کشور انتخاب شده است، که در حیطه زمین شناسی و جغرافیایی کشور ایران قرار دارد. روش های بیان شده، عموماً از روش های استاندارد بین المللی و مورد تایید، انتخاب شده است.

انواع خاک های مشکل ساز در پروژه های عمرانی

شناخت انواع خاک های مشکل ساز در پروژه های عمرانی اهمیت فراوانی دارد، چراکه باعث می شود بهترین راه تثبیت و بهسازی را برای هر نوع خاص خاک انتخاب کنیم.

به طور کلی خاک های مشکل ساز در پروژه های عمرانی را می توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

(الف) خاک های ریزدانه (خاک دستی)

(ب) خاک های انبساطی (منبسط شونده)

(ج) خاک های رمبند (فروریزی)

(د) خاک های نرم و شل (آبگونه شونده)

توجه: خاکهای آلوده به مواد شیمیایی و نفتی را میتوان در گروه خاک های دستی تقسیم بندی کرد.

الف) خاک های ریزدانه (خاک دستی)

با توجه به اینکه در حاشیه مناطق شهری نیاز به زمین جهت انجام فعالیت های عمرانی شهری، غیر قابل اجتناب است، ممکن است زمین هایی نیز مورد استفاده قرار بگیرند که قبلا به عنوان مکانی برای دفن زباله مورد استفاده قرار گرفته می شدند. زباله های مختلف ممکن است ناشی از حفاری های شهری و غیر شهری، ضایعات ساختمانی، پسماند های صنعتی و معدنی، آلودگی های نفتی^۱ و زباله های شهری (زباله های تر و خشک روزمره، لوازم قدیمی، قطعات خودرو های فرسوده و...) باشند. گاهی به این نوع خاک، خاک دستی نیز اطلاق می شود. مشکل عمده این نوع خاک ها، انباشتن این مصالح بدون در نظر گرفتن تمهیدات خاصی جهت تجزیه یا تحکیم زباله هاست، که با لایه ای خاک به ضخامت ۰,۶ تا ۲,۰ متر، سطح آن ها را می پوشانند. مشکلات مهمی از جمله ضعف باربری، تغییرات حجم و ناپایداری داخلی بعد از بارگذاری این نوع خاک ها بروز پیدا می کند. گاهی نشست بعضی خاکریز های شنی حدودا ۲,۵٪ ارتفاع، خاک های ماسه ای حدودا ۵,۰٪ ارتفاع و خاک های ریزدانه حدودا ۱۰,۰٪ ارتفاع می باشد. مشکل نگران کننده اینجاست که این نشست ها طی وزن خود زباله ها و خاکریزها در مدت زمان طولانی (۱۰ تا ۲۰ سال) اتفاق می افتد و ممکن است قبل از تراکم نسبی، پروژه ای عمرانی روی آن شروع شود. مطمئنا به دلیل خواص فیزیکی متنوع زباله ها و روش های مختلف قرارگیری خاکریز، نشست ها ناهمسان و غیر یکنواخت خواهد بود. لازم است که از روش های مناسبی که بعدا ذکر خواهد شد، به تثبیت و بهسازی این نوع خاک پرداخته شود.

ب) خاک های انبساطی (منبسط شونده)^۲

این خاصیت عموما در خاک های ریزدانه رسی دیده می شود. خاک های انبساطی دارای مقدار زیادی کانی مونت موریلونیت می باشد که با جذب آب، پتانسیل تورمی و انبساطی بالایی دارند. این نوع خاک با از دست دادن آب منقبض می شود. تغییرات حجمی خاک های منبسط شونده را می توان مشکل سازترین خاصیت منفی خاک ها رسی در اینجا دانست. رس ها معمولا اندازه کلونیدی (۰,۰۰۱ میلی متر) دارند؛ پس سطح مخصوص آنها بسیار زیاد بوده و قادرند سطح زیادی آب را به خود جذب کنند. آب و هوا و اقلیم، یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار روی خاک های منبسط شونده است، زیرا در مناطق مرطوب که سطح ایستایی آب نزدیک زمین است، این مشکل کمتر دیده می شود. در مناطق خشک که سطح ایستایی آب، پایین است و تاثیر کمی روی رطوبت خاک در نواحی سطحی دارد. این خاک ها را می توان به طریقی عمل آورد که تغییرات حجمی آن محدود شود؛ مثلا از طریق کنترل رطوبت و یا تثبیت با مواد افزودنی.

^۱ (عاطفی فرد و همکاران، ۱۳۹۴)

^۲ (غفارپور جهرمی و بدایعی، ۱۳۹۴)



ج) خاک های رملنده (فروریزی)

هنگامی که این خاک ها در شرایط بارگذاری همراه با غرفاب شدن و یا ارتعاش قرار می گیرند، عامل ایجاد پیوند بین ذرات آن ها از بین رفته و با وجود تخلخل زیاد ساختمان درونیشان می شکنند، پس نشست زیادی را به دنبال خواهند داشت. این نوع خاک ها تا زمانی که رطوبتشان تغییر نکند، مشکل زیادی برای سازه های عمرانی ایجاد نمی کنند. این نوع خاک ها اغلب بادرفت می باشند که محدوده دانه بندی آن در محدوده لای قرار داشته و تراکم صحرائی پایینی دارند. معمولا برای تثبیت این نوع خاک ها از مواد افزودنی استفاده می شود.

د) خاک های نرم و شل (سست)

از ویژگی عمده این نوع خاک ها، مقاومت کم و ناپایداری حجمی آن ها می باشد. برای نمونه خاک هایی مثل ماسه و لای های شل، رس های نرم با رطوبت بالا و خاک های آلی را می توان نام برد. از ویژگی های این خاک ها رطوبت زیاد و تحکیم عادی یافته یافته آن ها می باشد. روانگرایی ماسه و لای ها را که از تراکم کمی برخوردارند، می توان جزء این دسته قرار داد.

روشهای عمومی بهسازی و تثبیت خاک:

- ۱) حفاری و برداشت، جابه جایی و جایگزینی
- ۲) تراکم سطحی
- ۳) تراکم دینامیکی
- ۴) تراکم ویبره ای در عمق
- ۵) انفجار
- ۶) پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری
- ۷) تزریق
- ۸) استفاده از مواد افزودنی
- ۹) سیستم های حرارتی
- ۱۰) تسلیح خاک (مسلح کردن خاک)

۱) حفاری و برداشت، جابه جایی و جایگزینی

در پروژه های عمرانی در صورتی که خاک بستر پارامترهای مقاومتی مورد نیاز را نداشته باشد و از طرفی شرایط حاکم بر پروژه و نوع خاک راه حل دیگری جز تعویض خاک بستر با خاک مناسب دیگری از قرضه را برای ما نگذاشته باشد به ناچار مجبوریم خاک را بسته به نوع پروژه تا عمق مورد نظر، با خاک مناسب که با پارامتر های مد نظر ما تطابق دارد، جایگزین کنیم. عمق متوسط اصلاح ۵ متر می باشد که در شرایط مختلف بسته به شرایط پروژه و ظرفیت باربری مد نظر قابل تغییر است. خاک حفاری شده را نیز در محل مناسب دیگری که مشکلات زیست محیطی ایجاد نکند، با رعایت مقررات دپو می کنیم. گاهی لازم است خاک جایگزین شده را نیز با مواد و روش های مناسب دیگری بهسازی و تثبیت کنیم.

۲) تراکم سطحی

زمانی که خاک در رطوبت بهینه خود قرار دارد، اصلاح سطحی خاک و تراکم آن موجب افزایش ظرفیت باربری خاک می شود؛ تراکم موجب کاهش چشمگیر تخلخل، افزایش فزاینده وزن مخصوص و خواص شده و پارامترهای زیادی از خاک را افزایش میدهد. این روش در لای یا رس به طور خاص اثر چشمگیری ندارد، اما ممکن است که در بستر گود برداری های انجام شده، رس سفت یا سنگ نرم را به دلیل سست و خرد شدن در طی عملیات حفاری، کوبید.

تراکم سطحی مانند روش های مرسوم در روسازی، به این صورت است که لایه ها در ضخامت خاص خود ریخته شده و تحت رطوبت بهینه مورد نیاز قرار می گیرند، سپس متناسب با جنس خاک، توسط غلتک مورد نیاز کوبیده می شوند.

(شکل ۱)

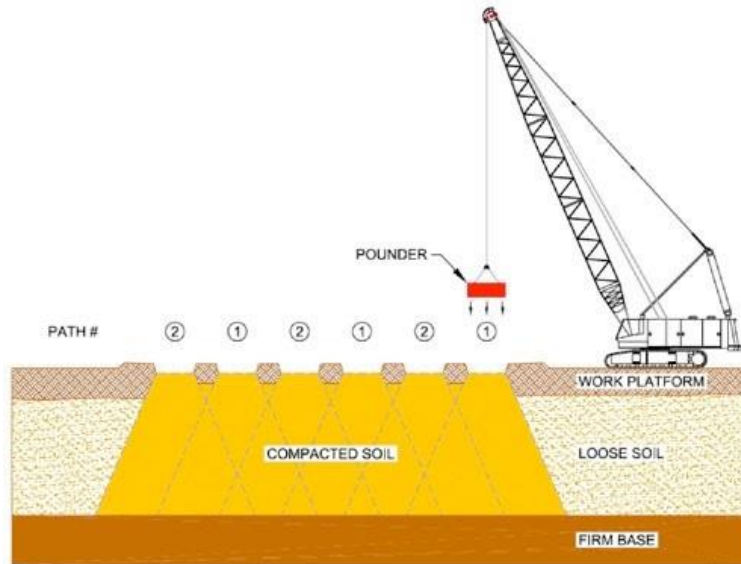


شکل ۱: تراکم سطحی

۳) تراکم دینامیکی^۲

این روش بهسازی و تثبیت، بر ایجاد ضربه جهت افزایش تراکم خاک استوار است؛ درجه تراکم نسبی بدست آمده به پارامترهای مختلف بسیاری وابسته است، که مهمترین آن ها عبارتند از: فواصل نقاطی که تحت اثر ضربه قرار میگیرند، شدت اثر ضربه و عمق مورد نظر جهت بهسازی باضربه. طی این روش وزنه ای به وزن ۱،۰ تا ۱۰۰،۰ تن را از ارتفاع ۱۰،۰ تا ۴۰،۰ متری رها می کنند. در طول سقوط وزنه، بسته به ارتفاع و وزن وزنه، می توان شدت و قدرت تراکم خاک را کنترل کرد، می توان نیروی کمی را به خاک وارد کرد و یا می توان نیرویی معادل قوی ترین زلزله های بالقوه که سبب تخریب ابنیه بسیاری خواهد شد را شبیه سازی کرد. وزنه های مورد استفاده در این روش بسته به نیاز، مکعب و یا استوانه ای شکل می باشند. زمین مورد نظر باید تقسیم بندی شود تا هر محل دو یا سه سری توسط این روش کوبیده شود، به طور معمول سه ضربه در یک خاک برای هر محل مد نظر است. جهت خروج آب و کاهش فشار آب منفذی می بایست زهکش هایی را اطراف محل تعبیه کرد تا عمل زهکشی به خوبی انجام شود. نشست و تراکم خاک ها بسته به جنسشان متفاوت است، به همین دلیل می بایست پس از اتمام عملیات سطح توسط غلتک مناسب جهت تسطیح بستر برای اجرای عملیات عمرانی اتو کشی شود. روش تراکم دینامیکی برای متراکم کردن خاک های دستی، زباله ها، ماسه های سست، خاکریز های سنگی، نخاله های ساختمانی، خاک های آهکی و خاکهای بسیار متخلخل مناسب است. (شکل ۲)

^۲ (جعفرزاده و جلیل زاده آذر، ۱۳۸۳)



شکل ۲: تراکم دینامیکی

۴) تراکم ویبره ای در عمق

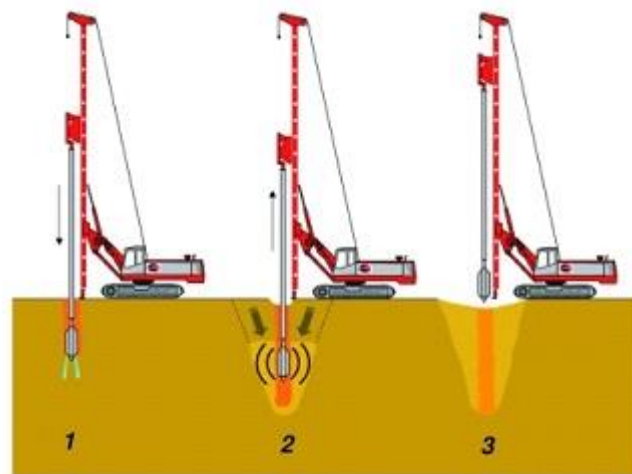
این روش به چهار دسته تقسیم می شود:

الف) میله های ارتعاشی (ب) تراکم ویبره ای شناور (ج) تراکم با ارتعاش و هوای فشرده (د) تراکم توسط شمع کوبی

الف) میله های ارتعاشی: در این روش یک چکش شمع کوب ارتعاشی و یک میله استوانه ای توخالی با طولی معادل ۳ تا ۵ متر بیشتر از عمق مورد نظر، را داخل خاک قرار می دهیم. در بعضی موارد برای بهتر فرو رفتن میله در خاک از جت آب استفاده می کنیم. پس از رسیدن به عمق مورد نظر، میله همراه با ارتعاش با یک آهنگ (سرعت) ثابت و آرام به سمت بالا کشیده می شود، در هنگام بالا کشیدن ممکن است از فشار آب برای تراکم بستر خاک استفاده شود. که به این ترتیب موجب تراکم خاک می شود. از این روش برای تثبیت خاک تا عمق ۳ تا ۴ متری استفاده می شود.

ب) تراکم ویبره ای شناور: از این روش معمولاً برای تراکم خاک های غیر چسبنده استفاده می شود و دارای ۳ بخش اصلی می باشد: ۱) سیستم ارتعاش (ویبراتور) ۲) لوله های کششی ۳) جرثقیل

ویبراتور شامل یک لوله استوانه ای توخالی است، که روی آن استوانه های خارج از محور نصب شده و در اثر دوران این استوانه ها، لغزش ایجاد می شود. این سیستم لوله ها را با سرعت ۱ تا ۲ متر بر دقیقه در زمین فرو آورده و سرعت بازگشت آن ۰,۳ متر بر دقیقه می باشد. لوله توسط جت آب و ارتعاش به عمق مورد نظر می رسد، پس فشار آب کم می شود و لوله از پایین به بالا همراه با ارتعاش بالا کشیده می شود. در هر مرحله که لوله بالا کشیده می شود، مصالح دانه ای نظیر شن و ماسه جایگزین آن خواهد شد که توسط ارتعاش، لوله مصالح جایگزین شده نیز، متراکم می شوند. نتیجه نهایی ایجاد یک ستون از مصالح دانه ای است که هم مقاومت برشی خاک را افزایش داده و هم اگر خاک اشباع باشد، جهت زهکشی از آن استفاده می شود. معمولاً شعاع ۱,۵ تا ۴,۰ متر اطراف نقطه مرتعش شده بهسازی می شود. (شکل ۳)



شکل ۳: تراکم وایبره ای شناور

ج) تراکم با ارتعاش و هوای فشرده: در این روش، یک لوله به کمک وایبراتور تا عمق مورد نظر در خاک کوبیده شده، سپس ماسه داخل لوله ریخته می شود و مرحله به مرحله لوله به سمت بالا کشیده می شود. همزمان با بالا کشیدن لوله، هوای فشرده داخل خاک تزریق می شود تا ماسه متراکم گردد، این فرایند آنقدر تکرار می شود تا شمع ماسه ای به سطح زمین برسد، شمع حاصل دارای قطر ۶۰ تا ۸۰ سانتی متر می باشد.

د) تراکم توسط شمع کوبی: یکی از روش های متراکم سازی خاک در عمق، استفاده از شمع های پیش ساخته و مناسب جهت کوبش است، این شمع ها با اعمال ضربات و تحمیل جابه جایی خاک استفاده می شوند. این روش در خاک های دانه ای شل مثل ماسه سست و لای کاربرد دارد. در این روش در اثر ضربات وارده بر شمع و انتقال آن به ذرات خاک، خاک متراکم می شود. بدلیل اینکه این نوع بارگذاری دینامیکی است، در خاک های دانه ای کاربرد فراوانی دارد؛ لازم به ذکر است که، به دلیل اینکه خاک در این روش دستخورده می شود، پس برای خاک های ریزدانه کاربرد ندارد.

۵) انفجار

تراکم در عمق توسط انفجار در بسیاری از حالت ها می تواند وسیله ای سریع و کم هزینه برای بهسازی خاک باشد، مراحل کلی این روش به صورت زیر است:

الف) نصب لوله با حفاری جت آب و یا گمانه زنی جهت جایگذاری مواد منفجره

ب) جایگذاری مواد منفجره در عمق مورد نظر

ج) پر کردن گمانه همراه با بیرون کشیدن لوله

د) منفجر کردن مواد طبق الگویی از پیش تعیین شده

نکته قابل توجه این است که؛ حداکثر عمقی که انفجار می تواند تثبیت کند، عدد خاصی نیست، ولیکن تا عمق ۲۰ متر با این روش پیشنهاد می شود.

روش انفجار در آب در خاک های سست و اشباع موفقیت آمیز و اقتصادی می باشد، برای عملکرد بهتر در روش انفجار، موارد زیر پیشنهاد می شود:

- ۱- مواد منفجره استاندارد بسته به قدرت انفجار و شدت تراکم، از ۱ کیلوگرم تا ۱۲ کیلوگرم
- ۲- عمق دفع مواد منفجره باید بیش از یک چهارم عمق لایه ای که می بایست تثبیت شود، تا سه چهارم عمق لایه ای که می بایست تثبیت شود، باشد.
- ۳- فاصله محل های گمانه های انفجاری در پلان از ۵ تا ۱۵ متر باشد.
- ۴- نشست سطح زمین اصولاً بین ۲٪ تا ۱۰٪ ارتفاع لایه خواهد بود.

۶) پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری

در این روش فشاری بزرگتر و بیشتر از فشاری که فونداسیون سازه قرار است بعداً به خاک وارد کند، به بستر وارد می کند پس نتیجه ی آن، پیش فشردگی بستر قبل از عملیات اجرایی است. پیش بارگذاری به کمک خاکریزی، ایجاد مخازن آب، ایجاد استخر های آب با پوشش نشست ناپذیر و پایین بردن سطح آب زیر زمینی و مکش انجام می شود. از اهداف عمده این روش این است که:

- ۱- اعمال بارهای موقت برای حذف و یا کاهش نشست هایی که احتمالاً بعد از ساخت بنا قرار است اتفاق بیفتند.
 - ۲- بهبود مقاومت برشی خاک بستر، با افزایش وزن مخصوص، کاهش تخلخل و کاهش درصد رطوبت آن
 - ۳- افزایش سختی خاک و کم کردن رطوبت موجود در خاک
 - ۴- پیش بارگذاری در خاک های لای دار و رس تحکیم عادی یافته از تاثیر بیشتری برخوردار می باشد، در شرایطی که خاک اشباع باشد؛ استفاده از زهکش های قائم همراه با پیش بارگذاری، سبب همزمانی تحکیم قائم و شعاعی شده و حدود ۱۰ برابر زمان تحکیم را کاهش می دهد.
- در استفاده از روش پیش بارگذاری میدان پیش بار بایستی بر اساس مقدار باری باشد که سازه اصلی قرار است به زمین وارد کند. از مزایای پیش بارگذاری علاوه بر کاهش نشست، عدم ایجاد سرو صدا می باشد که در مناطق شهری یا در جاهایی که محدودیت همسایگی مطرح است، این روش مناسب است. از معایب پیش بارگذاری می توان به طولانی شدن زمان بهسازی، غیر انتفاعی شدن خاکبرداری و حمل مصالح به جای دیگر اشاره کرد.

۷) تزریق^۴

در روش تزریق، کار با ایجاد چاله ها و گمانه هایی به فواصل معین، توسط دستگاه حفار و پر کردن این چاه ها با مواد سیال سمندی و نفوذ این مواد با سیستم های مختلف جذبی و ایجاد فشار در زمین مورد نظر می باشد، این روش پر هزینه بوده و در حالت های خاص مثل تثبیت بستر خاک برای بهسازی خاک در موارد ویژه به کار می رود. کاربرد های روش تزریق عبارتند از:

الف) پر کردن فضاهای خالی جهت جلوگیری از نشست های زیاد

ب) کنترل نشست و کاهش قابلیت نفوذپذیری خاک توسط ایجاد پرده های آب بند^۵

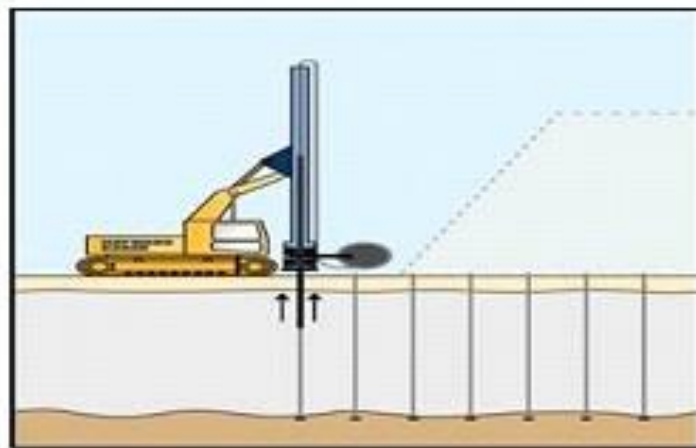
^۴ (عاطفی فرد و همکاران، ۱۳۹۴)

^۵ (عاطفی فرد و همکاران، ۱۳۹۴)

- (ج) مقاوم سازی خاک، زیرسازیهی موجود جهت جلوگیری از جابه جایی ساختمان به دلیل خاکبرداری در همسایگی
(د) کنترل جابه جایی زمین در حین عملیات احداث تونل
(ه) مقاوم سازی خاک برای کاهش سیستم های محافظتی جانبی
(و) مقاوم سازی خاک برای افزایش مقاومت شمع ها
(ز) تثبیت ماسه های شل، برای جلوگیری از واگرایی
(ح) کنترل واگرایی و ناپایداری در خاک های متعدد
(ط) تثبیت شیروانی ها

(ی) کنترل تغییر حجم خاک های انبساطی به کمک تزریق دوغاب آهک و سیمان
(ک) موادی که برای تزریق به کار می روند، شامل دوغاب سیمان، دوغاب آهک، بنتونیت، مواد سمنتی جدید و رزین ها می باشند.

انتخاب نوع ماده تزریقی، غلظت آن و فشار تزریق بستگی به اقتصاد پروژه و نوع خاک، روش اجرایی تزریق، عمق عملیاتی و شعاع تاثیر آن دارد. به طور کلی برای تزریق در شن و ماسه از دوغاب سیمان پرتلند، کانی رس و انواع رزین ها متداول است. (شکل ۴)



شکل ۴: تزریق

۸) استفاده از مواد افزودنی

تثبیت با افزودنی ها یکی از قدیمی ترین روش های بهسازی خاک است. قرن هاست که تثبیت با آهک و سیمان همراه با واکنش های شیمیایی و سیمانی شدن همراه است. استفاده از خاک سیمان دار در سازه های هیدرولیکی، روسازی و راهسازی راه ها، محوطه های وسیع و پارکینگ ها، ساختن سدها با سبب تند تر و وسعت عملیات کمتر، رواج بسیاری یافته است. بهترین هدف استفاده از افزودنی های شیمیایی، کنترل و بهبود پایداری حجمی خاک و نیز مقاومت تعویض خواص تنش- کرنش آن می باشد. مواد آلی معروف عملیات تثبیت عبارت است از: رزین ها، پلی استرها، مواد غیرآلی (سیمان و آهک) معمولاً برای تثبیت خاک های ریزدانه با پلاستیسیته و قابلیت تورم بالا، ۳٪ تا ۶٪ وزن خشک آن، به خاک آهک افزوده می شود و برای تثبیت خاک های ماسه ای و خاک های با پلاستیسیته ی کم، ۳٪ تا ۸٪ وزن خشک آن، سیمان به خاک افزوده می شود. اگر تثبیت در عمق نیاز باشد، ضمن حفاری با دستگاه دورانی، افزودنی ها به آن اضافه شده (مثل آهک و



سیمان) و سپس خاکریزی انجام می شود. در این روش در واقع ستون های خاکی آهکی در خاک ایجاد شده که ظرفیت مقاومتی و باربری خاک را افزایش داده و تغییر شکل را کاهش می دهد.

۹) سیستم های حرارتی

روش های حرارتی، اعم از گرمایی و سرمایایی می تواند برای تثبیت خاک به کار رود، مثلا اگر خاک های ریزدانه تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شوند، خشک شده و مقاومتشان افزایش می یابد، به شرط آن که از افزایش رطوبت بعدی جلوگیری شود. حرارت دادن این خاک ها از ۶۰۰۰ درجه سانتی گراد تا ۱۰۰۰۰ درجه سانتی گراد، باعث بهبود دائمی خواص خاک می شود، ویژگی هایی از جمله کاهش حساسیت نسبت به آب، کاهش تورم و تراکم پذیری با افزایش مقاومت خاک، خواصی هستند که با فرار گرفتن خاک در این درجه حرارت بوجود می آیند. از مهمترین محدودیت ها، نیاز به انرژی زیاد برای ایجاد حرارت می باشد. دو روش کلی برای تامین انرژی حرارتی استفاده می شود:

روش اول- این روش که روش احتراقی نیز نام دارد، به صورتی است که گمانه ای در داخل زمین زده شده و یک مشعل در بالای گمانه قرار داده می شود. هوای فشرده و مواد سوختنی به داخل گمانه تزریق شده، سپس در یک لحظه چند گمانه که به یک دستگاه مرکزی وصل شده اند، آتش زده می شوند.

روش دوم- این روش ایجاد حرارت توسط جریان الکتریسیته می باشد. در روش دوم گرم کننده های الکتریکی داخل گمانه قرار داده شده و حرارت ۵۰۰ درجه سانتی گراد تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد را ایجاد می کنند. خاک مجاور گمانه در اثر حرارت بالا، به صورت یک توده سفت و سخت و کلوخه ای در می آید.

در روش های یخ زدگی و افت دما، برای حفاری و پایداری موقت دیواره های حفاری، جلوگیری از جریان آب زیر زمینی و علاوه بر آن تثبیت خاک های نرم اطراف تونل ها و معادن کاربرد دارد. لازم به ذکر است که این روش، روشی کاملا موقت می باشد.

۱۰) تسلیح خاک (مسلح کردن خاک)

یکی از روش های بهسازی و مقاوم سازی زمین که امروزه کاربرد زیادی دارد، مسلح کردن خاک می باشد. این روش مشابه بتن مسلح می باشد که برای افزایش مقاومت کشش بتن از آرماتور استفاده می شود. خاک را به روش های مختلف می توان مسلح نمود، همچنین تسلیح خاک را می توان به صورت قائم، افقی و یا مایل انجام داد. تسلیح خاک توسط شمع ها و سپرها، ستون های سنگی و ماسه ای، ریز شمع ها، میل مهارها و خاک مسلح (ژئوسنتتیک ها) انجام می شود.

الف) شمع ها و سپرها:

شمع ها مانند ستون های داخلی خاک می باشند، که بار سازه ای را گرفته و به لایه های پایین خاک انتقال می دهند. انتقال بار توسط مقاومت جانبی و انتهای شمع ها صورت می گیرد. در جاهایی که خاک های سطحی، مقاومت مناسب و کافی نداشته باشند، یا بارهای وارده خیلی زیاد باشند، از شمع ها استفاده می شود. شمع ها می توانند پیش ساخته و یا در جا باشند. در روش پیش ساخته، شمع ها در کارگاه و روی زمین ساخته شده و سپس توسط شمع کوب داخل زمین کوبیده می شوند. در روش در جا، ابتدا چاه ها حفاری شده و سپس قفسه آرماتور داخل آن قرار می گیرد و از پایین به بالا، بتن ریزی می شود.



(ب) ستون های سنگی و ماسه ای:

این روش شامل ستون هایی به قطر ۰,۶ متر تا ۱,۰ متر از شن یا سنگ شکسته متراکم شده در خاک های نرم می باشد که نهایتا یک سیستم حفاظتی را در بال های فوقانی خاک ایجاد می کند، این سیستم حفاظتی برش های افقی یا مایل را تحمل کرده و نیز به عنوان زهکش قائم عمل می کند. فاصله ی چاه ها بین ۱,۵ متر تا ۳,۵ متر است. در روی سطح زمین برای کار کردن بهتر این ستون ها، یک لایه به ضخامت ۳۰,۰ سانتی متر از ماسه یا شن متراکم، ایجاد کرده و سپس سازه بر روی آن احداث می شود. این لایه علاوه بر ایجاد زهکش، باعث توزیع تنش بهتر، بر روی ستون ها می شود.

(ج) ریز شمع ها:

شمع های کوچکی با قطر ۷۵ میلی متر تا ۲۵۰ میلی متر و معمولا از جنس بتن هستند. ریز شمع ها با روش درجا ایجاد شده و در مرکز آن عموما دارای میله های مسلح کننده می باشند. می توان آن ها را به صورت قائم یا مایل به صورت گروهی ایجاد نمود؛ برای محافظت از سازه های فوقانی و تثبیت، جلوگیری از جابه جایی و ناپایداری خاک استفاده شود. برای اجرای ریز شمع ها، ابتدا دستگاه حفاری دورانی، گمانه ای را در زمین احداث کرده و سپس لوله ای در داخل گمانه قرار گرفته و میله مسلح کننده در وسط لوله قرار داده شود. سپس بتن با درجه کارایی بالا، روانی مناسب و اسلالمپ بالا داخل لوله ریخته شده و به آرامی لوله به سمت بالا کشیده می شود.

(د) میل مهارها:

میل مهارها که از بسیاری جهات شبیه ریز شمع ها می باشند، در تثبیت شیروانی ها و محافظت جداره ترانشه و نیز تثبیت سطوح حفاری شده در سنگ، مورد استفاده قرار می گیرد. میل مهارها معمولا از جنس فولاد بوده که داخل سنگ یا خاک کوبیده شده و یا داخل چاله هایی پیش حفاری شده قرار داده می شوند؛ سپس اطراف آن در اکثر موارد بتن با فشار تزریق می شود، طول آن ها معمولا نصف ارتفاع ترانشه محافظت شده، می باشد.

(ه) خاک مسلح:

خاک مسلح شامل دو قسمت می باشد، که یکی استفاده از تسمه های فولادی و دیگری ژئوسنتتیک ها می باشند. تسمه های فولادی: خاک مسلح شامل پوسته های بتنی، تسمه های فلزی و خود خاک می باشند. در واقع در این روش برای جلوگیری از جابه جایی خاک از خود خاک و اصطکاک خاک با تسمه ها، استفاده می شود. پوسته ها ۱,۵*۱,۵ متر و با ضخامت ۱۸ سانتی متر تا ۲۵ سانتی متر و تسمه های معمولی ۰,۷ تا ۰,۸ ارتفاع کل دیوار، طول دارند. عرض آنها حدود ۵۰ میلی متر و ضخامت آن ها ۵ میلی متر است و بهتر است از تسمه های آج دار استفاده شود. خاک مورد استفاده، اصولا خاک دانه ای است، تا اصطکاک بین تسمه ها و خاک بهتر انجام شود.

ژئوسنتتیک ها: خانواده گسترده ای از مصالح که با هدف بهبود ویژگی های مکانیکی و فیزیکی خاک به کار می روند. استاندارد ASTM1996 مربوط به محصولات مسلح شده با مواد پلیمری است. انواع مختلف مشابه این مواد هزاران سال است که مورد استفاده قرار می گیرد. آن ها در زمان رومیان باستان برای کارهای متعددی مورد استفاده واقع می شدند. این ژئوتکستایل های ابتدایی از فیبرهای طبیعی، به صورت پارچه ساخته شده بودند وقتی که بنا یا بستر جاده روی یک خاک با ظرفیت باربری کم و به نوعی ناپایدار قرار داشت با خاک مخلوط شده و برای بالا بردن کیفیت آن خاک مورد استفاده واقع می شدند. شاید ژئوسنتتیک های امروزی شباهت های کمی با پیشینیان خود داشته باشند ولی همگی از یک اصل پیروی می کنند. توسعه ی

ژئوسنتتیک ها عمدتاً به دلیل محدودیت هایی که در استفاده از مواد سازنده ی آن ها وجود داشته است کند بوده است. در پی پیشرفت های اخیر در صنعت پلیمر، توسعه ی ژئوسنتتیک ها نیز روند رشد بسیار سریعتری به خود گرفت. تشکیل انجمن بین المللی ژئوسنتتیک (IGS) در سال ۱۹۸۳ در پاریس را، می توان بارزترین نشان پیشرفت و پذیرش این محصول از سوی صنایع مختلف دانست. اولین بار در اواخر دهه ۴۰ و اوایل دهه ۵۰ میلادی در آمریکا از ژئوسنتتیکها استفاده نمودند و در دهه ۷۰ در اروپا رواج فراوان یافت. اخیراً در کشورهای آسیایی استفاده از این مصالح رایج شده است. اولین استفاده از ژئوسنتتیک در ساواناریوسایت در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۲۶ میلادی انجام شد^۶.

شناخت مواد و مصالح خانواده ژئوسنتتیک ها می تواند کمک فراوانی برای انتخاب بهترین گزینه در هر یک از پروژه های عمرانی باشد.

ژئوسنتتیک ها: خانواده گسترده ای از مصالح که حد اقل یکی از عملکردهای زیر را دارد:

(۱) جداسازی

(۲) تسلیح

(۳) فیلتراسیون

(۴) زهکشی

(۵) محدودسازی با ایجاد مرز نفوذناپذیر

ژئوتکستایل ها: بزرگترین گروه ژئوسنتتیک ها می باشند. ژئوتکستایل ها در دو نوع بافته شده (Woven) (منسوج) و بافته نشده (NonWoven) (غیرمنسوج) وجود دارند.

ژئوگریدها: از این نوع مواد پلیمری برای مسلح کردن خاک، جداسازی، فیلتراسیون و به طور کلی تریبرای بهسازی خاک به کار می روند. سه روش عمده برای تولید ژئوگریدها وجود دارد:

(۱) ژئوگریدهای بافته شده

(۲) ژئوگریدهای تزریقی

(۳) ژئوگریدهای اتصالی

ژئونت ها: مصالح توری شکلی هستند و از دو سری نخ که لبه های یکدیگر را می پوشانند، ساخته شده اند؛ در زاویه ای پیوسته از یکدیگر عبور می کنند تا منافذی متوالی و منظم ایجاد کنند. این مصالح با سطح مقاومت فشاری کم هستند و برای زهکشی و جداسازی لایه ها به کار می روند.

ژئوسل ها: المان های سه بعدی هستند که از مواد پلیمری و پلی اتیلنی همانند کندوی زنبورعسل ساخته شده اند.

ژئوممبرین ها: ژئوممبرین ها صفحاتی نفوذناپذیر هستند که از پلی اتیلن سنگین و برخی مواد افزودنی ساخته شده اند و

در برابر اشعه ی ماوراءبنفش (UV) خورشید و عوامل مختلف اکسید کننده محیط آب و خاک مقاوم است.

ژئوکامپوزیت ها: به هر ژئوسنتتیکی که از ترکیب چند ماده پلیمری با یکدیگر ساخته شده و چند ویژگی مختلف را با هم

داشته باشند، ژئوکامپوزیت می گویند.

^۶ (عاطفی فرد و همکاران، ۱۳۹۴)



ژئوسیستم ها: از قرار گرفتن اعضاء ژئوسنتتیک ها به صورت سه بعدی و پر کردن آن ها از مواد مختلف بوجود می آیند. ژئو سیستم ها شامل سه دسته می شوند:

الف) ژئوتیوب ها

ب) ژئوکانتینرها

ج) ژئوبگ ها

یافته ها

شناخت انواع خاک های مشکل ساز و راه های مناسب برای بهسازی و تثبیت هرکدام از اهمیت ویژه ای برخوردار است.
(جدول ۱)

ویژگی خاص	نوع خاک مشکل ساز
ضایعات ساختمانی، پسماند های صنعتی و معدنی و زباله های شهری	خاک های ریزدانه (خاک دستی)
دارای مقدار زیادی کانی مونت موریلونیت می باشدو با جذب آب، پتانسیل تورمی و انبساطی بالایی می یابد	خاک های انبساطی (منبسط شونده)
زمانی که در شرایط بارگذاری همراه با غرقاب شدن و یا ارتعاش قرار می گیرند نشست زیادی دارند	خاک های رمننده (فروریزی)
مقاومت کم و ناپایداری حجمی بالا	خاک های نرم و شل (آبگونه شونده)

جدول ۱: انواع خاک مشکل آفرین، ویژگی و خواص هر یک

شناخت روش های مرسوم و اجرایی بهسازی و تثبیت خاک ها، کمک شایانی به انتخاب بهترین روش در هر یک از پروژه های عمرانی وابسته به شرایط خاص هر کدام دارد. (جدول ۲)

نام روش	مشخصه	روش انجام	زیر مجموعه ها
حفاری و برداشت، جابه جایی و جایگزینی	تعویض خاک بستر	انتقال خاک مناسب از قرضه	-
تراکم سطحی	کاهش تخلخل، افزایش وزن مخصوص	تراکم خاک در درصد رطوبت بهینه	-
تراکم دینامیکی	ایجاد ضربه جهت افزایش تراکم خاک	استفاده از دستگاه سقوط وزنه	-
تراکم ویبره ای در عمق	استفاده از فشار ولرزش	-	میله های ارتعاشی تراکم ویبره ای شناور تراکم با ارتعاش و هوای فشرده تراکم توسط شمع کوبی
انفجار	استفاده از مواد منفجره	انتقال مواد منفجره کافی در عمق موثر با روش صحیح	-
پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری	پیش بارگذاری به کمک خاکریزی	اعمال بارهای موقت	-
تزریق	تزریق مواد مناسب در لایه های مختلف خاک	حفر چاله ها و گمانه ها	-
استفاده از مواد افزودنی	تثبیت با افزودنی	اضافه کردن مواد مناسب به خاک	-
سیستم های حرارتی	انجماد و یا تبخیر آب منفذی	گرمایش و سرمایش خاک	-
تسلیح خاک (مسلح کردن خاک)	اضافه کردن مواد مناسب جهت تسلیح خاک	شمع ها و سپرها ستون های سنگی و ماسه ای ریز شمع ها میل مهارها خاک مسلح	-

جدول ۲: شناخت روش های مرسوم و اجرایی بهسازی و تثبیت خاک ها

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله سعی شده تا یک منبع مناسب جهت بهسازی و تثبیت خاک های مشکل دار مختلف، مطرح گردد؛ از آنجا که روش ها و راهکار های مختلف همواره با پیشرفت علم و تکنولوژی قابل پیشرفت هستند، لذا بررسی دقیق روش های جدید دیگر، به همراه مشکلات جدی دیگر خاک ها، از جمله آلودگی های شیمیایی و نفتی و روش های برطرف کردن و تثبیت آن ها می تواند موضوعات و عناوین جذاب و کاربردی برای مطالعات بعدی سایر پژوهشگران در این حوزه باشد.



منابع

عاطفی فرد، مسعود و سعید بهنیا، بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی و تراکم پذیری خاکها در اثر آلودگی های نفتی، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، ۱۳۹۳

عاطفی فرد، مسعود؛ ابوالفضل سن زاد؛ مهدی خیری و سعید بهنیا، مروری بر روشهای تزریق دوغاب سیمانی و گروت در بستر، کنفرانس ملی مهندسی عمران و محیط زیست، ایران، قزوین، معاونت پژوهشی دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ۱۳۹۴

عاطفی فرد، مسعود و سعید بهنیا، مقایسه ای اجمالی بین نتایج استفاده از پتوی رسی نفوذناپذیر و پرده تزریق در آب بندی سدها، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، ایران، قم، دانشگاه صنعتی قم، ۱۳۹۴

غفارپور جهرمی، سعید و فاطمه بداغی، ارزیابی فرآیند تثبیت خاک رس و خاکهای مسئله دار با مصالح سنتی، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، ایران، قم، دانشگاه صنعتی قم، ۱۳۹۴

عاطفی فرد، مسعود؛ مصطفی گلشن؛ مجید حسینیان بادی و سعید بهنیا، شناخت خانواده ژئوسنتتیک ها جهت استفاده در اصلاح خواص و بهبود پارامترهای مختلف خاک ، سومین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۴

جعفرزاده، فردین و مهدی جلیل زاده آذر، مدلسازی تراکم دینامیکی به روش فیزیکی و بررسی پارامترهای موثر بر آن، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، تهران، دانشگاه شریف، عمران، ۱۳۸۳

Hadi Bahadori & Hooman Motamedi, 1390 , AN INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF GEOGRID AND GEOGRID- GEOMEMBRANE GEOCOMPOSITE ON THE REDUCTION OF SETTLEMENT DUE TO LIQUEFACTION

Sridharan, A., Rao, V.G., (1979). "Shear strength behavior of saturated clays and the role of the effective stress concept,". *Geotechnique* 2, 177–193.