بررسی روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا

مقاله علمی - پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
فاطمه نجفی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.geotec@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳- پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵
صفحه ۵۶-۴۱

چکیده

روانگرایی یکی از پدیده‌های مخرب ژئوتکنیکی خاک می‌باشد. این پدیده در خاک‌های ماسه‌ای اشباع که دارای دانه بندی سست بوده و تحت بار استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند رخ می‌دهد. زمانی که فشار آب حفره‌ای خاک افزایش پیدا می‌کند، تنش موثر خاک صفر می‌شود و تنش کل برابر با فشار آب حفره‌ای می‌شود. در این صورت خاک هیچ مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد و ماسه مانند مایع به حالت روان در می‌آید، که باعث خسارت به زمین‌های دارای پتاسیل روانگرایی می‌شود. در اینصورت برای بهبود پارامتر های مقاومتی خاک نیاز به بهسازی در این گونه خاک‌ها می‌باشد. هدف از این مقاله بررسی روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا، روش استفاده از آنها و خاک‌های مناسب برای هر روش می‌باشد. روش مورد استفاده در این پژوهش بررسی پژوهش‌های موجود در روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا می باشد. بر اساس نتایج این تحقیق، انتخاب روش‌های مناسب برای بهسازی خاک‌های روانگرا شامل جایگزینی خاک، آب‌زدایی، مقاوم‌سازی ساختگاه، تزریق، حرارتی، ژئوسنتتیک‌ها، انفجار و تراکم با میله‌های ارتعاشی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های روانگرا، بهسازی، خاک ماسه‌ای

۱-مقدمه

روانگرایی یکی از مهم ترین عناوین مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای می‌باشد. هنگامی که دو زلزله در آلاسکا ۱۹٦٤ و نیگاتا ژاپن ۱۹٦٤ رخ داد، در هر دو زلزله نمونه‌های جالبی از خرابی ناشی از زلزله مانند گسیختگی شیب‌ها، گسیختگی شالوده ساختمان‌ها، پل‌ها و شناوری سازه‌های مدفون بر اثر روان شدن خاک بستر اتفاق افتاد (میرحسینی،۱۳۷٦). موارد متعددی از پدیده روانگرایی در زلزله رودبار- منجیل که در خرداد سال ۱۳٦۹ در ایران به‌وقوع پیوست مشاهده گردید که جزئیات آن‌ها و خصوصیات مناطق مربوطه توسط محققین مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است (میرحسینی،۱۳۷۲). هیزن برای اولین بار لغت روانگرایی را در سال ۱۹۲۰ به منظور توضیح شکست سد کالاوراس کالیفرنیا به کار برد. پدیده روانگرایی از آن زمان به بعد توسط بسیاری از محققان مهندسی ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. هر چند معرفی این عبارت توسط هیزن برای توضیح شکست یک سد خاکی تحت بارهای استاتیکی به‌کار برده شده، اما بعدها وقوع این پدیده برای بارهای دینامیکی نیز مورد استفاده قرار گرفت. وقوع پدیده روانگرایی تحت بارهای غیر لرزه‌ای به وسیله تعدادی از محققان مثل قیاسی وهمکاران (1400,2013,2018, 2019, 1397, 2020, 2021,) کاسترو (۱۹٦۹)، کریمر و سید (۱۹۸۸) و کاساگرانده (۱۹۳٦)، اولسن و استارک (۲۰۰۰) پورکرامت و همکاران و غفاری و همکاران (۲۰۲۱) مورد مطالعه قرار گرفته است. با این وجود به‌دلیل وقوع خرابی‌های بسیار ناشی از این پدیده بر اثر بارهای لرزه‌ای، این موضوع توجه خیلی از محققان مهندسی زلزله را به خود جلب کرده است (بازیار، ۱۳۸٦). هدف از انجام این تحقیق بررسی انواع روش‌های مختلف بهسازی، انتخاب روش مناسب بر حسب ساختگاه مورد نظر و بحث هزینه و مطالعات اقتصادی پروژه

می‌باشد. استعداد روانگرایی خاک به حالت اولیه خاک (یعنی به خصوصیات تنش و دانسیته آن در زمان وقوع زلزله) نیز بستگی دارد. به‌دلیل اینکه تمایل برای ایجاد اضافه فشار حفره‌ای در یک خاک، شدیداً تحت تأثیر شرایط دانسیته و تنش اولیه می باشد، لذا استعداد روانگرایی نیز شدیداً به حالت اولیه خاک بستگی دارد. انواع شرایط خاک‌هایی که قابلیت روانگرا شدن را دارند به صورت زیر است:

-قابلیت روانگرایی توده‌های قدیمی‌تر خاک عموماً کمتر از توده‌های جوان‌تر می‌باشد.

-روانگرایی تنها در خاک‌های اشباع رخ می دهد، لذا عمق تراز آب زیرزمینی (چه آزاد و چه تحت فشار) بر استعداد روانگرایی اثر می‌گذارد (عسگری، ع.، علیایی، م. و باقری، م.، ۲۰۱۳).

-روانگرایی توده‌های شل مانند توده‌هایی که بدون تراکم ایجاد شده‌اند، بسیار محتمل است.

-سیلت‌های درشت دانه که غیر چسبنده و غیر پلاستیک هستند، شدیداً مستعد روانگرایی می‌باشند.

-شکل ذرات نیز بر استعداد روانگرایی اثر می‌گذارد، خاک‌های با ذرات کروی ساده‌تر از خاک‌های با ذرات گوشه‌دار متراکم می‌شوند، لذا استعداد روانگرایی آن‌ها بیشتر است (آدلیر، کا و همکاران، ۲۰۱۳).

بر اساس فاکتورهای موثر فوق روش عمومی زیر جهت ارزیابی قابلیت روانگرایی ماسه‌ها پیشنهاد شده است:

الف) بعد از تعیین شرایط خاک و زلزله طرح، تغییرات زمانی تنش‌های برشی ایجاد شده در اثر زلزله در اعماق مختلف توده ماسه را مشخص نمایید.

ب)با معادل گیری مناسبی از تنش‌های ایجاد شده در سیکل‌های مختلف زلزله، تغییرات زمانی تنش‌ها را به تعدادی سیکل معادل با تنش‌های یکنواخت تبدیل نموده و مقادیر تنش‌های یکنواخت معادل را به صورت تابعی از عمق مطابق شکل رسم نمایید.به این ترتیب شدت حرکات زمین، مدت حرکات و بالاخره تغییرات تنش برشی در توده ماسه مورد نظر قرار گرفته است.

ج)با کمک اطلاعات صحرایی موجود و یا نتایج آزمایشگاهی که در فشارهای محدود کننده مختلف روی نمونه‌های خاک به عمل آمده، تنش‌های برش سیکلی ایجاد شده در اعماق مختلف که اعمال آن‌ها به تعداد سیکل معادل قید شده در مرحله ۲ موجب روان شدن ماسه خواهد شد را تعیین نمایید. در این رابطه می‌توان از آزمایش فشار سه محوری سیکلی و یا برش ساده سیکلی استفاده نمود.

د)از مقایسه برش ایجاد شده در اثر زلزله با تنش‌هایی که موجب روان شدن ماسه می‌گردند معین نمایید که آیا در هیچ قسمتی از عمق توده ماسه روانگرایی رخ خواهد داد یا خیر. به عبارت دیگر آیا تنش‌های زلزله از تنش‌های مولد روانگرایی تجاوز می‌نمایند یاخیر (میرحسینی، ۱۳۷۲).

۲- محدوده روان شدن اولیه در محل

برای تعیین محدوده‌ای از خاک که در اثر زلزله ممکن است به حالت روان درآید، پنج مرحله کلی زیر وجود دارد.

-تعیین زلزله مبنای طرح

-تعیین تاریخچه زمانی تنش‌های به وجود آمده توسط زلزله در عمق‌های مختلف لایه ماسه.

-تبدیل تاریخچه زمانی تنش برشی به N تعداد سیکل‌های تنش معادل، این رابطه را می‌توان بر حسب عمق نشان داد.

-با استفاده از نتایج آزمایش‌های، مقدار تنش متناوب را که باعث روان شدن اولیه در صحرا در N سیکل (تعیین شده در مرحله ۳) در اعماق مختلف می‌شود، تعیین کنید.

-منطقه‌ای که در آن میزان تنش برشی متناوب لازم جهت ایجاد روانی اولیه (مرحله٤) مساوی یا کم‌تر از تنش‌های برشی متناوب معادل ناشی از زلزله است. محدوده روان شدن احتمالی است (داس، ۱۳۹۰).

۳-ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک

در ارزیابی روانگرایی معمولاً پتانسیل وقوع و آثار مرتبط مورد ملاحظه قرار می‌گیرد، که شامل عامل‌های زیر می‌باشد: معیارهای زمین شناسی، وضعیت ساختگاه، نوع خاک و تخلخل طبیعی آن، درصد ریزدانه موجود در خاک، تاریخچه تنش، چگونگی اشباع بودن، میزان تنش‌های سربار، وضعیت بارگذاری، فشار محدود کننده، تعداد سیکل‌های وارده ناشی از بار دینامیکی، تراکم نسبی و بزرگی زلزله (میرحسینی و عارف پور، ۱۳۷۸).

مخاطرات روانگرایی

وقوع روانگرایی و ناپایداری‌های مربوطه برای پایه‌های پل‌ها، دیوارهای ساحلی و تاسیسات اسکله‌ها نیز به سه صورت موجب خسارت می‌شود:

-روان شدن خاک جلوی دیوار، کاهش و یا فقدان فشار مقاوم

-روان شدن خاک پشت دیوار، افزایش فشار فعال (وقوع حالت‌های ۱ یا ۲ و یا هر دو، تسریع در واژگونی را به‌دنبال دارد).

-روان شدن خاک زیر دیوار که منجر به کاهش و یا فقدان توان باربری-افزایش نشست شده و در نهایت موجبات لغزش و واژگونی فراهم می‌گردد (میرحسینی، ۱۳۷٦).

رویکردهای کاهش خطرات روانگرایی

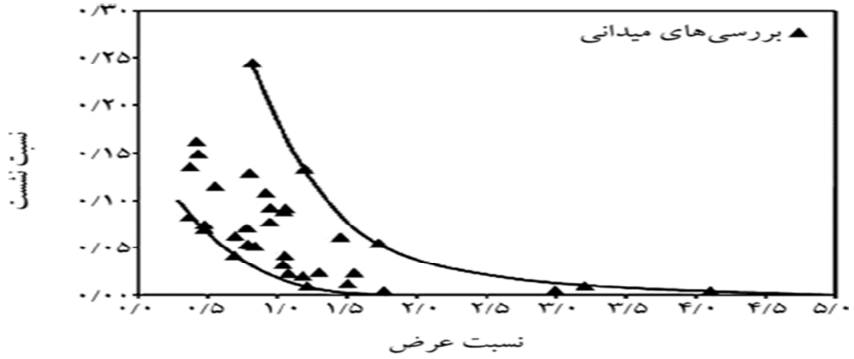
-دوری جستن از خاک‌های مستعد روانگرایی. گزینه اول، دوری جستن از ساخت و ساز بر روی خاک‌های مستعد روانگرایی است. ساختگاه‌هایی را که دارای نهشته‌های ضخیم خاک با ضریب اطمینان پایین در برابر روانگرایی باشند، می‌توان پارک یا فضای باز در نظر گرفت.

-برداشتن یا بهسازی خاک. برای مثال ضریب اطمینان در برابر روانگرایی را می‌توان با تراکم خاک و یا بهبود ویژگی‌های زهکشی خاک افزایش داد.

-ساختن سازه‌های مقاوم در برابر روانگرایی. به دلایل گوناگونی ممکن است لازم باشد تا یک سازه بر روی خاک‌های مستعد روانگرایی ساخته شود. برای مثال ممکن است زمین مناسب در دسترس نباشد. در این صورت ممکن است بتوان با استفاده از سیستم شالوده‌های گسترده یا شالوده‌های عمیق سازه را در برابر روانگرایی مقاوم کرد (آدلیر، کا و همکاران، ۲۰۱۳).

مشاهدات صحرایی

محققان زیادی پس از زلزله‌های مخرب، با حضور در محل حادثه، به جمع‌آوری اطلاعاتی نظیر مقادیر نشست‌ها با توجه به ابعاد سازه، مشخصات خاک منطقه مورد بررسی و... پرداختند و نمودارهایی برای ارزیابی رفتار پی‌ها ارایه داده‌اند. یوشیمی و توکیماتس نشست ۳۵ ساختمان بتن مسلح را در زلزله سال ۱۹٦٤ نیگاتای ژاپن بررسی کردند، آن‌ها مقادیر نشست و عرض پی را به مقدار ضخامت ماسه روانگرا شده نرمالایز کردند. در شکل ۱ نشست سازه در زلزله ۱۹٦٤ نیگاتای ژاپن نشان داده شده‌است (مرادی و جعفریان، ۱۳۹٤).



شکل۱. نشست سازه در زلزله ۱۹٦٤ نیگاتای ژاپن (یوشیمی، وای و توکیماتسو، کا.، ۱۹۹۷)

آزمایش SPT

به دلیل مشکلات و هزینه‌های بالای تهیه نمونه‌های دست نخورده و با کیفیت بالا و نیز با توجه به اینکه حضور روش‌های ساده‌ی مبتنی بر (SPT,CPT,BPT) و آزمایش سرعت موج برشی، مهندسین ژئوتکنیک عموماً این آزمایش‌ها را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی ترجیح می‌دهند. یکی از روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی مبتنی بر آزمایش SPT است. که در آن از شرایط مرزی شرایطی که منطقه روانگرا را از منطقه غیر روانگرا جدا می‌کند استفاده می‌شود (شوش پاشا و همکاران، ۱۳۸۷).

در جدول ۱ مقایسه مزایا و معایب آزمایش‌های مختلف برای تخمین مقاومت روانگرایی آورده شده است.

با توجه به روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا می‌توان روش‌های سنتی مقابله با روانگرایی را در خاک‌های مختلف با هم مقایسه نمود و بهترین روش را که با تمامی خاک‌ها سازگاری دارد انتخاب نمود. در جدول ۲ این روش‌های مقابله با روانگرایی نشان داده شده‌است.

شاخص‌های انتخاب گزینه روش بهسازی

کارایی روش انتخاب شده برای مورد منظور

مطلوبیت فن اجرا

موجود بودن سازوکار

هزینه پروژه

حفاظت از محیط زیست (عسگری، ع.، علیایی، م. و باقری، م.، ۲۰۱۳)

جدول۱. مقایسه مزایا و معایب آزمایش‌های مختلف در محل برای تخمین مقاومت روانگرایی (یود تی و همکاران، ۲۰۰۱).

خصوصیت	نوع خاک			
	SPT	CPT	Vs	BPT
اندازه‌گیری‌های انجام شده در سایت‌های مستعد روانگرایی	فراوان	فراوان	محدود شده	بسیار کم
نوع رفتار تنش کرنش خاک که آزمایش را تحت تاثیر قرار می‌دهد.	زهکشی جزیی، کرنش بالا	زهکشی شده، کرنش‌های بالا	کرنش‌های پایین	زهکشی جزیی
کنترل کیفیت و تکرارپذیری	نامناسب تا خوب	خیلی خوب	خوب	نامناسب
شناسایی تغییرات رسوبات خاک	نامناسب برای تشخیص لایه‌های با ضخامت سانتی‌متر ۵۰ و کمتر	خیلی خوب	مناسب	مناسب
انواع خاک‌هایی که نوع آزمایش در آن توصیه شده است.	به غیر از شن	به غیر از شن	انواع خاک	عمدتاً شن
بازیابی نمونه خاک	بله	خیر	خیر	خیر
اندازه‌گیری‌های آزمایش به عنوان شاخص یا خصوصیات مهندسی	شاخص	شاخص	مهندسی	شاخص

جدول۲. روش‌های سنتی مقابله با روانگرایی (توانایاگام، تی، کاناگالین گام، تی و شن دن تی. ۲۰۰۲)

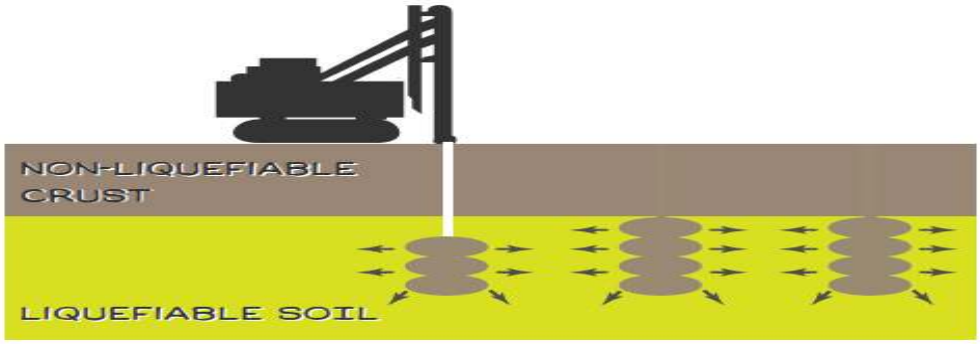
روش		**نوع خاک**			**قابلیت دسترسی (سازه‌های موجود تحت بهسازی انجام شده)**
		ماسه	**ماسه لای**	**لای**	
تحکیم	تحکیم دینامیکی	بله	*	*	خیر
	تحکیم به روش لرزه‌ای	بله	*	*	خیر
تحکیم/زهکشی/مسلح سازی	ستون‌های سنگی به روش لرزه‌ای	بله	*	*	خیر
جامد سازی	تزریق نفوذی	بله	غیر قابل اطمینان	خیر	بله
	تزریق فشاری	بله	بله	کم	بله
	اختلاط خاک	بله	بله	بله	خیر
	تزریق تحت فشار	بله	بله	بله	خیر
تزریق به روش الکترواسمز		غیر قابل اطمینان	بله	بله	بله

جدول۳. روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا در ساختگاه (دی، ۱۳۹۳)

روش	تکنیک	اصول	خاک‌های مناسب	ملاحظات
روش‌های جایگزینی خاک	برداشت و جایگزینی	مصالح ضعیف یا نامطلوب برداشته و خاک بهتر جایگزین می شود.	تمامی خاک‌ها	برای عمق‌های محدود و مناطقی که مقرون به صرفه باشد.
	جابه جایی	خاک‌های ضعیف پیش بارگذاری می‌شوند، تا تحت برش قرار گیرند و با خاکریز قوی تر جابه جا شوند.	بسیار نرم	مشکلات مرتبط با امواج گل و خاک‌های تراکم پدیر که در زیر خاکریز باقی مانده‌اند؛ به ویژگی‌های ساختگاه بسیار وابسته است.
روش‌های آب زدایی	ترانشه زنی	آب اجازه زهکشی دارد.	خاک‌های نرم، ریزدانه و خاکریزهای هیدرولیکی	عمق موثر تا ۳ متر؛ سرعت آب زدایی بستگی به نوع خاک و فاصله ترانشه‌ها دارد.
	پیش فشردگی	بارهای اعمال شده پیش از ساخت خاک را تحکیم می‌کند.	خاک‌های ریزدانه عادی تحکیم یافته، خاک‌های آلی، خاکریزها	عموما اقتصادی است؛ برای دست‌یابی به تحکیم ممکن است زمان زیادی مورد نیاز باشد؛ عمق موثر فقط با قابلیت دستیابی به تنش‌های مورد نیاز محدود می‌شود.
	پیش فشردگی با زهکش‌های قائم	مسیر زهکشی را کوتاه کرده تا تحکیم تسریع شود.	خاک‌های ریزدانه عادی تحکیم یافته، خاک‌های آلی، خاکریزها	هزینه‌ها بیشتر است؛ عمق موثر معمولاً محدود به ۳۰ متز است.
	الکترواسموزی	جریان الکتریکی موجب جریان آب به سمت کاتد می‌شود.	رس‌های لای دار و لای‌های عادی تحکیم یافته	گران است، نسبتاً سریع است، برای مناطق محدود قابل استفاده است، برای خاک‌های رسانا قابل استفاده نیست، بیشترین کاربرد را برای مناطق کوچک دارد.
روش‌های مقاوم سازی ساختگاه	تراکم دینامیکی	کوبه‌های بزرگ با وزن ۵ تا ۳۵ تن که به تکرار سقوط می‌کنند از وزنه‌های بزرگتر نیز استفاده شده است.	بهترین کاربرد را برای خاک های غیر چسبنده دارد، برای خاک‌های دارای ریزدانه نیز استفاده شود، برای خاک های چسبنده واقع شده زیر سفره آب زیرزمینی ضعیف‌ترین نتایج را دارد.	ساده و سریع است، در بالا و پایین سفره آب زیرزمینی قابل استفاده است، عمق موثر تا ۱۸ متر است، هزینه‌ها متوسط است، احتمال خسارات ناشی از ارتعاش به سازه‌های مجاور وجود دارد.
روش‌های مقاوم سازی ساختگاه	تراکم ارتعاشی	تجهیزات ارتعاشی خاک را متراکم می‌کند.	خاک‌های غیر چسبنده با کمتر از ۲۰ درصد ریزدانه	تا عمق ۳۰ متر می‌تواند موثر باشد، دانسیته و یکنواختی خوبی را می‌توان به دست آورد، فاصله شبکه چاه‌ها مهم است، نسبتا گران است.

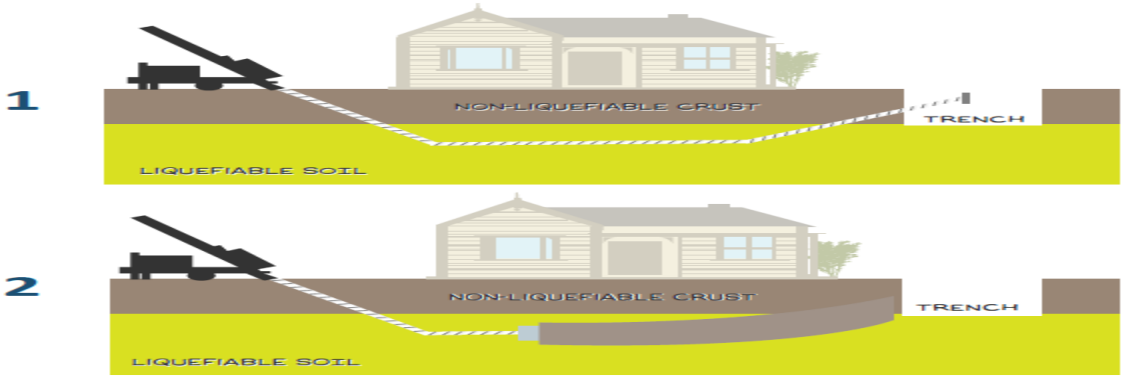
	جایگزینی ارتعاشی	از فوران و ارتعاش برای نفوذ و بیرون آوردن خاک از چاه استفاده می‌شود، سپس خاک‌های دانه‌ای متراکم در چاه‌ها ریخته می‌شود تا ستون‌های تکیه گاهی را تشکیل دهد که توسط خاک دست نخورده احاطه شده‌اند.	خاک‌های چسبنده نرم	نسبتاً گران است.
	جابجایی ارتعاشی	مشابه جایگزینی ارتعاشی است با این تفاوت که به جای آنکه خاک از چاه بیرون آورده شود، به صورت جانبی جابه‌جا می‌شود.	خاک‌های چسبنده سفت تر	نسبتاً گران است.
تزریق	تزریق دوغاب	خلل و فرج خاک با مواد سیمانی پر می‌شود تا مقاومت خاک بیشتر و نفوذپذیری آن کمتر شود.	طیف وسیعی از خاک‌های درشت دانه و ریز دانه	گران است، برای خاک های ریزدانه دوغاب گران‌تری لازم است، می‌توان از تکنیک های تزریق فشاری شکست خاک یا تراکمی استفاده کرد.
	اختلاط عمیق	از فوران یا اوگر برای اختلاط فیزیکی مواد تثبیت کننده خاک استفاده می‌شود.	طیف وسیعی از خاک های درشت دانه و ریز دانه	روش فورانی برای رس های بسیار چسبنده و برخی خاک های شنی نامناسب است، اختلاط عمیق برای خاک‌های نرم تا عمق ۵۰ متر بیشترین کاربرد را دارد.
حرارتی	گرمایش	از گرما برای افزایش مقاومت برگشت ناپذیر و کاهش آسیب ناشی از وجود آب استفاده می‌شود.	خاک‌های چسبنده	انرژی زیادی لازم است، هزینه‌های زیاد کاربرد آن را محدود می‌کند.
	انجماد	رطوبت در خاک یخ می‌زند تا ذرات را به یکدیگر نگه‌دارد و مقاومت برشی افزایش و نفوذ پذیری کاهش یابد.	تمامی خاک‌های واقع در زیر سفره آب زیر زمینی؛ خاک‌های چسبنده بالای سفره آب زیرزمینی	گران است. در گود برداری‌ها و تونل‌ها بسیار موثر است، جریان زیاد آب زیرزمینی دردسر آفرین است.
ژئوسنتیک‌ها	ژئوگریدها، ژئوتکستایل‌ها ژئونت‌ها، و ژئوممبرین‌ها	از مسائل ژئوسنتیکی برای فیلتر، کنترل فرسایش، آب بندی، زهکشی، یا تسطیح خاک استفاده می‌شود.	فیلترهای موثر برای تمامی خاک‌ها، تسلیح اغلب برای خاک‌های نرم استفاده می‌شود.	به صورت وسیعی برای گستره‌ی گوناگونی از کارها استفاده می‌شود. معمولاً همراه با روش‌های دیگری است (برای مثال، زهکش نواری همراه با سربار، یا ساخت سکوی اجرایی برای دسترسی به ساختگاه)

نمونه‌ای از روش‌های بهسازی‌خاک‌های روانگرا در شکل ۳ نشان داده شده است.

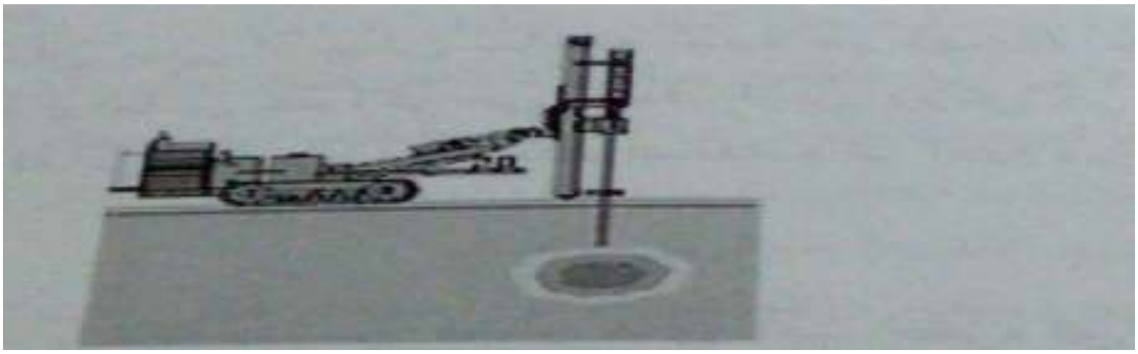


الف)

تزریق



ب) اختلاط با سیمان



ج) تراکم دینامیکی

شکل۳. تعدادی از روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا الف) تزریق ب) اختلاط ج) تراکم دینامیکی (www.Civil808.com)

۵- ژئوگریدها

در راهسازی، با افزایش خطوط عبوری، ظرفیت باربری لازم برای تحمل بار وارده افزایش می‌یابد. همچنین عبور متوالی ترافیک باعث افزایش تغییرشکل‌های الاستیک و پلاستیک بستر راه خواهد شد. طبق مطالعات صورت گرفته ژئوگرید در سیستم راهسازی عموماً به دو منظور جدایش و تسلیح استفاده می‌شود. اما با توجه به اندازه چشمه‌های ژئوگریدهای معمول، از آن به عنوان فیلتر استفاده نمی‌گردد و منظور از جدایش، غالباً رعایت ترتیب لایه‌های روسازی می‌باشد. لذا، کاربری اصلی آن، تقویت لایه‌های روسازی است. سه هدف اصلی استفاده از ژئوگرید در ساختار راه، تقویت بستر نرم، افزایش عمر بهره‌وری و کاهش سطح مقطع عرضی لازم برای یک پروژه می‌باشد. ژئوگرید به عنوان مسلح‌کننده، باعث می‌شود عمل تراکم لایه بستر راحت‌تر صورت گیرد و مقدار مصالح درشت‌دانه مورد نیاز را کاهش می‌دهد. ژئوگرید همچنین برای پایداری مکانیکی بستر، تسلیح لایه اساس و تسلیح پوشش آسفالت بتنی نیز به کار می‌رود (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤).

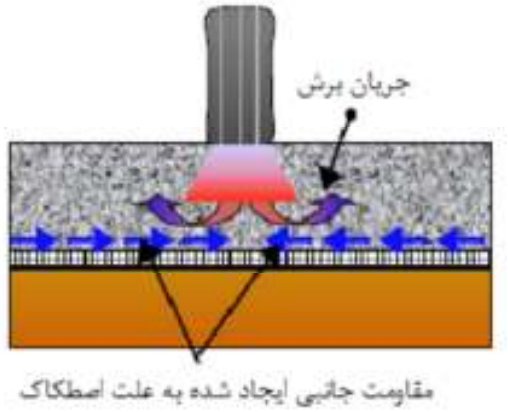
۵-۱- عملکرد ژئوگریدها

طبق مطالعات صورت گرفته، مکانیزم تسلیح ژئوگرید در بستر راه از طریق ایجاد مقاومت جانبی، تقویت ظرفیت باربری و عملکرد غشایی رخ می‌دهد. مقاومت جانبی به علت محصورشدگی دانه‌ها درون چشمه‌های ژئوگرید تامین می‌گردد.

از آنجا که خصوصیات مقاومتی دانه‌های خاک وابسته به تنش است، افزایش محصورشدگی باعث افزایش مدول مصالح لایه اساس می‌گردد.

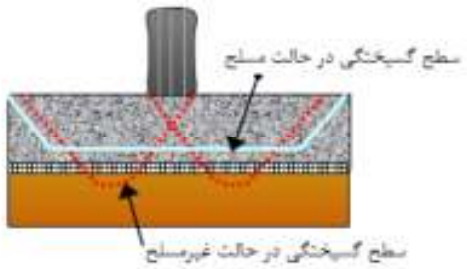
این افزایش در مدول مواد دانه‌ای، باعث بازتوزیع تنش قائم روی بستر و به تبع آن، کاهش تنش رسیده به بستر تا حد تحمل آن می‌گردد.

شکل ۱، مکانیزم ایجاد مقاومت جانبی را توسط ژئوگرید نشان می‌دهد (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤).



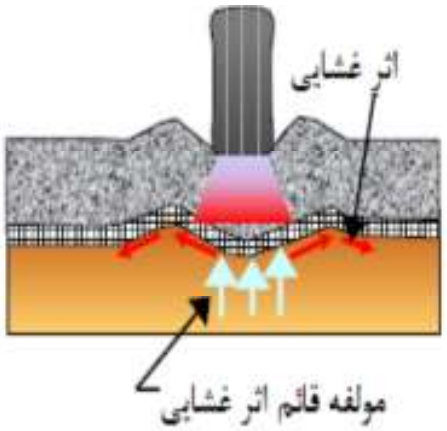
شکل۱. تصویر شماتیک مقاومت جانبی ایجادشده به علت تسلیح (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤)

عملکرد بعدی ژئوگرید که به آن نقش مسلح‌کننده می‌دهد، تقویت ظرفیت باربری می‌باشد. این مکانیزم، از طریق انتقال سطح گسیختگی از بستر ضعیف به مصالح مناسب در لایه اساس صورت می‌گیرد. شکل ۲، مکانیزم موردنظر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤).



شکل ۲. تصویر شماتیک انتقال سطح گسیختگی در حالت مسلح (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤)

سومین اثر حضور ژئوگرید، اثر غشایی نام دارد. بار وارده به ژئوگرید، باعث ایجاد تنش کششی در لایه ژئوگرید تغییرشکل یافته می‌شود. مولفه قائم این تنش کششی، تنش قائم رسیده به بستر را کاهش می‌دهد. شکل ۳، مبین اثرغشایی در ژئوگرید می‌باشد (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤).



شکل ۳. تصویر شماتیک عملکرد غشایی در حالت مسلح (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤)

۵-۲- بررسی خصوصیات مقاومتی بستر مسلح با ژئوگرید

با تسلیح زمینه در بسیاری تحقیقات اخیر، سال‌های در ژئوگرید صورت گرفته است. مطالعات صورت گرفته حاکی از بهبود رفتار خاک به واسطه‌ی تسلیح می‌باشد، به طوری که قرارگیری لایه تسلیح در خاک به خصوص در خاک‌های با ظرفیت باربری اولیه کم، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش پارامترهای مقاومتی آن از جمله CBR، چسبندگی، سختی و مدول الاستیسیته خاک دارد (مهرپژوه، آقایی، مقدسی تفرشی، ۱۳۹٤).

۵-۳- طراحی خاکریز مسلح با ژئوسل

روش‌های طراحی مختلفی به منظور استفاده از خاک مسلح با ژئوتکستایل و ژئوگرید در بستر راه پیشنهاد شده است. از آنجا که ژئوسل یکی از اعضای سه بعدی خانواده ژئوسنتتیک‌ها میباشد، با تغییر برخی پارامترها از جمله ارتفاع و ضخامت، می‌توان از مبانی طراحی ژئوسنتتیک‌های دوبعدی در طراحی ژئوسل نیز بهره برد. حضور ژئوسل در راهسازی جهت پایداری بستر و کاهش ضخامت و شیب خاکریز به‌کار می‌رود. میزان کارایی تسلیح با ژئوسنتتیک‌ها، با توجه به مقاومت خاک و نوع ژئوسنتتیک قابل پیشبینی می‌باشد (آقایی، مهرپژوه، اسماعیلی، ۱۳۹٤).

٦-روش‌های ارزیابی بعد از بهسازی

با استفاده از برخی روش‌ها باید بهسازی بدست آمده مورد بررسی و تایید قرار گیرد. در صورت نبود این ارزیابی‌ها مهندسان و مالکان نمی‌توانند به بهسازی به وجود آمده اعتماد داشته باشند. ارزیابی‌ها باید با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی یا آزمایش‌های در محل انجام گیرد. آزمایش‌های آزمایشگاهی بسیار رایج می‌باشد، اما معایب آن‌ها باعث شده تا روش‌های در محل به سرعت رشد یابند. علاوه بر آن نیاز فزاینده به روش‌های بهسازی، یک عامل محرک برای رشد این روش‌ها می‌باشد. زمانی که زمین بهسازی می‌شود، مقایسه نتایج آزمایش‌های در محل، پیش از بهسازی و پس از آن برای نشان دادن میزان بهسازی (جدول٤) بدست آمده به طور گسترده‌ای بکار گرفته می‌شود (بازیار، ۱۳۸٦).

جدول٤. مقاومت خاک بعد از بهسازی (بازیار، ١٣٨٦)

طبقه بندی خاک	نوع خاک	مقادیر ماکزیمم آزمایش		
		SPT (blows/300mm)	CPT (MPa)	فشارسنج-فشار حالت حدی (MPa)
منطقه ۱	خاک‌های درشت دانه بندی شده و با نفوذ پذیری بالا (شن و ماسه)	٥٠-٤٠	٢٩-١٩	٢,٤-١,٩
منطقه ۲	خاک‌های با نفوذپذیری پایین ماسه لای دار، رس و رس لای دار	٤٥-٣٤ ٣٥-٢٥	١٧-١٣ ١٣-١٠	١,٩-١,٤ ١,٤-١
منطقه ۳	خاک‌های نفوذپذیر نیمه اشباع رسوبات معدنی و انباشته های رسی	٤٠-٣٠	N/A	١,٩-١,٤
دیگر رسوبات	محل های دفن زباله	٤٠-٢٠	N/A	١-٠,٥

در جدول ۵ مطالعات انجام گرفته بر روی روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا نشان داده شده است.

جدول۵. بر مروری مطالعات روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا

ردیف	نام نویسنده	سال	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۱	میرمحمد حسینی، سید مجد الدین؛	۱۳۷۲	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی و زمین‌های مستعد روانگرایی توضیح داد شد.	با توجه به حساس بودن خاک‌های روانگرا و هم چنین لزوم شناخت درست آن‌ها پیشنهاد گردید تا اقدامات سخت گیرانه‌تری، برای شناخت خاک‌ها در نظر گرفته شود.
۲	میرمحمد حسینی، سید مجد الدین؛	۱۳۷٦	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	مقاومت ماندگار خاک که مبتنی بر استفاده از نتایج آزمایشات محلی می‌باشد و برای تعیین نشست‌های موجود در سطح خاک استفاده شد.	باتوجه به دستاوردهای شناخت روانگرایی خاک‌ها، روش‌های ساده‌تر و دقیق‌تری نیز برای کاهش خطرات روانگرایی هنگام زلزله وجود دارد.
۳	عارف پور، ب؛ میر حسینی، م.	۱۳۷۸	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	ارزیابی روانگرایی و آثار مرتبط با آن مورد بررسی قرار گرفت که بیشتر بحث بر روی خصوصیات درجای خاک بوده است.	با توجه به پارامترهای ارزیابی روانگرایی در آزمایش‌های SPT CPT، بهتر است به صورت دقیق‌تر و با سخت گیری بیشتری انجام گیرد.

٤	بازیار، محمد حسن؛ قناد، زینب؛	۱۳۸٦	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی	عوامل اثر گذار بر روانگرایی خاک‌ها مانند امواج دریا یا بارهای ضربه‌ای مداوم ناشی از ترافیک و یا تنش ناشی از انفجار نیز مورد برسی قرار گرفته‌است.	معایب روش‌های آزمایشگاهی بعد از بهسازی خاک که امری ضرروی است برطرف گردد.

ادامه جدول۵. مروری بر مطالعات روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا

ردیف	نام نویسنده	سال	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۵	شوش پاشا، عیسی؛ باقری پور، محمد حسین؛ افضلی راد، مبین؛	۱۳۸۷	مطالعات آزمایشگاهی، میدانی، کتابخانه‌ای	ضریب اطمینان بزرگتر از ۱ به معنی ایمنی بیشتر نیست، بلکه باید قضاوت‌های مهندسی در رابطه با درصد احتمال بروز روانگرایی صورت گیرد.	روش ضریب اطمینان به‌منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی را می‌توان با داشتن اطلاعات مورد نیاز برای مناطق دیگر نیز تعمیم داد.
٦	ملاعباسی، حسین؛ جمشیدی چناری، رضا؛	۱۳۹۰	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل عددی، کتابخانه‌ای	در این تحقیق با توجه به پتانسیل روانگرایی در استان مازندران به کمک آزمایش‌های برجا، به معرفی اثر لایه‌ی غیرروانگرای بالایی در کاهش پتانسیل روانگرایی لایه‌های زیرین می‌پردازد.	با توجه به شرایط خاص دانه‌بندی و توپوگرافی می‌توان پتانسیل روانگرایی را در مناطق مختلف تشخیص داد.
۷	نائینی، سید ابوالحسن	۱۳۹۰	مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل عددی	نسبت تخلخل بحرانی برای ارزیابی کمی قابلیت روان شدن ماسه کافی نیست.	همچنان با توجه به تحقیق‌های عمده ای که در زمینه روانی خاک‌ها انجام شده است، می‌توان با بررسی‌های بیشتر در آزمایش‌های مربوطه مانند (سه محوری دینامیکی، برش ساده متناوب) نتایج بهتری به‌دست آورد.

۸	احمدی، محمد مهدی	۱۳۹۳	مطالعات آزمایشگاهی، میدانی، کتابخانه‌ای	دسته بندی معایب و مزایای روش های بهسازی خاک صورت گرفته بر روی خاک‌های مناسب با آن روش می‌باشد.	علاوه بر روش‌های ذکر شده روش‌های دیگری نیز برای بهسازی خاک‌ها وجود دارد پس نباید فقط به این روش‌ها بسنده کرد.

ادامه جدول۵. مروری بر مطالعات روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا

ردیف	نام نویسنده	سال	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۹	مرادی، محمد علی؛ جعفریان، یاسر؛	۱۳۹٤	مطالعات مدل سازی عددی	در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای موج ورودی بر مقادیر نشست سازه پرداخته شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای شتاب بیشینه و محتوای فرکانسی موج ورودی، هر کدام تاثیر بسزایی در مقادیر نشست دارند.	نتایج به‌دست آمده برای این تحقیق می‌باشد، برای شرایط متفاوت نظیر پی با عرض ماسه کم یا بیشتر با تراکم بالاتر باید بررسی‌های دقیق‌تری انجام داد.
۱۰	(آقائی، مهرپروژه و اسماعیلی، ۱۳۹٤)	مدول الاستیسیته، سختی و چسبندگی	مطالعات مروری	در صورت مسلح‌سازی خاک با ژئوسل مدول الاستیسیته، چسبندگی و سختی خاک افزایش می‌یابد.	با استفاده از ژئوسل می‌توان مدول الاستیسیته را افزایش داد.
۱۱	(آقایی آرایی، ۱۳۹۵)	مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی ماسه و شن داسیتی	مطالعات آزمایشگاهی	تشخیص آسان زمان رسیدن امواج و مقادیر مدول برشی داسیت شنی در دانسیته خشک حداکثر نصف مقادیر نظیر داسیت ماسه‌ای در دانسیته خشک حداکثر مربوطه هست.	در صورت استفاده از این روش دقت افزایش و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.
۱۲	یوشیمی، وای و توکیماتسو، کا	۱۹۹۷	مطالعات آزمایشگاهی، میدانی	نشست ۳۵ ساختمان بتن مسلح را در زلزله ۱۹٦٤ نیگاتای ژاپن بررسی کردند. و مقادیر نشست و عرض پی را به مقدار ضخامت ماسه روانگرا تعیین کردند.	در تعیین نشست‌های حاصله در هنگام زلزله پارامترهای زیادی دخالت دارند که به مقدار بزرگای زلزله وابسته هستند.
۱۳	یود تی و همکاران	۲۰۰۱	مطالعات آزمایشگاهی، کتابخانه‌ای	مقایسه بین روش‌های ارزیابی پتانسیل خاک (SPT,CPT,BPT) نتیجه بدست آمده نشان می‌دهد هر روش برای کدام خاک مناسب‌تر است.	آزمایش SPT,CPT به دلیل در دسترس بودن از سایر آزمایش‌ها مناسب‌تر می‌باشند.

ادامه جدول ۵: مروری بر مطالعات روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا

ردیف	نام نویسنده	سال	روش پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۱٤	توانایاگام، تی، کاناگالین گام، تی و شن دن تی.	۲۰۰۲	مطالعات آزمایشگاهی، کتابخانه‌ای	روش‌های سنتی بهسازی خاک‌ها که برای انواع خاک‌ها مفایسه شده‌است.	روش تزریق فشاری برای تمامی خاک‌ها قابل اعتماد بوده و امکان اجرا وجود دارد.
۱۵	اَدلیر، کا و همکاران	۲۰۱۳	مطالعات میدانی، کتابخانه‌ای	بررسی انواع خاک‌های روانگرا و کاهش خطرات روانگرایی با استفاده از ۳ روش قابل چشم پوشی خواهد بود.	در بعضی مواقع با استفاده از روش‌های کاهش خطر روانگرایی، خاک روانگرا از بین نرود که در این صورت باید منطقه‌ای دیگر را انتخاب کرد.
۱٦	عسگری، ع، علیایی، م و باقری، م.	۲۰۱۳	مطالعات میدانی، کتابخانه‌ای	تمایل برای ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای در یک خاک، شدیدا تحت تاثیر شرایط دانسیته و تنش اولیه می‌باشد، لذا استعداد روانگرایی نیز شدیدا به حالت اولیه خاک بستگی دارد.	بیشترین خاک‌هایی که استعداد روانگرایی را دارا می‌باشند خاک‌های ماسه ای هستند که حالت اشباع پیداکرده‌اند.
۱۷	هاشمی نژاد، ع. و بهادری، ح.	۲۰۱۹	مطالعات آزمایشگاهی، میدانی	خواص مهندسی خاک‌ها با تزریق یا اختلاط مواد سیمانته کننده با خاک بهبود می‌یابد، در نتیجه فشارآب حفره‌ای تولیده شده کاهش می‌یابد.	یکی از شاخص‌های مهم انتخاب روش بهسازی خاک‌ها، هزینه و اقتصادی بودن پروژه می‌باشد.

۷-نتیجه‌گیری

پدیده روانگرایی در منطقه‌ای که پتانسیل روانگرایی را دارا باشد مشاهده می‌شود. این پدیده باعث وارد آمدن خسارت‌های زیادی به سازه‌ها در هنگام زلزله می‌شود. بنابراین، انجام بهسازی خاک با استفاده از روش‌های مناسب مورد نیاز بوده است. لازم است انتخاب روش مناسب بهسازی لرزه‌ای برای خاک‌های روانگرا با توجه به شرایط سازه‌های ژئوتکنیکی،

محدودیت‌های زیست محیطی، شرایط ساخت و کنترل اعتمادپذیری و دوام صورت گیرد. براین اساس، نوع خاک روانگرا و توزیع اندازه ذرات از عوامل مهم جهت انتخاب اولیه روش مناسب جهت بهسازی خاک روانگرای مورد نظر می‌باشند (هاشمی‌نژاد، ع. و بهادری، ح، ۲۰۱۹). در چند دهه اخیر، رونق استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در مهندسی عمران، محققین را به سوی انجام مطالعات گستردهای پیرامون عملکرد این مصالح سوق داده است. طبق مطالعات انجام‌شده، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌گردد. علاوه بر آن، حضور تسلیح نرخ کرنش قائم را کاهش داده و یا متوقف می‌کند. بهبود عملکرد خاک مسلح با ژئوسل به عنوان نوع خاصی از ژئوسنتتیک‌ها، استفاده از آن را در مواردی همچون خاکریزها و شیروانی‌های خاکی مورد توجه قرارداده است (آقایی، مهرپژوه، اسماعیلی، ۱۳۹٤). در این تحقیق انواع روش‌های بهسازی خاک‌های روانگرا، چگونگی استفاده، اندازه ذرات خاک مورد استفاده در این روش و هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین باید توجه داشت روش‌های بهسازی از هزینه‌های بالایی برخوردار می‌باشند و با توجه به بعد اقتصادی پروژه که یکی از عوامل مهم در اجرای پروژه بوده، باید توجه نمود در روش انتخابی در بهسازی خاک‌ها، مصالح در دسترس و ارزان را به کار ببریم. در نهایت برای حل یک مسئله پیچیده در محیط خاک مانند روانگرایی باید علاوه بر شناسایی خواص خاک، زمین مورد استفاده، اقتصاد پروژه، قضاوت‌های مهندسی هم در نظر گرفته شود.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Geosynthetic
2. Geocell

۹-مراجع

- مهرپروژه، ا. آقائی، ج. و مقدس تفرشی، ن.، (۱۳۹٤)، "بررسی اثر تسلیح خاک با ژئوگرید برپارامترهای مقاومتی بستر راه"، نشریه جاده، دوره بیست و سوم، شماره ۸٤، ص. ۲۱۹-۲۳۱.

-احمدی، م.، (۱۳۹۳)، "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای"، تهران: انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

-آقائی، ج. مهرپروژه، ا. و اسماعیلی، م.، (۱۳۹٤)، "بررسی عملکرد و مبانی طراحی خاکریز مسلح با ژئوسل"، نشریه جاده، دوره بیست و سوم، شماره ۸۵ ص. ۲٤۷-۲۵٦.

-بازیار، م. و قناد، ز.، (۱۳۹۱)، "دینامیک خاک"، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.

-شوش پاشا، ع. باقری پور، م. و افضلی راد، م.، (۱۳۸۷)، "بررسی ارتباط عدد نفوذ استاندارد و احتمال وقوع روانگرایی با استفاده از روش اعتماد پذیری در خاک‌های ماسه‌ای"، مجله علمی و پژوهشی شریف، شماره ٤۲ (۲)، ص. ۸-۱.

-مرادی، م. و جعفریان، ی.، (۱۳۹٤)، "تأثیر مشخصات بار لرزه‌ای بر نشست دائمی پی‌های سطحی مستقر بر ماسه مستعد روانگرایی"، فصل‌نامه علمی پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، سال دوم، شماره سوم، ص. ۷۵-٦٤.

-ملاعباسی، ح. و جمشیدی چناری، ر.، (۱۳۹۰)، "ارزیابی پتانسیل روانگرایی در استان مازندران با کمک مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی با نگاهی بر معیار ایشیهارا"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره۲۸-۲، شماره ٤، ص.۱۳۵-۱۲۷.

-میرمحمدحسینی، م. و عارف پور، ب.، (۱۳۷۸)، "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای"، تهران: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

-میرمحمدحسینی، م.، (۱۳۷۲)، "اصول و مبانی دینامیک خاک"، تهران: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

-میرمحمدحسینی، م.، (۱۳۷٦)، "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای"، تهران: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

-نائینی، ا.، (۱۳۹۰)، "دینامیک خاک"، قزوین: انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره).

-قیاسی، و. محمودی، ا.، (۱٤۰۰). بررسی روش‌های طراحی لرزه‌ای دیوارحایل، جاده، شمار ۱۰۹، ص. ۵۷-٦۸.
doi:10.22034/road.2021.107906

-قیاسی، و. فتحی، ر. و شیرخانی چشمه شفیع، م.، (۱٤۰۰)، "بررسی اثر مدول الاستیسیته"، مدول برشی، نسبت میرایی و سرعت موج برشی در تحلیل دینامیکی خاک، جاده، شماره ۱۰۹، ص.۱۰۰-۸۷.

-قیاسی، و، مرادی، م.، (۱۳۹۷)، "مدل سازی عددی نشست پی‌های رادیه-مرکب منفصل با تاکید بر تعریف جدیدی از این سیستم‌ها با عنوان سیستم ترکیبی"، نشریه جاده، شماره ۱۰۷، مدل سازی در مهندسی، ص.۲٤۵-۲۳۵.

-قیاسی، و. والی راستی، ش.، (۱٤۰۰)، "مروری بر توزیع تنش در تونل‌های دایره‌ای، نشریه جاده، شماره ۱۰۹، ص.٦۵-۵۵.

Engineering", 28, 5, pp. 2519-2533. doi:10.24200/sci.2021.56159.4579.
-Pourkeramat, P., Ghiasi, V., & Mohebi, B., (2021), "The Effect of Post-Earthquake Fire on the Performance of Steel Moment Frames Subjected to Different Ground Motion Intensities. International Journal of Steel Structures, pp.1-13.
-Ghafari, M., Nahazanan, H., Yusoff, Z. M., & Ghiasi, V., (2021), "Effect of soil cohesion and friction angles on reverse faults", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 20(2), pp.329-334.
-Ghiasi, V., & Yousefi, M., (2020), "Development of Prediction-Area charts to improve the output of landslide potential models, Modares Civil Engineering journal, 20(6), pp.117-130.
-GhiasiI, V., Smaeili, K., & Arzjani, D., (2020), "Pile-Tunnel Interaction in Subway Tunnels under Seismic Loads", Journal of Civil and Environmental Engineering.
-Ghiasi, V., & Farzan, A., (2019), "Numerical study of the effects of bed resistance and groundwater conditions on the behavior of geosynthetic reinforced soil walls", Arabian Journal of Geosciences, 12(23), pp.1-7.
-Ghiasi, V., Koushki, M., (2021), "Numerical investigation of ground surface settlement due to circular tunneling influenced by variations of geometric characteristics of tunnel and mechanical properties of saturated soil and its prediction in the artificial neural network, Journal of Modeling in Engineering, 19(64), pp.27-39.
doi: 10.22075/jme.2019.18022.1735.
-Thevanayagam, Kanagalingam, T., and Shenthan, T., (2002), "Contact Density Confinning Stress – Energy to Liquefaction", Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, NY, June 2-5.
-www.Civil808.com.
-Yoshimi, Y., and Tokimatsu, K., (1997), "Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes", Soils Foundations, 17(1), pp.23-38.
-Youd, T, L., and Perkins, D. M., (2001), "Liquefaction resistance of soils", Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", J. Geotech Geoenviron, Eng., 127(10), pp.817-833.

DOI: 10.22034/road.2021.211545.1879.

doi: 10.22075/jme.2018.12596.1232.
-Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., & Baez, J. I., (2013), "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23(7), pp.571-584.
-Asgari, A., Oliaei, M., & Bagheri, M., (2013), "Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 51, pp.77–96.
-Hasheminezhad, A., & Bahadori, H., (2019), "Seismic response of shallow foundations over liquefiable soils improved by deep soil mixing columns", Computers and Geotechnics, 110, pp.251-273.
-Ghiasi, V., & Mozafari, V. (2018), "Seismic response of buried pipes to microtunnelling method under earthquake loads", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 113, pp.193-201.
-Ghiasi, V., & Moradi, M., (2018), "Assessment the effect of pile intervals on settlement and bending moment raft analysis of piled raft foundations", Geomechanics and Engineering, 16(2), pp.187-194.
-Ghiasi, V., Valipour, M. R., Mohammadirad, A. R., & Baharipour, S., (2013), "Methods of Retrofitting the Foundation of Unreinforced Masonry Buildings", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, pp.5747-5758.
-Ghiasi, V., & Koushki, M., (2020), "Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil", SN Applied Sciences, 2(5), pp.1-14.
-Ghiasi, V., & Moradi, M., (2019), "Investigation on the Effect of Raft Thickness and Pile Length Changes in Piled Raft Foundations Analysis", Journal of Engineering Geology, 13(2), pp.261-288.
-Ghiasi, V., Ghasemi, S. A. R., & Yousefi, M., (2021), "Landslide susceptibility mapping through continuous fuzzification and geometric average multi-criteria decision-making approaches. Natural Hazards, 107(1), pp.795-808.
-Ghiasi, V., & Omar, H. Slope Failure Assessment and Recommendations by Geophysical Investigation.
-Ghiasi, V., Heidari, F., Behzadinezhad, H (2021), "Scientia Iranica. Transaction a Civil

Investigation of Liquefiable Soils Improvement Methods

Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Fatemeh Najafi, M.Sc., Student, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

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

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Liquefaction is one of the most damaging geotechnical phenomena in soils. This phenomenon occurs in saturated, sandy soils that are loose-grained and subject to dynamic loading. When the pore water pressure increases, the effective stress becomes zero and the total stress is equal to the pore water pressure. In this case, the soil is no longer resistant and the sand becomes liquid. This causes damage to the soil and has the risk of liquefaction, so in this case a material is required to improve the strength parameters of the soil. This paper presents the methods used to improve liquid soils, their application and the soils suitable for each method. The method used in this study is a desk and laboratory investigation of the available sources. According to the results of this study, the selection of suitable methods for wetland soil improvement methods includes soil replacement, dehydration, site reinforcement, injection, thermal, geosynthetic, blasting and vibrocondensation.

Keywords: Liquid Soils, Improvement, Sandy Soil