

## تثبیت و بهسازی خاک

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد عمران گرایش سازه

**چکیده:** تثبیت خاک و مصالح شنی روشی است که در راهسازی به منظور بهبود کیفیت مصالح به کار می‌رود تا مصالحی با مشخصات مناسب برای به کار بردن در لایه‌های روسازی به دست آید. از مصالح تثبیت شده برای ایجاد خاکریزها، ساختن لایه‌های اساس، زیر اساس و خاک بستر روسازی‌ها و حتی در پاره‌ای موارد به عنوان یک لایه رویه می‌توان استفاده کرد. تصمیم در مورد تثبیت خاک و مصالح شنی نظیر هر تصمیم دیگر مهندسی پس از مقایسه راه حل‌های مختلف قابل قبول (از نظر فنی) انجام می‌شود. تثبیت خاک و مصالح شنی معمولاً به منظورهای زیر انجام می‌شود:

الف- اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت ب- بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی ج- ایجاد لایه‌های اساس و زیر اساس با قابلیت باربری نسبتاً زیاد د- بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود ه- کاهش گرد و خاک و یا کاهش رطوبت برای تثبیت خاک از مواد تثبیت کننده نظیر سیمان، آهک، قیر، کلرور کلسیم یا سدیم استفاده می‌شود. انتخاب نوع ماده تثبیت کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان آمد و شد، هدف از انجام تثبیت خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. تعیین مقدار ماده تثبیت کننده مورد لزوم به کمک آزمایش (مقاومت و دوام) انجام می‌شود. سیمان یکی از موادی است که از آن برای تثبیت خاک‌ها و مصالح سنگی استفاده می‌شود. از سیمان همچنین برای تثبیت رویه‌های شنی و بهسازی آنها برای آمد و شدهای زیاد استفاده می‌شود. معمولاً هر نوع خاکی نظیر شن و ماسه، خاک‌های ماسه‌ای، خاک‌های لای دار و خاک‌های رسی با حد روانی کم را می‌توان با استفاده از سیمان تثبیت کرد، لیکن خاک‌های آلی به هیچ وجه مناسب برای تثبیت با سیمان نیستند. آهک ماده دیگری است که از آن برای تثبیت خاک‌ها استفاده می‌شود. به کار بردن آهک شکفته برای تثبیت خاک‌های شنی رس دار سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود. ایرانیان از قدیم آهک را می‌شناختند و از آن برای تثبیت خاک و بالا بردن مقاومت خاک استفاده می‌کردند (شفته آهکی و بتن آهکی). افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با آهک به علت ترکیب دوغاب آهک با کانی‌های رسی و تشکیل سیلیکات و آلومینات کلسیم است که سبب چسباندن دانه‌های خاک و سنگ به یکدیگر می‌شود (واکنش پوزولانی). اضافه کردن مواد تثبیت کننده نظیر سیمان و یا آهک به خاک سبب کاهش خواص خمیری خاک می‌شود. از این نظر در مواردی که مصالح شنی از نظر دانه بندی مناسب برای لایه‌های اساس و زیر اساس بوده ولیکن به علت حد روانی یا دامنه خمیری زیاد نتوان از آن استفاده کرد، می‌توان با افزودن مقدار کمی سیمان یا آهک از خواص خمیری مصالح کاست و از آنها برای ساختن لایه‌های اساس و زیر اساس استفاده کرد. ماده دیگر تثبیت کننده خاک قیر است که از آن برای تثبیت خاک‌هایی که مقدار ریز دانه آنها خیلی زیاد نبوده و خواص خمیری آنها نیز کم باشد می‌توان استفاده کرد.

- تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک

برخی خاک‌ها به علت مشخصات فنی نامطلوب از نوع بد یا نا مرغوب محسوب شده و مشکلات زیادی از نظر فنی و اقتصادی در راهسازی ایجاد می‌کنند. در این موارد اغلب یا اقدام به تغییر مسیر راه و یا تعویض خاک می‌شود. هرگاه بنا به عللی امکان تغییر مسیر راه و یا تعویض خاک نباشد باید روش تثبیت خاک مورد بررسی قرار گیرد تا اگر این روش از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد مبادرت به انجام آن شود. در این بخش تأثیر آهک بر خاک‌ها و مصالح شنی مورد بررسی قرار گرفته و خواص و ویژگی‌های مصالح تثبیت شده با آهک شرح داده شده است تا با شناخت بیشتر این نوع مصالح از آن به طور اصولی‌تر در راهسازی استفاده شود.

سالها است که از انواع مواد آهکی با درجات خلوص مختلف برای تثبیت خاک و مصالح شنی استفاده شده است. متداول‌ترین این مواد آهک شکفته، آهک شکفته دولومیتی، آهک زنده، و آهک زنده دولومیتی است. تثبیت خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی خاک و تسریع در انجام عملیات راهسازی می‌شود. خاک تثبیت شده با آهک در برابر عوامل جوی (رطوبت و یخبندان) بهتر از خاک تثبیت نشده مقاومت کرده و قابلیت باربری بیشتری دارد. تثبیت خاک با آهک با استفاده از وسایل و ماشین آلات متداول راهسازی امکان پذیر است و کارگران ایرانی به استفاده از آهک آشنا هستند (شفته آهکی و بتن آهکی). در راهسازی از خاک

و مصالح سنگی تثبیت شده با آهک برای ایجاد خاکریزها و ساختن لایه های اساس، زیر اساس و خاک بستر روسازی راه، راه آهن و فرودگاه استفاده شده که نتایج خوبی داشته است. میزان آهک مصرفی به عوامل متعددی از قبیل جنس خاک، جنس آهک، نحوه استفاده از مصالح، شرایط جوی منطقه، هدف از تثبیت خاک و هزینه انجام عملیات بستگی دارد و معمولاً مقدار آن بین ۵٪ تا ۸ درصد وزن خشک خاک متغییر است. به طور کلی تمام خاک‌های ریز دانه پس از اختلاط با آهک دارای کیفیت بهتری از نظر خصوصیات خمیری می‌شوند، لیکن اضافه کردن آهک به هر خاکی ممکن است سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت آن نشود.

اضافه کردن آهک به خاک سبب کاهش خصوصیات خمیری آن می‌شود، به طوری که در برخی موارد ممکن است مخلوط خاک و آهک کاملاً غیر خمیری شود. خاک‌هایی که دارای مقدار بیشتری رس هستند و یا دامنه خمیری آنها بیشتر است نیاز به مقدار بیشتری آهک برای رسیدن به حالت غیر خمیری دارند. اگر اضافه کردن آهک به خاک در چند مرحله صورت بگیرد، معمولاً مقدار آهکی در مرحله اول به خاک اضافه می‌شود دارای تأثیر بیشتری در کاهش خصوصیات خمیری خاک هست و به ترتیب از تأثیر آن در مراحل بعدی کاسته می‌شود. کاهش خصوصیات خمیری خاک موجب می‌شود که کار کردن با خاک اصلاح شده سهل‌تر شده و جا به جا کردن آن در کارگاه ساده‌تر انجام شود. اصلاح خاک‌های رسی با آهک سبب می‌شود که به طور قابل ملاحظه‌ای از قابلیت تورم این نوع خاک‌ها کم شود. علت این کاهش کم شدن میل به جذب آب توسط دانه‌های رس اشباع شده از آهک و همچنین به وجود آمدن یک استخوان بندی از مواد سنتی است که در برابر افزایش حجم مصالح در اثر رطوبت مقاومت می‌کند. درصد تورم خاک‌های اصلاح شده با آهک متغیر است، لیکن این امر به هیچ وجه غیر عادی نیست که با اضافه کردن آهک به خاک بتوان میزان تورم آن را از ۷ یا ۸ درصد به حدود ۱٪ درصد کاهش داد. ارزیابی مقاومت خاک‌های تثبیت شده با آهک می‌تواند با انجام آزمایش‌های مختلفی انجام شود. متداول‌ترین این آزمایشات، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، آزمایش فشاری محدود نشده (تک محوری)، آزمایش کشش غیر مستقیم و آزمایش سه محوری است. مقاومت فشاری تک محوری خاک‌های ریز دانه که در درصد رطوبت بهینه متراکم می‌شوند معمولاً بین ۱/۷ تا بیش از ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متغیر است و به جنس خاک بستگی دارد. نتایج به دست آمده در عمل نشان داده است که افزایش مقاومت خاک‌های تثبیت شده با آهک با گذشت زمان ادامه می‌یابد و در برخی موارد این افزایش مقاومت تا بیش از ۱۰ سال نیز طول می‌کشد. برای تعیین مقاومت برشی خاک‌ها از آزمایش برشی سه محوری که بر روی نمونه‌های تحکیم نشده و زهکشی نشده خاک انجام می‌شود استفاده می‌گردد تا مقاومت برشی خاک در شرایطی تقریباً مشابه شرایط کارگاهی اندازه‌گیری شود. آزمایشات انجام شده بر روی خاک‌های رسی که دارای واکنش خوبی با آهک هستند نشان داده که مقدار زاویه اصطکاک داخلی این نوع خاک‌ها پس از تثبیت شدن با آهک بین ۲۵ تا ۳۵ درجه متغیر است. پارامتر چسبندگی این خاک‌ها پس از تثبیت با آهک به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد و این افزایش متناسب با افزایش مقاومت فشاری تک محوری این مصالح است. خاک‌های تثبیت شده با آهک دارای مقاومت برشی قابل توجهی هستند.

تعیین مقاومت کششی خاک‌های تثبیت شده با آهک که در لایه‌های روسازی‌ها به کار می‌روند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا لایه‌های اینگونه مصالح به علت داشتن مقاومت زیاد نظیر یک دال عمل می‌کنند. برای تعیین مقاومت کششی خاک‌های تثبیت شده با آهک معمولاً از دو روش که عبارتند از آزمایش کششی غیر مستقیم و آزمایش خمشی استفاده می‌شود. به منظور تحلیل رفتار روسازی‌هایی که شامل لایه خاک تثبیت شده با آهک هستند لازم است که منحنی تغییرات تنش و تغییر شکل نسبی این مصالح در دست باشد. خاک‌های تثبیت شده با آهک استقامت نهایی بیشتری و تغییر شکل نسبی نهایی کمتری نسبت به خاک اصلی دارند. در اینجا لازم به یادآوری است که چون مقاومت خاک‌های تثبیت شده با آهک با گذشت زمان و گرمای محیط افزایش می‌یابد، لذا اگر تنش‌های به وجود آمده در این مصالح در هر بارگذاری مقدار ثابتی باشد نسبت این تنش‌ها به مقاومت نهایی مصالح با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در نتیجه تعداد دفعات بارگذاری که برای خسته کردن مصالح لازم است افزایش خواهد یافت. تأثیر دراز مدت رطوبت بر خاک‌های تثبیت شده با آهک معمولاً خیلی شدید نیست و آزمایشات انجام شده نشان داده است که نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع شده در آب به مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع نشده بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ متغیر است.

خاک‌های تثبیت شده با آهک در اثر یخبندان - ذوب یخ قسمتی از مقاومت خود را از دست می‌دهند. مقاومت فشاری اولیه خاک‌های تثبیت شده با آهک بر روی مقاومت مصالح در برابر یخبندان - ذوب یخ تأثیر زیادی دارد و هر اندازه مقاومت فشاری اولیه این مصالح بیشتر باشد مقاومت آنها نیز در برابر یخبندان - ذوب یخ بیشتر خواهد بود. تعداد دفعات تکرار یخبندان - ذوب یخ بر روی کاهش مقاومت مصالح تأثیر زیادی دارد و با افزایش دفعات یخبندان - ذوب یخ از مقاومت مصالح بیشتر کاسته می‌شود. بازسازی کنترل شده خاک درجا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی را بهسازی خاک می‌گویند. بهسازی خاک از مفاهیم بسیار مهم و کاربردی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد.

امروزه از روش‌های بهسازی خاک به‌طور گسترده‌ای در جهان استفاده می‌شود. کاربرد این روش‌ها باعث بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره‌برداری می‌گردد. روش‌های بهسازی خاک‌ها به منظور تغییر و بهبود خصوصیات خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نهایت منجر به کاهش نشست سازه، بهبود مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن، افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی خاکریزها و سدهای خاکی، کاهش خصوصیات فشرده شدن و تورم خاک می‌شوند. اگر شرایط ژئوتکنیکی زمین، برای ساخت انواع پی‌های متعارف از نظر پایداری و نشست پذیری و در شرایط خاصی آنگذری مناسب نباشد، ضروری است، تمهیداتی جهت تثبیت و بهسازی خاک‌ها مدنظر قرار گیرد. به‌طور کلی در مواجهه با خاک‌های مسئله دار در پروژه‌ها عمرانی، در صورتی که تصمیم بر آن باشد که پروژه بر روی خاک بستر موجود اجرا گردد، برای بهبود شرایط موجود، خصوصیات خاک اصلاح خواهد شد و بهسازی زمین انجام می‌شود.

### روش‌های بهسازی خاک

روش‌های بهسازی خاک به‌طور کلی در پنج گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شود:

#### ۱. عملیات خاکی

۲. متراکم سازی

۳. بهسازی فیزیکی - شیمیایی

۴. بهسازی هیدرولیکی

۵. مسلح سازی

### خاک‌های مسئله دار

چهار دسته اصلی خاک‌های مسئله دار که قبل از اجرای پروژه نیاز به بهسازی دارند:

خاک‌های نرم و شل

خاک‌های انبساطی

خاک‌های رمبنده یا فرو ریزشی

خاکریزها

بشر از زمان‌های دور با زمین‌های ضعیف در حال نبرد بوده است. بیشتر مواقع در برخورد با زمین‌های نامناسب ۵ راه حل یا استراتژی عمده وجود دارد این راه‌ها عبارتند از:

۱) جانشین سازی خاک ضعیف با خاک مناسب تر

۲) تقویت خاک و زمین نامناسب توسط شمع‌ها و پی‌های عمیق

۳) طراحی مجدد سازه با توجه به محدودیت‌های خاک

۴) تغییر دادن شرایط طبیعی خاک‌های ضعیف برای بدست آوردن ملزومات پروژه (بهسازی)

۵) تغییر محل پروژه

هم اکنون روش های مختلف بهسازی خاک، جهت افزایش و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، بطور گسترده ای مورد استفاده مهندسين عمران می باشد. استفاده از این روش ها علاوه بر بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، باعث کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره برداری می گردد.

افزایش هزینه ی ساخت راه، سد، راه آهن و فرودگاه و به طور کلی سازه های خاکی با توجه به محدود بودن بودجه و سرعت اجرای کار سبب می گردد تا مهندسان برای جلوگیری از جابه جایی زیاد احجام از مصالح محلی، حداکثر استفاده را نمایند. تغییر عملکرد خاک به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک آن، به معنی اعم، تثبیت خاک نامیده می شود. تثبیت خاک به عنوان روش نتیجه بخش در افزایش توان باربری و کنترل خواص خمیری بسیاری از خاک ها مورد استفاده قرار می گیرد. هدف عمده از تثبیت این است که لایه تثبیت شده بتواند بدون ایجاد تغییر شکل های زیاد، بارهای وارده را تحمل نماید. انتخاب روش تثبیت خاک و ماده تثبیت کننده به صورت طبقه بندی شده امر مشکلی است، مهندسين ژئوتکنیک می باید با توجه به کلیه ی مسائل فنی، اقتصادی، نیروی انسانی و ماشین آلات، تجربه ی شخصی و نتایج آزمایشات، روش بهینه را انتخاب کنند. انتخاب نوع ماده به عواملی چون دانه بندی، شاخص خمیری، توجیه اقتصادی و وجود ماده بستگی دارد. به طور کلی اهم روش های اصلاح یا تثبیت خاک به صورت فهرست به شرح زیر است:

۱- تثبیت مکانیکی

۲- تثبیت الکتریکی

۳- تثبیت حرارتی

۴- تثبیت شیمیایی

اصلاح خاک در کلیه ی موارد مهندسی خاک و به خصوص در شرایط ضعیف بودن خاک مطرح است. صرف نظر از مسائل مربوط به مکانیک خاک و کاربرد آن در پی سازی و غیره ... یکی از معمول ترین کاربرد آن در تقویت راه سازی و باند فرودگاه است. بنابراین مسأله ی مورد توجه برای مهندس طراح این است که به چه ترتیب خاک نامناسب را برای کاربرد مورد نظر اصلاح نمایند.

#### تثبیت شیمیایی خاک

منظور از تثبیت شیمیایی، اصلاح ویژگی های مورد نظر خاک بوسیله مواد افزودنی است. در اثر فعل و انفعالات شیمیایی مواد افزودنی با خاک، خواص خاک از جمله چسبندگی، جذب آب، تورم و ... تحت تاثیر قرار می گیرد. اصلاح یا تثبیت خاک به طور کلی برای دستیابی به اهداف زیر انجام می گیرد.

الف) افزایش مقاومت و خواص ژئوتکنیکی و افزایش توان باربری خاک (ب) تغییر نفوذپذیری و کاهش درصد جذب آب و جلوگیری از تورم (ج) پیش گیری از نشست (د) کاهش چسبندگی در خاک های با چسبندگی زیاد (ه) افزایش چسبندگی در مورد خاک های با چسبندگی کم (ماسه بادی) و جلوگیری از رویش گیاهان در سطح راه و نیز کاهش گرد و خاک (ز) تقلیل هزینه های ساخت پروژه به دلیل اصلاح خواص خاک و کاهش میزان حمل و نقل خاک

#### ۱- تثبیت با قیر

تثبیت خاک با قیر برای خاک های درشت دانه و شنی که مقدار ریزدانه آنها خیلی زیاد و خواص خمیری آنها نیز کم است مناسب می باشد. خاک های ریزدانه با خواص خمیری زیاد برای تثبیت با قیر مناسب نیستند. بطور کلی قیرهای مایع مناسب برای تثبیت خاک های ریزدانه هستند. میزان متوسط قیر برای تثبیت خاک های ریزدانه حدود ۴ تا ۸ درصد وزن خاک است. در مورد خاک های ماسه ای، ماسه همراه با مقدار کمی ریزدانه به خوبی با قیر تثبیت می شود.

#### ۲- تثبیت با آهک

آهک با درجات خلوص متفاوت به عنوان تثبیت کننده ای برای خاک سابقه ی طولانی دارد، اضافه کردن این ماده باعث کاهش خواص خمیری خاک می شود. بنابراین وقتی مصالح شنی از نظر دانه بندی برای لایه های اساس و زیراساس مناسب

باشند ولی بعلاوه حد روانی و یا دامنه خمیری زیاد نتوان از آنها استفاده کرد از این ماده برای کاستن خواص خمیری مصالح و در نتیجه برای ساختن لایه‌های اساس و زیر اساس استفاده می‌شود. معروفترین و متداولترین مواد آهکی مورد استفاده در تثبیت عبارتند از آهک شکفته، آهک شکفته دلومیتی، آهک زنده و آهک زنده دلومیتی. باید توجه داشت که بطور کلی آهک زنده ماده تثبیت کننده مؤثری نسبت به آهک شکفته است و اگر بصورت دوغاب به خاک اضافه شود مقاومت بیشتری را نسبت به موقعی که به صورت پودر اضافه می‌شود ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه میزان قابل توجهی از خاک مخصوصاً در ایران ریزدانه و از نوع رسی می‌باشد. چون خاک های رسی دارای خواص خمیری بالا هستند و واکنش شیمیایی خوبی خواهند داشت، باید راهی را برای مقاوم کردن و بهبود رفتار اینگونه ریزدانه ها پیدا کرد. یکی از مؤثرترین روش های بهبود کیفی مشخصات فنی خاک های رسی که استفاده از آن ها متداول است بهره‌گیری از آهک می‌باشد، آهک اصولاً برای تثبیت خاک های ریزدانه که دامنه خمیری آن ها بزرگتر از ۱۰ و خاک های رسی خیلی خمیری مناسب است ولی این ماده برای تثبیت خاک هایی که حاوی مقدار بیش از دو درصد مواد آلی و همچنین حاوی مقدار بیش از نیم درصد سولفات قابل حل در آب می‌باشند مناسب نیست. وقتی آهک به خاک ریزدانه اضافه می‌شود واکنش های مختلفی اتفاق می‌افتد که عبارتند از واکنش تبادل کاتیون ها، واکنش پوزولانی، واکنش کربناسیون. با توجه به نکات گفته شده می‌توان برداشت کرد که مراحل اجرایی عملیات تثبیت خاک با آهک شامل آماده کردن خاک، پخش آهک، اختلاط و آب پاشی، کوبیدن و تسطیح و عمل آوردن مخلوط می‌شود.

### ۳- تثبیت با پلیمر

با توجه به رشد چشمگیر مواد شیمیایی جدید به خصوص مواد پلیمری در اجرای پروژه های عمرانی و اهمیت و تأثیر این مواد در تثبیت خاک های ضعیف، اخیراً علم شیمی و پلیمر را به علم عمران نزدیک کرده است. الیاف پلیمری به دلیل اجرای آسان و ماندگاری بالا و عدم ایجاد مشکل در شرایط اشباع بسیار مورد توجه مهندسين عمران قرار گرفته اند. همچنین خواص فیزیکی نسبتاً مطلوب از جمله ویژگی هایی است که باعث پرمصرف گشتن این محصولات شده است. همچنین این گروه از مواد دارای وزن مخصوص پایین و پایداری خوب در مقابل مواد شیمیایی هستند. امروزه پلیمرهایی از قبیل ژئوتکستایل ها، ژئوگرید ها و الیاف هایی از جنس پلی وینیل، پلی استر، پلی پروپیلین و ... در تثبیت و تسلیح خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند

### ۴- تثبیت با سیمان

مکانیزم تثبیت خاک با سیمان شبیه مکانیزم تثبیت خاک با آهک است با این تفاوت که در تثبیت خاک با آهک بخشی از مواد پوزولانی برای فعل و انفعال شیمیایی خاک با آهک از طریق خاک تأمین می‌شود، در صورتی که مواد پوزولانی برای تثبیت خاک با سیمان به صورت بالقوه در سیمان موجود هستند و لزوماً نباید از طریق خاک تأمین گردد. پس از اضافه شدن سیمان به خاک واکنش های مختلفی بین خاک و سیمان صورت می‌گیرد. مهمترین این واکنش ها واکنش جانشینی یون های مثبت و واکنش تجمع-تراکم است. در این واکنش بافت خاک با تجمع ذرات خاک در کنار یکدیگر و به نوعی دانه بندی آن تغییر می‌کند و مقاومت آن افزایش می‌یابد. هر چه ذرات سیمان ریزتر باشد هیدراتاسیون بیشتر و برای مدت طولانی حتی تا سالیان دراز انجام می‌شود این امر به افزایش مقاومت ترکیب سیمانی با زمان منجر می‌گردد مشخصات فنی خاک های تثبیت شده با سیمان بستگی به جنس خاک، مقدار سیمان، وزن مخصوص خاک تثبیت و کوبیده شده، کیفیت اختلاط سیمان و خاک، شرایط عمل آوردن مخلوط و زمان دارد. اضافه کردن مقدار سیمان بالاتر از ۲ درصد خواص خاک را تغییر می‌دهد.

بهسازی خاک (Soil Improvement) با استفاده از روش های متعدد و متنوع، امروزه یکی از مهمترین کاربردهای علم ژئوتکنیک به شمار می‌آید. احداث سازه ها روی بستر های نامناسب و خاک های مساله دار، این الزام را ایجاد می‌کند که پیش از شروع طراحی و عملیات اجرایی سازه عملیات بهسازی جهت مناسب سازی بستر در اولویت قرار گیرد.

بهسازی خاک روش های مختلفی را در بر می گیرد که در زیر ارائه می گردد:

- ۱ (ریز شمع یا میکروپایل) (Micropile)
- ۲ (ستون شنی یا ستون سنگی) (Stone Column)
- ۳ (تزریق پر فشار یا جت گروتینگ) (jet Grouting)
- ۴ (اختلاط عمیق خاک) (DSM: Deep Soil Mixing)
- ۵ (تراکم دینامیکی) (Dynamic Compaction)
- ۶ (شمع) (Pile)
- ۷ (پیش بارگذاری) (Preloading)
- ۸ (زهکشی یا کنترل تراوش آب) (Drainage)
- ۹ (خاک مسلح یا ژئوسینتتیک) (Geosynthetic)



بهسازی خاک

### ۱ (ریز شمع یا میکروپایل) (Micropile)

به شمع های با قطر کمتر از ۳۰ سانتیمتر که با تسلیح فولادی (میلگرد گذاری) و تزریق همراه است ریزشمع یا میکروپایل اطلاق می گردد. روش اجرای میکروپایل معمولاً شامل حفاری گمانه، قرار گیری آرماتور و سپس تزریق آن می باشد. میکروپایل می تواند نیرو های قابل توجه محوری و تا حدودی نیروهای جانبی را تحمل کند و می توان از آن بسته به ایده طراحی شکل گرفته به عنوان جایگزینی برای شمع های رانشی متداول یا ستون های از پیش حفاری شده و یا بخشی از سیستم شمع و خاک استفاده کرد. امکان اجرای میکروپایل در پروژه هایی که محدودیت دسترسی دارند و در هر نوع خاک و شرایط زمینی وجود دارد.



ریز شمع یا میکروپایل

بهسازی خاک به روش میکروپایل یا ریز شمع

### ۲ (ستون شنی ارتعاشی) (Vibro Stone Column)

اجرای ستون شنی به منظور بهسازی و یا تحکیم خاک شامل جابجایی بخشی از لایه های فوقانی خاک های مسئله دار با یک ستون قائم متراکم شنی است که بایستی در لایه های ضعیف اطراف ستون شنی به خوبی نفوذ کرده باشد. وقتی از فشار آب در روند اجرای ستون شنی به منظور بهسازی و یا تحکیم خاک استفاده می شود این روش به نام روش جایگزینی ارتعاشی (Vibro Replacement or wet process) یا اجرای تر ستون شنی نامیده می شود. اما زمانی که اجرای ستون شنی در خاک هایی نیمه اشباع مانند توده خرده سنگی قدیمی باشد روند بهسازی خاک بدون فشار آب و به نام اجرای ستون شنی به روش خشک یا ارتعاشی جابجایی نامیده می شود. روش ستون شنی ارتعاشی مشتمل بر سه مرحله حفاری، تراکم و تسلیح و اجرای بالشتک شنی می باشد.



ستون شنی ارتعاشی

بهسازی خاک به روش ستون شنی ارتعاشی

### ۳ (جت گروتینگ) (Jet Grouting)

امروزه به منظور دستیابی به شرایط ژئوتکنیکی لازم جهت بهسازی خاک یا بهسازی زمین، آب بندی و پایدارسازی و ... از روش های تزریق پرفشار در خاک یا سنگ استفاده می شود. تزریق به طور کلی به دو نوع تزریق در سنگ و تزریق در خاک تقسیم بندی می شود. روش جت گروتینگ (تزریق با فشار بسیار بالا) به عنوان یکی از مؤثرترین روش های بهسازی خاک مطرح می باشد. تزریق با فشار بسیار بالا یا جت گروتینگ روشی برای اصلاح خاک است که در آن دوغاب، با فشار بسیار بالا و سرعت زیاد از طریق

نازل هایی به داخل خاک تزریق شده و باعث تخریب، تغییر، اصلاح و بهبود ساختار خاک می شود. طی این فرایند، ذرات خاک به صورت درجا با دوغاب مخلوط می شوند و توده ای همگن از خاک اصلاح شده به وجود می آید که به آن اصطلاحاً ستون خاک - سیمان اطلاق می شود. ستون های خاک - سیمان ایجاد شده از طریق روش تزریق با فشار بالا در داخل خاک (جت گروتینگ)، دارای مقاومت بالا، تغییر شکل پذیری اندک و نفوذپذیری پایین هستند و باعث تقویت خصوصیات خاک محل می شوند. جت گروتینگ تکنیکی بسیار مطمئن و کارا جهت اصلاح مقاومت، تحکیم و یا آب بند کردن تشکیلات بستر خاکی به صورت درجا می باشد

بهسازی خاک به روش جت گروتینگ یا تزریق پر فشار



جت گروتینگ

#### ۴ (اختلاط عمیق) (Deep Soil Mixing)

اختلاط عمیق خاک یا DSM یکی از روش های کاربردی بهسازی خاک در جهان است که با استفاده از تزریق مواد پایدار کننده ای نظیر سیمان یا آهک با استفاده از یک حفار با محور توخالی به صورت مکانیکی در خاک، باعث تولید ستون های خاک سیمانی و اصلاح مشخصات خاک می گردد. در این روش به وسیله اختلاط خاک با مصالح سیمانی توسط همزن هایی در عمق و ایجاد ستون های خاک سیمان مشخصات خاک بهبود می یابد. ضمناً با همپوشانی ستون ها قبل از گیرش کامل، دیوار های پیوسته ای زیر سطح زمین قابل احداث می باشند. بهسازی خاک به روش اختلاط عمیق یا -DSM





## ۵ (تراکم دینامیکی) (Dynamic compaction)

یکی از روش‌های بهسازی، روش تراکم دینامیکی است. این روش شامل اعمال ضربات تکراری با انرژی زیاد بر سطح خاک با استفاده از کوبه‌هایی با وزن ۵ تا ۴۰ تن از ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ متر است. تراکم دینامیکی خاک یکی از روش‌های تراکم عمقی خاک است.

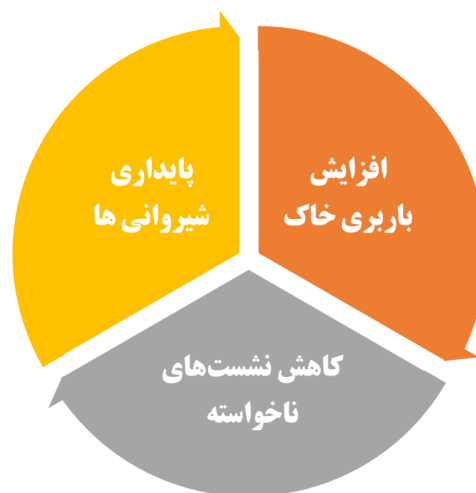


تراکم دینامیکی

بهسازی خاک به روش تراکم دینامیکی

از فواید تراکم می‌توان به:

- افزایش باربری خاک
  - کاهش نشست‌های ناخواسته
  - پایداری شیروانی‌ها
- اشاره کرد.



فواید تراکم دینامیکی

## ۶ (شمع) (Pile)

بر حسب شرایط تحت الارضی، سطح آب زیر زمینی و نوع باری که باید حمل شود، انواع مختلفی از شمع ها در کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می گیرد.



شمع

مراحل اجرای شمع بتنی درجا

مراحل اجرای شمع بتنی کوبشی - روش بهسازی خاک - شرکت ایستا سازه  
شمع ها بر حسب مصالحی که از آن ساخته می شوند، دارای انواع زیر هستند:

الف) شمع های فولادی

ب) شمع های بتنی

ج) شمع های چوبی

د) شمع های مرکب



انواع شمع ها

## ۷ (پیش بارگذاری) (fill surcharge preloading method)

پیش بارگذاری معمولاً به فرایند تراکم خاک زیر فشار عمودی گفته می شود که قبل از ساخت و قرار دادن بار سازه نهایی آن را اعمال می کنند.

بهسازی خاک به روش پیش بارگذاری

از انواع پیش بار گذاری می توان به موارد زیر اشاره کرد:

▪ **پیش بارگذاری به وسیله خاکریز**

ساده ترین روش برای **پیش بارگذاری**، بارگذاری به وسیله خاکریز است که با ریختن خاکریز بر روی خاک سست انجام می گردد.

▪ **پیش بارگذاری توسط خلاء یا ایجاد مکش**

در مواقعی که فراهم کردن خاک برای احداث خاکریز ممکن نیست یا منوط به صرف هزینه بسیار بالایی است و همچنین در جاهایی که خاک بستر، آن قدر نرم باشد که قرار دادن خاکریز باعث ایجاد مسائل پایداری شود، استفاده از روش خلاء در این مواقع مناسب و عملی است. در روش تحکیم به وسیله خلاء سربار یا بار مورد نیاز برای تحکیم با فشار اتمسفر جایگزین می شود.



انواع پیش بارگذاری

**(8) زهکشی یا کنترل تراوش آب (Drainage)**

از مشکلات بزرگی که در زمان انجام دادن گودبرداری پروژه های ساختمانی یا **زهکشی گودهای ساختمانی** با آن ها مواجه هستیم ورود آب به داخل محدوده گودبرداری است.



زهکشی ساختمان

علل ورود آب ممکن است یک یا چند مورد از موارد زیر باشد:

- جریان های زیرزمینی
- قنوات
- نشت فاضلاب از سیستم های دفع فاضلاب ساختمان های همسایه



علل ورود آب به داخل محدوده گودبرداری

زهکشی ساختمان را در واقع می توان موثرترین روش برای مهار چنین اتفاقاتی برای پروژه های ساختمانی دانست. معمولاً سیستم زهکشی گودهای ساختمانی کنار استفاده از عایق های ژئوممبران و یا آب بندی بتن مورد استفاده قرار می گیرد تا از سازه ها در برابر اتفاقات زیرزمینی محافظت کند و هم اینکه از ورود هرگونه رطوبت به درون سازه ها پیشگیری و جلوگیری نماید.

**(9) خاک مسلح یا ژئوسینتتیک (Geosynthetic)**

**خاک مسلح** مجموعه ای از خاکریز (معمولاً دانه ای) است که عناصر مسلح کننده در خاک به صورت تسمه، میلگرد هستند. خاک مسلح عموماً در مقابل فشار و برش مقاوم بوده، اما در مقابل کشش ضعیف است. در خاک مسلح وجود عناصر مسلح کننده در جهت کرنش کششی باعث بهبود رفتار خاک می شود (مشابه بتن مسلح). دیوارهای خاک مسلح در گروه دیوارهای انعطاف پذیر قرار دارند.



خاک مسلح یا ژئوسینتتیک



پایدارسازی گودهای عمیق (Deep excavations stabilization) به طور کلی به صورت زیر می باشد:

۱ (میخکوبی یا نیلینگ) (Nailing)

۲ (مهارگذاری یا انکراژ) (Anchorage)

۳ (ساخت از بالا به پایین یا تاپ دان) (Top & Down Construction)

۴ (مهار متقابل یا استرات) (Strut)

۵ (دیوار برلنی) (Berlin Wall)

۶ (سازه نگهبان خرپایی) (Truss Retaining Structure)

۷ (دیوار دیافراگمی) (Diaphragm Pile Wall)

۸ (سپرکوبی) (Sheet Pile)

۹ (خاک مسلح یا ژئوسنتتیک) (Geosynthetic)

۱۰ (پایش دیواره های گود) (Monitoring)

۱۱ (نقشه برداری) (Surveying)



### پایداری سازی گودهای عمیق

در هر یک از روش های پایداری سازی گودهای عمیق بنا به مقتضیات طراحی، عضوی به عنوان دیوار حائل می تواند وجود داشته باشد. این عضو می تواند دیوار دیافراگمی، شمع های بتنی، ستون های تزریق پر فشار (جت گروتینگ) و اختلاط عمقی، شمع های نگهدارنده فلزی، سپر یا اعضای مشابه باشد. البته در روش میخ کوبی معمولاً از یک لایه بتن پاششی (شاتکریت) به عنوان پوشش استفاده می شود. دیوارهای مختلف نگهدارنده هر یک دارای مزایا و محدودیت های ویژه ای بوده که به فرآیند پروژه ها می توان از هر یک یا تلفیق آن ها استفاده نمود.

#### ۱) نیلینگ یا میخکوبی خاک (Soil Nailing)

میخ کوبی دیواره ها یا نیلینگ به معنای تسلیح برجای توده خاک موجود با نصب میلگردهای فولادی (Nails) در فواصل نزدیک به هم در یک سطح شیبدار و یا در محل گودبرداری به صورت قائم و با اجرای از بالا به پایین (Top Down Construction) می باشد. میلگردها معمولاً داخل گمانه هایی که در دیواره خاکی حفاری می شود، قرار می گیرند که به منظور جلوگیری از خوردگی میلگردها و انتقال مناسبتر نیروها بین خاک و میلگرد توسط دوغاب سیمان پر می شوند. روش نیلینگ یک مقطع مسلح پایدار ایجاد می کند که توانایی نگهداری خاک پشت خود را دارد.

طراحی و اجرای پایداری سازی گودهای عمیق به روش میخ کوبی (نیلینگ)

روش میخ کوبی در سال ۱۹۶۰ میلادی برای اولین بار مورد بحث و بررسی قرار گرفت. این روش بر اساس روش سیستم مهاربندی و پیچ کردن سنگ ها می باشد. اولین بار این سیستم پایداری سازی برای حفر تونلی در استرالیا در سال ۱۹۶۰ به کار گرفته شد. در این تونل برای پایداری سازی از آرما تور، تزریق دوغاب سیمان و شاتکریت استفاده گردید. در سال های بعد نیز به مرور این روش در سطح جهان گسترش یافت. در ایران نیز استفاده از روش میخ کوبی در سال های اخیر توسعه چشمگیری یافته و یکی از کاربردی ترین روش ها به ویژه در ساخت و سازهای شهری می باشد. از دیدگاه اصول علمی مطرح در مهندسی ژئوتکنیک، روش نیلینگ به صورت مقاوم عمل کرده و اثر خود را از طریق اندرکنش خاک - میلگرد، حاصل از ایجاد تغییرشکل در خاک اعمال می کند. از این رو استفاده از سیستم نیلینگ در موقعیت هایی که حساسیت به تغییر مکان های ناشی از گودبرداری بالا بوده و یا در مجاورت سازه های حساس، قدیمی و فرسوده واقع هستند و یا شامل خاک های نرم و متوسط به لحاظ سختی و مقاومت هستند، به طور کلی توصیه نمی گردد.

#### مراحل روش اجرای نیلینگ

- در روش **نیلینگ**، میخ‌ها غالباً در کشش عمل می‌کنند ولی در شرایط خاصی، عملکرد خمشی و برشی آنها نیز در نظر گرفته می‌شود. اثر مسلح سازی میخ برای بهبود پایداری دیوار با دو عملکرد زیر حاصل می‌شود:
- افزایش نیروی قائم و در نتیجه افزایش مقاومت برشی سطح لغزش در خاک های اصطکاکی
- کاهش نیروی رانشی سطح لغزش در خاک های اصطکاکی و چسبنده
- پس از نصب میلگردهای تسلیح، یک دیواره سطحی کم ضخامت که معمولاً شامل شاتکریت همراه با یک لایه تسلیح سبک فولادی شبکه ای می‌باشد، سطح دیواره شیروانی یا گود را می‌پوشاند. هدف از اجرای این دیواره:
- جلوگیری از فرسایش سطحی خاک
- ایجاد سطح تمام شده مناسب تر برای ساخت و سازهای احتمالی بعدی
- هدف مهم تر ساخت این دیواره ها افزایش بازدهی عملکرد سیستم خاک تحکیم یافته به ویژه در بخش های نزدیک به دیواره گود می‌باشد.



اهداف اجرای شاتکریت

همچنین این لایه بتنی - فولادی به انتقال بهتر نیروهای محرک به المان های تسلیح، کمک شایانی می‌کند. پوشش نهایی (Facing) به ۲ صورت زیر قابل طراحی و اجرا می‌باشد:

- موقتی (Temporary)
- دائمی (Permanent)



پایداری سازی گودهای عمیق

نیلینگ یا میخ کوبی خاک روش نسبتاً جدیدی جهت پایدارسازی گودهای عمیق می باشد که به دلیل اقتصادی بودن و مزایای منحصر به فرد خود، به عنوان راه حل بسیار مناسبی در موارد مختلف کاربردهای فراوانی دارد:

- پایدارسازی شیب ها، شیروانی ها و ترانشه ها
- افزایش ظرفیت باربری
- محدود کردن تغییر شکل ها با ایجاد حداقل دست خوردگی در وضعیت طبیعی زمین



کاربردهای روش میخ کوبی (نیلینگ)

استفاده از روش نیلینگ، طی دو دهه اخیر در اکثر کشورهای پیشرفته و در حال توسعه جهت پایدارسازی گودبرداری ها و همچنین پایدارسازی شیب های طبیعی کاربرد وسیعی پیدا کرده است. برخی از کاربردهای وسیع این روش تسلیح خاک شامل پایدارسازی شیب های طبیعی و یا ترانشه های مجاور راه ها، تعریض راه ها، گودبرداری در مجاورت سازه های موجود، پایدارسازی و مقاوم سازی سازه های نگهبان قدیمی و ... می باشد.

پایدارسازی گود به روش میخ کوبی و مهارگذاری (نیلینگ و انکراژ) - خدمات شرکت عمرانی مهندسی ایستاسازه

### (2) انکراژ یا مهارگذاری (Soil Anchorage)

اصول اجرای روش مهارگذاری یا انکراژ مشابهت های فراوانی با روش نیلینگ (میخکوبی) دارد. تفاوت اصلی در اعمال نیروی پس تنیدگی برای المان تسلیح می باشد. گام های اجرایی مشابه روش میخکوبی و شامل خاکبرداری مقطعی، حفاری گمانه ها، نصب میلگرد تسلیح، تزریق دوغاب سیمان (در بخشی از طول گمانه)، بتن پاشی و نصب صفحه سر نیل و مهره می باشند. پس از گذشت مدت زمان مناسب جهت عمل آوری دوغاب سیمان، با نصب پایه جک، جک کششی و نیروسنج، نیروی پس تنیدگی تا مقدار مورد نظر طراحی به میلگرد تسلیح و دوغاب اطراف آن اعمال می شود.

طراحی و اجرای پایدارسازی گود به روش مهارگذاری (انکراژ) - شرکت ایستاسازه

مرحله اول: خاکبرداری تا تراز نصب اولین ردیف انکرها انجام می گردد.

مرحله دوم: حفاری گمانه جهت اجرای انکر انجام می گردد.

مرحله سوم: جایگذاری مهاری و تزریق

مرحله چهارم: پس از گیرش دوغاب، عملیات کشش و خاکبرداری و اجرای پوشش بتنی انجام می گردد.

در این روش امکان اجرای پوشش دائمی نیز در صورت نیاز وجود دارد. این پوشش ها نیز می تواند از نوع:

- بتن پاششی
- بتن پیش ساخته
- بتن درجا ریز



سایر انواع تکنولوژی های جدیدتر برای اجرای پوشش طرح دار و سازگار با محیط باشد.

در روش **انکراژ** انواع روش های تزریق جهت تأمین مقاومت قسمت گیردار وجود دارد.

### **(3) ساخت بالا به پایین یا تاپ دان (Top – Down Construction)**

در روش **ساخت بالا به پایین یا تاپ دان** به جای احداث سازه نگهبان، خود سازه اصلی از بالا به پایین اجرا و همزمان گودبرداری انجام می گردد. این روش با ایجاد تغییراتی در نحوه طراحی و محاسبات سازه و در اختیار داشتن برخی تجهیزات و امکانات خاص، در ساخت ایستگاه های مترو در اروپا به منظور کاهش زمان و هزینه های اجرائی و کاهش اختلال در ترافیک شهری و زندگی مردم به کار گرفته شد و به دلیل مزایای بالای آن در سال های اخیر در پروژه های بزرگ عملاً جایگزین روش ساخت سنتی گردیده است. پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا به پایین

ساخت و سازه ها به صورت سنتی که به روش ساخت پایین به بالا (Bottom-Up) معروف است با گودبرداری و سپس اجرای شالوده (فونداسیون) آغاز شده و با ساخت سازه اصلی و تکمیل سقف نهایی پایان می یابد. بر خلاف روش مذکور روش دیگری به نام Top-Down وجود دارد که بر خلاف روش سنتی با ساخت دیواره های دور، ستون ها و سقف نهایی آغاز و با تکمیل گودبرداری و ساخت شالوده (فونداسیون) سازه به اتمام می رسد. از مهمترین مزایای این روش می توان با حذف و یا به حداقل رساندن سطوح قالب بندی و حذف یا کاهش مهار های موقت اشاره نمود.

#### **مراحل روش اجرای ساخت از بالا به پایین یا تاپ دان**

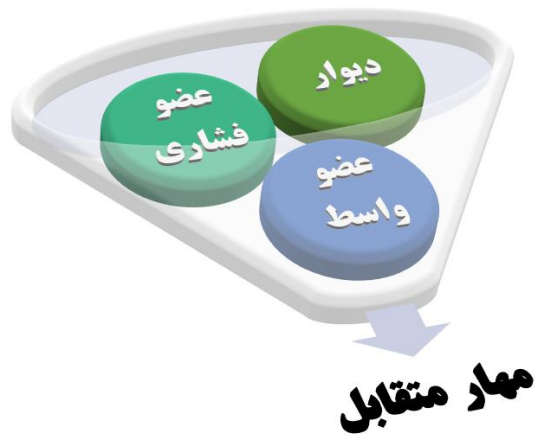
در روش ساخت از بالا به پایین یا **تاپ دان**، ابتدا دیوار دیافراگمی، شمع فولادی یا شمع بتنی در پیرامون احداث می گردد. پس از آن ستون های سازه همراه با یک شالوده (فونداسیون) از نوع عمیق یا نیمه عمیق اجرا گردیده و به ترتیب از بالا به پایین سازه اصلی همزمان با خاکبرداری اجرا می شود. چنانچه وضعیت خاک به لحاظ استحکام مناسب بوده و شرایط آب زیر سطحی نیز مساعد باشد می توان اجرای دیوار را نیز به صورت مرحله به مرحله همزمان با اجرای طبقات از بالا به پایین انجام داد. در این روش نیز می توان کل سازه و یا بخشی از آن را به صورت از بالا به پایین اجرا نمود. در صورتی که ابعاد پروژه در پلان کوچک باشد اجرای کل سازه زیرزمین به روش ساخت بالا به پایین به راحتی امکان پذیر است. در صورت وسعت زیاد در پلان اجرای نوار پیرامونی به روش از بالا به پایین و ناحیه مرکزی به روش ساخت پایین به بالا می تواند گزینه مناسب تری باشد. همچنین امکان تلفیق این روش با سایر روش های پایدارسازی نیز ممکن می باشد.

مراحل روش اجرای ساخت از بالا به پایین یا تاپ دان

### **(4) استرات یا مهارگذاری فشاری خاک (Braced Excavations – Struts)**

در روش **استرات** از مهارهای فشاری جهت انتقال فشار خاک استفاده می گردد. اجزای تشکیل دهنده این سیستم به طور کلی شامل موارد زیر است:

- دیوار که می تواند از نوع Sheet Pile، دیوار دیافراگمی، شمع های نگهبان فلزی یا بتنی و غیره باشد.
- اعضای فشاری به نام Brace یا Strut
- اعضای واسط بین دیوار و اعضای فشاری که Wale نامیده می شوند.



#### مهار متقابل

در این روش فشار خاک از طریق دیوار به **Wale** و از طریق **Wale** به **Strut** ها منتقل می شود و در نتیجه **Strut** ها و اتصال آنها بر اساس نیروی فشاری، **Wale** ها بر اساس نیروی برشی و خمشی و دیوار نیز بر اساس نیروهای ترکیبی طراحی می گردد. در روش **مهارگذاری فشاری خاک** ابتدا شمع های نگهبان پیرامونی به عنوان دیوار موقت اجرا شده و سپس در هر مرحله از گودبرداری **Wale** ها اجرا و **Strut** ها به آن متصل می گردند. اجرای پایدارسازی گود به روش مهارمتقابل (استرات) - توسط در این روش می توان از مدل سازی های ۲ بعدی یا ۳ بعدی استفاده نمود و حالات حدی نهایی و بهره برداری را کنترل و بر اساس نیروهای بدست آمده اعضای سازه ای را طراحی نمود. اعضای سازه ای عموماً فولادی بوده و مطابق آئین نامه های سازه های فولادی طراحی می گردند.

مراحل اجرای مهار متقابل (استرات)

#### (5) دیوار برلنی یا دیوار سولجر پایل (Berlin wall – Soldier Pile and Lagging System)

یکی از روش های پایدارسازی گود روش دیوار برلنی می باشد. این روش در واقع ترکیبی از شمع های بتنی یا فولادی و رویه بتنی (شاتکریت) می باشد. جهت گیرداری شمع های فولادی و بتنی حدود ۲۵ درصد از طول آنها به عنوان ریشه شمع در نظر گرفته می شود. جهت جلوگیری از ریزش های موضعی بین شمع ها از رویه های بتنی درجا یا پیش ساخته استفاده می گردد.

پایدارسازی گود به روش ترکیبی دیوار برلنی و مهارگذاری

جهت اجرای رویه های بتنی درجا، پس از خاکبرداری شبکه میلگرد فولادی (مش) بین شمع ها قرار داده شده و سپس به وسیله بتن پاشی (شاتکریت) یک رویه بتنی بین شمع ها ایجاد می گردد.

جهت پایدارسازی گودهای عمیق از ترکیب **دیوار برلنی** با میخ کوبی (نیلینگ) و یا مهارگذاری (انکراژ) نیز استفاده می گردد.

مراحل اجرای دیوار برلنی

#### (6) سازه نگهبان خرپایی (Truss Retaining Structure)

در روش اجرای **سازه نگهبان خرپایی** که یکی از روش های پایدارسازی گودهای نیمه عمیق است، فشار خاک وارد بر دیواره گود از طریق اعضای افقی و مورب به کف گود منتقل می گردد.

اعضای قائم می تواند به صورت فلزی یا بتنی باشند. اعضای افقی و مورب خرپا معمولاً به صورت فلزی ساخته می شوند.

طراحی و اجرای پایدارسازی گود به روش سازه نگهبان خرپایی - شرکت ایستاسازه

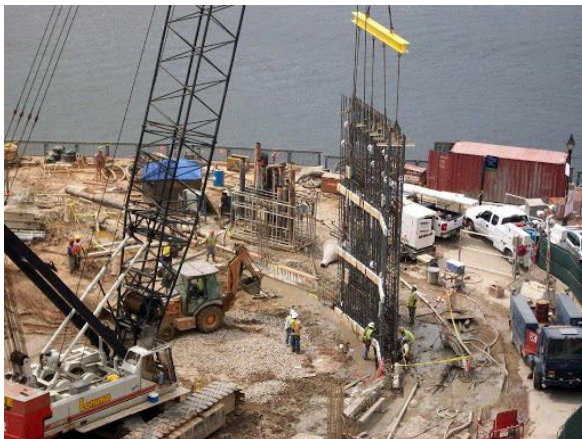
سازه نگهبان خرابایی مناسب برای گودهای با عمق کمتر از ۱۴ متر و نسبت عرض به عمق گود بزرگتر از پنج هستند. در گودبرداری های عمیق تر تأمین شیب ایمن و محدود نمودن تغییرشکلها در حد مجاز دشوار بوده و توصیه می شود در صورت امکان از روش های جایگزین استفاده گردد. در طراحی کلیات و چیدمان اعضای سازه نگهبان خرابایی، به منظور پیشگیری از بروز پدیده خرابی پیشرونده توصیه می شود که درجه نامعینی سازه تا حد امکان افزایش داده شود. مراحل اجرای سازه نگهبان خرابایی

### (7) دیوار دیافراگمی یا دیوار دوغابی (Diaphragm walls – Slurry walls)

**دیوار دیافراگمی** یا دیوار دوغابی یکی از روش های پایدارسازی گودهای عمیق می باشد. در این روش جهت حفاظت از ریزش دیواره گود، دیواره ای بتنی اجرا می گردد. گاهی مواقع جهت پایدارسازی گود از ترکیب روش های دیگر پایدارسازی با این روش استفاده می گردد.

جهت اجرای این دیواره از دستگاه های حفاری ویژه ای به نام هیدروفرز یا گراب (grab) استفاده می گردد. برای جلوگیری از ریزش های موضعی دیواره حفاری شده از دوغاب بنتونیت استفاده می گردد. بعد از اتمام حفاری دیوار دیافراگمی، میلگرد گذاری انجام می گردد و در نهایت کل قسمت حفاری شده با استفاده از لوله ترمی بتن ریزی می گردد و یک دیوار بتنی ایجاد می گردد. لوله ترمی، لوله ای است که به وسیله آن بتن در تراز پایین گود ریخته می شود با این کار در زمان بتن ریزی، بالا بودن وزن مخصوص بتن نسبت به بنتونیت، موجب بالا آمدن بنتونیت گردیده و بنتونیت بالا آمده برای استفاده مجدد قابل جمع آوری می باشد.

پایدارسازی گود به روش دیوار دیافراگمی

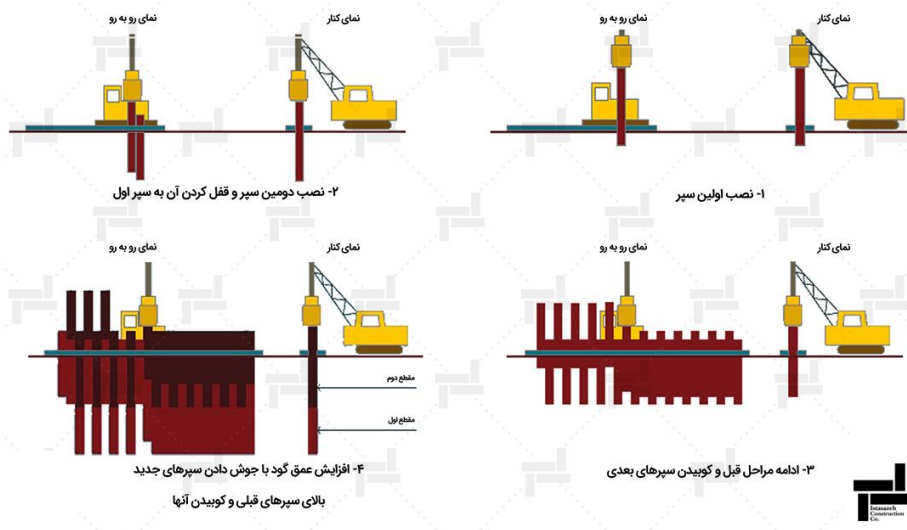


ضخامت دیوارهای دیافراگمی بین ۶۰ تا ۱۰۱ متر متغیر است. دیوار به صورت پانل های با عمق متناسب با عمق گود ساخته می شود. عرض پانل ها بین ۲ تا ۶ متر است. مقطع این گونه دیوارها اصولاً به صورت مستطیلی ساخته می شوند اما سایر اشکال مانند T و L برای اهداف خاص قابل استفاده است.

### (8) سپرکوبی (Sheet Pile)

سپرکوبی روشی بهینه و مقرون به صرفه نسبت به دیوار حائل بتنی و دیوار بتنی سکانت می باشد. در روش **سپرکوبی** نیاز به گیرش بتن نیست و می توان گودبرداری را بعد از اتمام کوبش سپرها شروع کرد. بنابراین زمان اجرای پروژه نسبت به روش های مشابه کمتر می باشد.

پایدارسازی گود به روش سپرکوبی



### مراحل اجرای سپر کوبی

### ۹) خاک مسلح یا ژئوسنتتیک (Geosynthetic)

کلمه ژئوسنتتیک از دو قسمت “ژئو (Geo)” و “سنتتیک (Synthetic)” تشکیل گردیده است. از کلمه “ژئو” در جایی استفاده می شود که مربوط به زمین باشد و از “سنتتیک” در جایی استفاده می شود که ماده، مصنوعی و ساخته دست بشر باشد. ژئوسنتتیک یا **خاک مسلح** به محصولاتی که مشکلات ژئوتکنیکی و خاکی را برطرف می کنند، اطلاق می گردد. چند محصول که به نام خاک مسلح نام برده می شود، عبارتند از:

- ژئوتکستایل (geotextile)
- ژئوگرید (geogrid)
- ژئوممبران (geomembrane)
- ژئونت (geonet)
- جی سی ال یا ژئوسنتتیک کلی لاینر (geosynthetic clay liner)
- ژئوفوم (geofoam)
- ژئوسل (geocell)
- ژئوکامپوزیت (geocomposite)



انواع مختلف خاک مسلح (ژئوسنتتیک)

طبیعت پلیمری محصولات نام برده شده باعث دوام زیادی در آنها می شود. ژئوسنتتیک ها در اشکال مختلف و مصارف مختلف ژئوتکنیکی، حمل و نقلی، زیست محیطی و هیدرولیکی در موارد زیر استفاده می گردند:

جاده ها، فرودگاه ها، خطوط راه آهن، سدهای خاکی، دیوارهای حائل، استخرهای ذخیره آب، سدها، کانال ها، کنترل فرسایش، کنترل رسوب، بستر لندفیل ها، پوشش لندفیل ها، معادن، پرورش آبزیان و کشاورزی.

هنگامی که از ژئوسنتتیک ها در تماس با خاک، سنگ یا هر مصالح مهندسی دیگر استفاده می شود همواره یک یا چند عملکرد از عملکردهای تسلیح، جداکنندگی، فیلتراسیون، زهکشی، آب بندی و حفاظت مورد انتظار می باشد.



انواع مختلف خاک مسلح (ژئوسنتتیک)

### 10) پایش دیواره های گود (Monitoring)

با توجه به پیشرفت روز افزون در صنعت ساختمان، حساسیت ساخت و نگهداری سازه های جدید نیاز به دقت و بررسی بیشتری دارد. زیرا همان طور که سازه های جدید در زندگی انسان ها مفید و راهگشا هستند، عدم دقت در طراحی، بهره برداری و نگهداری آنها ممکن است حوادث جبران ناپذیری ایجاد کند. بنابراین جهت حفظ دقت، نیاز به استفاده از روش ها و ابزار اندازه گیری خاصی می باشد. علم ژئوماتیک یکی از علمی است که جهت اندازه گیری های دقیق به کار می رود. در این علم از روش های مختلفی

جهت اندازه گیری های دقیق استفاده می گردد که میکروژئودزی یکی از مهمترین روش های موجود است. میکروژئودزی (ژئودزی در مقیاس کوچک) یعنی تعیین موقعیت سازه و یا منطقه ای کوچک به طوری که اثر کرویت زمین در آن مطرح نمی شود. موقعیت و شکل هر سازه ای به مرور زمان تغییر می یابد. مانند تغییرشکل پل ها در اثر عبور ماشین های سنگین، تغییرشکل سدها در اثر نیروی فشار آب، نشست زمین در راستای قائم در اثر حفاری ها و تخلیه منابع زیرزمینی و همچنین تغییر مکان دیواره های گود در اثر گودبرداری، خاکبرداری و پایدارسازی گود. بنابراین به طور خلاصه می توان گفت: مجموعه اقداماتی که به وسیله ابزار دقیق، جهت رفتار سنجی و بررسی حرکات یک سازه بزرگ مانند سد، پل، مخازن نفتی، سازه های مجاور گودبرداری و ... با دقت بسیار زیاد و با استفاده از مشاهدات و محاسبات ژئودتیک انجام می گردد را میکروژئودزی می نامند.

### پایش دیواره های گود

از جمله نتایج استفاده از سیستم های ابزار دقیق جهت پایش و رفتارسنجی (پایدارسازی گودهای عمیق) می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- کاهش هزینه ها: یک طرح ایزاربندی مناسب و قابل اعتماد در شرایط حساس همچون وجود خاک هایی با قابلیت فشردگی زیاد و یا موارد دیگر، باعث کاهش چشمگیر احتمال وقوع خطرات می شود. کاهش ریسک طرح، باعث افزایش ضرایب اطمینان در مرحله اجرا می شود. این موضوع نیز باعث کاهش هزینه ها خواهد شد.
  - تقلیل ضرایب اطمینان: بدون ایزاربندی و اندازه گیری های لازم، انتخاب پارامترهای طراحی بر اساس فرضیاتی صورت می گیرد که این فرضیات محافظه کارانه بوده و در نتیجه ضرایب اطمینان طرح و هزینه ها بالا خواهد بود.
  - تغییر در طرح: در صورتی که با توجه به شرایط، طراحی های انجام شده پاسخگو نباشد، اطلاعات حاصل از ایزاربندی در فازهای اولیه پروژه نیاز به ایجاد تغییرات در طراحی را مشخص می کند.
  - کنترل روند و روش عملیات اجرایی: ابزار دقیق در عملیاتی همچون تثبیت و اصلاح خاک و پایش بارگذاری، اطلاعاتی را در خصوص روند پیشرفت عملیات نشان می دهد. برای مثال کنترل کفایت تعداد زهکش های به کار رفته در پایش بارگذاری، توسط ابزار دقیق قابل بررسی می باشد.
  - ایمنی: ایزاربندی خطرات احتمالی را پیش از وقوع، هشدار می دهد به ویژه در مسائل مربوط به پایداری شیب ها فرصتی را برای تکمیل عملیات جهت رفع خطر و یا ترک محل فراهم می آورد.
- علاوه بر بحث پایش، کنترل کیفیت اجزای سازه نگهبان در حین اجرا نیز اهمیت ویژه ای دارد. از موارد کنترلی اجرای سازه نگهبان می توان به آزمایشات کنترل کیفیت بتن و میلگرد اشاره نمود.
- آزمایش های کنترلی و کنترل های حین اجرا شامل اجزای مختلف سازه نگهبان مانند میخ و مهارهای کششی نیز می گردد. انواع آزمایش های کششی بارگذاری، سیکل های بارگذاری و باربرداری، تست خزش و بارگذاری تا حد نهایی از این دست آزمایشات می باشند.

### 11) نقشه برداری (Surveying)

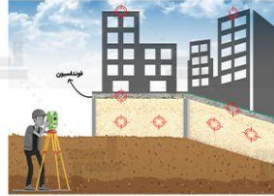
مهندسی نقشه برداری یکی از رشته های فنی - مهندسی دانشگاهی است که به روش های مختلف جمع آوری اطلاعات زمینی به منظور تهیه نقشه برای کاربران مختلف از روش های متفاوت می پردازد. نقشه یکی از اولین و ضروری ترین مشخصه هر فعالیت عمرانی نظیر پایدارسازی گود، بهسازی بستر، احداث راه، خطوط انتقال نیرو و آب، احداث تونل و مترو و ... می باشد.

#### نقشه برداری دو مرحله دارد:

- اندازه گیری: از دستگاه ها و روش های مختلف جهت به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز مرحله دوم استفاده می شود.
- ارائه نتایج: نتایج کار به صورت های زیر ارائه می گردد:  
آنالوگ (نقشه، مقاطع طولی و عرضی و ...)

رقمی (مانند جدول ها، مدل های رقمی زمین

### مراحل نقشه برداری:



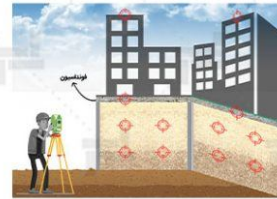
مرحله ۲  
نصب تارگت ها (نقاط نشانه) روی تاج گود  
و عوارض مجاور گود



مرحله ۱  
جانمایی نقاط صفر صفر زمین



مرحله ۴  
گزارش روند تغییر مکان های به سمت گود  
و نشست آن



مرحله ۳  
نصب تارگت های مراحل بعدی دیواره گود



مراحل نقشه برداری



### الف) مطالعات خاک (مطالعات ژئوتکنیک):

مطالعات ژئوتکنیک خاک) مطالعات خاک)، شناسائی وضعیت لایه بندی زیر سطحی و ویژگی های مهندسی خاک پیش نیاز تمامی پروژه های عمرانی است. محورهای فعالیت و ارائه خدمات شرکت عمرانی مهندسی **ایستاسازه** در بخش مطالعات ژئوتکنیک خاک:

- شناسایی های ژئوتکنیکی و مطالعات دفتری
- بازدید محلی: شامل جمع آوری اطلاعات ژئوتکنیکی موجود محلی، مطالعه نقشه های توپوگرافی، عکس های هوایی و ماهواره ای
- برنامه ریزی برای شناسایی های ژئوتکنیکی
- بررسی های زیر سطحی: شامل عملیات حفاری، گمانه زنی و اخذ نمونه های آزمایشگاهی، انجام آزمون های برجا
- انجام آزمون های آزمایشگاهی
- ارزیابی و تفسیر نتایج و ارائه پیشنهادات طراحی

انجام عملیات شناسایی در حین اجرا، در صورت نیاز، شرایط پروژه، محدودیت‌ها و اهمیت هر یک از مراحل اشاره شده می‌تواند موجب تغییر در ترتیب متداول گردد.

### برنامه‌ریزی شناسایی‌های ژئوتکنیکی

غالباً در شناسایی‌های ژئوتکنیکی به تدریج با پیشرفت عملیات شناسایی و کسب اطلاعات بیشتر از ساختگاه برنامه‌ریزی اولیه می‌تواند دچار تغییر شود. تبادل نظر بین مهندس طراح و مهندس مطالعات ژئوتکنیک در تدوین برنامه مطالعات الزامی بوده و تعیین ترتیب عملیات شناسایی بر عهده طراح است. ایستاسازه برنامه‌ریزی اولیه مطالعات ژئوتکنیکی را با تعیین موارد زیر براساس آیین‌نامه و مراجع، اطلاعات موجود ساختگاه و قضاوت مهندسی تنظیم می‌کند.

- پارامترهای مورد نیاز و میزان دقت تخمین آنها
  - آرایش، فاصله و عمق گمانه‌ها و چال‌های شناسایی
  - تعداد، عمق، روش و نوع نمونه‌گیری (دست‌خورده و یا دست‌نخورده)
  - نوع و تعداد آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی مورد نیاز
  - هزینه‌های شناسایی‌های ژئوتکنیکی
- معمولاً شناسایی‌های مطالعات ژئوتکنیکی کافی هزینه‌هایی در حدود ۰٫۲۵ تا یک درصد هزینه کل پروژه را شامل می‌شود. درصد هزینه معمولاً با افزایش هزینه کل پروژه کاهش یافته و ممکن است به ۰٫۱ درصد نیز برسد. تحقیقات نشان داده است در بسیاری موارد انجام شناسایی‌های دقیق‌تر ژئوتکنیکی منجر به کاهش هزینه کل پروژه به میزان چندین برابر هزینه شناسایی می‌گردد.

### خدمات و اهداف شناسایی‌های ژئوتکنیکی

- مطالعات دفتری و مقدماتی ساختگاه پروژه‌های عمرانی بر اساس اطلاعات معتبر منتشر شده از دیگر ساختگاه‌ها و شناسایی‌های انجام شده در گذشته، نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و بازدید محلی
- کسب پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس محاسبات معکوس ساخت سازه‌های مجاور (Back Analyses)
- حفاری چال‌ها و ترانسه‌های شناسایی-اکتشافی (Test Pits) و گالری‌های افقی
- حفاری گمانه‌های شناسایی-اکتشافی و نمونه‌گیری از مصالح خاک و سنگ
- انجام آزمون‌های **صحرایی**
- انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های تهیه شده در عملیات صحرایی

### آزمایش‌های مربوط به مطالعات ژئوتکنیک

مطالعات ژئوتکنیک در دو حوزه **صحرایی** (میدانی) و **آزمایشگاهی** انجام می‌شود. ابتدا متخصصین ما با بررسی دقیق محل احداث پروژه، اطلاعات و داده‌های لازم را جمع‌آوری می‌کنند و سپس در آزمایشگاه خاک تمامی آزمایش‌های مربوطه شامل تست‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیک خاک را انجام خواهند داد و در نهایت با گزارش مکتوب و رسمی وضعیت موجود را به کارفرما ارائه می‌دهند. مطالعات ژئوتکنیک خود شاخه‌ها و فرآیندهای گوناگونی را شامل می‌شود که هر کدام نیازمند تخصص و دستگاه‌های مختص به خود است. در ادامه مهم‌ترین بخش‌های مربوط به مطالعات و بررسی‌های مطالعات ژئوتکنیکی را بیان می‌کنیم.

#### حفاری در مطالعات ژئوتکنیک

در آزمایش‌های ژئوتکنیک، فرآیند حفاری نقش کلیدی را به منظور استخراج داده‌های زیرزمینی و لاگ‌های مربوطه ایفا می‌کند. آزمایشاتی نظیر SPT، CPT، لوفران بار افتان و بار خیزان و لوژان آزمایشاتی هستند که حین حفاری صورت می‌گیرند.

- تجهیزات آزمایش لوژان

- تجهیزات حفاری

تجهیزات-آزمایش SPT-

پکر جهت آزمایش لوژان



جعبه نگهداری نمونه های حفاری شده

آزمایش برش برجا

از این روش به منظور سنجش پارامتر های مقاومتی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به صورت برجا در مطالعات ژئوتکنیک استفاده می شود. تعیین شرایط گودبرداری و برآورد دقیق ضریب اطمینان و ظرفیت باربری پی های خاکی از نتایج **آزمایش برش برجا** می باشد.

آزمایش برش برجا

آزمون بارگذاری صفحه

هدف از آزمون بارگذاری صفحه، تحلیل خاصیت نشست پذیری در خاک و سنگ منطقه احداث پروژه است که بر روی مصالح با بهره گیری از صفحات مربعی یا دوار به صورت بارگذاری تدریجی مرحله ای در عمق مورد نظر اجرا می گردد و در تعیین مدول الاستیسیته و خاصیت نشست پذیری نقش کاربردی دارد.

### ب (مطالعات لرزه خیزی)

لرزه نگاری به عنوان یکی از شاخه های **ژئوفیزیک** شناخته می شود و مطالعه علمی گسترش امواج الاستیک در زمین می باشد. جهت تعیین لرزه خیزی مناطقی که با کمبود اطلاعات و داده ها مواجه هستند، باید ارزیابی احتمالاتی انجام دهیم.

برای طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله، شناخت جنبش نیرومند زمین که انتظار می رود در طول عمر مفید سازه رخ دهد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بهترین راه برای شناخت ویژگی های جنبش نیرومند زمین، به دست آوردن نمودار حرکت زمین از جمله شتاب نیرومند زمین در هنگام رویداد زمین لرزه های متوسط تا بزرگ می باشد و این امر بوسیله دستگاه شتابنگار موجود در محل و رخداد زمین لرزه در گستره نزدیک میسر می شود. که برای نیل به این هدف مطالعات تحلیل خطر و لرزه خیزی انجام می گیرد که به طور خلاصه شامل موارد ذیل می باشد:

- بررسی اجمالی زمین شناسی و لرزه شناسی عمومی منطقه طرح
  - تعیین گسله های لرزه زای موجود در منطقه
  - برآورد شتاب مبنای افقی و قائم بستر جهت استفاده در طراحی سازه ای
  - برآورد خطرات جانبی ساختگاه مانند گسلش
  - برآورد طیف پاسخ زمین
  - آزمایشات لرزه نگاری درون گمانه ای
- در مطالعات و آزمایشات ژئوتکنیک به منظور شناخت لایه بندی خاک و مقاومت لایه ها از این دست از تست ها استفاده می شود. در آزمایش درون گمانه ای بر اساس سنجش سرعت انتشار امواج فشاری و برشی، اطلاعات کاملی از زمین محل پروژه به دست می آید.

آزمایش بارگذاری صفحه

مطالعات لرزه نگاری در ژئوتکنیک

یکی از شاخه های مهم ژئوفیزیک، لرزه نگاری می باشد که در جهت بررسی و مطالعات مربوط به امواج الاستیک در زمین بحث می نماید. لرزه نگاری جهت مطالعه تخصصی علت وقوع زلزله و امواج ناشی از آن است که در مطالعات ژئوتکنیک نقش اساسی دارد:

### ج (مطالعات ژئوفیزیک)

#### انجام آزمون های ژئوفیزیک

- مطالعه و تعیین وضعیت سطوح آب زیرزمینی ساختگاه
- تعیین ضخامت و جنس لایه های خاک و عمق سنگ بستر

- ارائه مبانی، معیارها و پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی با توجه به سطح اهمیت و حساسیت پروژه
  - گردآوری پارامترهای مورد نیاز برای طراحی و پیشنهاد روش ترمیم سازه‌های در معرض گسیختگی
  - مطالعه تاثیر اجرای پروژه مورد نظر بر محیط و سازه‌های مجاور
  - کنترل ایمنی فرضیات طراحی و روش ساخت پروژه‌های ژئوتکنیکی، همزمان با مرحله ساخت
  - مطالعه ساختگاه در صورت مواجهه با شرایط ژئوتکنیکی پیش بینی نشده
- آزمایشات ژئوفیزیکی در مطالعات ژئوتکنیک
- در آزمایشات ژئوتکنیک می توان با توجه به سرعت و سهولت روش های ژئوفیزیکی نسبت به روش های حفاری و هزینه به صرفه تر این روش ها، از این نوع آزمایش ها در ترسیم پروفیل خاک و تفسیر نتایج حاصله استفاده نمود.
- تجهیزات آزمایش دانهول

#### آزمایش GPR

یکی از روش های ژئوفیزیکی، رادار نفوذی زمین یا GPR است که جهت به دست آوردن اطلاعات تصویری از سطوح زیر زمینی از سیگنال های الکترومغناطیسی بهره می برد. از نتایج این روش می توان به تعیین موقعیت تاسیسات زیرزمینی، تعیین ضخامت بتن و وضعیت شکستگی های آن، سنجش تراکم و بسیاری از موارد دیگر اشاره کرد.

آزمایش ژئوالکتریک

در این فرآیند با انتقال جریان الکتریکی به زمین، اطلاعات دقیقی از وضعیت خاک و سنگ احداث و ساخت پروژه به دست می آید. مشاورین ما با بهره گیری از جدیدترین دستگاه های تست و بررسی آماده ارائه دقیق ترین تحلیل ها به شما هستند.

#### د) زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی

مطالعات **زمین شناسی** مهندسی پروژه های عمرانی، تهیه نقشه های زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی و نقشه های آلودگی خاک، مطالعات کمی و کیفی منابع آب سطحی و زیر زمینی، مسیریابی خطوط انتقال نیرو، مطالعات مکان یابی، مطالعات زمین شناسی مهندسی شهری، اکتشاف حفرات زیرزمینی و کانال های مدفون، مطالعات زیست محیطی، مطالعات ریز پهنه بندی لرزه ای، برآورد خطر زمین لرزه، مطالعات اثرات ساختگاهی و برآورد طیف ساختگاه، و ارزیابی مخاطرات زمین شناسی (خطر گسلش، روانگرایی، لغزش، خاکهای مشکل آفرین و غیره) از جمله فعالیتهای این بخش می باشد. رؤس این موارد به شرح زیر است:

- مطالعات **زمین شناسی** مهندسی کلیه پروژه های عمرانی
- تهیه نقشه های زمین شناسی مهندسی و زیست محیطی
- مطالعات منابع آب سطحی و زیر زمینی
- مسیریابی خطوط انتقال نیرو
- تهیه نقشه های آلودگی خاک
- مطالعات زمین شناسی شهری
- اکتشاف حفرات زیرزمینی و کانالهای مدفون
- مطالعات آلودگی منابع آب و خاک
- مطالعات زیست محیطی معادن و پروژه های مهندسی
- مطالعات مکان یابی مراکز دفن پسماندهای ویژه و خطرناک

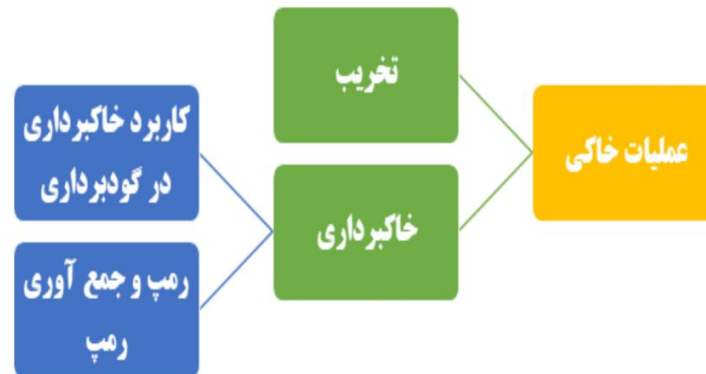
#### اجرای عملیات خاکی (تخریب و خاکبرداری Execution of earth operation)

محورهای فعالیت و ارائه خدمات شرکت عمرانی مهندسی **ایستاسازه** در بخش عملیات خاکی پروژه ها به طور کلی شامل دو بخش زیر می باشد:

#### تخریب

## خاکبرداری

- کاربرد خاکبرداری در **گودبرداری** ساختمان ها
- رمپ و جمع آوری رمپ در گودبرداری و خاکبرداری



اجرای عملیات خاکی (تخریب و خاکبرداری)

## تخریب

- با توجه به اینکه **تخریب** اولین مرحله از ساخت و ساز است و تولید نخاله ساختمانی می کند، می تواند اثرات فراوانی بر محیط زیست وارد آورد. ضمناً تخریب ساختمان می تواند باعث آسیب جانی و مالی شود و همچنین سلامت کارکنان پروژه را به خطر بیندازد و به محیط اطراف آسیب برساند.
- تخریب **ساختمان** با استفاده از بیل مکانیکی
- مسأله تخریب در شهر تهران به طور خاص مورد توجه قرار نگرفته و آیین نامه ای برای آن تهیه نشده است. البته به صورت پراکنده مقرراتی برای تخریب در نشریه ها و آیین نامه ها بیان گردیده است:
- مبحث دوازدهم مقررات ملی ساختمان
- نشریه مشخصات عمومی کارهای ساختمانی سازمان مدیریت
- آیین نامه حفاظت کارگاه های ساختمانی وزارت کار و امور اجتماعی

## خاکبرداری

- کلیه فعالیت های مربوط به تخریب، حفاری و کندن هر نوع زمین، انباشتن، جابجایی، بارگیری و حمل هرگونه مصالح خاکی در محدوده پروژه و یا خارج از آن (در صورت لزوم) که مرتبط با فعالیت های موضوع پیمان باشد را **خاکبرداری** گویند. این عملیات به طور عمده با استفاده از ماشین آلات و تجهیزات سبک و یا سنگین راه سازی انجام می گیرد، هرچند ممکن است در صورت لزوم و بسته به شرایط، از روش های دستی و یا روش های انفجاری نیز استفاده گردد.
- استفاده از بیل مکانیکی دکل بلند جهت خاکبرداری و جمع آوری رمپ **پروژه فرشته - کوهیار** شرکت ایستاسازه
- یکی از فعالیت های مرتبط با **خاکبرداری** و گودبرداری، تسطیح و تنظیم (رگلاژ) دیواره می باشد. به کلیه فعالیت های مرتبط با تسطیح، آماده سازی، هموارسازی، حذف زوائد، پرکردن حفرات و غیره، در کلیه سطوح خاکبرداری، به منظور ایجاد بستر مناسب برای اجرای لایه زهکش و یا نصب شبکه فولادی، در جهت انجام فعالیت های مرتبط با موضوع پیمان رگلاژ گویند. این عملیات به طور عمده با استفاده از نیروی انسانی و تجهیزات سبک صورت می گیرد، هرچند ممکن است در صورت نیاز، از ماشین آلات و مصالح و یا سایر روش های دیگر استفاده گردد.
- عملیات رگلاژ به منظور ایجاد بستری صاف و هموار برای نصب و اجرای زهکش (در صورت وجود) و شبکه فولادی ایجاد می گردد و به طور عمده با استفاده از نیروی انسانی و ابزار و تجهیزات سبک، انجام می گیرد.

بدین منظور زوائد و بیرون زدگی های سطح، مانند قلوه سنگ ها و یا برجستگی هایی که بعد از خاکبرداری باقی مانده است، در صورتی که ارتفاع بیرون زدگی بیش از رواداری ضخامت شاتکریت باشد، باید زدوده شود. در غیر این صورت فاصله شبکه فولادی از سطح دیواره و ضخامت شاتکریت از محل برجستگی ها محاسبه می شود.

زوائد بزرگ مانند قطعات بولدر، در صورتیکه عمده حجم آن بیرون از سطح قرار گرفته باشد باید به نحو مطلوبی زدوده شود. روش حذف این زوائد باید به گونه ای باشد که آسیبی به نقاط مجاور نرساند. در صورتی که بخش عمده قطعات سنگی بزرگ در داخل خاک قرار داشته باشد، حفظ آن مشروط بر آنکه مشکل پایداری کلی یا موضعی ایجاد ننماید مجاز می باشد، در غیر این صورت باید قسمت بیرون زده به نحو مناسبی تخریب گردد. تورفتگی های موضعی که در زمان اجرای پوشش سطحی به وسیله شاتکریت پر می شود و خللی در نصب مش ایجاد نمی کند. نیازی به رگلاژ و ترمیم ندارد. تورفتگی های قابل توجه (از لحاظ عمق یا وسعت) که باعث صعوبت نصب مش و یا بروز مشکلات فنی یا اجرایی برای هریک از فعالیت های اجرای سازه نگهبان نماید، می بایست به نحو مناسبی پر شود.

موارد فوق الذکر عمدتاً ناظر بر عملیات خاکی در محدوده تقریباً ۱۰ متری از خط پروژه می باشد. عملیات خاکی در داخل گود، به فاصله حداقل ۱۰ متر از خط پروژه، با روش های مورد تأیید و تحت نظر دستگاه نظارت، به صورت تقریباً یکنواخت (حداکثر اختلاف تراز ۱۰ متر و حداکثر شیب کلی ۱۰٪) در کف گود و متناسب با پیشرفت اجرای سازه نگهبان، انجام خواهد گرفت.

#### کاربرد خاکبرداری در گودبرداری ساختمان ها

خاکبرداری به صورت قسمت بندی (پنل بندی) شده از سر ترانشه شروع شده و در ادامه طی مرحله های خاکبرداری، با ارتفاع و طول مشخص، ادامه پیدا می کند. عملیات خاکبرداری در داخل گود به فاصله حداقل ۵/۰ متر از خط پروژه، با استفاده از ماشین آلاتی چون لودر (که دقت اجرایی کمتری دارند) امکان پذیر می باشد، ولی محدوده ۵/۰ متری از خط پروژه باید با استفاده از ماشین آلاتی با دقت بالاتر مانند بیل مکانیکی خاکبرداری گردد. اولین مرحله خاکبرداری دارای ارتفاعی که خاک بتواند در کوتاه مدت (حدود ۲۴ تا حداکثر ۴۸ ساعت) بدون محافظت پایدار بماند و حداکثر ۲ متر (معادل عرض ورق شبکه های فولادی) خواهد بود. ارتفاع مراحل بعدی خاکبرداری نیز حداکثر به اندازه عرض یک شبکه فولادی یا کمتر، طبق نظر دستگاه نظارت (براساس شرایط پایداری دیواره) خواهد بود. خاکبرداری بدون اجرای سازه نگهبان (یا حداقل اجرای پوشش سطحی، در ترازهایی که طبق نقشه ها نیلی در پنل خاکبرداری شده وجود ندارد) با ارتفاع بیش از عرض یک شبکه فولادی در حالت عادی مجاز نمی باشد، مگر اینکه به وسیله محاسبات امکان آن تأیید شده باشد. در غیر این صورت، پیمانکار باید پیشنهاد اصلاحی خود را به دستگاه نظارت اعلام و در نهایت طبق نظر دستگاه نظارت نسبت به انجام اقدام اصلاحی در اسرع وقت اقدام نماید.

خاکبرداری پروژه سعادت آباد - سایه پارک - شرکت ایستاسازه

طول هر قسمت (پنل) خاکبرداری بسته به وضعیت دیواره گود متغیر می باشد. به طور کلی طول پنل های خاکبرداری ۶ متر می باشد. در خاکهای ریزشی، یا سست و کم مقاومت، یا در مواردی که پایداری و جابجایی های دیواره گود در صورت پنل برداری با طول زیاد مورد تردید می باشد، حداکثر طول هر پنل می تواند طبق نظر دستگاه نظارت تا مقدار معادل فاصله افقی دو نیل مجاور کاهش یابد. در زمین های دارای مقاومت کافی، حداکثر طول مجاز پنل تابع نیل توان اجرایی پیمانکار می باشد. معمولاً بحرانی ترین وضعیت ناپایداری در زمان اجرا دیده می شود. پس از حفاری و قبل از اجرای شاتکریت و نیل گذاری بیشترین احتمال وقوع ناپایداری وجود دارد. بدین منظور پس از هر مرحله حفاری می بایست وضعیت ظاهری شیب مورد توجه قرار گیرد. شکم دادگی و دیده شدن جابجایی های بیش از حد، از مواردی است که می تواند مقدمه ای برای رخداد ناپایداری و ریزش باشد. در صورت مشاهده علائمی از وقوع ناپایداری، این موارد می بایست فوراً به اطلاع دستگاه نظارت رسانده شود. رگلاژ رگلاژ

#### رمپ و جمع آوری رمپ در گودبرداری و خاکبرداری

در انجام خاکبرداری ها غالباً نیاز به احداث رمپ می باشد. یکی از مشکلات و معضلات گودبرداری جمع آوری رمپ می باشد. بدین منظور با توجه به عمق گود، روش های مختلفی جهت جمع آوری رمپ وجود دارد

## بهبودی خاک چیست؟

در کلی ترین حالت، تغییر در هر خصوصیت خاک در جهت بهبود عملکرد خاک را **بهبودی خاک (Soil Improvement)** می گویند که در واقع باعث بهبود ضعف های خاک های مسئله دار در ظرفیت باربری، فشردگی پذیری، نشست، نفوذ پذیری، تورم و ... می گردد. در اولین گام قبل از هرگونه اقدام برای طراحی و اجرای سازه های عمرانی لازم است ابتدا خصوصیات خاک منطقه مورد نظر و زمین شناسی ارزیابی گردد و در صورت پاسخگو نبودن مقاومت آن جهت ساخت و ساز، با استفاده از روش های مناسب، **بهبودی خاک زیر فونداسیون** انجام شود. این امر با استفاده از تکنیک های نوین مختلف، بسته به شرایط و نوع خاک، نوع ساخت و ساز، عوامل زیست محیطی، شرایط منطقه، محدودیت های اجرایی، اهمیت پروژه، زمان مجاز برای اتمام پروژه و مسائل اقتصادی انجام می شود. روش های **بهبودی خاک** بسته به شرایط ممکن است به صورت یک فرآیند موقت برای ساخت تأسیسات مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد و یا به منظور اقدامی دائمی جهت بهبود پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک به کار برده شود. اجرای روش های جدید **بهبودی خاک** در پروژه های مختلف عمرانی، با تکیه بر سال ها تکامل دانش مهندسی ژئوتکنیک و ظهور فناوری های جدید در مهندسی عمران، در سال های اخیر میسر شده است.

شرکت مهندسی آساکو یکی از شرکت های موفق در زمینه **بهبودی خاک** در سراسر کشور بوده که با بهره گیری از مجرب ترین متخصصین قادر به طراحی و اجرای پروژه های مقاوم سازی سازه و **بهبودی خاک** مطابق با آخرین استانداردها و جدیدترین روش های روز دنیا می باشد.

## دلایل نیاز به بهبودی خاک

با توجه به اینکه در هر سازه و پروژه عمرانی بار ناشی از سازه فوقانی به خاک وارد می شود، خاک یکی از مهم ترین مصالح در مهندسی عمران شناخته شده است. در سال های اخیر، از یک سو با افزایش جمعیت نیاز به مسکن و شهرسازی در شهرهای بزرگ افزایش یافته و از سوی دیگر کمبود منابع طبیعی جهت جایگزین نمودن مصالح ضعیف با مصالح با کیفیت به منظور برآورده کردن الزامات طراحی را بیش از پیش با مشکل مواجه کرده است. همچنین عدم توجه به ضعف بودن خصوصیات مکانیکی خاک در زمان ساخت و ساز، معضلات متعددی از جمله تخریب سازه ها و جاده ها در اثر فرونشست و لغزش زمین، گودبرداری های ناپایمن، نشست و ایجاد ترک در سازه های صنعتی و غیر صنعتی، سقوط برج های انتقال نیرو در اثر آب شستگی و ... را به وجود می آورد که در این شرایط **بهبودی خاک** منابع موجود، راه حل عملی و اقتصادی جهت غلبه بر این مشکل می باشد. همچنین در بسیاری از پروژه های بزرگ مانند احداث تونل، راهسازی، سد و غیره با خاک های ضعیف مواجه شده که امکان اجرای پروژه بر روی آن بدون **بهبودی خاک** میسر نیست. به طور خلاصه وجود خاک نامناسب در محل ساخت، عدم وجود فضای کافی جهت ساخت و ساز و کمتر بودن هزینه **بهبودی خاک** ضعیف نسبت به جایگزین کردن آن با مصالح مرغوب از دلایل اولیه و عمده جهت به کارگیری تکنیک های **بهبودی خاک** می باشد. همچنین نتایج **بهبودی خاک** در پایدار سازی گود ها بسیار مطلوب ارزیابی شده است.

## هدف از بهبودی خاک

در حالت کلی هدف از **بهبودی خاک** بهبود ویژگی های خاک در راستای افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست های مورد انتظار به منظور تبدیل یک توده خاک ضعیف به یک ساختار جدید مقاوم جهت تأمین مقاومت مورد نظر برای تحمل بارها و نیروهای وارده و الزامات طراحی می باشد. چرا که در بیشتر موارد، خاک محل ساخت در حالت طبیعی قادر به برآورده کردن الزامات طراحی نمی باشد. به طور کلی اهداف **بهبودی خاک** ها مطابق چارت زیر است:

همچنین در زیر تصاویر برخی معضلات و چالش های ایجاد شده که نیاز به **بهبودی خاک** در سراسر کشور را حائز اهمیت کرده، نمایش داده شده است. تصاویر زیر متعلق به پروژه های شرکت مهندسی آساکو قبل از انجام **بهبودی خاک** و رفع مشکل می باشد.

آمار و تصاویر به خوبی بیانگر این موضوع است که در مواجهه با خاک های مسئله دار نظیر خاک های سست با قابلیت باربری کم، نشست پذیری زیاد، روان گرا، خاک های دستی و ... باید از روش های جدید بهسازی خاک استفاده کرد تا معضلات و خسارات مالی و جانی به حداقل برسد.

### مزایای بهسازی خاک

با نظارت های مستمر و انجام آزمایشات کنترلی و ارزیابی کیفی در روش های بهسازی خاک تمامی اهداف و مزایای این روش ها به شرح ذیل قابل بررسی هستند.

- بهبود خواص مقاومتی خاک
- کاهش میزان نشست و کنترل نشست
- افزایش ظرفیت باربری
- بهبود میزان نفوذپذیری خاک
- کاهش هزینه ها و زمان ساخت
- در نظر گرفتن شرایط خاص برخی از پروژه های صنعتی
- کاهش آسیب های زیست محیطی

### روش های بهسازی خاک

بسته به هدف بهسازی و با در نظر گرفتن شرایط منطقه، نوع خاک، عوامل زیست محیطی، مسائل اقتصادی و زمان مجاز پایان کار پروژه، روش مناسب جهت بهسازی خاک انتخاب می شود. بهسازی خاک های سست به روش میکروپایل، بهسازی خاک به روش جت گروتینگ یا تزریق پرفشار، اختلاط عمیق خاک (DSM)، نیلینگ و انکراژ و ستون شنی از جمله کاربردی ترین روش ها در این زمینه بوده است. در شکل های زیر روش های مختلف بهسازی خاک آورده شده است.

#### جت گروتینگ چیست؟

یکی از روش های نوین و مبتنی بر تزریق روش جت گروتینگ است. این روش یکی از شیوه های پایدارسازی و افزایش مقاومت و توان باربری خاک به صورت درجا می باشد. تکنیک جت گروتینگ اولین بار در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. ایده برش بوسیله جت آب با فشار بالا در اوایل دهه ۷۰ میلادی برای استفاده در معادن زغال سنگ ایالات متحده و همچنین بریتانیا مطرح شد و پس از آن در اواسط این دهه ژاپنی ها (برادران یاماگادو در سال ۱۹۶۵) از این روش نه فقط برای برش و فرسایش خاک بلکه برای تزریق سیمان نیز استفاده کردند.

در روش اجرای جت گروتینگ پس از حفاری گمانه تا عمق مورد نظر، دوغاب تزریق به همراه آب و هوای فشرده تحت فشار بسیار زیاد (بین ۲۵۰ تا ۷۰۰ بار) و با سرعت بیش از یکصد متر بر ثانیه از نازل انتهای میله حفاری خارج شده و همزمان با دوران میله حفاری، خاک اطراف محل خروج مخلوط تخریب گشته و با آن آمیخته می شود. این عملکرد باعث ایجاد ستونی با مقاومت بالا از جنس خاک سیمانته شده می گردد.

#### روش اجرای جت گروتینگ

به طور کلی اجرای روش جت گروتینگ شامل مراحل زیر است:

- حفاری تا عمق مورد نظر با قطر مناسب (حدود ۷۶ تا ۱۱۰ میلیمتر (به روش دورانی و همراه با فشار آب) ۲۰ بار) انجام می شود.
- دوغاب مورد نظر در میکسر های اولیه و ثانویه تهیه می شود و آماده تزریق می گردد.

در روش جت گروتینگ یا تزریق پرفشار دوغاب سیمان به صورت دورانی در مراحل مشخص) توقف - تزریق دورانی پرفشار - بیرون کشیدن (انجام می شود. به عنوان مثال ۸ دور در ۴ ثانیه تزریق) با فشار ۳۵۰ تا ۷۰۰ بار (و سپس ۴ سانتی متر بیرون کشی و تکرار. لازم به ذکر است اعداد مذکور نظر به وجود شرایط ژئوتکنیکی مختلف در پروژه های گوناگون برای دستیابی به قطر های مختلف طراحی می گردد. پس از اجرای آزمایشی ستون ها در سایت با اعداد بدست آمده. قطر ستون های اجرا شده اندازه گیری می شود تا مشخصات فنی و اجرائی پروژه حاصل شود.

در زمان تزریق، فشار زیاد جت تزریق قادر است به داخل خاک دیواره گمانه نفوذ کرده و موجب تغییر ساختار خاک گردد. از ترکیب دوغاب سیمان و خاک، ترکیبی خاک - سیمانی پدید می آید که پس از سخت شدن، ستونی مقاوم با مشخصات باربری و ناتراوایی مناسب برای پروژه مورد نظر ایجاد می گردد. شعاعی از خاک که تحت تاثیر تزریق جت قرار گرفته، شعاع تاثیر نامیده می شود و به عواملی نظیر فشار تزریق، زمان تزریق، مقاومت برشی برجای خاک، اندازه نازل ها و وزن مخصوص دوغاب تزریق بستگی دارد.

### جت آب خروجی از نازل دستگاه حفاری

بطور کلی وابسته به نوع خاک، سه مکانیزم اندرکنشی نشست، فرسایش و برش نشان داده شده در شکل زیر و جدول روبرو می تواند شکل گیرد.

به طور معمول، سه شیوه جهت اجرای تزریق پرفشار وجود دارد که بر اساس تعداد سیال های مورد استفاده، تقسیم بندی می شوند. این سه روش عبارتند از سیستم تک سیال، دو سیال و سه سیال. انتخاب بهترین روش عموماً به نوع خاک، خواص فیزیکی و نوع کاربرد موردانتظار از توده خاک سیمان بستگی دارد.

نوع خاک	مکانیزم اندرکنشی
خاک های شنی و ماسه ای	خوردگی و فرسایش
خاک های سیلتی، سیلتی ماسه ای و رسی	خوردگی و فرسایش
در خاک های ماسه ای، ماسه ی شنی و ماسه ی سیلتی	خوردگی و فرسایش
در خاک های شنی تمیز	نفوذ و تراوش

### ارتباط مکانیزم های اندرکنشی جت گروتینگ با نوع خاک

#### سه مکانیزم اندرکنشی در جت گروتینگ

معمولاً، سه شیوه جهت اجرای تزریق پرفشار وجود دارد که بر اساس تعداد سیال های مورد استفاده، تقسیم بندی می شوند. این سه روش عبارتند از سیستم تک سیال، دو سیال و سه سیال. انتخاب بهترین روش عموماً به نوع خاک، خواص فیزیکی و نوع کاربرد موردانتظار از توده خاک سیمان بستگی دارد.

لازم به ذکر است نوع اتصالات (واترسویل و ...) و نازل (مانیتور) در سه روش مذکور متفاوت است.

#### انواع نازل ها و واترسویل های مختلف در سه روش تزریق پرفشار

#### روش های مختلف تزریق پرفشار

## اصول طراحی

بطور کلی ستون های تزریق پرفشار با اهداف کلی افزایش ظرفیت باربری خاک در فشار و برش، کنترل نشست، مقابله با روانگرایی و کاهش نفوذپذیری مورد استفاده قرار می گیرد. در هریک از اهداف مذکور مطابق با روابط مربوطه محاسبات صورت می گیرد. پس به طور خلاصه رفتار این ستون ها مشابهت زیادی به رفتار سایر المان های قائم نظیر شمع دارد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن مقاومت اصطکاکی و نوک، ظرفیت باربری مجاز ژئوتکنیکی ستون های تزریق پرفشار تعیین می شود. همانند شمع ها، ظرفیت این ستون ها عبارت است از حداقل ظرفیت مجاز ژئوتکنیکی و سازه ای ستون ها. ظرفیت سازه ای ستون ها نیز براساس مقاومت تک محوری مغزه های اخذ شده از ستون و یا بارگذاری بزرگ مقیاس ستون ها قابل محاسبه و کنترل می باشد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم طراحی ستون های تزریق، مقاومت فشاری محصورنشده مخلوط خاک و سیمان حاصل از این روش می باشد.

می توان پس از اجرای آزمایشی یک ستون در خاک پروژه و نمونه گیری از عمق های مختلف این ستون، مقاومت ۲۸ روزه نمونه ها را بدست آورد و طراحی اولیه بر این اساس اصلاح گردد. همانطور که در جدول زیر و شکل روبرو دیده می شود مقاومت فشاری خاک سیمان رابطه مستقیمی با جنس خاک و میزان سیمان بکار رفته در گروت دارد.

سه سیاله	دو سیاله	تک سیاله	نوع خاک
۱۰-۲۰	۷,۵-۱۵	۱۰-۳۰	خاک های ماسه ای
۱,۵-۷,۵	۱,۵-۵	۱,۵-۱۰	خاک های رسی

## مقاومت فشاری نمونه های خاک اصلاح شده بروش تزریق پرفشار بر حسب مگاپاسکال (Kauschinger et al., 1989)

### رابطه نسبت سیمان مصرفی و مقاومت فشاری ستون تزریق پرفشار

#### کاربردها

جت گروتینگ از جمله روش هایی است که در بازه بزرگی از خاک های مختلف کاربرد دارد. در شکل زیر محدوده های عملکرد بهینه روش جت گروت نسبت به روش های مختلف بهسازی و پایدارسازی خاک نشان داده شده است. جت گروتینگ علیرغم اینکه به عنوان روشی جدید در زمینه بهسازی خاک شناخته می شود، کاربردهای بسیار متنوعی دارد که نمونه هایی از آن در زیر عنوان شده است.

- دوخت به کف (Underpinning)
- ترمیم و بازسازی پی ها
- دیوار های نگهبان
- آب بندی گود ها و سازه های زیر سطح آب زیرزمینی

### محدوده کاربرد روش جت گروت در مقایسه با سایر روش های بهسازی بستر

#### کنترل کیفی

مطابق استانداردهای جهانی (ASCE, EN) کنترل کیفی اجرای ستون های تزریق پرفشار شامل محصول آزمایشی و محصول نهایی می گردد. بدین معنی که در ابتدا ستون های آزمایشی با مقادیر آزمایشی از پارامترهای مختلف نظیر فشار تزریق، گام های



تزریق، طرح اختلاط های مختلف و ... ساخته می شود. در این مرحله لازم است بطور دقیق، لحظه به لحظه اطلاعات تزریق ثبت گردد. پس از انجام آزمایش های تعیین قطر و مقاومت که برخی از روش های آن در ادامه ارائه شده است، مقادیر پارامترهای فوق با مقادیر هدف طرح کالیبره می شود تا در مرحله بعد با ثابت نگه داشتن آن مقادیر به کیفیت یکنواختی از اجرا و تولید ستون های جت گروت دست یافته شود.

در مرحله ساخت ستون های نهایی، آزمایش ها و کنترل های لازم عبارتند از:

- آزمایش های کنترل مصالح پیش از گیرش
- آزمایش های کنترلی پس از گیرش
- آزمایش های بزرگ مقیاس

### مزایا و محدودیت ها

محدودیت های اقتصادی، زمانی و یا محیطی گاهی سبب می شود سایر روش های بهسازی مانند پیش بارگذاری، یا روش های دینامیکی مناسب نباشند. روش تزریق پرفشار به عنوان جایگزینی مناسب برای این روش ها و همچنین روش شالوده های عمیق (اجرای شمع)، قابلیت های خود را به اثبات رسانده است.

متأسفانه با گذشت حدود ۴۰ سال از آغاز بکارگیری این روش در جهان، به دلیل نبود تکنولوژی لازم جهت اجرا، امکان بومی سازی تکنولوژی در ایران فراهم نشده بود. از آنجا که کشور ایران دارای زمین های ساحلی بسیاری با موقعیت استراتژیک ویژه ای در شمال و جنوب است و این زمین ها بدلیل مقاومت کم و ساختار سست و نشست پذیر خود و قرار گرفتن در نواحی زلزله خیز مستعد پدیده های نظیر روانگرایی و نشست می باشند، اهمیت بهسازی بستر با توجه به اهداف سازندگی و توسعه کشور نمایان گردیده است.

هم اکنون روش جت گروتینگ که برای بهسازی محدوده وسیعی از مشخصات خاک ها قابل استفاده است، به عنوان گزینه ای مناسب مورد توجه قرار گرفته است و با همت متخصصین ژئوتکنیک و مکانیک ایرانی و با تکیه بر دانش و تجربه چندین دهه خود تمام موانع پشت سر گذاشته شده و سرآغازی بر اجرای این روش نوین در کشور گشوده شده و با اجرای موفق چند پروژه در ایران، نوید توسعه سریع روش جت گروت در کشورمان را به ارمغان آورده شده است.

از جمله مزایای این روش می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- کاهش نفوذپذیری خاک
- افزایش مقاومت خاک
- کاهش نشست خاک بر اثر سربار
- جلوگیری از روانگرایی
- اصلاح زمین بصورت درجا
- تبدیل زمین به بخشی از سیستم خاک - سازه
- امکان کنترل و تایید کیفی کار
- هزینه کمتر تجهیز کارگاه نسبت به موارد مشابه نظیر اجرای شمع
- سرعت اجرای بسیار بالا
- هزینه اجرای کمتر نسبت به موارد مشابه
- تولید صدا و ارتعاش کمتر در محیط شهری نسبت به روش های مشابه

### ترکیب شمع های اجرا شده جت گروتی و انکرهای کششی

اختلاط عمیق

Deep Soil Mixing

یکی دیگر از روش های بهسازی خاک که مبتنی بر تزریق مصالح به دورن خاک است که در نهایت ستون های خاک سیمانی ایجاد می کند روش **اختلاط عمیق خاک (Deep Soil Mixing)** است که به اختصار DSM خوانده می شود. این روش یکی از کاربردیترین روش های بهسازی خاک در جهان محسوب می شود که عبارت است از **اختلاط خاک با مواد سیمانی** و ... که با استفاده از همزن هایی در عمق انجام می گیرد و منتج به شکلگیری ستون های خاک سیمان می شود.

در سال ۱۹۷۱ اولین بار روش اختلاط عمیق در نزدیکی فرودگاه هاندا اجرا شد. در این پروژه از **آهک** به عنوان مواد افزودنی استفاده شد. در ابتدا، در اکثر پروژه های اختلاط عمیق از آهک به عنوان پایدارساز استفاده می شد. ولی به مرور زمان و با شناخت اثرات سیمان بر خاک و همچنین در دسترس بودن آن، استفاده از سیمان به عنوان ماده افزودنی رواج بیشتری گرفت. گسترش این روش در خاک اروپا از کشور های شمالی قاره و از اواسط دهه ۱۹۷۰ آغاز گردید. در آمریکا آغاز بکارگیری این روش زمانی بود که در ژاپن پیمانکاران تخصصی زیادی در این زمینه فعالیت می کردند. اولین پروژه اختلاط عمیق آمریکا در سال ۱۹۸۶ و مربوط به **بهسازی خاک** در زیر سدی واقع در دریاچه جکسون می باشد. بعد از آن در پروژه های وسیعی در آن کشور توسط این روش اجرا گردید به نحوی که انجمن بزرگراه های ایالتی (Federal Highway Administration) در آمریکا در سال ۱۹۹۷ به تدوین آئین نامه ها و ضوابطی برای اجرای روش **اختلاط عمیق** دست زد.

**ستون های اجرا شده توسط روش اختلاط عمیق خاک**

### اصول طراحی

بطور کلی **ستون های اختلاط عمیق** با اهداف کلی افزایش ظرفیت باربری خاک در فشار و برش، کنترل نشست، مقابله با روانگرایی و کاهش نفوذپذیری مورد استفاده قرار می گیرد که در هریک از اهداف مذکور مطابق با روابط مربوطه محاسبات صورت می گیرد. مبانی طراحی ستون های اختلاط عمیق تقریباً مانند مبانی طراحی ستون های بت گروتینگ است و **مقاومت فشاری خاک** سیمان رابطه مستقیمی با جنس خاک و میزان سیمان بکار رفته در اختلاط دارد.

**فلوچارت طراحی و ساخت ستون های اختلاط عمیق در پروژه ها**

### روش اجرای اختلاط عمیق خاک

مطابق تعریف **اختلاط خاک** که در آن مواد پایدارکننده ای نظیر **سیمان** یا **آهک** با استفاده از یک حفار با محور توخالی بصورت مکانیکی با خاک مخلوط می شود، فرآیند اختلاط خاک موجب تولید **ستون یکنواختی** (با پهنای ثابت) از خاک و ماده افزودنی می گردد. با همپوشانی ستون ها قبل از گیرش کامل، دیوار های پیوسته ای زیر سطح زمین قابل احداث می باشند. همانطور که در شکل مشاهده می شود، در این روش ابتدا **اوگر حفاری** با بازوهای خود در زمین حفاری را آغاز می کند. زمانی که به عمق مورد نظر رسید حفاری متوقف شده و اوگر دارای بازو به صورت معکوس حرکت را آغاز می کند و به طور آهسته به سمت بالا رانده می شود. در زمان حرکت اوگر به سمت بالا از درون نازل های تعبیه شده در نوک بازوها دوغاب با فشار بسیار زیاد به درون خاک تزریق می شود. این حرکت به سوی بالا مرحله ای بوده و پس از طی فاصله ی یک متر رو به بالا، تقریباً یک دقیقه در همان تراز می چرخد و دوغاب به داخل زمین تزریق می شود. البته فاصله ها و زمان های اشاره شده با توجه به نوع دستگاه و نوع خاک متفاوت است.

### مراحل اجرایی روش اختلاط عمیق خاک

#### محدوده کاربرد و کاربرد ها

همانطور که در شکل دیده می شود، روش **اختلاط عمیق** برای بهسازی محدوده وسیعی از خاک های نرم غیر آلی و خاک هایی که سایر روش های بهسازی در آن ها مناسب نیستند کاربرد دارد، البته در مورد خاک های آلی نیز می توان با در نظر گرفتن تمهیداتی نظیر اضافه کردن ماسه به مخلوط خواص خاک را بهبود بخشید.

با اختلاط خاک در محل می توان انواع متفاوت خاک ها را اصلاح نمود. روش اصلاح بسته به میزان انرژی اختلاط و نوع مواد افزودنی متفاوت است. در خاک های نرم و در مقایسه با سایر روش های اصلاح خاک، این روش از اقتصادی ترین شیوه های بهبود است. در این روش، با اختلاط دوغاب با خاک، مصالحی ساخته می شود که با گذشت زمان سخت تر شده و مقاومت آن افزایش می یابد و می تواند بعنوان مصالح مهندسی با خصوصیات ژئوتکنیکی بهتر از خاک محل در طراحی ها استفاده گردد. روش اختلاط عمیق خاک کاربرد وسیعی در بهسازی بستر دارد که برخی از آن ها در ذیل نام برده شده است:

- تقویت پی انواع سازه
- کاهش پتانسیل روانگرایی
- تقویت فونداسیون اجرا شده
- تقویت پی در راهسازی
- فونداسیون مخازن نفتی
- دیوار آب بند
- اجرای دیواره های قائم
- حفاظت شیب خاکبرداری
- توسعه بنادر
- پایدار سازی تونل

#### محدوده کاربرد روش های مختلف بهسازی بستر

#### کنترل کیفی

بطور کلی آزمایش های مورد نیاز برای کنترل کیفی محصول اختلاط عمیق عبارتند از:

کنترل کیفیت آب مصرفی (مطابق استانداردهای ملی)

- کنترل کیفیت سیمان مصرفی (مطابق استانداردهای ملی)
  - کنترل کیفیت افزودنی های مصرفی (مطابق استانداردهای ملی)
  - کنترل کیفیت دوغاب مصرفی
  - کنترل پساب خروجی
  - آزمایش های کنترل مشخصات هندسی (قطر، امتداد، طول و...)...
- این آزمایش ها عموماً بصورت اندازه گیری مشاهده ای انجام می شود که شامل موارد ذیل می گردد:
- انحراف در پلان
  - انحراف در عمق
  - انحراف قطر در عمق

دو روش کلی مقابله با خاک های مسئله دار، یکی استفاده از المان های باربر و دیگری اضافه کردن مواد و مصالحی به خاک جهت بهسازی پارامترهای مقاومتی آن می باشد. میکروپایل یا ریزشمع روشی است که به نوعی مزایای هر دو روش بالا را در بر می گیرد. لوله کوبی یا حفاری و لوله گذاری خاک، تزریق و تسلیح، سه مرحله ای است که اساس بهسازی خاک به روش استفاده از میکروپایل را تشکیل می دهد. میکروپایل ابتدا برای ترمیم پی ها و ساختمان های موجود به کار گرفته می شد. اما با پیشرفت تجهیزات حفاری و تزریق به سرعت ذهن محققین و مهندسان عرصه ژئوتکنیک را به خود معطوف کرد تا به استفاده بهینه تر و کابردی از این روش دست یابند.

تاریخچه میکروپایل

میکروپایل ها در مراجع مختلف به شمع های با قطر کمتر از ۳۰ سانتی متر اطلاق می گردد که با تسلیح فولادی و تزریق همراه خواهد بود. تاریخچه میکروپایل به اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی بر می گردد. در آن زمان نیاز به ترمیم ساختمان های آسیب دیده در جنگ جهانی دوم در اروپا زیاد بود. ابداع میکروپایل توسط Fondedile پیمانکار مشهور ایتالیایی به همراه دکتر Fernando Lizzi صورت پذیرفت.

با توجه به کارایی و قابلیت اجرای آن در ساختمان های آسیب دیده و همچنین سرعت اجرای آن به سرعت در ایتالیا گسترش یافت. Fondedile در سال ۱۹۶۲ این تکنولوژی را با ترمیم چند ساختمان تاریخی به انگلستان و در سال ۱۹۶۵ با استفاده از این روش در پروژه های حمل و نقل، آن را به آلمان معرفی کرد. پس از حدود دو دهه، در سال ۱۹۷۳ و انجام ترمیم ساختمان هایی در بوستون و نیویورک این تکنولوژی به آمریکای شمالی معرفی شد. بعد از معرفی میکروپایل، سازمان ها و پژوهشکده های علمی به تنظیم آئین نامه ها و استانداردهای میکروپایل پرداختند. معروف ترین آن ها آیین نامه Micropile Design and construction است که توسط انجمن بزرگراه های آمریکا (FHWA) تنظیم شده است. همچنین در پروژه ملی Forever فرانسه نیز در مورد بررسی رفتار میکروپایل ها تحقیقات جامعی صورت گرفت.

### مراحل اجرای میکروپایل کوبشی

#### اصول طراحی میکروپایل

اصول محاسبات مهندسی میکروپایل تابع نوع کاربری میکروپایل و به تبع آن نحوه رفتار آن می باشد. در شرایطی که میکروپایل ها با هدف تحکیم و بهسازی بستر پی سازه ها مورد استفاده قرار می گیرند، محاسبات فنی میکروپایل مشابه با محاسبه شمع های متداول است. این محاسبات مبتنی بر سه بخش طرح سازه ای (Structural Design)، طرح ژئوتکنیکی (Geotechnical Design) و کنترل برش پانچ (Cone Shear) می باشد.

در طرح سازه ای، ظرفیت باربری امان های میکروپایل مشتمل بر جدار فولادی، آرماتور تسلیح و دوجاب سیمان محاسبه می شود. این ظرفیت می بایست با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از بار وارده به میکروپایل باشد.

در طرح ژئوتکنیکی، مقاومت اصطکاکی جداره میکروپایل با خاک اطراف محاسبه می گردد. این مقاومت اصطکاکی می بایست با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از بار وارده باشد تا امکان جدایی میکروپایل از خاک قبل از وقوع تسلیم عوامل مسلح کننده میسر نگردد.

در گام نهایی طرح، با توجه به این امر که میکروپایل ها دارای بار متمرکز زیاد و قطر کوچک بوده و برش پانچ با توجه به سربارهای وارده محتمل می باشد، کنترل مقاومت در برابر برش پانچ که منتهی به ارائه طرح فلنج مناسب می گردد، انجام می شود.

#### روش اجرای میکروپایل

شرکت سامان پی با استفاده از دو تکنیک روز، بهسازی خاکبه روش میکروپایل را انجام می دهد. روش اول روش مرسوم است که مشتمل بر چهار مرحله حفاری (در صورت نیاز)، لوله کوبی، تزریق و تسلیح می باشد که به طور شماتیک نشان داده شده است. اما این شرکت با استفاده از میکروپایل های خودحفار – خودتزریق نیز اقدام به بهسازی خاک می کند که در این زمینه جزو شرکت های پیشرو در ایران می باشد.

#### کاربردهای میکروپایل

بطور کلی کاربرد میکروپایل ها در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش استفاده در بستر پی سازه ها و اصلاح و بهسازی برجای خاک می باشد. انجام تحقیقات گسترده در مجامع علمی – تخصصی جهان بر روی میکروپایل روز به روز در حال افزایش است. بررسی رفتار استاتیکی، دینامیکی و لرزه ای آن ها مورد توجه است. در بسیاری از تحقیقات چگونگی رفتار و معیارهای طراحی میکروپایل ها در خاک های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین امروزه دامنه استفاده از میکروپایل گسترش فراوانی یافته است.

## مراحل اجرای میکروپایل خودحفرار خود تزریق یا میکسوپایل

### کنترل کیفی میکروپایل

با توجه به هدف اجرای میکروپایل و نگاه عملکردی به آن آزمایش های کنترل کیفی مختلفی را می توان برای این روش تعریف کرد که برخی از آن ها عبارتند از:

آزمایش بارگذاری فشاری میکروپایل

آزمایش بارگذاری کششی میکروپایل

آزمایش بارگذاری جانبی میکروپایل

روش تراکم ارتعاشی از حدود سال های ۱۹۳۰ در اروپا و ۱۹۷۰ در آمریکا و سایر نقاط جهان جهت اصلاح عمیق خاک های دانه ای، چسبنده و مخلوط توسط مهندسان مورد استفاده قرار گرفته است، هر چند سابقه تاریخی استفاده از این روش به سال های ۱۸۳۰ در فرانسه بر می گردد. این روش که ماهیتی فیزیکی - مکانیکی دارد، امروزه توسط پیمانکاران متعددی در سرتاسر جهان به خوبی و با موفقیت اجرا می گردد. این روش به حدی در عرصه مهندسی ژئوتکنیک جا افتاده که علاوه بر اشاره به آن در بسیاری از مراجع علمی به عنوان یکی از کارآمدترین روش های بهسازی خاک می باشد و موسسه آژادراه های آمریکا (FWHA) نیز آئین نامه ای را تحت عنوان "طراحی و ساخت ستون های سنگی" در مورد تئوری، روش های طراحی و اجرای این روش در سال ۱۹۸۳ منتشر کرده است.

طی اجرای این روش در خاک های سست، در نقاط معلوم و در یک شبکه منظم، ستون های متراکمی که دارای دانه بندی مناسبی نیز می باشند، ایجاد می گردد که در حقیقت از جایگزینی و متراکم شدن جزئی و نسبی توده خاک موجود ساختگاه و مصالح شن و ماسه ای با دانه بندی مناسب، حاصل شده اند.

### اجرای ستون های شنی ارتعاشی

#### دامنه کاربرد

روش ستون های شنی ارتعاشی تلفیقی از دو روش تراکم ارتعاشی (Vibro Compaction) و جایگزینی ارتعاشی (Vibro Replacement) می باشد. در روش تراکم ارتعاشی بدون اضافه کردن مصالح درشت دانه سعی بر این است که توده خاک موجود به کمک ارتعاش، متراکم گردد. از اینرو کاربرد این روش به خاک های دانه ای محدود می گردد. چرا که ارتعاش و تراکم حاصل از آن در خاک های ریزدانه و یا چسبنده به وقوع نمی پیوندد.

از سوی دیگر، در خاک های ریزدانه و چسبنده اضافه شدن و یا جایگزینی مقدار اندکی مصالح درشت دانه مناسب، بهبود قابل توجهی را در خواص مکانیکی توده خاک ایجاد می نماید. از این رو ترکیب دو روش فوق علی الخصوص در مورد خاک های لایه لایه و یا مخلوط می تواند بازدهی عملیات بهسازی خاک را به طور چشمگیری افزایش دهد. در شکل روبرو گستره کاربرد مؤثر هر یک از این روش ها بسته به منحنی دانه بندی خاک محل نشان می دهد. در جداول روبرو به ترتیب تأثیرپذیری خاک های مختلف را در مقابل تراکم ارتعاشی و روش های تسلیح کننده نشان می دهد.

### گستره کاربرد روش های تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی در خاک های مختلف

#### روش اجرا

روش ستون شنی ارتعاشی مشتمل بر سه مرحله حفاری، تراکم و تسلیح و اجرای بالشتک شنی می باشد که به طور شماتیک در شکل زیر نشان داده شده است. همانگونه که در شکل روبرو مشخص است، تجهیزات اصلی اجرای ستون های شنی عبارت از یک المان میله ای مرتعش با قطر ۳۰ تا ۴۰ سانتیمتر، طول ۲ تا ۴ متر و وزن ۲ تا ۳ تن می باشد که درون خاک فرو می رود. فرکانس ارتعاش افقی (و در برخی موارد قائم) این میله مرتعش که به نام های متعددی نظیر Probe, Vibrator, Vibroflot, Vibroflot, Pocker و .... شناخته شده، حدود ۳۰ تا ۵۰ هرتز و دامنه ارتعاش آزاد آن، بین ۷ تا ۲۵ میلیمتر می باشد. در این حالت نیروی افقی گریز از مرکز حاصله حدود ۱۰ الی ۲۰ تن خواهد بود. تصویر نمونه ای از دستگاه ویبروفلات در شکل زیر نشان داده شده است.

## مراحل اجرای ستون شنی ارتعاشی

### دستگاه وایبروفلوت، واحد کنترل و تجهیزات اجرای روش ستون شنی ارتعاشی

#### مزایای روش تراکم ارتعاشی

قابلیت اجرای سریع، آسان و ارزان ستون های شنی با این روش از یک سو و بهبود خواص فیزیکی - مکانیکی توده خاک حاصل از آن سوی دیگر، باعث افزایش روزافزون اقبال عمومی جامعه مهندسی نسبت به آن گردیده، به طوری که تقریباً در کلیه عرصه های ساخت و ساز به ویژه موارد زیر استفاده موفق از این روش تجربه گردیده است:

- افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری خاک بستر پی ها
- کاهش پتانسیل روانگرایی
- افزایش سرعت نشست تحکیمی خاک های ریزدانه
- پایدارسازی شیب های طبیعی و یا مصنوعی (خاکریزه ها)

#### • اهداف بهسازی خاک

- خاک های مشکل ساز در پروژه های عمرانی
- عوامل موثر در انتخاب روش های بهسازی خاک
- انواع روش های بهسازی خاک
- هزینه بهسازی خاک

امروزه با توجه به رشد جمعیت و نیاز روز افزون بشر به صنعت ساخت و ساز، توجه به نوع بستر و کیفیت آن برای دستیابی به این هدف افزایش یافته است. بدیهی است ضعف در باربری بستر یک سازه موجب به خطر افتادن کل پروژه ساخت و ساز خواهد شد. مشکلاتی که در خاک های فاقد باربری و دارای مقاومت برشی پایین رخ می دهند خود را به صورت ریزش یا ترک خوردگی ساختمان، نشست ناهمگون در پی ساختمان نشان می دهد که تخریب موضعی و یا از بین رفتن کل سازه را در پی دارد. از این رو بهسازی خاک امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. بهسازی خاک به معنی مناسب سازی کنترل شده شرایط ژئوتکنیکی خاک جهت احداث یک سازه در آن می باشد. که موجب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه و زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره برداری می گردد.

#### هزینه بهسازی خاک



بهسازی خاک

#### اهداف بهسازی خاک

- افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری خاک
- کاهش تخلخل و نفوذپذیری خاک و افزایش چگالی آن

- بهبود مقاومت برشی خاک و افزایش ظرفیت باربری آن
  - یکنواخت سازی ویژگی های تغییر شکل پذیری مصالح
  - **خاک های مشکل ساز در پروژه های عمرانی**
  - خاک های نرم و شل: ناپایدار از نظر حجمی و دارای مقاومت ضعیف
  - خاک های تورم پذیر: پتانسیل تورم بالا در اثر جذب آب و افزایش رطوبت
  - خاک های رمبنده (فروریزی): نشست زیاد در اثر ارتعاش و غرقاب شدن (به ویژه در آب و هوای خشک)
  - خاکریزها: زمان بر بودن تحکیم آنها تحت وزن خود
- به طور کلی **بهبودی خاک** را می توان به دو دسته سطحی (مانند تثبیت با سنگدانه، تثبیت با مصالح مخلوط، تثبیت با ماسه بادی، ژئوتکستایل و ...) و عمیق (مانند میکروپایل ها، پیش بارگذاری، تراکم دینامیکی، تزریق و ...) دسته بندی نمود.



ژئوتکستایل

#### عوامل موثر در انتخاب روش های بهسازی خاک

همانند همه پروژه های مقاوم سازی، انتخاب روش بهسازی خاک نیز تابع عوامل متعددی است که برخی از آنها عبارتند از:

- نوع و میزان بهسازی خاک مورد نیاز
- نوع خاک، ساختار زمین شناسی و شرایط تراوش آب
- آسیب احتمالی به بناهای مجاور یا آلودگی منابع آب زیرزمینی
- دسترسی به تجهیزات و مصالح
- هزینه

#### انواع روش های بهسازی خاک

متداول ترین روش ها عبارتند از: تراکم سطحی، تراکم دینامیکی، استفاده از مواد افزودنی، تزریق، پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری میکروپایل، شمع گذاری و نیلینگ. در ادامه به معرفی انواع روش های بهسازی خاک پرداخته شده است.

#### بهبودی خاک با میکروپایل

بهبودی خاک با استفاده از میکروپایل یکی از پیشرفته ترین روش های بهسازی می باشد که به عنوان روش ریز شمع نیز شناخته می شود. میکروپایل ها دارای قطر کوچکی بوده (کمتر از 300 mm و از آنها به منظور انتقال بارهای استاتیکی و دینامیکی سازه به لایه های مقاوم زیرین و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در برابر نشست استفاده می گردد. روش بهسازی خاک با استفاده از میکروپایل اغلب با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب همراه است. در واقع میکروپایل ها نقش یک المان باربر را

ایفا کرده و علاوه بر افزایش مقاومت خاک، به دلیل تزریق دوغاب سیمان خصوصیات مکانیکی خاک را نیز اصلاح می کنند. در واقع می توان گفت با استفاده از میکروپایل ظرفیت باربری خاک را افزایش داده و موجب بهبود چسبندگی، سختی و تراکم پذیری خاک می گردد. روش استفاده از میکروپایل شامل چهار مرحله حفاری، لوله کوبی، تزریق و تسلیح می باشد. کنترل کیفی میکروپایل نیز با انجام آزمایش های بارگذاری فشاری میکروپایل، بارگذاری کششی میکروپایل و بارگذاری جانبی میکروپایل انجام می شود.



بهسازی خاک به روش میکروپایل

### مزایای روش میکروپایل

انعطاف پذیری بالا در حین اجرا

حداقل بودن اثرات جانبی و لرزش در سازه های مجاور به دلیل انرژی پایین و قطر ناچیز حفاری

قابلیت اجرای ساده در شرایط وجود آب زیرزمینی

امکان اجرا در مکان های با دسترسی محدود

سرعت اجرای بیشتر نسبت به سایر روش های بهسازی خاک

مناسب برای استفاده در محیط های شهری به دلیل عدم نیاز به ماشین آلات زیاد

هزینه پایین

### روش تزریق

**بهسازی خاک به روش تزریق** به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک، افزایش مقاومت بارگذاری جانبی شمع ها، تثبیت شیروانی

ها، جلوگیری از نشست آب (به طور مثال در سدها) و نیز جلوگیری از تورم و نشست استفاده می شود. در روش تزریق ابتدا چاله ها

و گمانه هایی با فواصل معین حفر شده و سپس با مواد دوغابی (عموما سیمان) پر می شوند تا خاک زیر پی تقویت گردیده و از

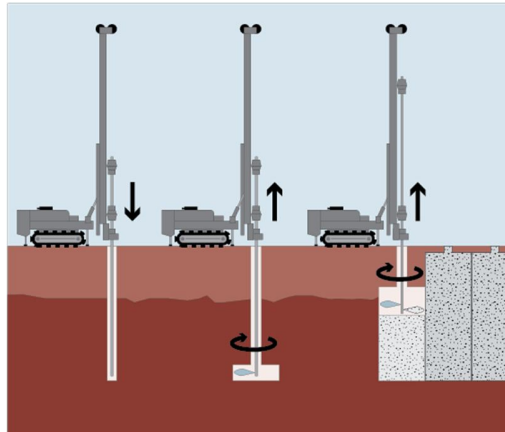
نشست های زیاد جلوگیری شود. از نکات قابل توجه این روش پر هزینه بودن آن می باشد که به همین دلیل تنها در موارد خاص

مورد استفاده قرار می گیرد. روش های مختلفی برای تزریق در خاک وجود دارد که عبارتند از: تزریق جت (جت گروتینگ)، تزریق

تراکمی، تزریق نفوذی و تزریق شکست هیدرولیکی که با توجه به هدف تزریق، جنس و دانه بندی مصالح موجود و ... انتخاب می

شوند.





جت گروتینگ

در روش جت گروتینگ، پس از حفاری با قطر مناسب و تا عمق مورد نظر، دوغاب تزریق می گردد. تزریق دوغاب به صورت دورانی و پرفشار انجام می شود. فشار بالا سبب می گردد که دوغاب به درون خاک دیواره نفوذ کند. این روش با افزایش ظرفیت باربری خاک، موجب بهسازی آن می شود.

### مزایای روش تزریق

- افزایش ظرفیت باربری خاک در حالت اشباع
- تثبیت و تراکم لایه سست
- ترمیم تمامی خلل و فرج های موجود
- جلوگیری از آب شستگی به وسیله نفوذناپذیر کردن ترک ها



بهسازی خاک به روش تزریق

### تراکم دینامیکی

**بهسازی خاک با تراکم دینامیکی** یکی دیگر از انواع روش های بهسازی خاک است که به منظور تراکم عمقی خاک مورد استفاده قرار می گیرد. این تراکم عمقی به واسطه کوبیدن یک وزنه سنگین به زمین (اغلب سقوط یک وزنه فولادی با جرمی بین ۵ تا ۴۰ تن از ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ متر توسط یک جرثقیل) و انتقال ارتعاشات ناشی از آن به لایه های عمیق تر و در نتیجه تراکم خاک و مواد پرکننده حاصل می شود. مکان های سقوط وزنه با توجه به شرایط سطح زیرین، بارگذاری و هندسه فونداسیون تعیین می گردد. از مزایای این روش **بهسازی خاک** می توان به افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش نشست های ناخواسته، پایدار شیروانی ها، متراکم سازی خاک های دانه ای سست و افزایش تراکم و کاهش حفره ها اشاره نمود.



بهسازی خاک با تراکم دینامیکی

### بهسازی خاک با شمع گذاری

بهسازی خاک با شمع گذاری به منظور انتقال نیرو به سطوح پایین تر خاک که دارای تراکم و اصطکاک مطلوب می باشند استفاده می گردد. در واقع شمع ها وظیفه انتقال بار ناشی از سازه به خاک مقاوم تر را بر عهده دارند. جنس شمع ها می تواند بتنی، فولادی و یا چوبی باشد. انواع روش های شمع گذاری در خاک عبارتند از شمع درجا و شمع پیش ساخته. شمع های درجا، بتنی بوده و بدون تغییر مکان می باشند. در این نوع از شمع ها ابتدا حفاری صورت گرفته و سپس بتن ریزی انجام می شود. مقطع شمع های پیش ساخته معمولا مربعی است و اغلب دارای میلگردهای معمولی به منظور مقاوم نمودن شمع در مقابل خمش و افزایش مقاومت فشاری هستند.



بهسازی خاک با شمع گذاری

### بهسازی خاک به روش نیلینگ

نیلینگ یا همان میخ کوبی جدار دیوار یکی از کاربردی ترین روش های بهسازی خاک دیواره به ویژه در ساخت و سازهای شهری است. این روش بهسازی خاک با ایجاد کردن یک مقطع مسلح شده به وسیله نصب میلگرد فولادی امکان نگهداری خاک پشت مقطع را به وجود می آورد. هدف از نیلینگ پایدارسازی شیب ها، حفاظت از گودبرداری ها، پایدارسازی دیوارهای حفاری و ... می باشد. برای اجرای این روش، ابتدا خاکبرداری انجام شده و سپس حفره های لازم برای نصب میخ ها ایجاد می شود. در ادامه میخ ها نصب شده و سپس دوغاب ریزی و اجرای پوسته موقت انجام می شود. پس از این مرحله سطح خاکبرداری انجام شده تراز می گردد و در نهایت یک لایه پوسته دائمی و نهایی (شامل بتن درجای مسلح، شاتکریت مسلح و یا پانل های بتنی پیش ساخته) اجرا می شود. شایان ذکر است که لایه سطحی شاتکریت و شبکه میلگرد پس از نصب نیلینگ ها از فرسایش خاک جلوگیری می کند. از مزایای روش نیلینگ می توان به افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییر شکل، پایدارسازی شیب ها، ترانشه ها و شیروانی ها، امکان اصلاح طرح در خلال اجرا، همزمانی عملیات خاکبرداری و پایدارسازی و ... اشاره نمود. در عین حال این روش دارای معایبی همچون نیاز به نیروی کار متخصص، ایجاد آلودگی صوتی، نیاز به تجهیزات ویژه حفاری و ... می باشد.



بهسازی خاک دیواره گود با نیلینگ

### بهسازی خاک با استفاده از پیش بارگذاری

پیش بارگذاری، به منظور پیش فشردن بستر و به کمک خاکریزی، پایین بردن سطح آب زیرزمینی از طریق زهکشی، مکش و ... و با اعمال فشاری بزرگتر از فشار وارده از طریق فونداسیون سازه به بستر انجام می شود. پیش بارگذاری زمانی انجام می شود که خاک زیرین از نوع ماسه ای با درصد بالای ریزدانه باشد، برای حفاری نیاز به پایین آوردن آب زیرزمینی باشد و یا تقویت در برابر روانگرایی مورد نیاز باشد. پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری موجب کاهش نشست های احتمالی سازه، بهبود مقاومت برشی خاک، کاهش درصد رطوبت خاک و ... می شود. عموماً جهت تسریع نشست خاک از زهکش های قائم استفاده می گردد که در این صورت مدت زمان تحکیم به دلیل همزمانی تحکیم قائم و شعاعی به صورت چشمگیری کاهش می یابد. یکی از مزیت های اصلی این روش بهسازی خاک، عدم ایجاد سر و صدا و از معایب آن زمانبر بودن این روش می باشد.



بهسازی خاک با استفاده از پیش بارگذاری

### منابع

- Engineering treatment of soils , Bell , F.G , 1993 , E & FN Spon publication.
- principles and practices of ground improvement , Han , j. , 2015 , john wiley & sons
- مهندسی ژئوتکنیک، جلد ۱: مبانی، کاوش و تفسیرها؛ جلد ۲: طراحی، کاربردها و مخاطرات، اسلامی، ا و سخاوتیان آ. ۱۳۹۲، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

### (PDA) تست بارگذاری دینامیکی شمع

تست PDA یکی از روش‌های آزمایش کرنش بالا است که برای بدست آوردن اطلاعات کامل رفتار شمع‌های اجرا شده در یک پروژه استفاده می‌شود. آنالیز و تست دینامیکی روشی قدرتمند برای کنترل و حصول اطمینان از شرایط کمی و کیفی انواع شمع‌های فلزی و بتنی در جاریز یا کوبشی با استفاده از آنالیزهای مربوط به رفتار شمع، خاک و اندرکنش بین آنها می‌باشد. همچنین می‌توان برای نظارت بر عملیات کوبش و تحت کنترل قرارداد عملکرد چکش و رفتار شمع و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی وارده به شمع در حین کوبش نیز از آن استفاده نمود.

استاندارد حاکم بر این تست ASTM-D4945 و AASHTO-T298 به همراه دستوالعمل‌های شرکت سازنده می‌باشد که طی آن قواعد و روش اجرای تست را شرح می‌دهند.

### نتایج و فواید تست PDA

در زمان تست:

کنترل رفتار شمع و تنش‌های وارده به شمع  
اندازه‌گیری انرژی منتقل شده به شمع و سنجش بازده چکش  
پس از آنالیز:

تعیین ظرفیت باربری نهایی استاتیکی و دینامیکی شمع  
تعیین ظرفیت باربری اصطکاکی و جداره شمع  
تعیین ظرفیت باربری نوک شمع  
تخمین تغییرات لایه‌های خاک در طول نفوذ شمع

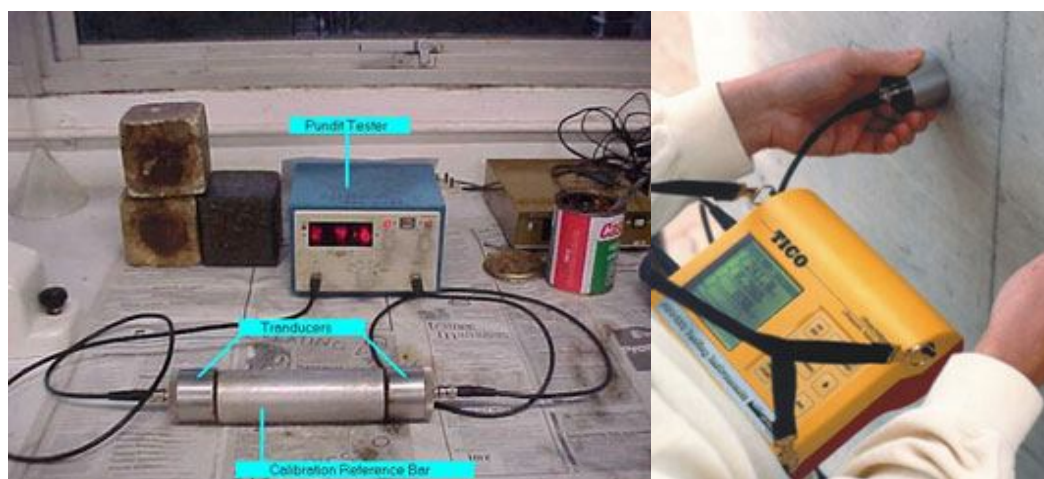
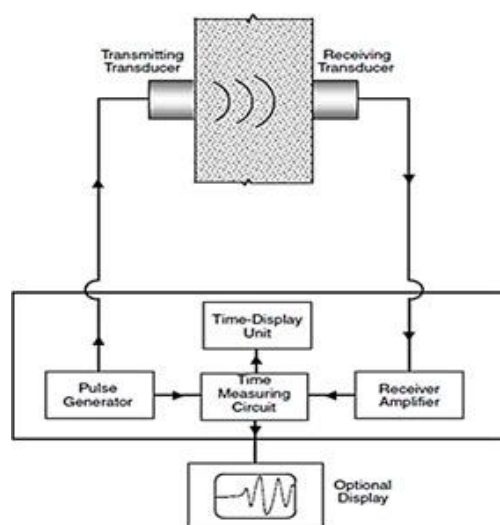
### (Pulse Velocity Through Concrete Test) آزمایش التراسونیک بتن

شماره استاندارد آزمایش	ASTM C 597
هدف آزمایش	قضاوت در خصوص عملکرد، نیازها و روش‌های تعمیرات و بازسازی سازه‌های بتنی.
موارد کاربرد	این آزمایش را برای کلیه نمونه‌های بتنی می‌توان انجام داد. البته در صورت امکان هدف آزمون باید مقایسه بتن مشکوک با بتن مشابه در سایر قسمت‌های سازه باشد که معلوم شده رضایت‌بخش است یا کیفیت آن تایید شده است.

آزمایش التراسونیک بتن از جمله آزمایش‌های غیرمخرب بتن است. این آزمایش‌ها با در اختیار قرار دادن داده‌های مختلف سازه‌های موجود، به کارشناسان و متخصصین این امکان را می‌دهد تا در خصوص عملکرد، نیازها و روش‌های تعمیرات و بازسازی سازه‌های بتنی قضاوت و تصمیم‌گیری نمایند. آزمایش التراسونیک بتن با ارائه مقاومت فشاری نسبی، طول و ابعاد ترک‌های ایجاد شده در بتن، به طراحان و کارشناسان امکان تصمیم‌گیری در زمینه طرح‌های مقاوم‌سازی و تقویت و یا صحت‌سنجی عملیات‌های انجام شده را می‌دهد. این آزمون در حال حاضر عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری سرعت پالس با استفاده از تکنیک‌های فراصوتی است. این روش به طور گسترده در سراسر جهان مورد قبول بوده و ابزار سبک و قدرتمند مناسبی است که راحت در سایت و نیز آزمایشگاه می‌توان از آن بهره‌مند شد.

اگر یک اپراتور با تجربه از این روش بدرستی استفاده کند، می‌تواند درباره داخل یک عضو بتنی مقدار قابل توجهی اطلاعات بدست آورد. با این حال، از آنجا که محدوده سرعت‌های پالس مربوط به کیفیت عملی بتن نسبتاً کم (۴,۸ - ۳,۵ کیلومتر بر ثانیه)

است، کاربرد این روش به خصوص در سایت دقت زیادی را می‌طلبد. به علاوه، از آنجا که خواص الاستیک بتن که بر سرعت پالس تاثیر می‌گذارد، بررسی کامل رابطه بین مدول الاستیک و مقاومت در زمان تفسیر نتایج اغلب ضرورت دارد. پیشنهاد استفاده از این روش در BS 1881:Part 203 و نیز در ASTM C597 آمده است. عملکرد این آزمایش بر مبنای این مفهوم است که ضربه بر یک حجم جامد، سه نوع موج تولید می‌کند. امواج سطحی دارای جابجایی ذرات بیضوی، کندترین امواج هستند در صورتی که امواج برشی و عرضی با جابجایی ذرات در زوایای قائم به سمت حرکت، سریعتر هستند. امواج طولی دارای جابجایی ذرات در جهت حرکت (که گاهی به امواج فشاری معروف است) مهم‌ترین امواج هستند زیرا سریع‌ترین موج‌ها بوده و به طور کلی اطلاعات مفیدتری ارائه می‌کنند. مبدل‌های الکترو اکوستیکی در اصل این نوع امواج را تولید می‌کنند؛ انواع دیگر به دلیل سرعت پایین آن‌ها به طور کلی تداخل چندانی ایجاد نمی‌کند. سرعت پالس به خواص الاستیک و حجم واسطه وابسته است و از این رو اگر حجم و سرعت انتشار موج معلوم باشد، می‌توان خواص الاستیک را ارزیابی کرد.



### (In- situ California Bearing Ratio, CBR) آزمایش باربری کالیفرنیا صحرايي

ASTM D4429 - 09a

شماره استاندارد آزمایش

هدف آزمایش	تعیین مقاومت نسبی لایه های رویه و اساس و خصوصیات تراکم پذیری خاک
کاربرد آزمایش	برای کلیه خاک ها استفاده می شود.

این آزمایش اولین بار در سال ۱۹۲۹ توسط گروه مهندسی راه در اداره راهسازی ایالت کالیفرنیا آمریکا ابداع شد. این آزمون هم در آزمایشگاه و هم به صورت برجا انجام می شود. به کمک این آزمایش، مقاومت برشی خاک در یک رطوبت و وزن مخصوص معین، مشخص می شود. در پی سازی برای بیان کیفیت نسبی خاک زیر پی و در راهسازی مقدار ضریب مزبور در انعکاس مقاومت برشی خاک و تحمل آن در برابر بارهای ترافیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. آزمایش CBR صحرائی برای ارزیابی و طرح اجرایی روسازی انعطاف پذیر، مانند لایه اساس و بستر راه ها و کاربردهای دیگر (مانند راه های سوشه)، که برای آنها CBR پارامتر مناسب و مطلوب برای تعیین مقاومت می باشد، استفاده می گردد. نتیجه این آزمون در یک مکان خاص ممکن است نماینده نقاط و مکان های دیگر نباشد، با این حال، آزمون های برجای CBR به علت آسان و سریع و کم هزینه بودن به طور کلی رایج ترین و پذیرفته شده ترین آزمون برای ساخت جاده ها باندهای فرودگاهی می باشد

### تعریف عدد: CBR

بنا به تعریف، بار استفاده شده برای فرو رفتن و نفوذ یک سنبه استاندارد به میزان معین در یک نمونه مورد آزمایش به مقدار بار استاندارد برای همان نفوذ است. میزان نفوذ سنبه استاندارد معمولاً ۰٫۵ اینچ یا به عبارت دیگر برابر ۱۲٫۵ میلی متر می باشد. فشار لازم برای نفوذ پیستون در داخل مصالح سنگی شکسته مشخص، استاندارد بوده و مقادیر آن در جدول زیر قابل مشاهده است:

میزان نفوذ پیستون (اینچ)	فشار استاندارد (پوند بر اینچ مربع)	نیروی استاندارد (کیلو گرم)
۰٫۱	۱۰۰۰	۱۳۶۰
۰٫۲	۱۵۰۰	۲۰۴۰
۰٫۳	۱۹۰۰	۲۵۹۰
۰٫۴	۲۳۰۰	۳۱۳۰
۰٫۵	۲۶۰۰	۳۵۴۰

فشار لازم برای نفوذ پیستون در داخل مصالح سنگی شکسته مشخص استاندارد

### تجهیزات و دستگاه ها

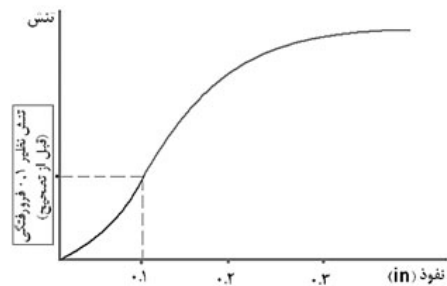
(۱) جک پیچی مکانیکی (برای افزایش بار پیوسته)	(۲) حلقه های اندازه گیر (رینگ نیرو سنج)
(۳) پیستون نفوذی (با سطح مقطع ۳ اینچ مربع و ۴ اینچ طول)	(۴) گیج های عقربه ای (با دقت ۰٫۰۱ میلیمتر).
(۵) تکیه گاه برای نفوذ سنج	(۶) صفحه سر بار
(۷) وزنه های سر بار	(۸) کامیون یا کانتینر (حداکثر بار پیش بینی شده آزمون)
(۹) جک ها	(۱۰) وسایل متفرقه

شکل زیر نمونه ای از نحوه استقرار دستگاه در محل را برای آزمایش های تعیین نسبت باربری کالیفرنیا نشان می دهد.



### روش انجام آزمایش و محاسبات

سطح مورد آزمایش با برداشتن مصالح خشک و سستی که معرف خاک مورد آزمایش نمی باشد، آماده می گردد. سطح آزمایش در حد امکان هموار و تراز باشد. در صورت برخورد به مصالح اساس غیر خمیری، باید نهایت دقت بعمل آید تا سطح آزمایش دست خورده نگردد. فاصله نقاط آزمایش های نفوذ باید طوری باشد که عملیات در یک نقطه باعث دست خوردگی خاک در نقطه دیگری که باید مورد آزمایش نفوذ قرار گیرد نشود. این فاصله ممکن است از حداقل ۷ اینچ (۱۷۵ میلیمتر) برای خاک های خمیری تا ۱۵ اینچ (۳۸۰ میلی متر) برای خاک های درشت دانه محدود گردد. پس از استقرار دستگاه و کامیون و جک در محل مورد نظر، صفحه سربار ده پوندی (۴,۵ کیلوگرم) زیر پیستون نفوذی قرار می گیرد و نفوذ انجام می شود. منحنی تنش نفوذی با تقسیم نیروی اعمال شده بر سطح پیستون برای هر افزایش نفوذ محاسبه می شود. شکل زیر منحنی تنش بر حسب نفوذ را نشان می دهد.

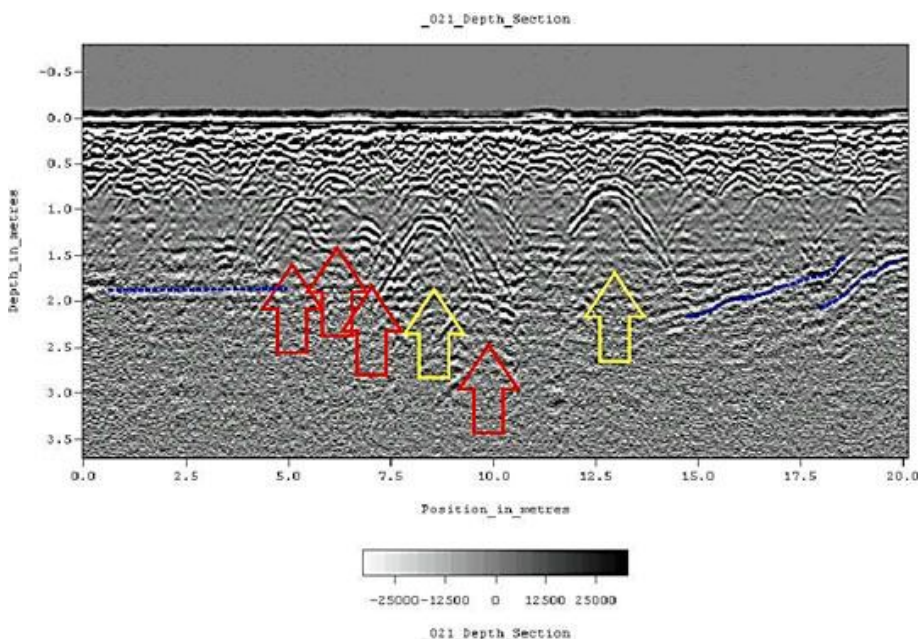


منحنی تغییرات مقدار تنش - نفوذ تصحیح نشده

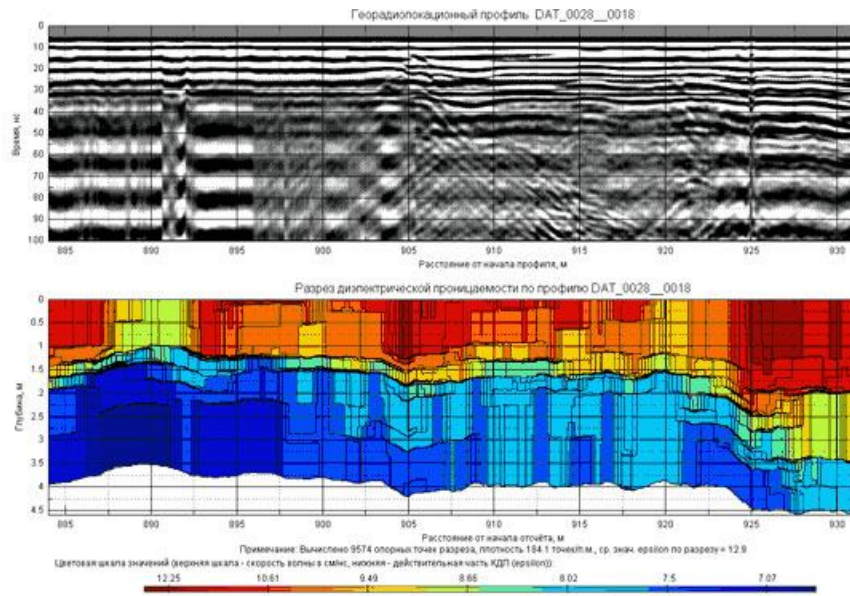
### بررسی لایه های زیر سطحی خاک بستر با استفاده از دستگاه (Ground-penetrating radar) GPR

ASTM D 6432-11	شماره استاندارد
به دست آوردن تصویری از لایه های زیر سطح زمین، شناسایی ناهنجاری های زمین تا عمق ۱۵ متری	هدف آزمایش
رادار نافذ زمین را می توان در انواع واسطه ها از جمله سنگ ، خاک ، یخ ، آب ، سنگ فرش های خیابان و ساختمانها به کار برد	موارد کاربرد

دستگاه رادار نافذ زمین (Ground- Penetrating Radar) GPR علاوه بر سرعت و سهولت در برداشت داده ها در آشکارسازی مرزهایی که مشخصه های الکترومغناطیسی در مرز بین دو محیط به صورت ناگهانی تغییر می کند بسیار موفق است. از کاربردهای GPR تفکیک لایه های مختلف آسفالت جاده ها شامل زیرسازی تا روسازی می باشد. با استفاده از روش آنالیز سرعت و داده های برداشت شده در جاده ها می توان عمق را تعیین کرد. انرژی امواج GPR در محیط های گوناگون می تواند به صورت های مختلفی منتشر شود. سرعت امواج وابسته به محیط انتشار است و فرستنده در آن تأثیر ندارد. بیشترین سرعت این امواج در هوا ۳۰۰ mm/ns و کمترین سرعت آنها در آب 33 mm/ns است. بدست آوردن ضخامت لایه های زیر سطح زمین مستلزم بدست آوردن توزیع سرعت زیر سطحی است. معمولاً سرعت این امواج در آسفالت 130-175 mm/ns است. البته سرعت حرکت امواج GPR در آسفالت جاده همیشه ثابت نیست، چون آسفالت مخلوطی است که سرعت آن می تواند از ترکیبات، خصوصیات شیمیایی، درصد هوا و آب موجود در آسفالت، سن و هوازدگی آسفالت تأثیر پذیرد.



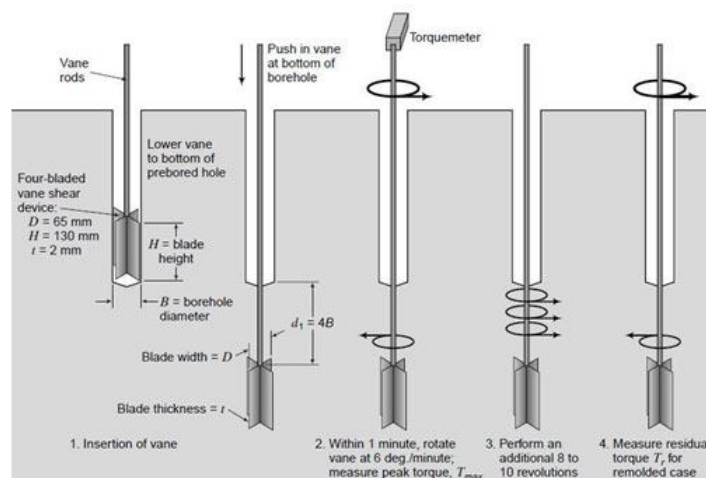


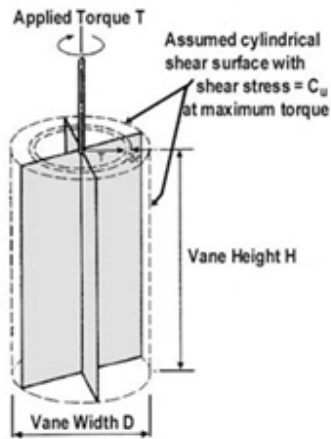


### آزمایش برش پره (Vane Shear Test):

ASTM D 2573-08	شماره استاندارد آزمایش
تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده درجا و همچنین حساسیت رس‌های نرم	هدف آزمایش
این آزمایش برای خاکهای رسی کاربرد دارد	موارد کاربرد

آزمایش درجای برش پره یا وین که نوع آزمایشگاهی آن نیز موجود است، از آزمایشات پر کاربرد در تعیین درجای مقاومت برشی خاک‌های رسی می‌باشد. این دستگاه برای اولین بار تعیین مقاومت برشی درجا و همچنین حساسیت رس‌های نرم را ممکن ساخت. در این آزمایش امکان بررسی مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای رسی در جهات مختلف وجود دارد. این ابزار معمولاً از چهار صفحه فلزی نازک هم اندازه تشکیل شده است که به یک میله فلزی پیچشی جوش داده می‌شود. با اعمال لنگر پیچشی بر میله فلزی و چرخاندن آن با نرخ ۶ تا ۱۲ درجه در دقیقه تا وقوع گسیختگی و قرائت لنگر پیچشی در لحظه گسیختگی می‌توان مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده را اندازه‌گیری نمود.





### آزمایش بارگذاری صفحه (Plate Loading Test)

ASTM D 4394-08	شماره استاندارد آزمایش
تعیین مدول الاستیسیته و خاصیت نشست پذیری خاک؛ مدول عک العمل بستر، گاهای ظرفیت باربری پی های منفرد، قضاوت در خصوص عملکرد، نیازها و روش های تعمیرات و بازسازی سازه های بتنی.	هدف آزمایش
نتایج این آزمایش در مواردی بیشتر قابل اطمینان می باشد که خاک ناحیه همگن باشد و لایه های متفاوتی نداشته باشد.	موارد کاربرد

هدف از این آزمون، تعیین خاصیت نشست پذیری در خاک و سنگ می باشد و بر روی مصالح دست نخورده با استفاده از صفحات مربعی یا دایره ای و بارگذاری تدریجی گام به گام در عمق مورد نظر انجام می شود؛ سپس مقادیر نشست در برابر فشار وارده ثبت می گردد.

### ابزار آزمایش

- سکوی بارگذاری: برای فراهم آوردن عکس العمل مورد انتظار بار کل



- جک هیدرولیکی یا مکانیکی
  - صفحات بارگذاری
  - دستگاه ثبت نشست
- مراحل انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای  
الف. حفر گالری



- ب. آماده‌سازی
- آماده‌سازی محل صفحات
  - سیمان کردن
  - حفاری چال اکستنسومتر
- ج. نصب سیستم آزمایش
- نصب صفحات
  - نصب اکستنسومترها
  - نصب جک‌ها
  - نصب قرائت کننده‌ها
- د. اعمال بار

پارامترهای ژئوتکنیکی قابل محاسبه از نتایج این آزمایش

E مدول الاستیسیته

qu ظرفیت باربری پی

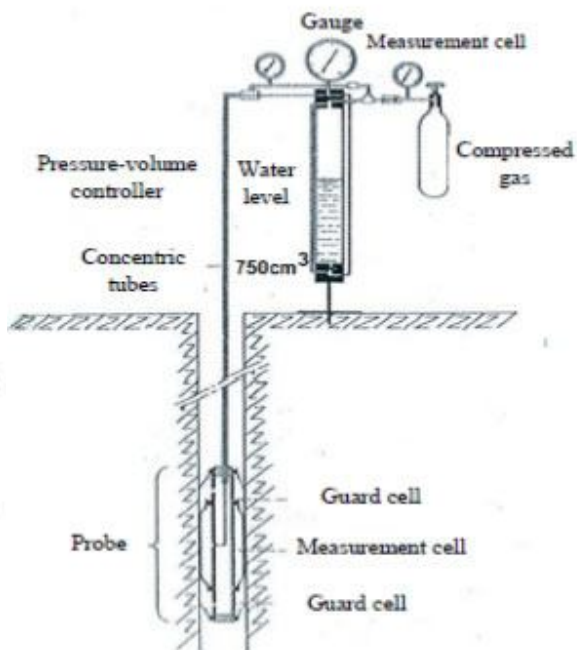
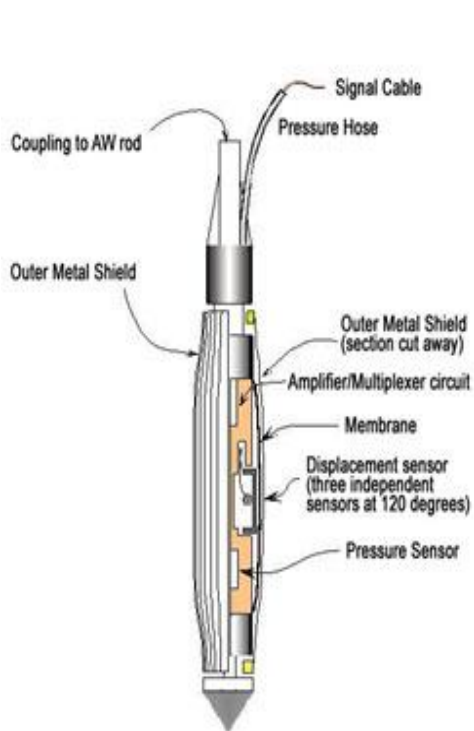
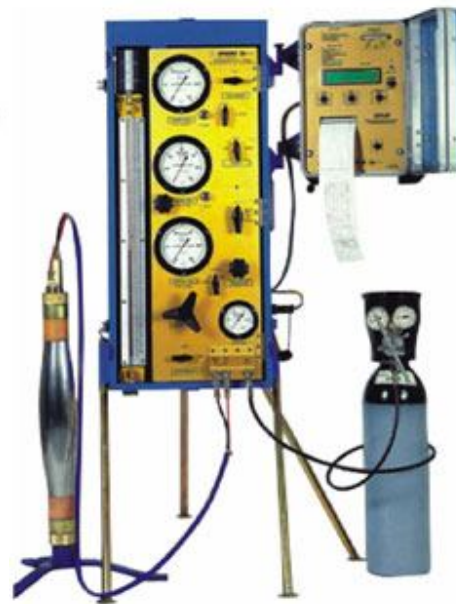
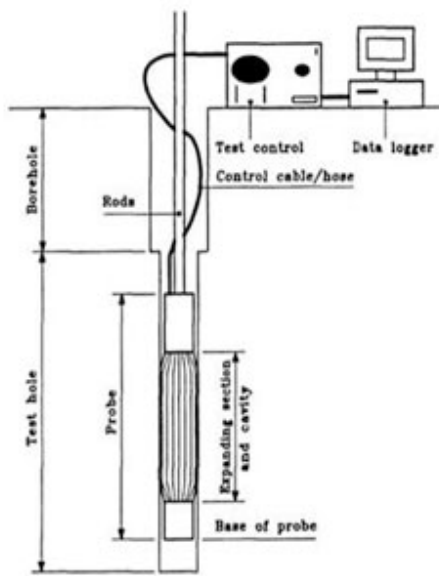
Ks مدول بستر



#### (Pressuremeter test) آزمایش پرسیمتری

ASTM D 4719	شماره استاندارد آزمایش
دست آوردن خصوصیات نشست پذیری از جمله ضریب عکس العمل افقی، پارامترهای به مقاومتی و مکانیکی.	هدف آزمایش
در انواع مختلفی از خاکها و سنگها کاربرد دارد.	موارد کاربرد

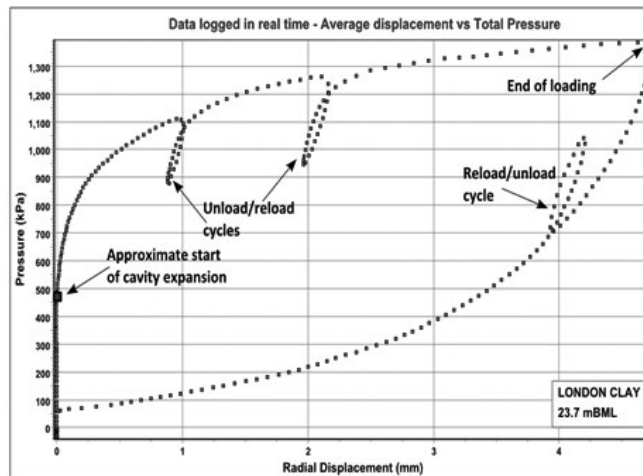
پرسیومتر منارد، پروبی است که در عمق مورد نظر درون گمانه حفاری شده قرار داده شده و سپس به سلول اندازه گیری آن، توسط سیال، فشار اعمال می گردد. فشار اعمالی موجب افزایش حجم بالن می شود. فشار اعمالی در بازه های زمانی ثابت، افزایش داده می شود و تغییرات حجم متناظر با آن ثبت شده و سپس نمودار فشار-تغییر حجم رسم می گردد. با استفاده از این نمودار می توان اطلاعات سودمندی مانند پارامترهای تغییر شکل (مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون)، پارامترهای مقاومت خاک (زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه ای و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رسی) و ضریب فشار افقی را بدست آورد. اندازه گیری های انجام شده به لحاظ مکانیزم بارگذاری نیز انطباق خوبی با بارگذاری های واقعی وارده بر خاک دارد، از مزایای دیگر این آزمایش این است که تئوری حاکم بر آن به صورت مطلوبی قوی بوده و نتایج به دست آمده تکرارپذیری مناسبی دارد. بعلاوه این روش دست خوردگی کمی در خاک ایجاد می کند. پرسیمتر از یک پروب که شامل سیستم نفوذ در خاک و سیستم قابل انبساط، لوله های انتقال سیال ها، کنترل کننده فشار برای کنترل و ثبت نتایج آزمایش و حجم، یک مخزن ذخیره هوای فشرده و لوله های رابط انتقال فشار و ... تشکیل شده است که اجزاء آن در اشکال زیر دیده می شود.



پرسیومترها به دو دسته عمده زیر تقسیم می شوند:

• پیش حفار: پرسیومتر پیش حفار (Pre-Bored Pressuremeter) درون گمانه‌ای که از قبل آماده شده قرار گرفته و آزمایش انجام می‌گیرد (مانند پرسیومتر منارد). این نوع پرسیومترها در کلیه خاک‌ها و سنگ‌های ضعیف که امکان ایجاد گمانه در آن‌ها باشد قابل استفاده می‌باشند خود حفار: پرسیومتر خود حفار (Self-Boring Pressuremeter) نیازی به حفاری قبل

از انجام آزمایش ندارد و نقطه قوت آن اعمال دست خوردگی کمتر به خاک می باشد.



تحلیل تست پرسیمتر به روش خود حفار در رس لندن

### آزمایش چکش اشمیت (Schmidt Hammer Test)

ASTM D 5873-14	شماره استاندارد آزمایش
تعیین بعضی از پارامترهای مکانیکی سنگ مانند مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته	هدف آزمایش
هایی همراه استفاده از این آزمایش در مورد سنگ های خیلی نرم و یا خیلی سخت با محدودیت است.	موارد کاربرد



آزمایش چکش اشمیت به نام های چکش بازتاب، چکش ضربه ای و یا آزمایش سنجش سختی نیز شناخته می شود و یک روش غیر مخرب برای آزمایش بتن می باشد. آزمایش بر اساس این اصل است که بازتاب یک جرم ارتجاعی به سختی سطح در مقابل جرمی که به آن برخورد می کند وابسته است. در چکش اشمیت جرم متصل شده به فنر وجود دارد که با کشیدن فنر تا نقطه مشخصی، مقدار انرژی ثابتی به آن داده می شود. این کار با فشار دادن چکش به سطح صاف بتن انجام می شود. بعد از آزاد کردن، جرم تحت اثر بازتاب میله چکش (که هنوز در تماس با سطح بتن است) قرار می گیرد و مسافتی که توسط جرم طی می شود و برحسب درصدی از انبساط اولیه فنر بیان می شود، عدد بازتاب نامیده می شود. این مقدار توسط یک نشانه که در طول یک مقیاس مدرج است حرکت می کند، نشان داده می شود. عدد بازتاب یک اندازه مطلق است، چون به انرژی ذخیره شده در فنر و به اندازه جرم

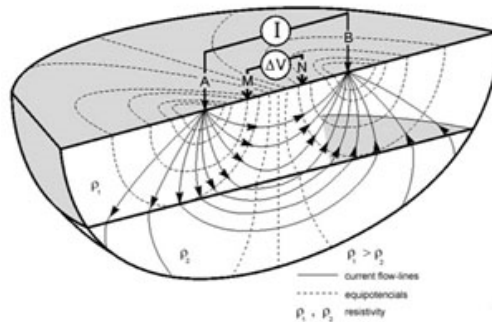
وابسته می‌باشد مطالعات نشان داده است که سختی سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک محوری و مدول کشسانی سنگ‌ها در ارتباط است در واقع سختی یکی از مفاهیم رایج است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها بکار می‌رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین کننده سختی یک سنگ است. روش‌های متعددی برای تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها بکارگیری وسیله‌ای به نام چکش اشمیت، معروف به آزمایش‌های واجهشی یا دینامیکی است. در این دسته از آزمایش‌ها از یک چکش یا وزنه برای ضربه زدن به سطح سنگ استفاده می‌شود و ارتفاع واجهش وزنه مقیاسی برای سنجش سختی است. هرگونه رفتار پلاستیک یا تغییر شکل بر اثر ضربه، انرژی الاستیک واجهش چکش را کاهش می‌دهد. این آزمایش برای تعیین سختی سنگ و بتن با استفاده از چکش اشمیت در صحرا و یا آزمایشگاه بکار می‌رود. با استفاده از این سختی می‌توان خصوصیات دیگر سنگ و بتن را مانند مقاومت فشاری آن، تخمین کرد. این روش که توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ ISRM به صورت استاندارد در آمده است، در مورد سنگ‌های خیلی نرم یا خیلی سخت دارای محدودیت‌هایی بوده است و نتایج قابل اطمینانی ارائه نمی‌دهد. چکش‌های اشمیتی که جهت تخمین مقاومت فشاری بتن بکار می‌رود انرژی ضربه فنر در حدود ۲,۲۰۷ ژول دارند که برای سازه‌های بتنی که مقاومتی بین ۱۰ تا ۷۰ مگاپاسکال دارند مناسب است.



**(Geoelectric Test) آزمایش ژئوالکتریک**

ASTM D5777	شماره استاندارد
دست آوردن اطلاعات زیر سطحی از جمله: اکتشاف سفره‌های آب زیرزمینی جهت احداث چاه آب، به شناسایی مسیر آب‌های زیرزمینی، شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، ناپیوستگی‌ها، تعیین محل قنات‌های قدیمی، اکتشاف منابع مختلف معدنی فلزی و غیر فلزی، تعیین میزان تخلخل سنگ زیر سطحی و میزان نشست، تعیین محل غارهای کارستی و حفرات زیرزمینی، شناسایی مناطق آلوده	هدف آزمایش
در کلیه ساخت‌گاه‌ها قابل استفاده است. البته با استفاده از این روش برای مطالعه تا عمق ۲۵۰ متری می‌شود تری را استخراج می‌توان اطلاعات دقیق	موارد کاربرد

اساس کار روش ژئوالکتریک انتقال جریان الکتریکی به داخل زمین، ایجاد اختلاف پتانسیل بین دو نقطه و محاسبه مقاومت ویژه عمق‌های مختلف زمین است. در این روش بر اساس استاندارد که مربوط به مقاومت جنس‌های مختلف خاک، سنگ و همچنین مقادیر مقاومت الکتریکی موادی مثل آب، فلزات، حفرات و مواردی از این دست، مطالعات اکتشافی صورت می‌گیرد. حداکثر عمق شناسایی در این روش ۵۰۰ متر است که البته در عمق ۲۵۰ متر سطحی، دقت بالاتری را نشان می‌دهد. شکل زیر به صورت شماتیک برداشت داده بر روی لایه‌های زمین را نشان می‌دهد.



در اکتشاف و مطالعه آبهای زیرزمینی، روش ژئوالکتریک بیشترین سهم و موفقیت را نسبت به سایر روشهای ژئوفیزیکی داشته و به تنهایی می تواند عمق، محدوده یا گسترش جانبی، ضخامت و حجم تقریبی سفره یا ذخیره آب زیرزمینی در یک محل را تعیین نماید. یک لایه غیر قابل نفوذ رسی، که در زیر یک سفره آب زیرزمینی قرار گرفته و یا دو سفره آب زیرزمینی را از هم جدا می کند، به راحتی در روی منحنی های حاصل از یک برداشت ژئوالکتریک به روش سونداژ قابل تشخیص بوده و در نتیجه می توان عمق و ضخامت آن لایه را تخمین زد. به طور کلی روش ژئوالکتریک در بررسی آبهای زیرزمینی می تواند اطلاعات با ارزشی فراهم نماید که معمولاً نمی توان این اطلاعات را از روش های دیگر به دست آورد. شکل زیر نمونه ای از نتایج تفسیر برداشتهای ژئوالکتریک را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، بخشهای آبی رنگ به خوبی بیانگر عمق و ضخامت لایه های آبدار است. روش ژئوالکتریک یا مقاومت سنجی DC، از قدیمی ترین روش های الکتریکی است در این روش هدف ثبت اختلاف پتانسیل ایجاد شده ناشی از ارسال جریان مستقیم به داخل زمین است.

#### انواع روش های ژئوالکتریک

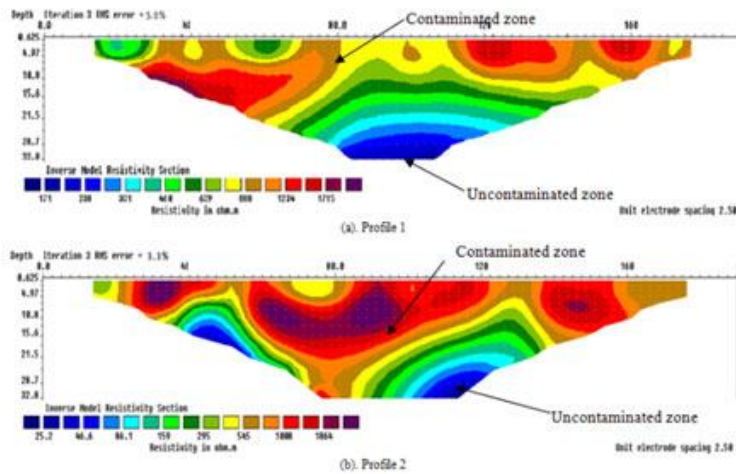
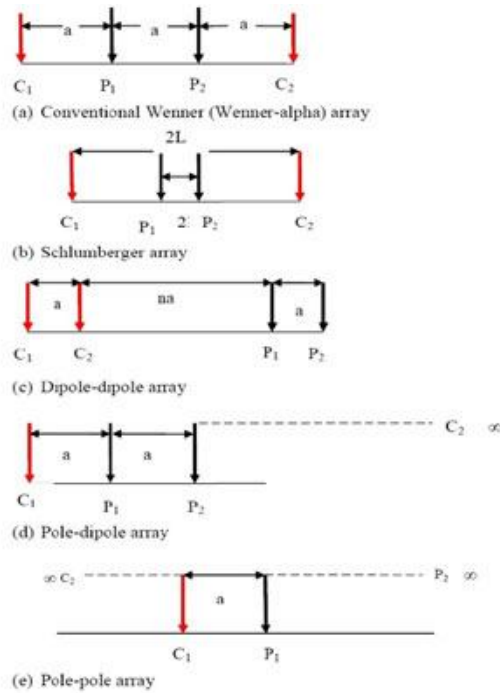
بطور کلی، وضعیت قرارگیری الکترودها بصورت خطی برای اندازه گیری مقاومت مورد استفاده قرار می گیرد. آرایش رایج الکترودها بصورت «شلومبرژر» (Schlumberger)، «ونر» (Wenner)، «بسط دوقطبی-دوقطبی» می باشد که در شکل زیر قابل مشاهده است. با توجه به مزیت های روش تجربی و منظم، برای اجرای سونداژ الکتریکی عمودی اغلب از آرایش متقارن «شلومبرژر» استفاده می کنند.



برای ثبت این اختلاف پتانسیل از آرایش های مختلف الکترودی استفاده می شود. انواع آرایش ها یا آرایه های الکترودی (به طور مثال ونر، شلومبرژه، دو قطبی-دوقطبی) می تواند بسته به نوع کاربرد و قدرت تفکیک آنها مفید باشد. نوعاً جریان الکتریکی از یک جفت الکترودها به زمین وارد می شود. جفت الکترودها دیگر میزان ولتاژ را اندازه گیری می کند. الکترودهای با فاصله بیشتر، برای بررسی های عمیق تر به کار می روند. از آن جا که مواد گوناگون زیر سطحی مقاومت ویژه متفاوت دارند، اندازه گیری های سطحی در تعیین تغییرات قائم و جانبی مواد زیرین می تواند مفید باشد. موفقیت روش بستگی به تباین مقاومت ویژه مواد زیرسطحی دارد.



اندازه‌گیری‌های انجام شده با استفاده از روابط ساده ریاضی به مقاومت ویژه الکتریکی سنگها تبدیل می‌شود و در نهایت اطلاعات بدست آمده تعبیر و تفسیر می‌شوند.

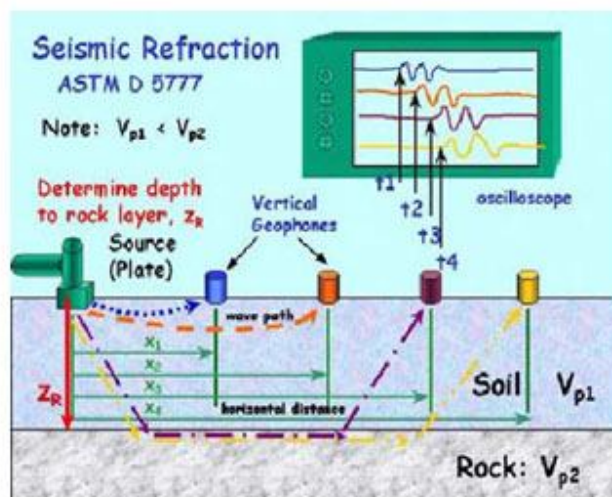


### لرزه نگاری انکساری (Seismic Refraction Surveys)

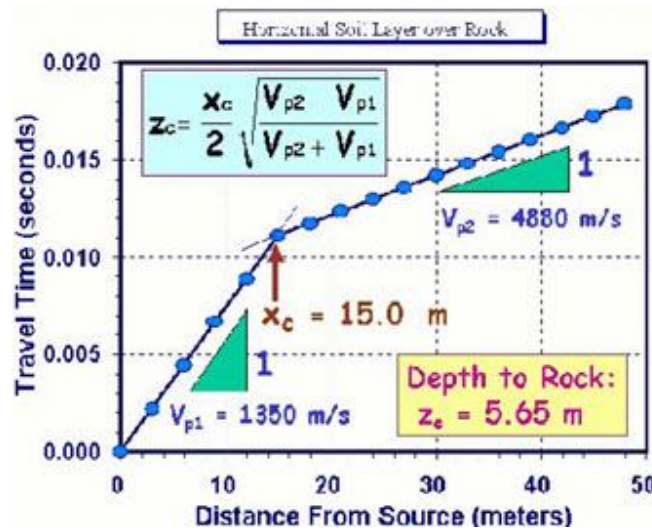
ASTM D-5777	شماره استاندارد آزمایش
های زیر سطحی شناسایی و تعیین لایه	هدف آزمایش
عمق سنگ بستر، ضرایب دینامیکی خاک و شناسایی P و S به دست آوردن سرعت موج زون های کم سرعت از پرسرعت	موارد کاربرد

در روش انکسار لرزه ای یا شکست مرزی، سرعت موج فشاری با استفاده از یک ردیف ژئوفون که در محل کار گذاشته شده اند، اندازه گیری می شود. با استفاده از نتایج آن عمق سنگ بستر و ضخامت لایه های زیر سطحی و احیاناً سطح آب زیرزمینی تعیین می گردد. زمانی که امواج صوتی از سطح مشترک بین دو لایه که دارای سرعت های متفاوت هستند، عبور می کنند، انکسار می یابند. زاویه موجی که سطح مشترک را ترک می کند نسبت به زاویه برخورد تغییر می کند. این تغییر زاویه به سرعت های نسبی بستگی دارد. زمانی که موج از لایه با سرعت پایین به لایه با سرعت بالا حرکت می کند، موج در سطح بالایی لایه پایینی انکسار پیدا می کند. هنگامی موج حرکت می کند، موج انکسار یافته در لایه بالایی انتشار می یابد. در این حالت این موج به سطح ژئوفون ها وارد می شود. سرعت امواج صوتی در لایه پایینی در مقایسه با لایه بالایی بیشتر است، بنابراین در برخی از نقاط، در سطح موج انکسار یافته نسبت به موج مستقیم سبقت گرفته و سریعتر عبور می کند. در نتیجه موج انکساری اولین موجی خواهد بود که به ژئوفون ها می رسد و این حالت تا زمانی که موج سریعتر و عمیق تری وجود داشته باشد، پایدار خواهد بود. تفاوت زمان طی شده از موج دریافتی بین ژئوفون ها به میزان سرعت لایه پایینی بستگی دارد. اگر لایه مسطح باشد، امواج انکساری حاصل از خط مستقیمی که دامنه آن مستقیماً به سرعت وابسته است، تشکیل می شوند. نقطه ای که در آن امواج انکساری از امواج مستقیم پیشی می گیرند، مسافت متقاطع نامیده می شود و برای تخمین فاصله بخش های عمیق تا سطح انکساری به کار برده می شود. آزمایش های انکساری بر اساس زمان دریافتی حرکت زمین که توسط منبع ثبت شده تولید گشته در فواصل مختلف استوار شده است. اطلاعات بدست آمده از آزمایش های انکساری شامل سری های زمان در برابر مسافت است. این اطلاعات به صورت عمق سطح مشترک زیر سطح و سرعتی که در آن موج درون هر یک از لایه های زیر سطحی حرکت می کند. این سرعت ها توسط ثابت های فیزیکی که پارامترهای الاستیکی نامیده می شوند، کنترل می گردند. مزایای روش لرزه ای انکساری: مشاهدات انکساری به منابع تولید کننده امواج کمتر و به تبع آن به دریافت کننده های کمتری نیازمند است و در مقایسه با روش انعکاسی ارزان قیمت تر می باشد. پردازش های کمی در مشاهدات انکساری انجام می شود. از آنجایی که نسبت کوچکی حرکت زمین ثبت می شود، ایجاد مدل ها و تفسیرهای مربوط به آن در مقایسه با سایر روش های ژئوفیزیکی آسانتر است.

معایب روش لرزه ای انکساری: از روش انکسار لرزه ای زمانی می توان سود برد که حرکت ایجاد شده و انتشار یافته با افزایش عمق زمین افزایش پیدا کند. مشاهدات انکسار لرزه ای اغلب به صورت لایه ای تفسیر می شوند. این لایه ها دارای شیب و توپوگرافی هستند. مشاهدات لرزه ای انکساری فقط برای زمان دریافتی حرکت زمین در مسافتهای مختلف از منبع به کار برده می شود. مدلی که برای زیر سطح زمین داده می شود از اصلاح زمان های دریافتی مشاهده شده، بدست آمده است.



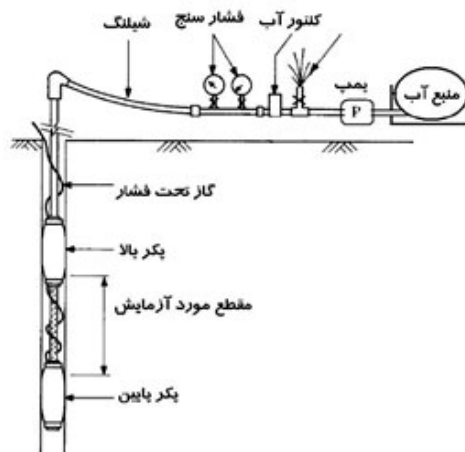
(NHI, 2001) جانمایی ابزارها و شیوه عملکرد و نحوه محاسبه عمق سنگ بستر روش انکسار لرزه ای



### آزمایش لوژان (Lugeon Permeability Test Method)

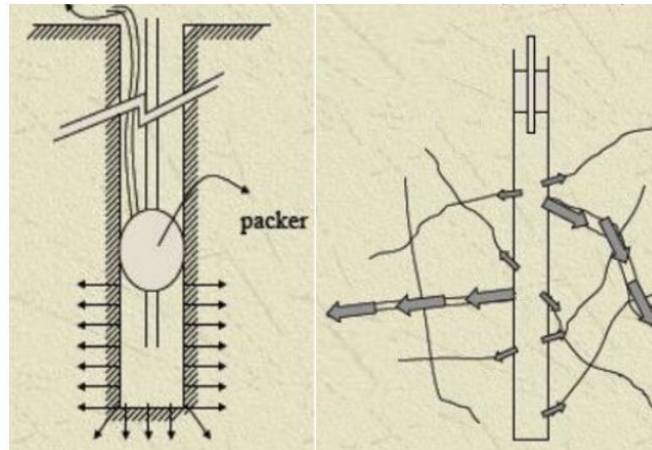
ISRM-RM for the Lugeon Test	شماره استاندارد آزمایش
تعیین پتانسیل تزریق پذیری و نفوذپذیری	هدف آزمایش
این آزمایش برای سنگ ها کاربرد دارد	موارد کاربرد

مرسوم ترین روش اندازه گیری نفوذپذیری توده های سنگی درزه دار در صحرا، روش لوژان است. در این روش ابتدا میزان آب خوری توده تحت یک فشار ثابت اندازه گیری می شود و سپس با تغییر فشار آب منحنی تغییرات خوردن آب در برابر فشار آب ترسیم می شود. از تفسیر این نمودار عدد لوژان به دست می آید عدد لوژان در واقع نماد غیرمستقیم نفوذپذیری توده های سنگ است و طبق تعریف یک واحد لوژان برابر نفوذ پذیری توده سنگی است که از یک متر طول گمانه حفاری شده در آن، تحت فشار ۱۰ بار، یک لیتر در دقیقه آب عبور کند.

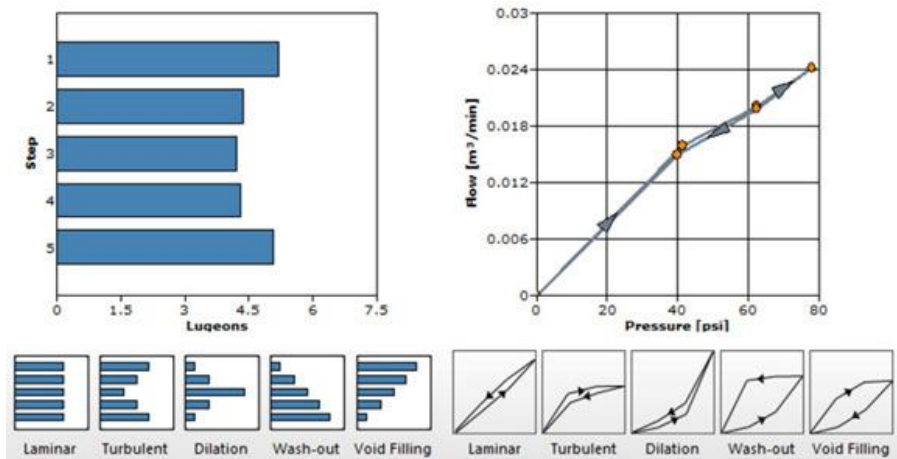


این آزمایش لوژان اولین بار در سال ۱۹۳۳ توسط موریس لوژان به منظور برآورد تزریق پذیری و نفوذ پذیری سنگها ارائه شد. این آزمایش اغلب بصورت ۵ متری انجام می شود که در بعضی مواقع بصورت ۴ و ۳ متر نیز گرفته می شود. بعد از حفر چاه و رسیدن به عمق مورد نظر آزمایش، ابتدا باید مقطع با آب زلال شسته شود سپس پکر را به اصطلاح پک کرده و این گونه گمانه آماده آزمایش می باشد. پکر یا از نوع مکانیکی است که با فشار هیدرولیک دستگاه حفاری انجام می گردد و یا از پکر پنوماتیک که با

فشار آب یا انتقال هوا با شیلنگ پلاستیکی (نایلکس) بروی پکر انجام می شود سپس کنتوری که قبلا کالیبره شده بروی مسیر آب که می بایست آب زلال باشد بسته و با یک عدد سه راهی که دقیقا پشت کنتور است و یک عدد مانومتر (گیج فشار) جهت کنترل فشار مقطع بروی سه راهی بسته می شود. آزمایش لوژان معمولا ۷۵ دقیقه گرفته می شود که با توجه به شرایط تغییر می کند، در مقاطع خشک ۵ دقیقه برای پر آب کردن مقطع بدون اعمال فشار در نظر گرفته می شود (اشباع) و در گمانه های دارای سطح آب با ۵ دقیقه پله اول رادها (های لوله حفاری) و شیلنگ ها تا سر مقطع انجام می شود.



باید توجه کرد میزان فشاری که برای تست در نظر گرفته می شود، ممکن است برای هر مقطع در یک گمانه متفاوت باشد. لذا هنگام انجام تست حتما باید به این مورد توجه گردد. بعد از اشباع ۴ مرحله دیگر باقی می ماند، که در ۲ مرحله فشار از حداقل به حداکثر می رسد (رفت) و در دو مرحله فشار از حداکثر به حداقل رسانده می شود. لازم به تذکر می باشد که هر مرحله میزان توقف، ۲ بازه ۵ دقیقه ای می باشد (۱۰ دقیقه)، به شرط اینکه حداکثر تغییر قرائت کنتور در ۵ دقیقه دوم (نسبت به ۵ دقیقه اول) کمتر از ۱۰ درصد باشد. اگر تغییر بیشتر از ۱۰ درصد باشد باید توقف در آن مرحله ادامه پیدا کند تا تغییر به کمتر از ۱۰ درصد برسد، از این رو ممکن است یک ۵ دقیقه یا بیشتر به زمان توقف در آن مرحله افزوده شود. هنگام ارزیابی نتایج باید دقت کرد که فشار واقعی در مقطع با لحاظ کردن اختلاف ارتفاع بین مانومتر و تراز آب زیرزمینی (یا وسط مقطع مورد آزمایش در نقاطی که آب زیر زمینی وجود نداشته باشد) بدست می آید از اینرو فشار در مرکز مقطع از فرمول روبر بدست می آید:



که در این فرمول  $P$  فشار در مرکز مقطع مورد آزمایش می باشد ،  $P_m$  فشار قرائت شده روی مانومتر ،  $H_1$  تراز مانومتر ،  $H_2$  تراز آب زیرزمینی ( یا وسط مقطع مورد آزمایش) است. سپس با استفاده از فرمول روبرو مقدار لوژان بدست می آید که در این فرمول،  $Q$  جریان آب در مقطع آزمایش بر حسب لیتر در دقیقه می باشد،  $L$  طول قطعه آزمایش به متر،  $t$  زمانی که در آن دبی  $Q$  جریان داشته است بر حسب دقیقه و  $P$  فشار آزمایش است.

### دستورالعمل آزمایش های تراوایی، نشریه ۱۸۸

شماره استاندارد آزمایش	دستورالعمل آزمایش های تراوایی، نشریه ۱۸۸
هدف آزمایش	تعیین ضریب نفوذپذیری خاک
موارد کاربرد	این آزمایش برای تعیین نفوذپذیری مصالح ناپیوسته مثل آبرفت ها، واریزه ها و خاک های برجا شود استفاده می

یکی از پارامترهای مهم مصالح ناپیوسته، ضریب تراوایی این مصالح در حالت برجا است که در طراحی سازه ها به ویژه سازه های آبی جزء پارامترهای اصلی به حساب می آید و در محاسبات نشت آب از پی ها و دیواره های آب بند به کار گرفته می شود. برای تعیین ضریب تراوایی مصالح یاد شده، از آزمایش لوفران یا آزمایش پمپاژ داخل گمانه استفاده می شود. در این آزمایش میزان آبخوری لایه های مورد نظر تحت فشار ثابت اندازه گیری شده و میزان تراوایی محاسبه می شود و در هر شرایطی صرف نظر از موقعیت سطح آب زیرزمینی قابل اجرا است. این آزمایش پا به پای حفاری در فواصل ۲ متر یکبار (تا حداکثر ۳ متر) یا هر موقع که جنس مواد از نفوذ ناپذیر به نفوذپذیر تبدیل می شود باید انجام گردد. آزمایش نفوذپذیری لوفران در مورد مواد مختلف غیر چسبنده و ساختگاه های هوازده و در شرایط مختلف هیدرئولوژیک مورد استفاده قرار میگیرد. این روش در خاکهای چسبنده نیز بکار می رود ولی نتایج کمتر مورد اعتماد خواهند بود.

#### مراحل آماده سازی:

برای انجام آزمایش ابتدا لازم است گمانه تا عمق مورد نظر برای آزمایش، حفاری و پوشش شود و پوشش بنحوی انجام شود که در تماس کامل با دیواره گمانه قرار گیرد. قسمت انتهائی گمانه باید آب بندی شود تا جریان آب از گمانه به آبرفت فقط از جدار قسمت مورد آزمایش و نیز ته گمانه صورت گیرد. بدین منظور، لوله پوشش ۴۰ تا ۵۰ سانتیمتر بالا کشیده می شود، سپس از ته گمانه بطرف بالا ارتفاع ۸۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر با رس یا بنتونیت پر می شود. می توان از مخلوط رس - سیمان نیز بخصوص در زیر تراز آب زیرزمینی استفاده کرد. چنانچه سطح آب زیرزمینی پائین تر از قسمت مورد آزمایش باشد از رس که دارای رطوبت در حد پلاستیک باشد استفاده می شود. این مواد در سه تا پنج لایه باید ریخته شده و کوبیده گردد. چنانچه سطح آب زیرزمینی بالاتر از قسمت مورد آزمایش باشد از قطعات (کلوخه) بنتونیت استفاده شده و با وسائل مناسب متراکم می گردد. کیفیت آزمایش نفوذپذیری در آبرفت بستگی به نحوه اجرای موارد فوق الذکر داشته و دقت فراوانی در اجرای صحیح عملیات باید بعمل آید. زمانی که ستون رس یا بنتونیت تکمیل شد ، لوله ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر به پائین رانده می شود. در مرحله بعدی ، حفاری گمانه در داخل ستون آب بند زیر لایه زیر آبرفت به عمق ۸۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر پائینتر از ستون آب بند انجام می شود. قطر حفاری ۶۶ می باشد البته بهتر است قطر حفاری ۸۶ میلیمتر در نظر گرفته شود. دقت خاصی در تمام مراحل انسجام این عملیات و نیز مراحل بعدی کار ضروری است. بدیهی است ادامه حفاری جهت دستیابی به عمقهای پائین تر و انجام مراحل بعدی ، باهمان قطر اولیه حفاری صورت خواهد گرفت. بهتر است قسمت مورد آزمایش با انجام پمپاژ تمیز شود تا برای آزمایش آماده گردد. بعد از این عملیات باید مدتی صبر کرد تا سطح آب زیر زمینی به حالت طبیعی و متعادل باز گردد. سه بار قرائت به فواصل ۱۰ دقیقه برای حصول اطمینان ، ضروری است. آزمایش نفوذپذیری در دو یا سه روش بشرح زیر انجام خواهد شد تا بدین طریق نتایج اطمینان بخش و قابل مقایسه ای بدست آید.

#### روش آزمایش

این آزمایش را به دو صورت می توان انجام داد:

### آزمایش تعیین ضریب تراوایی افقی:

این آزمایش در خاک‌هایی امکان پذیر است که دیواره گمانه در طول قطعه مورد نظر ریزش نکند و در آن یک قطعه آزمایش می شود. در این روش، نتایج آزمایش زمانی قابل قبول است که طول قطعه بزرگتر یا مساوی ۱۰ برابر شعاع گمانه باشد.

### الف) بار آبی خیزان و افتان

K برابر ضریب تراوایی بر حسب سانتی متر بر ثانیه، C برابر ضریب ثابت برای قطعه مورد آزمایش، L طول قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتی متر، H طول ستون آب تا وسط قطعه مورد آزمایش یا سطح ایستایی (هر کدام کوچکتر باشد) بر حسب سانتی متر و r شعاع گمانه در محل قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتی متر، t برابر زمان افت و یا خیز آب بر حسب ثانیه و h برابر افت یا خیز سطح ایستایی در زمان t بر حسب سانتی متر.

### ب) سطح آب ثابت

K برابر ضریب تراوایی بر حسب سانتی متر بر ثانیه، Q شدت جریان ورودی آب بر حسب سانتی متر مکعب در ثانیه، L طول قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتی متر، H طول ستون آب تا وسط قطعه مورد آزمایش یا سطح ایستایی (هر کدام کوچکتر باشد) بر حسب سانتی متر و r شعاع گمانه در محل قطعه مورد آزمایش بر حسب سانتی متر.

### آزمایش تعیین ضریب تراوایی قائم:

این آزمایش برای خاک‌هایی امکان پذیر است که جدار گمانه در طول مورد نظر ریزش می کند. در این موارد لوله جدار تا انتهای گمانه رانده می شود و فقط کف گمانه مورد آزمایش قرار می گیرد و به این دلیل آن را آزمایش نقطه ای هم می نامند.

از نقطه نظر شیوه پمپاژ آب، آزمایش لوفران به دو صورت زیر انجام می شود:

ریختن آب به داخل گمانه برای گمانه‌هایی که سطح آب آنها پایین باشد، انجام می شود.

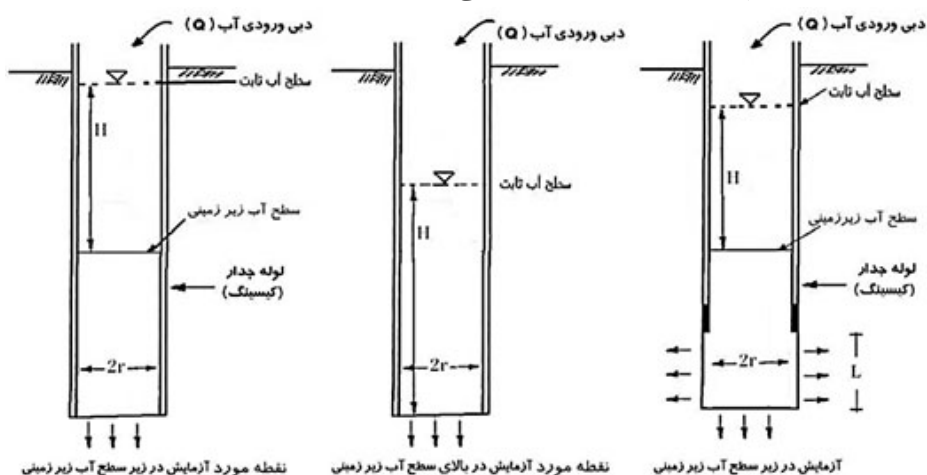
تخلیه آب از گمانه برای گمانه‌هایی که انجام می شود که سطح آب آنها در نزدیکی سطح زمین باشد.

بر اساس نحوه افزودن و یا خارج کردن آب از گمانه نیز آزمایش لوفران به یکی از سه روش زیر انجام می شود:

**بار ثابت:** بطور مداوم در طول آزمایش آب به سر لوله گمانه ریخته می شود تا سطح آب ثابت بماند. میزان آب افزوده در

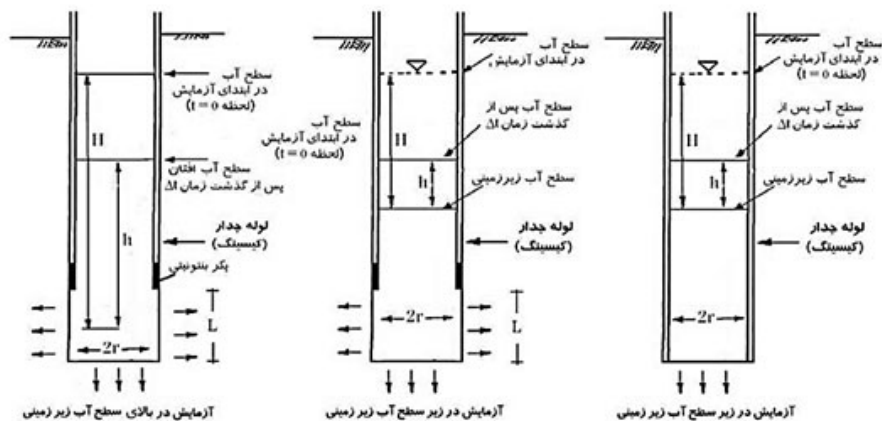
طول زمان اندازه گیری می شود. آزمایش، زمانی تکمیل است که میزان آب در سه قرائت ۱۰ دقیقه‌ای با تفاوت ۱۰٪ ثابت

بماند. در این حالت مقدار نفوذپذیری از رابطه زیر به دست می آید:



آزمایش لوفران به روش بار آبی ثابت در حالت های نقطه ای (چپ و وسط) و قطعه ای (راست)

که در آن  $K$  برابر ضریب نفوذپذیری بر حسب سانتی متر بر ثانیه،  $h$  برابر شعاع داخلی لوله جداری در کف گمانه بر حسب سانتی متر،  $H$  برابر طول ستون آب تا نقطه مورد آزمایش یا تا سطح آب زیرزمینی بر حسب سانتی متر (هرکدام کوچک تر باشند) و  $t$  برابر زمان افت و یا خیز آب بر حسب ثانیه و  $h$  برابر افت یا خیز سطح ایستابی در زمان  $t$  بر حسب سانتی متر. **بار افتان** لوله چاه پر از آب شده و سپس قطع می گردد. افت آب در لوله در زمانهای مختلف یادداشت می شود. هرگاه شرایط مذکور در روش الف حاصل شود آزمایش تمام است.



آزمایش لوفران به روش بار آبی افتان در حالت های قطعه ای (چپ و وسط) و نقطه ای (راست) که در آن  $K$  برابر ضریب نفوذپذیری بر حسب سانتی متر بر ثانیه،  $h$  برابر شعاع داخلی لوله جداری در کف گمانه بر حسب سانتی متر،  $H$  برابر طول ستون آب تا نقطه مورد آزمایش یا تا سطح آب زیرزمینی بر حسب سانتی متر (هرکدام کوچک تر باشند) و  $t$  برابر زمان افت و یا خیز آب بر حسب ثانیه و  $h$  برابر افت یا خیز سطح ایستابی در زمان  $t$  بر حسب سانتی متر. خیز یا افت آب در روشهای الف یا ج در زمانهای ۱- ۲- ۳- ۴- ۵- ۱۰ دقیقه و حداقل دو قرائت دیگر هر یک به فواصل زمانی ۱۰ دقیقه باید اندازه گیری شود. در این روش، میزان جریان آب برای ثابت نگهداشتن سطح آب در دقایق ۱- ۲- ۳- ۴- ۵- ۱۰ و دو قرائت دیگر بفواصل ۱۰ دقیقه اندازه گیری می شود.

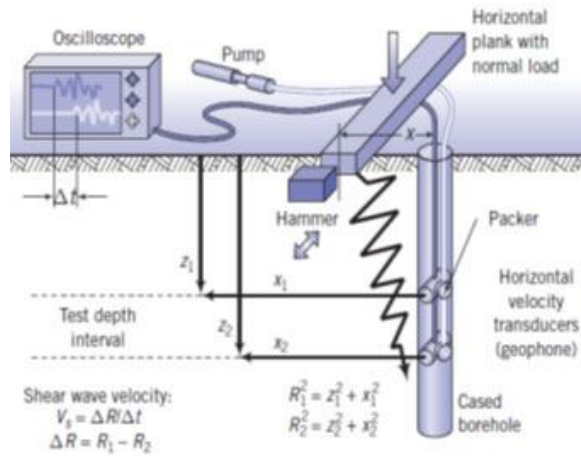
**بار خیزان**: آب زیرزمینی با پمپ خارج می شود بنحوی که سطح آب ۲ تا ۳ متر افت نماید. سپس آب در زمانهای مختلف یادداشت می شود تا زمانی که به حالت تعادل برسد.

#### (Downhole Seismic Testing) ای آزمایش لرزه نگاری درون گمانه

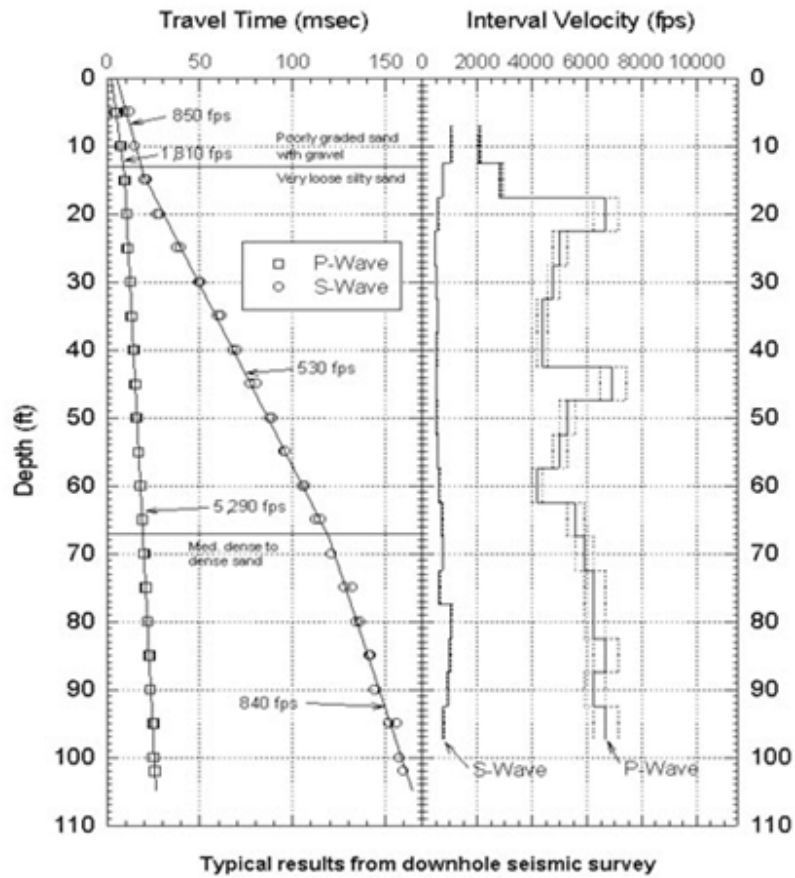
ASTM D7400-14	شماره استاندارد آزمایش
شناسایی لایه بندی و تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ و تخمین پارامترهای دینامیکی گیری سرعت انتشار امواج فشاری و برشی مربوط به هر لایه بر مبنای اندازه	هدف آزمایش
انواع سنگ و خاک	موارد کاربرد

آزمایش درون گمانه ای به هدف شناسایی لایه بندی خاک و مقاومت آن ها استفاده می گردد. اساس این روش بر مبنای اندازه گیری سرعت انتشار امواج فشاری و برشی و استفاده از آن جهت تفکیک لایه ها و تخمین پارامترهای دینامیکی خاک می باشد. در این متناسب با قطر ژئوفون های PVC آزمایش گمانه ها می بایست به روش ماشینی حفاری شده و پس از قرارگیری لوله از جنس درون گمانه، اطراف لوله از ماسه ریزدانه با دانه بندی یکنواخت پر گردد به نحوی که لوله کاملاً در جای خود ثابت قرار گیرد منبع ارتعاش در سطح زمین و ژئوفون ها درون گمانه قرار می گیرند و با ایجاد ارتعاش در سطح زمین و دریافت امواج در اعماق مختلف، با توجه به زمان و فاصله طی شده توسط موج های ارتعاشی، سرعت آن ها در اعماق مختلف قابل محاسبه خواهد بود و با

توجه به تغییرات سرعت موج در خاک‌های با جنس مختلف، امکان شناسایی لایه‌بندی و جنس خاک و نیز تخمین پارامترهای خاک استفاده نمود.



تجهیزات آزمایش Downhole





### آزمایش نفوذسنج جیبی یا پنترومتر (Soil Pocket Penetrometer)

ASTM D 1558 & D 2573	شماره استاندارد آزمایش
تعیین مقاومت فشاری محدود نشده در محیط آزمایشگاه یا صحرای	هدف آزمایش
این آزمایش برای خاک‌های چسبنده کاربرد دارد	موارد کاربرد

آزمایش نفوذسنج جیبی، آزمایشی کم هزینه و با تجهیزات ساده می باشد. این آزمایش را می توان هم بصورت درجا و هم داخل آزمایشگاه انجام داد. این ابزار قادر به اندازه گیری مقاومت برشی زهکشی نشده خاک های چسبنده از ۰ تا ۲,۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد. دستگاه آزمایش پنترومتر جیبی دارای شاخصی است که به موجب فرورفتن میله پنترومتر جابجا شده و به روی عدد موجود بر میله مدرج قرار می گیرد. مقاومتی که خاک در برابر فرورانش نوک استوانه ای به میزان مشخص شده ۶ میلی متر نشان می دهد، موجب برآورد مقاومت فشاری محدود نشده خاک (qu) بر روی استوانه مدرج بر این ابزار که به فنر ویژه ای با سختی مشخص متصل می باشد، می شود. با قرائت عدد مورد نظر و تقسیم آن بر عدد ۲ مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده خاک قابل محاسبه است. به جهت سادگی و کم هزینه بودن این آزمایش در تعیین مقاومت برشی، این ابزار روش مفیدی برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک است. همچنین بمنظور ارزیابی ناهمسانی در مقاومت برشی خاک و مقایسه مقادیر مقاومت برشی زهکشی نشده در دو راستای افقی و قائم می توان از این ابزار مناسب و کم هزینه استفاده نمود.



### آزمایش برش مستقیم برجا برای خاک (In- situ Direct Shear test for soil)

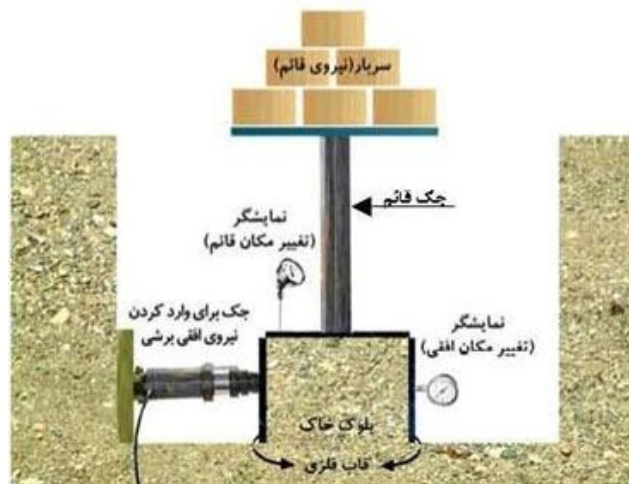
--	شماره استاندارد آزمایش
تعیین پارامترهای مقاومتی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خاک بصورت برجا	هدف آزمایش
تحلیل پایداری گودبرداری ها و تخمین ضریب اطمینان برای ترانشه ها و برآورد صحیح ظرفیت باربری پی های خاکی	کاربرد آزمایش

با توجه به گسترش روزافزون ساخت و ساز و انجام پروژه های عمرانی مختلف، شناخت ویژگی های ژئوتکنیکی آبرفت های درشت در این مصالح CPT و SPT دانه در بسیاری از مناطق مثل شهر تهران لازم است. انجام برخی آزمایشهای برجای متداول نظیر کاربرد ندارد، همچنین وجود قطعات درشت در جداره گمانه های حفر شده باعث تفاوت بین رفتار واقعی توده خاک و مقادیر اندازه گیره شده در آزمایشهای دقیقی مثل پرسیومتری و ایجاد پارگی پروب و آسیب به این دستگاه می شود. لذا انجام آزمایش هایی نظیر برش مستقیم برجا برای استخراج پارامترهای مهندسی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) مناسب است

[SPT آزمایش نفوذ استاندارد](#)

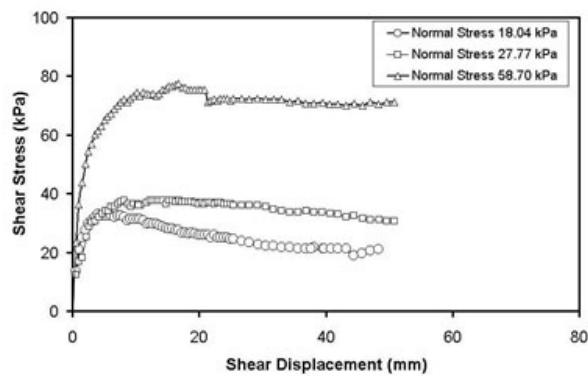
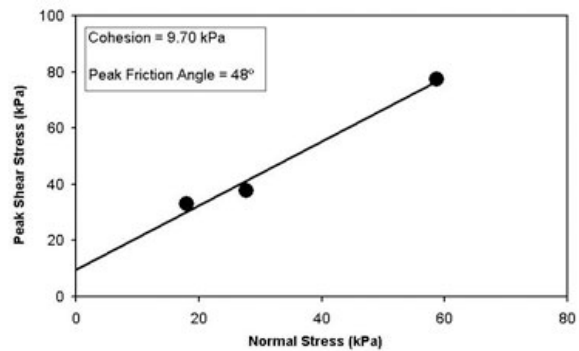
[CPT آزمایش نفوذ مخروط](#)

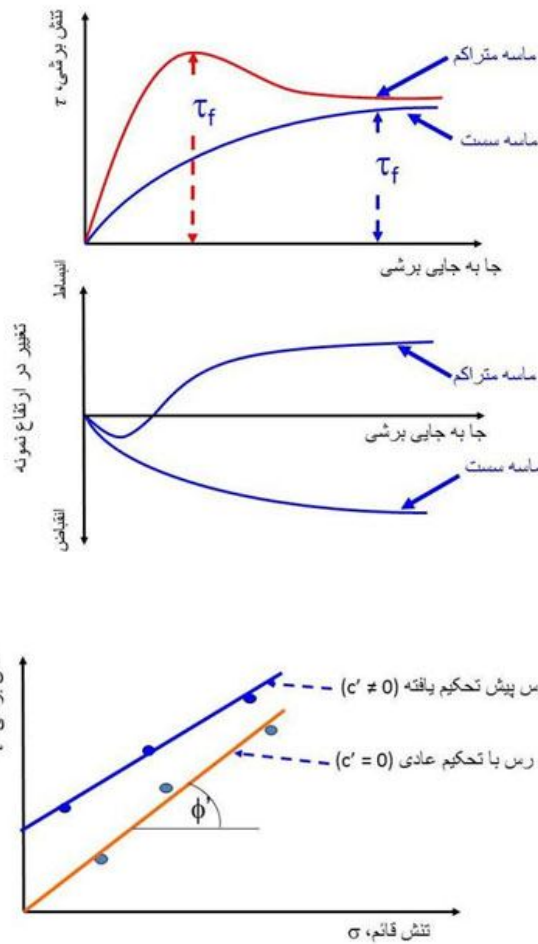
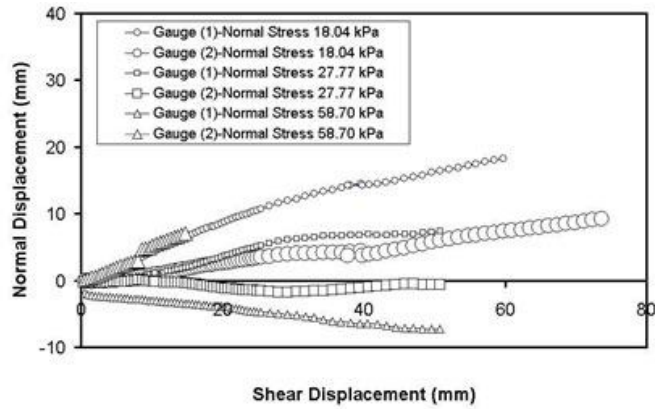
شمال جعبه برشی برای در بر گرفتن بلوک خاک تحت آزمایش، BS تجهیزات آزمایش برش برجای خاک بر اساس استاندارد جک هیدرولیکی، سکوی بارگذاری، نمایشگرهای افقی و قائم نمونه و سربارهای سربی و بتونی برای انجام آزمایش در روی زمین و پمپ آزمایش می باشد





نتایج بدست آمده از آزمایش شامل نمودار تنش برشی نسبت به تنش قائم در نقطه پیک، تنش برشی به تغییر مکان برشی و تغییر مکان قائم نسبت به تغییر مکان برشی می باشد. زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در این آزمایش بدون اعمال ضریب اطمینان بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع ارائه می گردد.





### زمایش نفوذ استاندارد (Standard Penetration Test)

ASTM D1586-11	شماره استاندارد آزمایش
های خاک و تخمین برخی از پارامترهای مقاومتی و تغییر دست آوردن معیاری از تراکم لایه به پذیرای خاک شکل	هدف آزمایش
های سنگی انجام نمی شود این آزمایش در لایه	موارد کاربرد

آزمایش نفوذ استاندارد در سال ۱۹۵۸ معرفی شد و در حال حاضر احتمالاً پرکاربردترین آزمایش صحرائی می‌باشد. دلیل محبوبیت این آزمایش، سادگی، ارزانی و وجود مطالعات بسیار گسترده جهت تخمین پارامترهای متعدد خاک بر اساس نتایج این آزمایش می‌باشد. آزمایش نفوذ استاندارد با نفوذ یک نمونه گیر قاشقی استاندارد با ضربات ناشی از سقوط چکشی به وزن ۶۳,۵ کیلوگرم و از ارتفاع ۷۶۰ میلی‌متری انجام می‌شود. مراحل انجام آزمایش به شرح زیر است:

- ۱- حفر گمانه با قطر ۲,۵ تا ۱۸ اینچ تا عمق مورد نظر،
- ۲- جدا کردن میله از سرمته حفاری در عمق مورد نظر و اتصال نمونه گیر SPT. شکل زیر نمونه گیر SPT را نشان می‌دهد که از یک استوانه تو خالی تشکیل شده است و می‌تواند در امتداد طول خود به دو نیم تبدیل شود.
- ۳- سقوط آزاد چکش ۶۳,۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۷۶ سانتی متری با استفاده از مکانیزم اتومکانیک و یا با مکانیزم قرقره و طناب.
- ۴- به دست آوردن عدد N از جمع تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۱۵ سانتی متر دوم و سوم. نتایج به دست آمده برای ۱۵ سانتی متر اول به دلیل اینکه خاک محدوده مذکور در عملیات حفاری دست خورده شده است و یا به علت ریزش جدار گمانه مورد اعتماد و توجه نیست.

۵- جدا کردن نمونه گیر SPT از میله حفاری و برداشتن خاک درون نمونه گیر به عنوان نمونه دست نخورده. عدد نفوذ استاندارد NSPT برای موارد مختلفی مانند فشار سربار، انرژی و... اصلاح می‌گردد. روابط همبستگی بسیاری برای تخمین پارامترهای مختلف خاک مانند تراکم، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، نسبت بیش تحکیمی، مدول الاستیسیته و... برحسب NSPT ارائه شده است. اسکمپتون پیشنهاد کرده است که نتایج خام آزمون نفوذ استاندارد با استفاده از رابطه زیر اصلاح شوند:

$$N/60 C_R C_S C_B E_m = \epsilon \cdot N$$

که در آن:

$E_m$ : ضریب بازدهی چکش بر حسب نوع چکش بین ۰,۴۵ تا ۰,۸۵؛

$C_B$ : ضریب اصلاح قطر گمانه بین ۱ تا ۱,۵ هرچه قطر گمانه بیشتر باشد  $C_B$  بزرگتر خواهد بود.

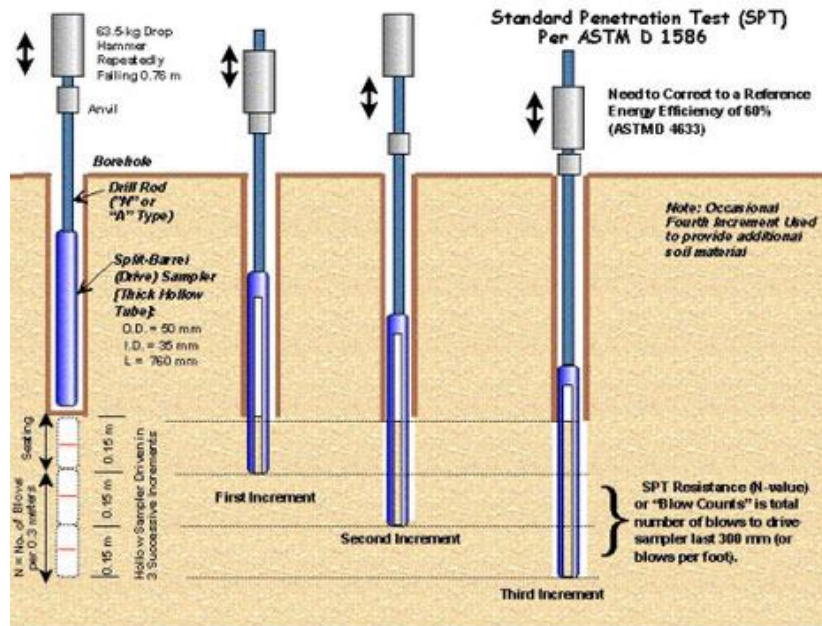
$C_S$ : ضریب اصلاح نمونه گیر برای نمونه گیرهای بدون آستری معادل ۱,۲ در نظر گرفته می‌شود.

$C_R$ : ضریب اصلاح طول میله است و هرچه میله بلندتر باشد، مقدار این ضریب بزرگتر است.

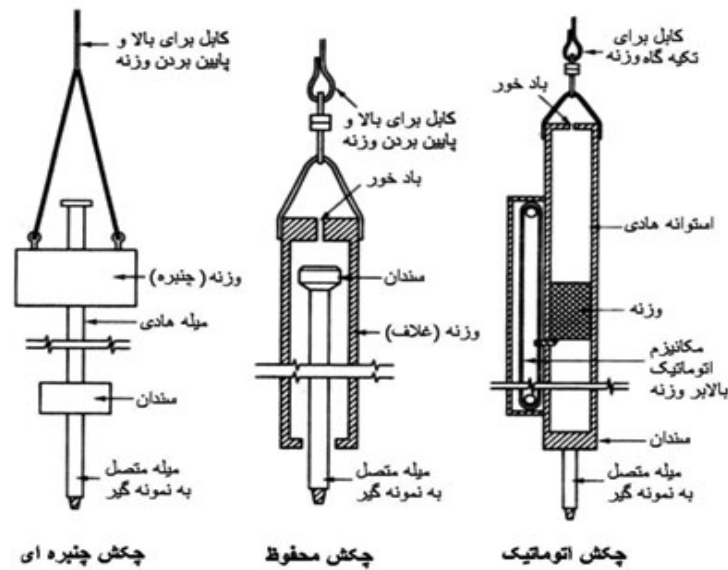
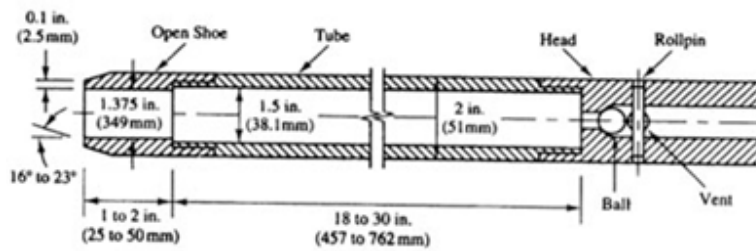
$N$ : عدد خام SPT بدست آمده در صحرا.

نحوه استخراج ضرایب اصلاحی در مراجع به صورت کامل بیان شده است.

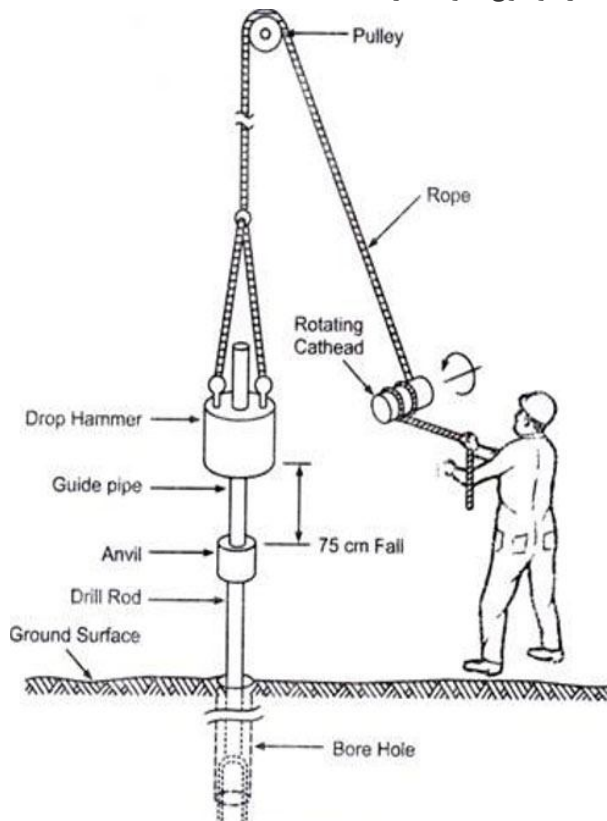
معمولاً آزمایش SPT بسته به شرایط در فواصل ۱,۵ تا ۵ متری در درون گمانه انجام می‌شود. عدد خام SPT برای خاکهای نرم به طور معمول کمتر از ۵ و برای خاک های خیلی متراکم بالاتر از ۵۰ است. جدول زیر محدوده مقادیر به دست آمده و تفسیر آن را نشان می‌دهد.



مراحل انجام آزمایش نفوذ استاندارد

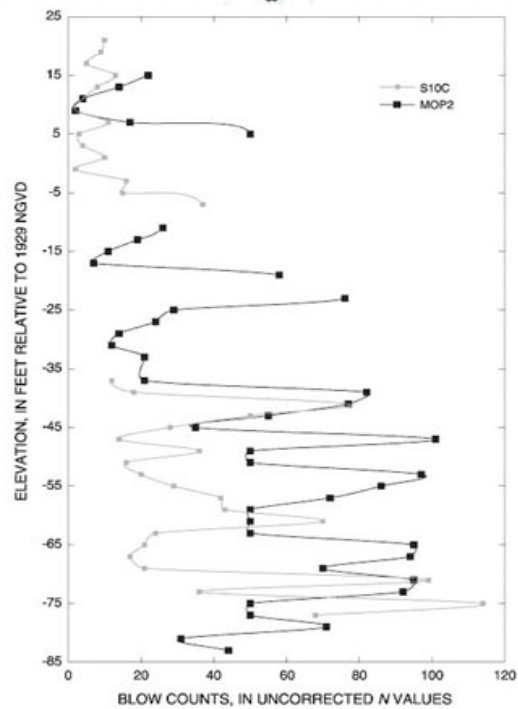
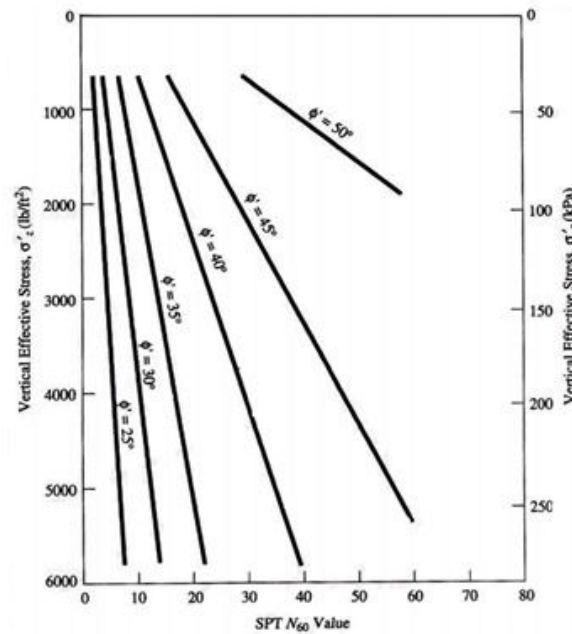


### SPT ابعاد استاندارد و انواع نمونه گیر دستگاه



طبقه بندی خاک	تشریح	$e, N$	مقاومت زهکشی نشده $S_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
خیلی نرم	انگشت شست به راحتی در آن نفوذ می کند و وقتی در داخل مشتمل فشرده می شود از لای انگشتان بیرون می زند.	$2 >$	$0.12 >$
نرم	انگشت شست حدود ۲۵ میلی متر در آن نفوذ می کند و با فشار اندک شکل می گیرد.	4-2	0.25-0.12
متوسط	انگشت شست با فشار ملایم حدود ۶ میلی متر در آن نفوذ می کند، با فشار زیاد انگشتان شکل می گیرد.	8-4	0.5-0.25
سفت	انگشت شست به راحتی در آن دندان می اندازد (مضرس میکند) و با فشار زیاد ۱۲ میلی متر در آن نفوذ میکند.	15-8	1-0.5
سخت	انگشت شست در آن دندان نمی اندازد ولی ناخن شست به سهولت در آن دندان می اندازد.	30-15	2-1
خیلی سخت	ناخن انگشت بر آن دندان نمی اندازد و یا به سختی دندان می اندازد.	$>30$	$>2$

اشکال زیر به ترتیب ارتباط بین  $\sigma'_z$  و  $N$  را بر حسب تنش موثر قائم برای ماسه های سیمانته نشده، و نمودار تعداد ضربات نسبت به عمق را نشان می دهد.







نمونه SPT



نمونه SPT



نمونه SPT

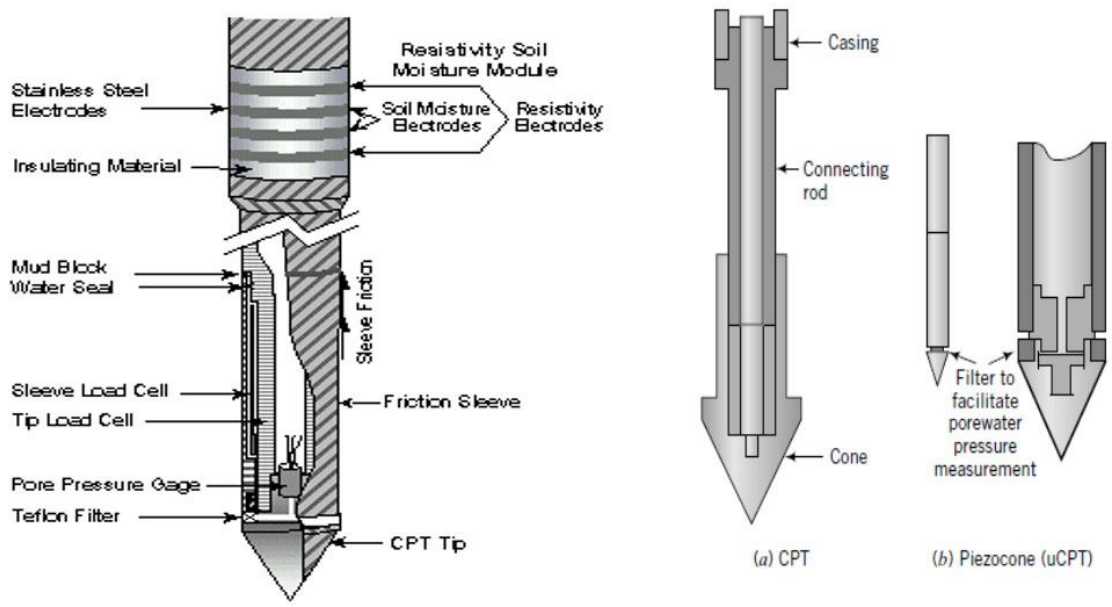


نمونه SPT

## آزمایش نفوذ مخروط (CPT (Cone penetration Test) و پیژونکن (CPTu (Piezo Cone) Penetration Testing

ASTM D3441-16	شماره استاندارد آزمایش
های خاک بندی و تعیین برخی از ویژگی شناخت طبقه.	هدف آزمایش
های شنی و سیمانته شده سخت با محدودیت همراه است استفاده از این آزمایش در لایه	موارد کاربرد

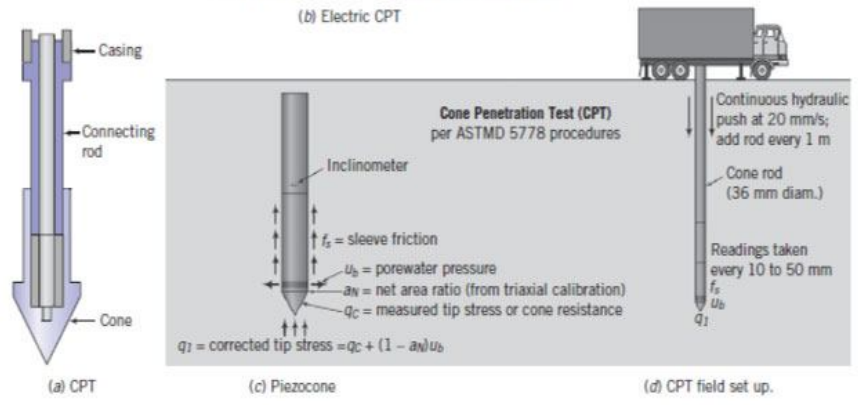
آزمایش نفوذ مخروط یکی از آزمایش‌های صحرایی پرکاربرد در شناخت، طبقه بندی و تعیین برخی از ویژگی های خاک می باشد. در این آزمایش با نفوذ مخروطی با زاویه رأس ۶۰ درجه و سطح ۱۰ سانتیمتر مربع با نرخ ثابت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه به درون زمین رانده شده و مقاومت آن در برابر نفوذ اندازه گرفته می شود. در آزمایش های نفوذ مخروط معمول، دو پارامتر مقاومت نوک (qc) و مقاومت اصطکاکی جداره (fc) اندازه گیری می شود. از این اندازه گیری ها به خوبی می توان برای شناخت، طبقه بندی و ارزیابی ویژگی های مختلف خاک مانند مشخصه های مقاومت و تغییر شکل آن استفاده نمود. بدین منظور روابط همبستگی متعددی برای تخمین پارامترهای مختلف خاک مانند دانسیته نسبی، مقاومت برشی زهکشی نشده و زاویه اصطکاک داخلی برحسب مقاومت نوک (qc)، مقاومت اصطکاکی جداره (fc) و نسبت اصطکاک ( $Fr=fc/qc$ ) ارائه شده است. بعلاوه با توجه به شباهت بین مخروط و شمع، تعیین ظرفیت باربری شمع یکی از متداول ترین کاربردهای آزمایش CPT می باشد. آزمایش CPTU نیز که از آزمایش CPT سرچشمه گرفته، قابلیت مازاد اندازه گیری فشار آب حفره ای را نیز دارد. پیدایش آزمایش پیژونکن CPTU، ابزار لازم برای ایجاد یک روش پیشرفته ایجاد کرده است و برخی روش های جدید بر پایه اندازه گیری های CPTU توسعه یافته است. یکی از مهم ترین مزیت های این روش، عدم نیاز به حفر گمانه برای انجام آن و سرعت انجام بالای آن می باشد. بطور کلی CPT آزمایشی قوی، ساده، اقتصادی و قابل اعتماد است که شناخت خوبی از خاک زیرسطحی تأمین می کند.



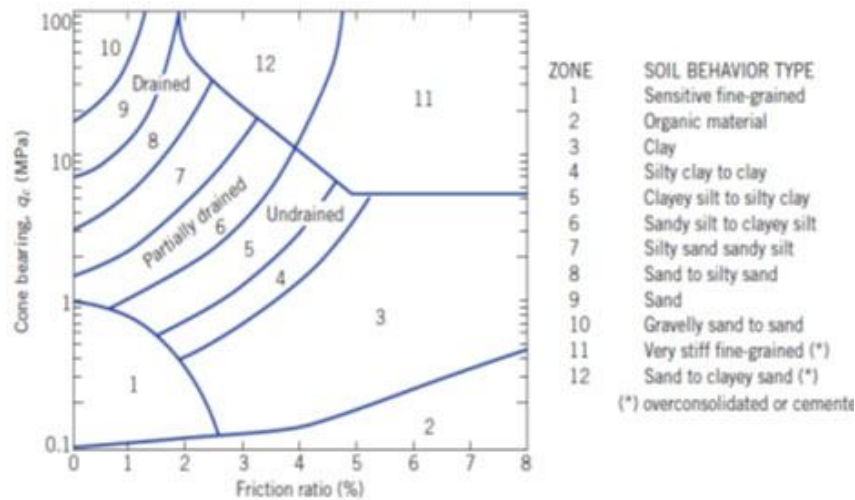
Electric cone penetrometer with 60° apex:  
 $d = 36 \text{ mm}$  (Area =  $10 \text{ cm}^2$ )  
 or  
 $d = 44 \text{ mm}$  (Area =  $15 \text{ cm}^2$ )

1. Saturation of cone tip cavities and placement of pre-saturated porous filter element.
2. Obtain baseline readings for tip, sleeve, porewater transducer, and inclinometer channels.

(b) Electric CPT



**Figure 3.17** (a) CPT, (b) electric CPT, (c) piezocone, (d) CPT field set up. (Courtesy of Professor Paul Mayne, Georgia Tech.)



CPT طبقه بندی خاک بر اساس نتایج آزمایش

### آزمایش برش مستقیم برجای سنگ (In-situ Direct Shear Test for Rock)

ASTM D4554	شماره استاندارد آزمایش
تعیین زاویه اصطکاک سطوح گسیختگی سنگ ها	هدف آزمایش
تحلیل تعادل حدی شیروانی های سنگی یا تحلیل پایداری پی سدها، تونل ها، مخازن و مغارها	کاربرد آزمایش

آزمایش برش مستقیم در سال ۱۹۷۴ توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ به عنوان یکی از روشهای تعیین مقاومت برشی برجای سنگ ارائه گردید. از نتایج این آزمایش میتوان در تحلیل تعادل حدی شیروانی های سنگی یا تحلیل پایداری پی سدها، تونل ها، مخازن و مغاره ها استفاده کرد. با این آزمایش، مقاومت برشی مستقیم نهایی و ماندگار سنگ به صورت تابعی از تنش عمودی اعمال شده بر صفحه برش تعیین میگردد. صفحه برش معمولاً سطح یک ناپیوستگی مثل درز و ترک، لایه بندی، تورق، گسل و یا فصل مشترک سنگ یا بتن یا خاک می باشد.

تجهیزات مورد نیاز آزمایش برش مستقیم:

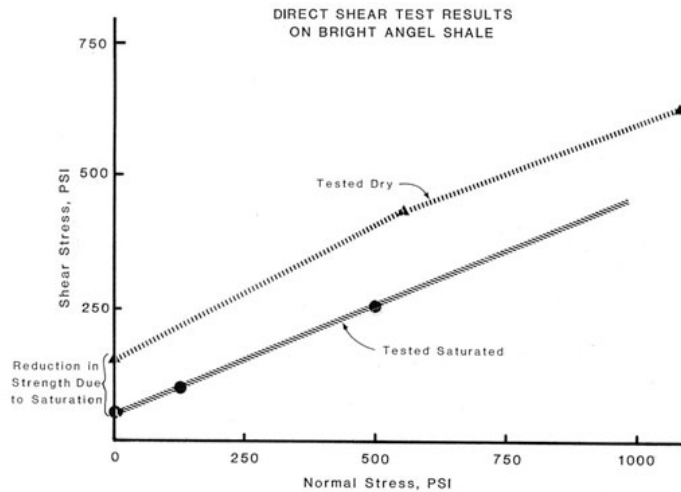
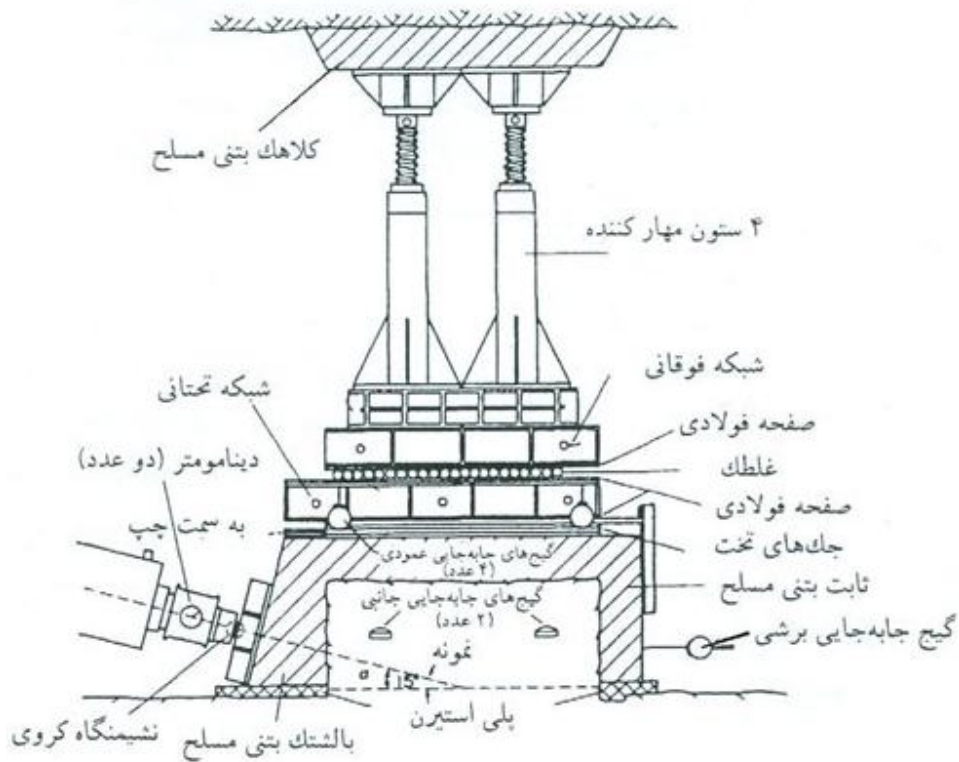
تجهیزات مربوط به بریدن و قابل گیری بلوک سنگی

سیستم اعمال بار عمودی شامل جک های تخت، جکهای هیدرولیکی یا سیستم وزنه ای (بار مرده) با ظرفیت کافی

سیستم اعمال نیروی برشی شامل جک های تخت یا جک های هیدرولیکی با قابلیت حداکثر جابجایی ۱۵۰ میلیمتر

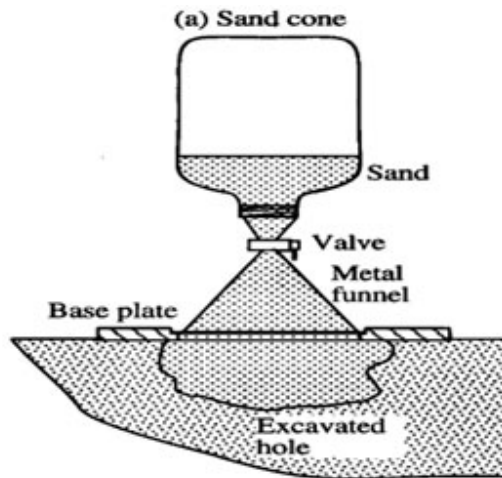
وسایل اندازه گیری نیرو شامل دو سیستم اندازه گیری با دقت بیش از  $\pm 2\%$  درصد نیروهای حداکثر آزمایش

وسایل اندازه گیری تغییر شکل شامل گیج های با دقت بیش از ۰,۰۵ میلیمتر و قابلیت اندازه گیری بیشتر از ۱۰۰ میلیمتر



**(Sand Cone Test):** آزمایش دانسیته در محل به روش مخروط ماسه

ASTM D 1556 و D1556M – 15e1	شماره استاندارد آزمایش
تعیین وزن مخصوص خاک را در محل.	هدف آزمایش
این آزمایش برای خاک هایی استفاده می شود که درصد قابل توجهی سنگ و مصالح درشت دانه بزرگتر از ۳۸ میلی متر نداشته باشند. همچنین خاک باید به اندازه کافی چسبندگی یا در هم قفل شدگی داشته باشد تا در حفر یک گودال کوچک دیواره های گودال پایدار بماند.	موارد کاربرد



با استفاده از این آزمایش می توان وزن مخصوص خاک را در محل تعیین نمود. این آزمایش برای خاک هایی استفاده می شود که درصد قابل توجهی سنگ و مصالح درشت دانه بزرگتر از ۳۸ میلی متر نداشته باشند. همچنین خاک باید به اندازه کافی چسبندگی یا در هم قفل شدگی داشته باشد تا در حفر یک گودال کوچک دیواره های گودال پایدار بماند.

این آزمایش عموماً برای کنترل وزن مخصوص خاکریزهای کوبیده شده در سد های خاکی، راهسازی و ... استفاده می گردد. این آزمایش به همراه آزمایش تراکم به عنوان مبنای پذیرش کفایت عملیات تراکم مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد این آزمایش در خاک های اشباع محدود بوده و همچنین در خاک های نرم و شدیداً شکننده توصیه نمی شود. هدف از این آزمایش به دست آوردن وزن مرطوب نمونه ای از خاک حفاری شده از یک گودال با شکل هندسی نامنظم است که اگر حجم آن گودال مشخص باشد دانسیته ظاهری یا مرطوب خاک به سادگی محاسبه می شود. در زمان انجام عملیات آگاهی از وزن ماسه لازم برای پرکردن کیف مخروط ماسه مفید است. در این آزمایش از نوع مخصوصی از ماسه به نام ماسه اتاوا استفاده می شود. در ابتدای کار باید وزن مخصوص ماسه اتاوا را تعیین کرد. برای این کار از آب استفاده می شود. بدین ترتیب که در ظرف مخصوصی پر از آب می شود و وزن ظرف و آب را به دست می آید. وزن ظرف اندازه گیری می شود. تفاضل این دو عدد برابر وزن آب داخل ظرف است و به این ترتیب حجم ظرف به دست می آید. سپس همان ظرف از ماسه اتاوا پر شده و توزین می شود. بدین طریق می توان وزن ماسه داخل ظرف را به دست آورد. از تقسیم کردن وزن به دست آمده برای ماسه به حجم ظرف وزن مخصوص ماسه اتاوا به دست می آید. در این قسمت هدف به دست آوردن وزن ماسه درون مخروط می باشد. بنابراین ابتدا دستگاه استوانه دانسیته روی سطح محکم و صافی قرار می گیرد. شیر خروج ماسه بسته و مقداری در آن ماسه در ظرف ریخته می شود. سپس شیر ظرف باز شده تا مخروط زیر دستگاه از ماسه پر شود. شیر را بسته و باقیمانده ماسه داخل دستگاه وزن می شود تا پس از کسر آن از وزن ماسه اولیه وزن ماسه زیر مخروط به دست آید. یا می توان ماسه را مستقیماً به دقت وزن کرد.

برای تعیین وزن مخصوص خاک در محل به طریق زیر عمل می شود:

سطح محلی که آزمایش می شود باید صاف باشد. استوانه دانسیته روی سطح صاف قرار داده می شود. حدود اطراف کف استوانه دانسیته روی زمین مشخص می شود. چاله آزمایش در وسط محدوده ای که روی زمین مشخص شده حفر می شود. در حین حفر چاله باید دقت شود که دیواره چاله خراب نشود و خاک کنده شده کاملاً در ظرفی جمع آوری و هیچگونه مصالحی دور ریخته نشود. استوانه دانسیته که مقدار معینی ماسه در آن ریخته شده روی چاله درست در محل مورد نظر قرار داده می شود، بطوریکه سوراخ شیر در مرکز چاله قرار گیرد. شیر خروج ماسه باز می شود تا تا چاله پر از ماسه شود. وقتی جریان ماسه به داخل چاله متوقف شد، شیر بسته می شود ماسه باقیمانده در دستگاه وزن می گردد. خاک کنده شده از چاله نیز وزن می شود. خاک کنده شده از چاله به خوبی مخلوط شده و مقداری جهت تعیین درصد رطوبت برداشته و پس از توزین در گرمخانه قرار می گیرد. پس از

آن که نمونه خاک در گرم خانه خشک شد (بعد از ۲۴ ساعت) نمونه وزن شده و از اعداد به دست آمده درصد رطوبت خاک محاسبه می‌شود. در نهایت با داشتن وزن خاک تر و بدست آمدن حجم ماسه داخل چاله با استفاده از چگالی ماسه، که برابر با حجم خاک خروجی است چگالی تر خاک بدست می‌آید.



#### محاسبات:

محاسبه حجم درون گودال به روش زیر انجام می‌شود:

که در این رابطه،  $V$  برابر حجم گودال بر حسب سانتی متر مکعب،  $M1$  برابر وزن ماسه استفاده شده برای پر کردن گودال آزمایش، قیف و صفحه بر حسب گرم،  $M2$  برابر وزن ماسه استفاده شده برای پر کردن قیف و صفحه و  $p1$  دانسیته حجمی ماسه بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب.

محاسبه وزن خشک ماسه برداشته شده از گودال آزمایش به روش زیر انجام می‌شود:

که در آن  $w$  برابر محتوای آب برداشته شده از گودال آزمایش (% )،  $M3$  وزن ماسه مرطوب برداشته شده از گودال آزمایش (گرم) و  $M4$  وزن خشک مواد برداشته شده از گودال آزمایش (گرم).

محاسبه دانسیته خشک و مرطوب در جای خاک به روش زیر انجام می‌شود:

که در این رابطه  $pm$  برابر دانسیته مرطوب مواد مورد آزمایش بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و  $pd$  برابر دانسیته خشک مواد مورد آزمایش بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است.

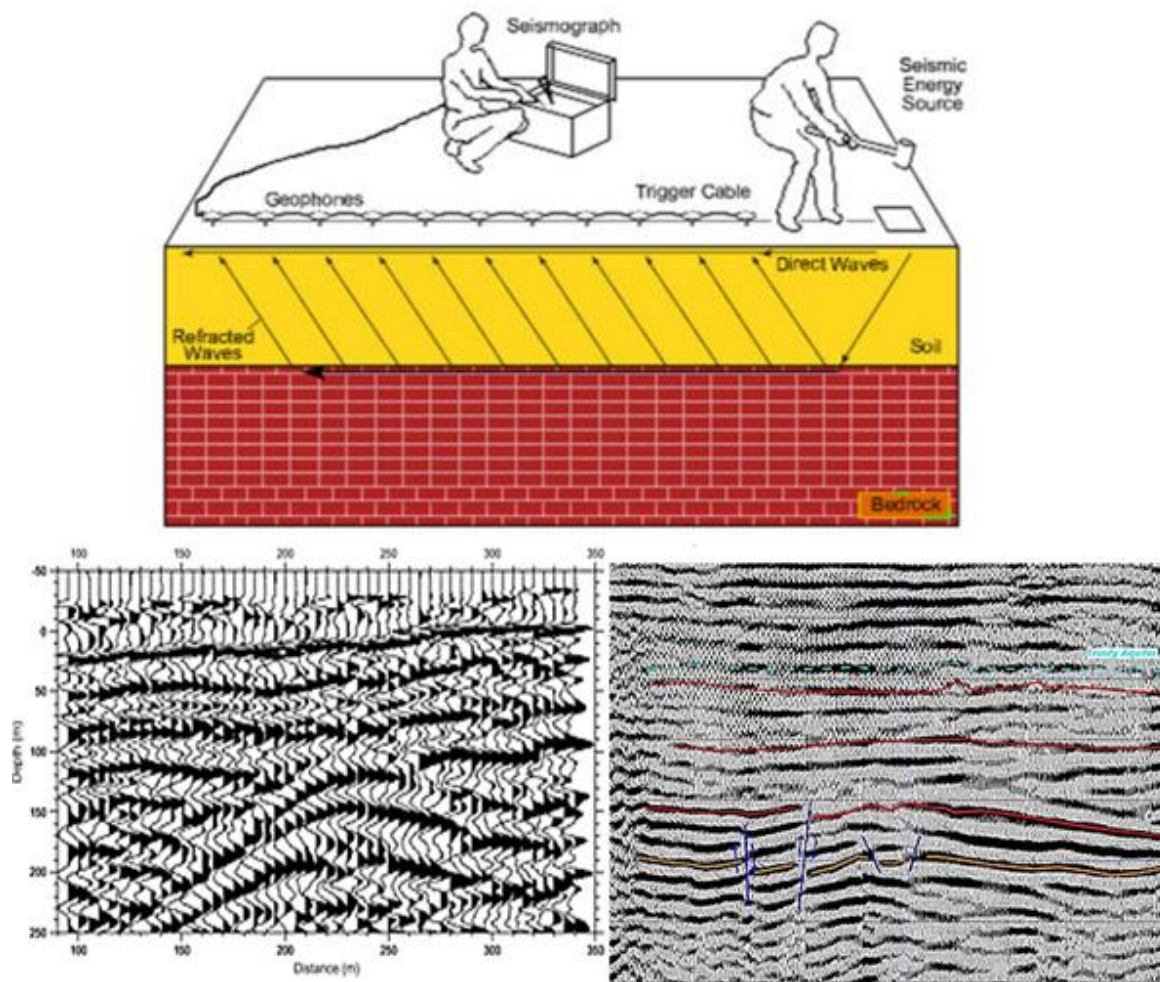
#### آزمایش نفوذسنج جیبی یا پنترومتر (Soil Pocket Penetrometer)

#### (Seismic Reflection surveys) لرزه نگاری انعکاسی کم عمق

شماره استاندارد آزمایش	D7128 - 05(2010)
هدف آزمایش	شناسایی و تعیین لایه های زیر سطحی
کاربرد آزمایش	شناسایی شیب گسل و لایه بندی، ساختارهای زمین شناسی، طاقدیس و ناودیس، ارزیابی حجم نفت گاز.

در این روش پس از تولید پالس به وسیله منبع، با گذشت زمانی مشخص، انعکاس امواج لرزه ای از زیر سطح زمین به ژئوفون ها می‌رسد. با اندازه گیری زمان دریافت امواج منعکس شده در موقعیت های مکانی متوالی، می توان پروفایل یا مقطعی از زمان های حرکت امواج لرزه ای تهیه کرد. تفاوت این روش با روش انکساری در آن است که امواج مورد بررسی و تحلیل در روش انعکاسی، امواج منعکس شده از سطح مشترک لایه های زیرسطحی می باشند، در حالی که در روش انکساری امواجی که در سطح مشترک لایه ها به علت اختلاف سرعت در لایه ها انکسار می یابند، ثبت و تحلیل می شوند. هنگامی که امواج از منبع واقع در سطح زمین منتشر می شوند، با توجه به شرایط زیرسطحی، گروهی از امواج به صورت مستقیم، گروهی دیگر به صورت انکساری یا انعکاسی در

فضا منتشر شده و نهایتاً ژئوفون ها همه امواج مذکور را دریافت می کنند. در روش انعکاسی تحلیل های ژئوفیزیکی بر اساس آن دسته از امواجی است که بصورت انعکاسی به گیرنده ها رسیده اند و چون این امواج به لحاظ عملی و نظری پیچیده هستند، برای به دست آوردن تصویر درست از لایه های زیرسطحی لازم است تعداد زیادی ژئوفون در سطح وجود داشته باشد، ولی با توجه به سرعت بالای امواج انکسار یافته از لایه های رویی سطح زمین صرفاً با تعداد اندکی ژئوفون می توان امواج انکساری را دریافت نموده و به راحتی مورد تحلیل قرار داد.



### (Flexible Dilatometer Test) پذیر آزمایش دیلاتومتر انعطاف

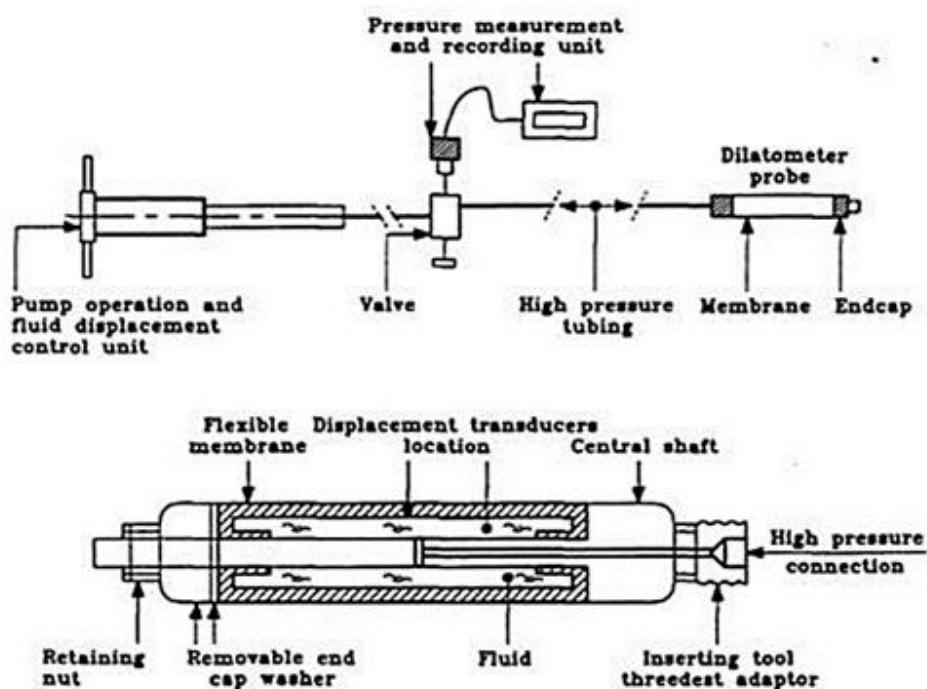
SM for Deformability Determination Using a Flexible Dilatometer – 1987 [EUR 4]	شماره استاندارد آزمایش
بررسی خواص تغییرشکل پذیری سنگ و تعیین جهت تنش های اصلی	هدف آزمایش
انواع خاک و سنگ	موارد کاربرد

هدف این آزمایش، اندازه گیری تغییرشکل در جای سنگ) آزمایش دیلاتومتر سنگ، (RDT و خاک) آزمایش دیلاتومتر خاک، (SDT) از طریق اندازه گیری انبساط شعاعی گمانه تحت فشار یکنواخت اعمال شده به وسیله پروب استوانه ای دیلاتومتر است.



این آزمایش شامل وارد کردن پروب استوانه ای با غشای انعطاف پذیر خارجی به درون گمانه، و اندازه گیری تغییرشکل شعاعی گمانه در حین انبساط پروب تحت فشار شعاعی مشخص، در بازه های زمانی مشخص در یک روند پیوسته، می باشد. این روش RDT برای سنگ های سخت و نرم قابل استفاده است، در حالی که SDT برای خاک های نرم و سخت توصیه شده است. نتایج آزمایشات دیلاتومتر استوانه ای برای تعیین خصوصیات تغییرشکل و خزش درجا در سنگ بکر استفاده می شود در سنگ های رسی یا شکننده و یا ساختگاه های دارای ترک و درزه که در آن به دست آوردن نمونه از گمانه سخت یا ناکافی می باشد، دیلاتومتر استوانه ای برای به دست آوردن اندیس های گمانه و مقایسه های تغییرشکل پذیری نسبی لایه های مختلف سنگ به کار می رود.





زمایش دیلاتومتری تخت مخصوص خاک (Flat Plate Dilatometer)

ASTM D6635	شماره استاندارد آزمایش
تعیین ویژگی‌های تغییر شکل پذیری توده سنگ	هدف آزمایش
برای کلیه خاک‌ها قابل استفاده است	موارد کاربرد

در سال ۱۹۸۶ به عنوان وسیله‌ای ساده جهت **Schmertmann** در سال ۱۹۸۰ و سپس **Marchetti** دیلاتومتر تخت توسط تعیین فشار افقی خاک بر شمع‌های تحت بارگذاری جانبی ساخته شد. طرح کنونی دیلاتومتر تخت شامل تیغه تختی به ضخامت ۱،۵ سانتیمتر و عرض ۹،۶ سانتیمتر با یک غشاء مدور به قطر ۶ سانتیمتر در مرکز آن می‌باشد.

آزمایش با نفوذ تیغه تحت سرعت ثابت ۲ سانتیمتر بر ثانیه به داخل زمین آغاز می‌گردد و در هر بازه نفوذ ۲۰ سانتیمتری، دو تا در زمانی انجام می‌گیرد که غشاء با اولین حرکت در تماس با خاک قرار می‌گیرد **A** سه قرائت فشار انجام می‌شود. قرائت نیز که **C** مربوط به زمانی است که غشاء به اندازه ۱،۱ میلی‌متر به داخل خاک اطراف وارد می‌شود. در صورت نیاز، فشار **B** قرائت اصلاح **P0** و **P1** با در نظرگیری تصحیح سختی غشاء به **B** و **A** فشار مربوط به وضعیت اولیه‌اش است قرائت می‌گردد. فشارهای محاسبه می‌گردد (**ID**) یا شاخص مصالح (**ED**) می‌گردد که از طریق آن‌ها پارامترهای اصلی مانند شاخص دیلاتومتری محققین مختلف ارتباطات مناسبی بین این شاخص‌ها و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک برقرار نموده‌اند که از طریق آن‌ها امکان تعیین این خصوصیات وجود خواهد داشت.

از مزایای عمده آزمایش دیلاتومتری می‌توان به دو مورد ذیل اشاره نمود

الف- دیلاتومتر وسیله‌ای ساده و اقتصادی برای تعیین خصوصیات مکانیکی خاک مانند سختی، مقاومت و تاریخچه تنش با قابلیت تکرار بسیار بالا در اعماق متوالی در یک محل است

ب- به دلیل هندسه و شکل دیلاتومتر، میزان دست‌خوردگی توده خاک از جمله کرنش‌های برشی و حجمی و غیریکنواختی ناشی از قراردادن این وسیله در هر عمق جهت تعیین خصوصیات خاک حداقل است که منجر به ارزیابی دقیق‌تری از شرایط و ویژگی‌های مکانیکی خاک خواهد شد



### روش های نمونه گیری

نمونه گیری از خاک

هدف از مطالعات ژئوتکنیک و اکتشافات صحرایی تعیین مشخصات خاک جهت شناسایی رفتار آن است. که بر اساس نتایج حاصل از حفاری ها و آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی تعیین می گردد. از این رو می بایست نمونه هایی از خاک تهیه و جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه ارسال گردد. نکته قابل تامل در نمونه گیری از خاک این است که نمونه مورد نظر می بایست معرف شرایط واقعی خاک در محل باشد. از این رو مشخصات نمونه گیر، نحوه نمونه گیری، شرایط حمل و نگهداری نمونه بسیار حائز اهمیت است. انواع نمونه با توجه به قابلیت انطباق با شرایط صحرایی به دو دسته زیر تقسیم می شود:

• نمونه دست خورده

• نمونه دست نخورده

نمونه دست خورده

در نمونه دست خورده ساختار صحرایی خاک، درصد تخلخل و رطوبت تغییر می کند ولی اندازه ذرات حفظ می شوند. از جمله آزمایش هایی که بر روی نمونه دست خورده انجام می شود می توان به حدود اتربرگ، حد انقباض و دانه بندی اشاره کرد. در خاک های دانه ای اخذ نمونه دست نخورده بسیار مشکل است. از این رو نمونه را به اندازه دانسیته صحرایی آن متراکم می کنند. این نوع نمونه به نام نمونه بازسازی شده شناخته می شود. همچنین می بایست به این نکته توجه کرد که در خاک های دانه ای سیمانته شده نمی توان نمونه باز سازی شده ساخت زیرا باعث از بین رفتن سیمان تاسیون آن خواهد شد. در شکل ۱ تا ۳، نمونه ای از نمونه های دست خورده اخذ شده توسط شرکت مهندسی مشاور باران خاک و پی آورده شده است.



شکل ۱: نمونه دست خورده اخذ شده



شکل ۲: نمونه دست خورده اخذ شده



شکل ۳: نمونه دست خورده اخذ شده

شرایط نگهداری نمونه دست خورده بسته به شرایط مورد نیاز پروژه انجام می‌گیرد. در صورت، لزوم حفظ رطوبت نمونه آن را در داخل فویل بسته بندی و حفظ می‌کنند. چند نمونه از نمونه‌های اخذ شده توسط شرکت مهندسی مشاور باران خاک و پی در شکل ۴ تا ۸ آورده شده است.



شکل ۴: بسته بندی نمونه دست خورده



شکل ۵: بسته بندی نمونه دست خورده ت



شکل ۶: بسته بندی نمونه دست خورده



شکل ۷: خروج نمونه از داخل نمونه گیر



شکل ۸: نمونه گیری توسط کربارل دابل

نمونه دست نخورده

در نمونه دست نخورده پارامترهای خاک جهت انجام کلیه آزمایش‌ها عینا مشابه خاک موجود در محل می‌باشد.

از جمله نمونه گیرهایی که نمونه دست نخورده حاصل می‌کند نمونه گیر جدار نازک و یا شلبی است. که نسبت قطر بیرونی به قطر درونی آن کم است و توسط فشار به داخل خاک هدایت می‌شود. در عملیات اخذ نمونه شلبی پی مطابق شکل‌های ۹ تا ۱۳ پس از اخذ نمونه دو سر آن جهت حفظ رطوبت و ایزوله کردن آن، موم اندود می‌شود. اطلاعات مربوط به نام پروژه، نام گمانه، عمق حفاری، جهت بالا و پایین نمونه و بخشی از اطلاعات مورد نیاز بر روی آن الصاق می‌گردد و سپس نمونه داخل لوله پولیکا قرار داده شده و درپوش آن بسته می‌شود و نسخه دیگری از اطلاعات نیز بر روی آن الصاق شده و جهت انتقال به آزمایشگاه با احتیاط حمل می‌گردد.



شکل ۹: نمونه شلبی موم اندود شده اخذ شده



شکل ۱۰: نمونه شلبی موم اندود شده اخذ شده



شکل ۱۱: نمونه شلبي موم اندود شده اخذ شده



شکل ۱۲: نمونه شلبي موم اندود شده اخذ شده توسط



شکل ۱۳: نمونه شلبي داخل لوله پوليکا و آماده انتقال به آزمایشگاه



انواع روش‌های بهسازی مبتنی بر تزریق عبارتند از:

⊗ تزریق نفوذی

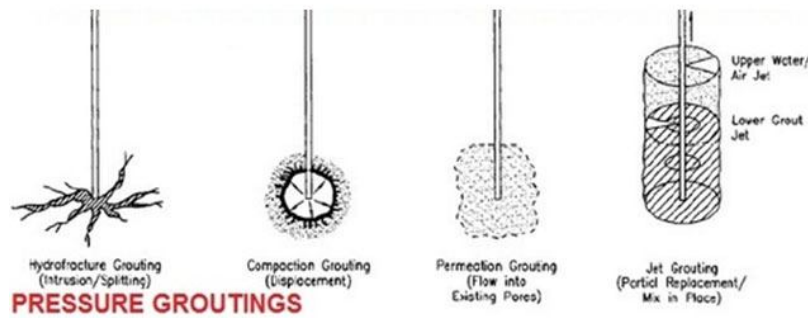
⊗ تزریق تراکمی

⊗ تزریق شکست هیدرولیکی

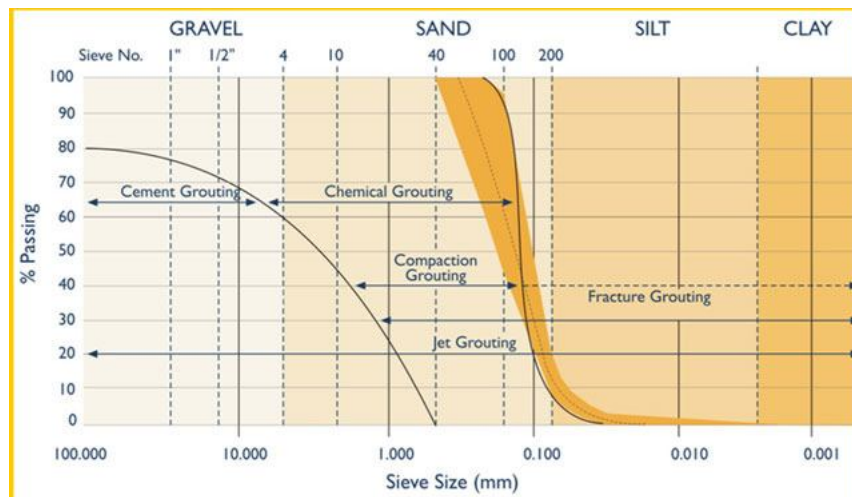
⊗ تزریق پرفشار (جت گروتینگ)

عمده تفاوت انواع تزریق در مکانیزم بهسازی خاک پذیرنده تزریق است که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

از جمله پارامترهای مؤثر در تزریق می‌توان به مواردی همچون هدف تزریق، جنس و دانه‌بندی مصالح موجود، فشار تزریق و نوع مصالح تزریق شونده نام برد. به همین سبب در مراجع مختلف، دسته‌بندی‌های متفاوتی برای روش‌های تزریق در نظر گرفته‌اند اما به‌طور کلی می‌توان انواع روش‌های تزریق را در چهار دسته: تزریق نفوذی، تزریق تراکمی، تزریق شکست هیدرولیکی و تزریق جت (جت گروتینگ) جای داد. عمده تفاوت انواع تزریق در مکانیزم بهسازی خاک پذیرنده تزریق است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.



محدوده خاک‌های مناسب برای هر روش در شکل زیر نشان داده شده است



جت گروتینگ (تزریق فواره‌ای- تزریق پرفشار)

جت گروتینگ یکی از روش‌های بهسازی خاک می‌باشد که در آن دوغاب سیمان با فشار و سرعت بالا به خاک تزریق می‌شود. سه

روش اصلی برای جت گروتینگ ایجاد شده است: تزریق تک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای. در هر سه روش از حفاری روتاری جهت رسیدن به عمق مورد نظر استفاده می‌شود.



در روش تک مرحله‌ای، دوغاب سیمان با سرعت زیاد تزریق می‌گردد.

در روش دو مرحله‌ای، جت دوغاب سیمان توسط جت هوا با سرعت مشابه احاطه شده است. این کار باعث تخریب بیشتر خاک و اختلاط بهتر خاک و دوغاب می‌شود. در روش سه مرحله‌ای، جت آبی که توسط جت هوا احاطه شده است باعث تخریب بیشتر خاک می‌شود و فضای ایجاد شده توسط جت دوغاب پر می‌شود.

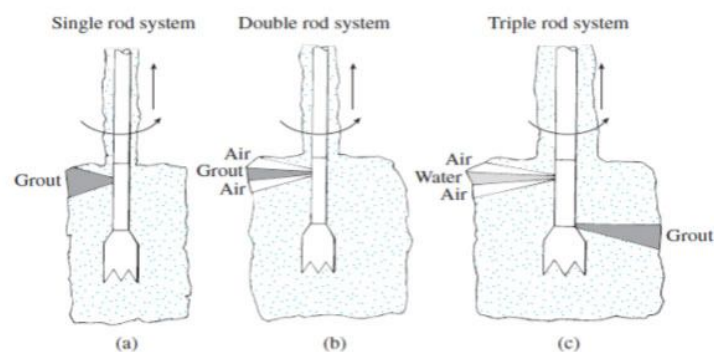


Figure 14.41 Jet grouting

تأثیرگذاری این روش وابسته به نوع خاک و میزان فرسایش پذیری (تخریب پذیری) آن می‌باشد. به صورت کلی، خاک‌های شنی و

ماسه‌ای که فرسایش‌پذیری بالایی دارند برای این روش مناسب هستند در حالی که استفاده از این روش برای خاک رس پلاستیک سخت می‌باشد در شکل زیر میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های مختلف نشان داده شده است.

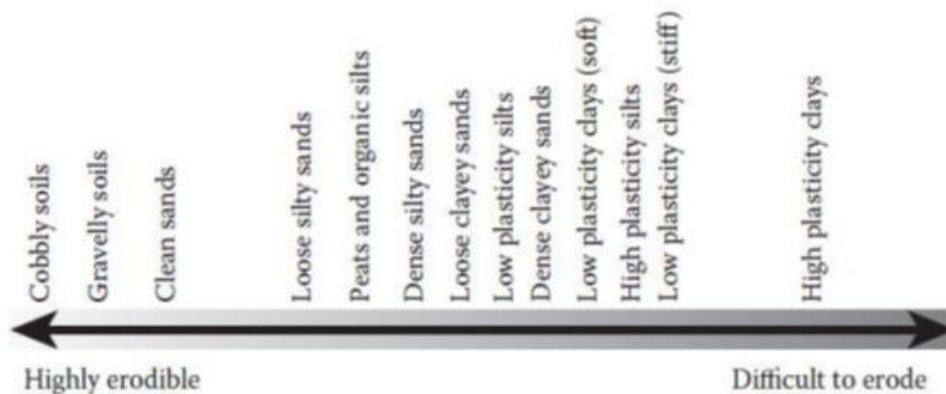


Figure 6.17 Soil erodibility scale.

Welsh and Burke, 1991; Burke, 2004): در ادامه محدوده پارامترها مربوط به سه روش بالا اشاره شده است

#### Single Rod System:

##### A. Grout slurry

Pressure . . . . .	0.4–0.7 MN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	100–300 l/min
Specific gravity . . . . .	1.25–1.6
Number of nozzles . . . . .	1–6

##### B. Lift

Step height . . . . .	5–600 mm
Step time . . . . .	4–30 sec

##### C. Rotation . . . . . 7–20 rpm

##### D. Stabilized soil column diameter

Soft clay . . . . .	0.4–0.9 m
Silt . . . . .	0.6–1.1 m
Sand . . . . .	0.8–1.2 m

#### Double Rod System:

##### A. Grout slurry

Pressure . . . . .	0.3–0.7 MN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	100–600 l/min
Specific gravity . . . . .	1.25–1.8
Number of nozzles . . . . .	1–2

##### B. Air

Pressure . . . . .	700–1500 kN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	8–30 m <sup>3</sup> /min

C. Lift

Step height . . . . .	25–400 mm
Step time . . . . .	4–30 sec
D. Rotation . . . . .	7–15 rpm
E. Stabilized soil column diameter	
Soft clay . . . . .	0.9–1.8 m
Silt . . . . .	0.9–1.8 m
Sand . . . . .	1.2–2.1 m

Triple Rod System:

A. Grout slurry

Pressure . . . . .	700 kN m <sup>2</sup> –1 MN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	120–200 l/min
Specific gravity . . . . .	1.5–2.0
Number of nozzles . . . . .	1–3

B. Air

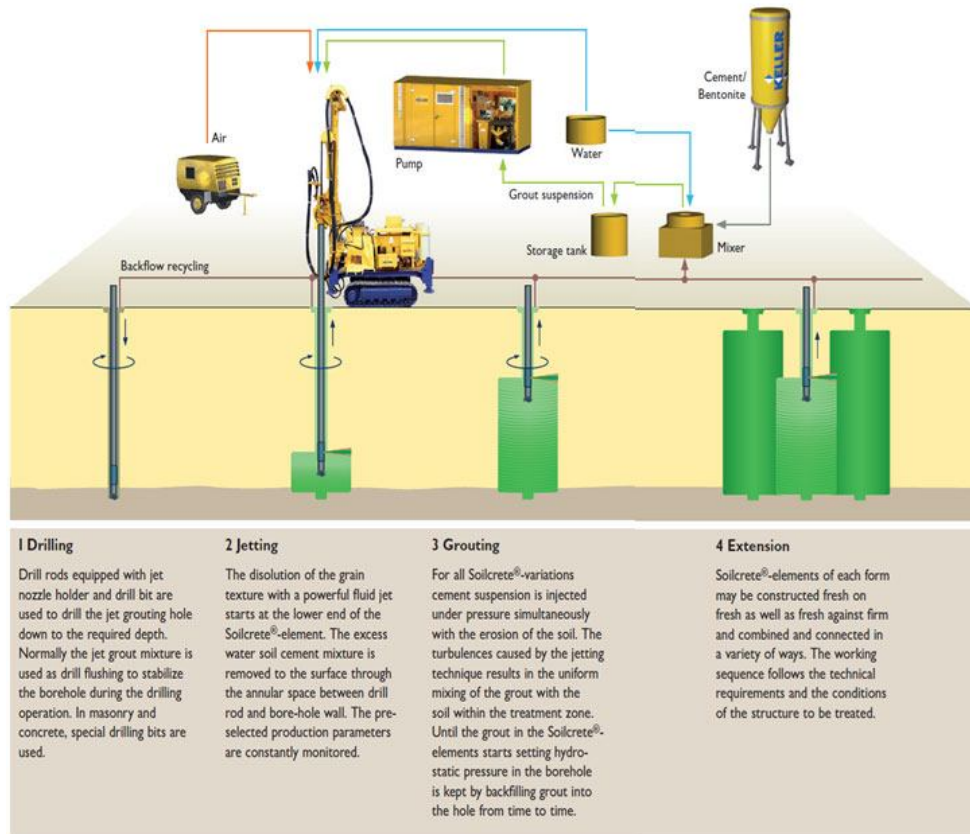
Pressure . . . . .	700–1500 kN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	4–15 m <sup>3</sup> /min

C. Water

Pressure . . . . .	0.3–0.4 MN/m <sup>2</sup>
Volume . . . . .	80–200 l/min

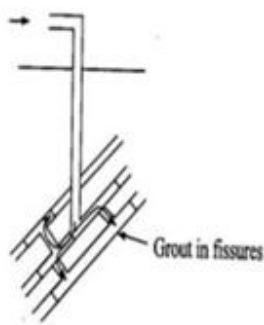
D. Lift

Step height . . . . .	20–50 mm
Step time . . . . .	4–20 sec
E. Rotation . . . . .	7–15 rpm
F. Stabilized soil column diameter	
Soft clay . . . . .	0.9–1.2 m
Silt . . . . .	0.9–1.4 m
Sand . . . . .	0.9–2.5 m

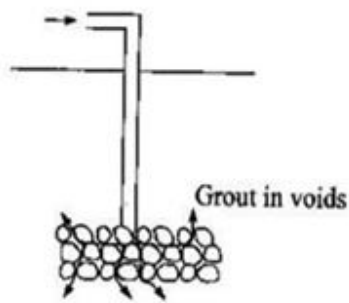


## تزریق نفوذی

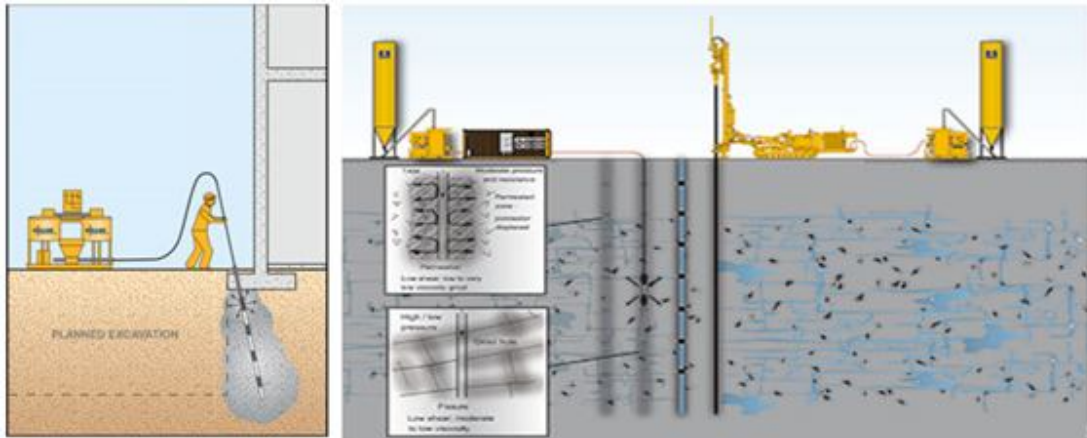
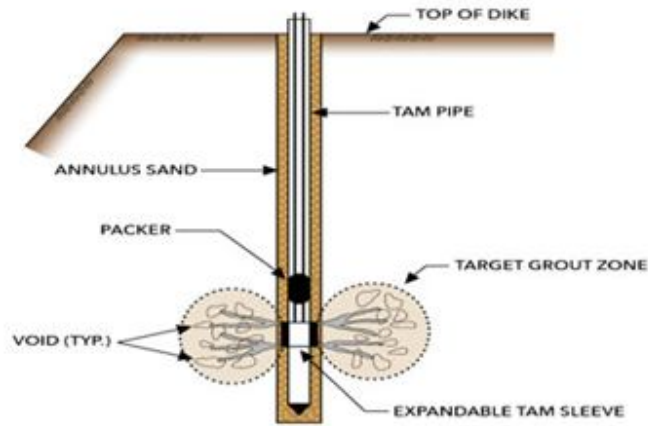
روش تزریق نفوذی قدیمی ترین و پرکاربردترین روش تزریق می باشد. در این روش، درزه ها، شکاف ها و یا شکستگی ها در سنگ و فضاهای خالی در خاک با دوغاب، بدون برهم زدن ساختار سنگ یا خاک با حداقل فشار توسط دوغاب پر می گردد. سیال دوغاب با حداقل فشار تزریق در یک بازه زمانی در فضاهای خالی موجود در بین ذرات خاک و یا در شکاف های سنگ تزریق می شود تا از وقوع شکستگی های جدید جلوگیری شود. هدف اصلی از انجام تزریق نفوذی، کاهش نفوذپذیری و کنترل جریان آب زیرزمینی و افزایش مقاومت خاک و ایجاد توده ای یکپارچه تر و منسجم تر می باشد. تزریق سیمان و تزریق شیمیایی از این دسته می باشند.



(a) Permeation grouting in rocks

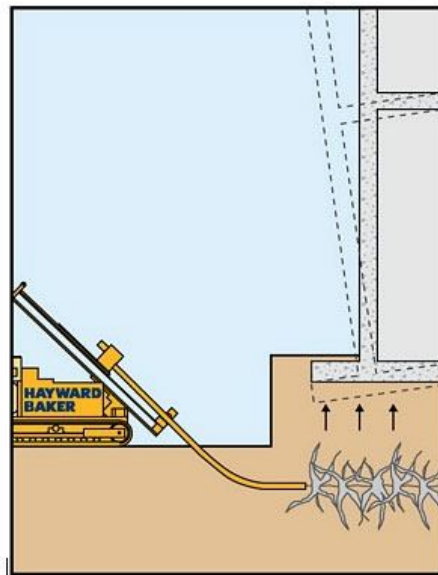
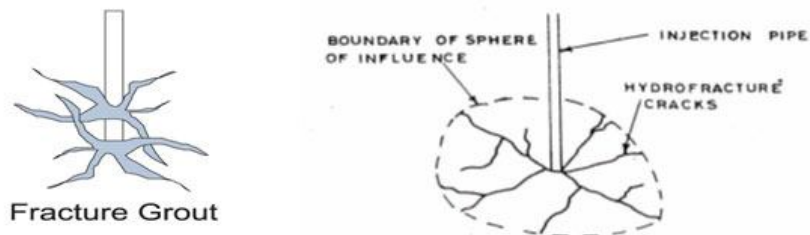


(b) Permeation grouting in soils



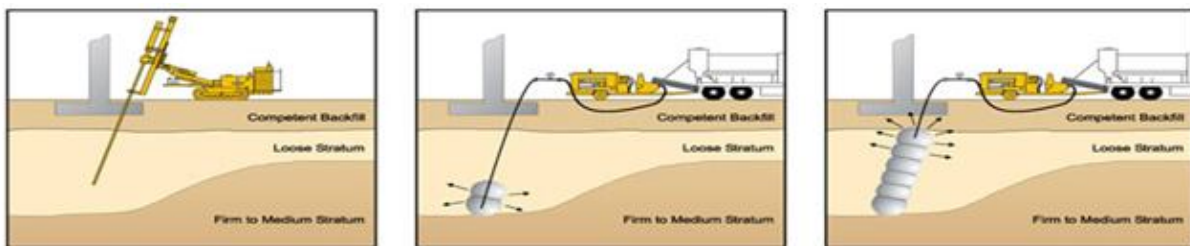
تزریق شکست هیدرولیکی

زمانی که فشار تزریق بزرگ تر از مقاومت کششی خاک یا سنگ باشد، باعث شکست هیدرولیکی، گسیختگی و ایجاد ترک شده و دوغاب به سرعت به ناحیه ترک خورده نفوذ می کند. این روش جهت متراکم و سخت کردن زمین و یا دسترسی به حفرات دیگری که در دسترس نیستند، بکار می رود. این روش وقتی کاربرد دارد که برهم زدن ساختار خاک و ایجاد جابجایی تحت فشار تزریق در سطح زمین مشکل ساز نباشد.



### تزریق تراکمی

در روش تزریق تراکمی، با تزریق دوغاب با ویسکوزیته بالا و فشار بیشتر و در مراحل متعدد، حباب‌هایی از دوغاب ایجاد می‌شود که باعث جابه‌جا شدن خاک و در نتیجه متراکم شدن آن می‌گردد. این روش برای محیط‌های کارستی، خاک‌های بسیار سست و فروریزی ماسه‌ای و ریزدانه کاربرد دارد. این روش ندرتاً منجر به بروز تغییر مکان‌های جزئی در سطح زمین شده و در صورت وجود سازه حساس در این محل، این روش تزریق باید محتاطانه به کار برده شود.



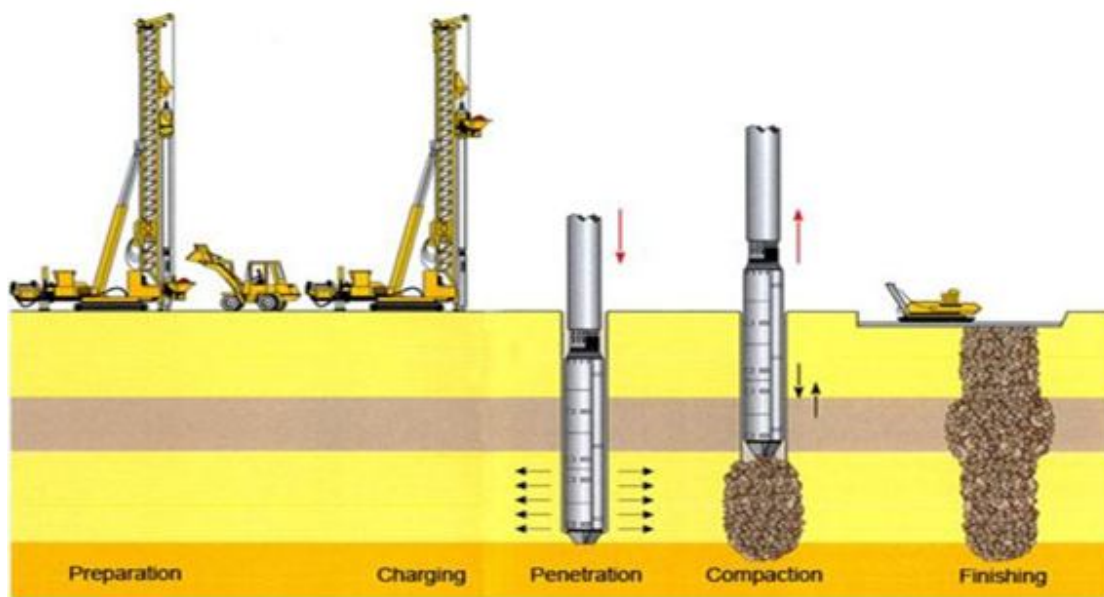
### ستون سنگی

یکی از روش‌های مورد استفاده برای افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر لایه‌های رس نرم، ستون سنگی می‌باشد. در این روش ابتدا درون خاک رس نرم، با استفاده از فشار آب و ارتعاش، چاهی حفر می‌نمایند، سپس آن را با خاک درشت‌دانه پر می‌کنند. شن داخل گمانه، در زمان بالا کشیدن و بیبراتور، بتدریج متراکم می‌شود. ذرات خاک درشت‌دانه مورد استفاده در ستون سنگی، سایزی در حدود ۶ تا ۴۰ میلی‌متر دارد. ستون سنگی نیز معمولاً با قطر ۰.۵ تا ۰.۷۵ متر و با فواصل مرکز به مرکز ۱/۵ تا

۳ متر اجرا می‌شود. استفاده از ستون سنگی باعث کاهش نشست پی می‌شود. برای این ستون‌ها، عمق ۶ تا ۱۰ متر مؤثرترین عمق است. اگرچه تا عمق ۳۰ متر هم اجرا شده‌اند.







اساس این روش بر مبنای سقوط یک وزنه سنگین که از ارتفاع مشخص در فواصل معینی رها می‌شود، می‌باشد. جرم این وزنه بین ۸ تا ۳۵ تن متغیر می‌باشد و ارتفاع سقوط آن بین ۷,۵ تا ۳۰,۵ متر می‌باشد. انرژی منتقل شده از سقوط این وزنه به خاک منجر به متراکم شدن آن می‌گردد. تراکم حاصله بستگی دارد به:

- جرم وزنه
- ارتفاع سقوط
- فاصله بین محل‌های سقوط وزنه

**مراحل طراحی روش تراکم دینامیکی عبارتند از:**

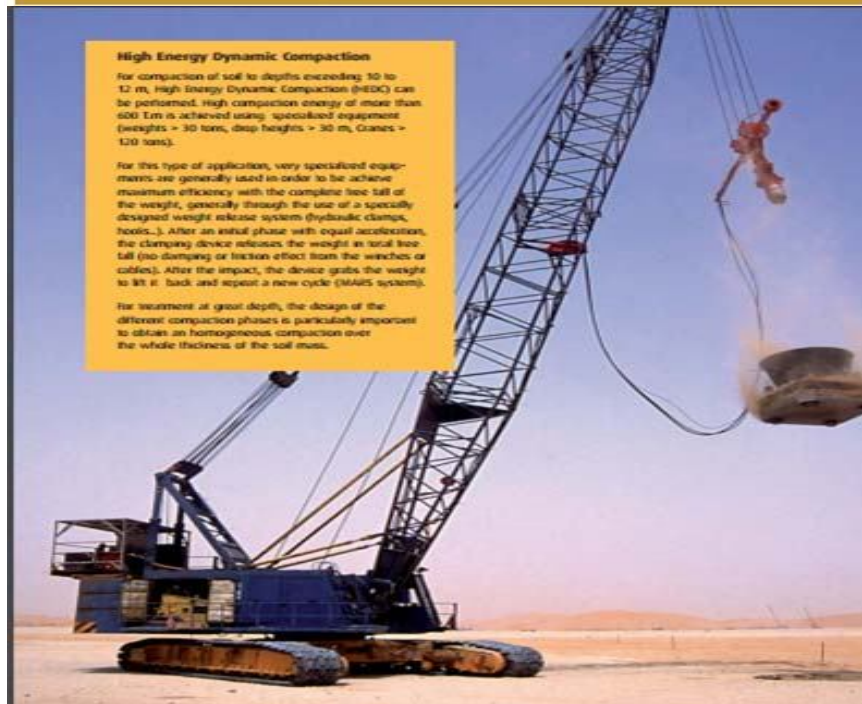
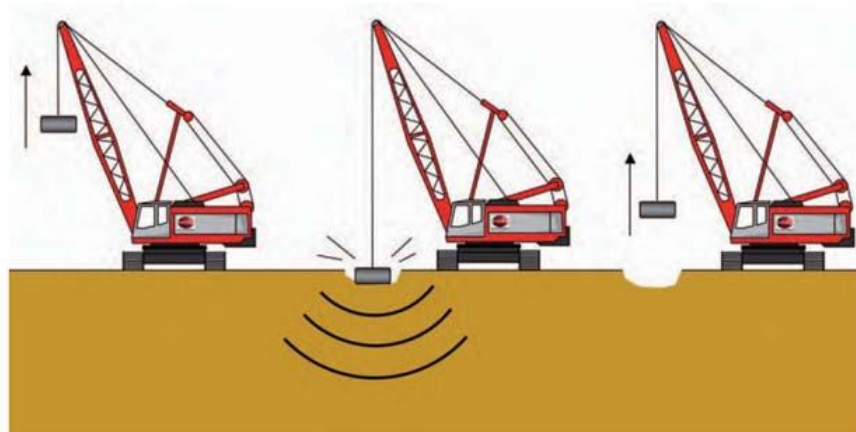
۱. انتخاب وزن کوبه و ارتفاع سقوط برای دستیابی به عمق تأثیر مورد نظر

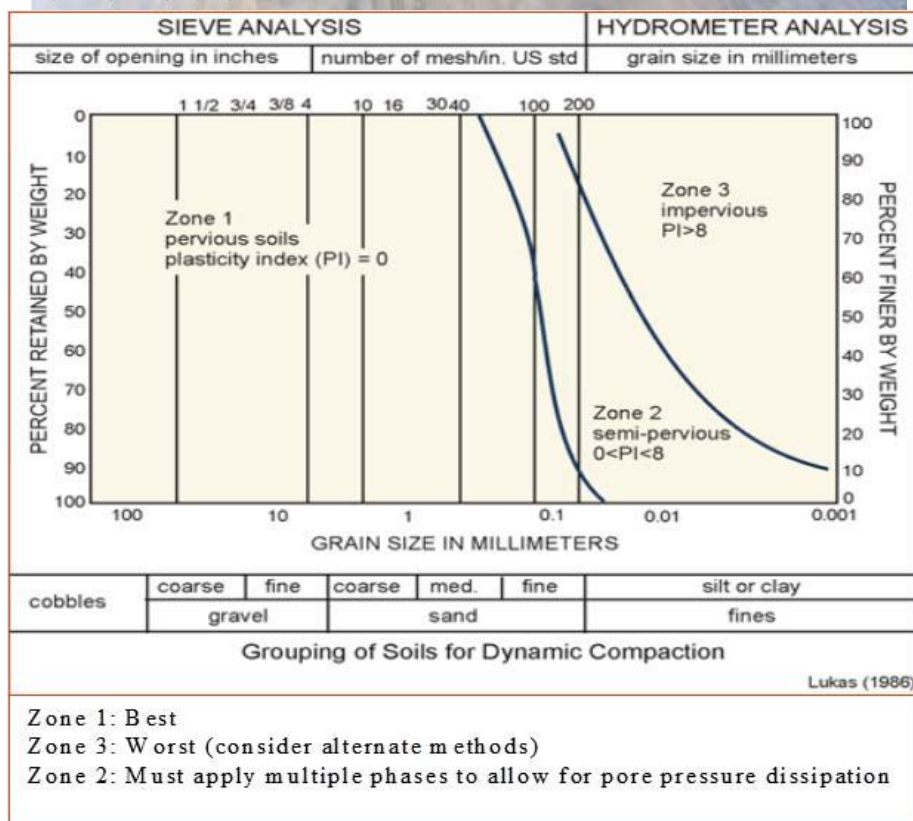
۲. تعیین میزان انرژی موردنیاز جهت رسیدن به میزان اصلاح موردنظر

۳. تعیین محدوده گسترش عملیات تراکم دینامیکی

۴. تعیین فواصل بین نقاط اعمال ضربه و تعداد ضربات

۵. تعیین تعداد مراحل اعمال ضربه





عملکرد تراکم دینامیکی در خاک‌های مختلف

- محدوده ۱: بهترین
- محدوده ۳: بدترین

محدوده ۲: نیاز به انجام عملیات در چند فاز جهت ایجاد امکان محو شدن فشار آب حفره‌ای

### میکروپایل

اولین بار در دهه ۱۹۵۰ در اروپا استفاده شد و از آن به بعد تاکنون در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. میکروپایل‌ها در واقع شمع‌هایی با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند که در مورد زیر کاربرد دارند و می‌توانند در هرگونه بستری که نیاز به شمع داشته باشد به صورت عمودی یا با هر شیبی به کار می‌روند.

تحمل بار سازه‌ای در سایت‌هایی که در دسترسی به آن محدودیت دارد. این نوع از شمع‌ها در متون علمی تحت عناوینی از قبیل

needlepile, root pile, pinpile, micropile, minipile مطرح شده‌اند.

میکروپایل‌ها به‌طور کلی در سه زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند:

### ۱. اریز شمع باربر

○ جهت صنایع سبک

○ تقویت پی

○ گودبرداری و سیستم‌های نگهدارنده با دسترسی محدود

○ به‌عنوان یک روش کاهش نشست

### ۲. مسلح سازی خاک

○ شمع ریشه‌ای

○ پایداری شیروانی‌ها

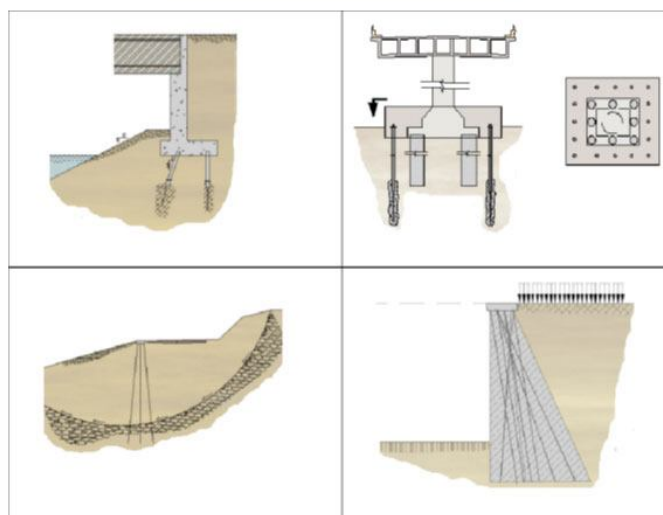
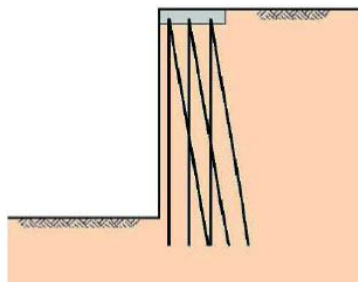
○ ایجاد دیوار حائل

○ خاک‌های متورم شونده

### ۳. اریز شمع‌های کششی

○ مقاومت در برابر نیروی بویانت

○ پی‌های گسترده و برج‌های مخابراتی



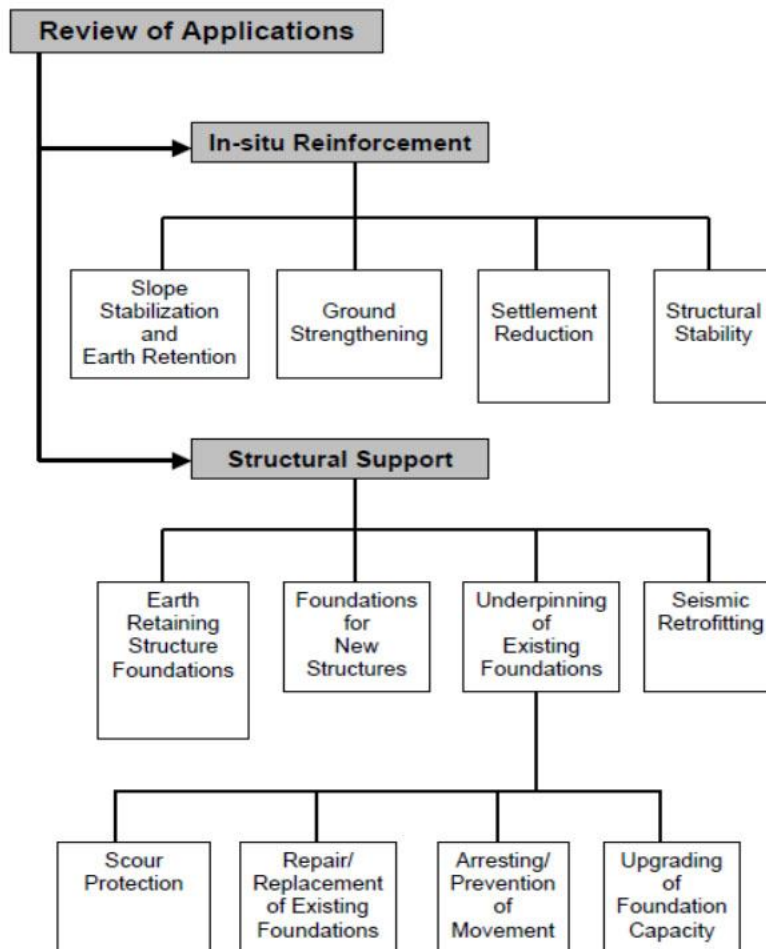


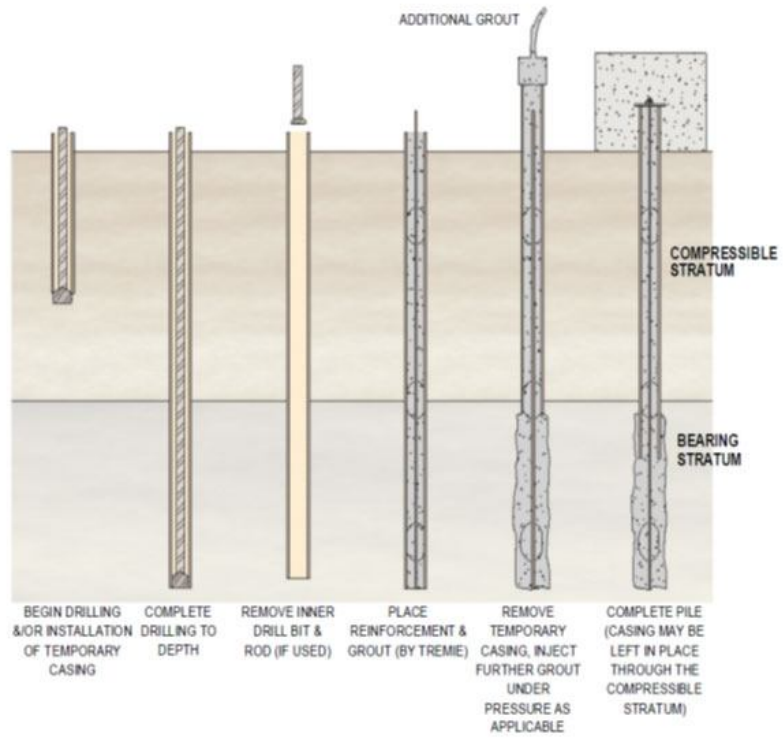
Figure 3-1. Classification of Micropile Applications.

### مزایای میکروپایل

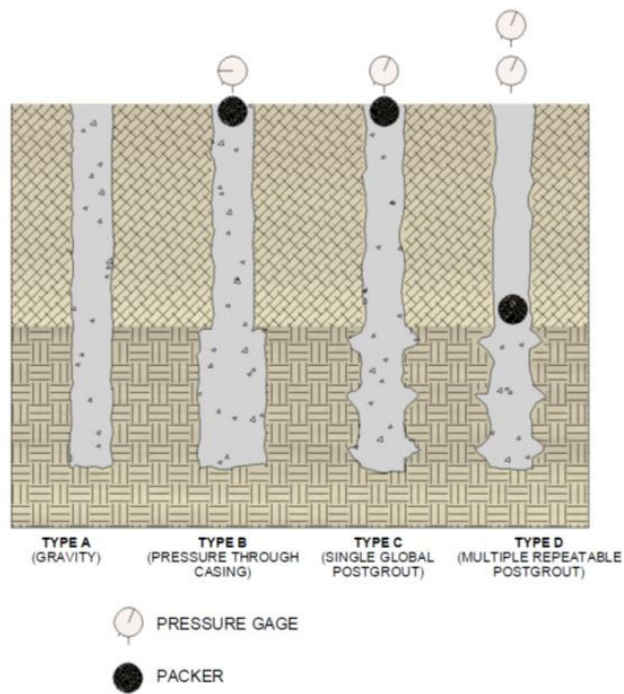
- سهولت اجرا در هر مکان
- اقتصادی بودن نسبت به سایر روش‌ها
- عدم نیاز به تخریب
- سهولت آموزش نیروی کار ماهر
- افزایش ظرفیت باربری پی
- جلوگیری از نشست
- دست نخوردگی فضای ساختمان

### دسته‌بندی میکروپایل بر اساس روش اجرا

روش انجام تزریق حساس‌ترین مرحله اجرای میکروپایل می‌باشد. بر همین اساس بسته به روش اجرا، میکروپایل‌ها به ۴ دسته تقسیم می‌شوند که در شکل و جدول زیر نشان داده شده است:



مراحل اجرای میکروپایل



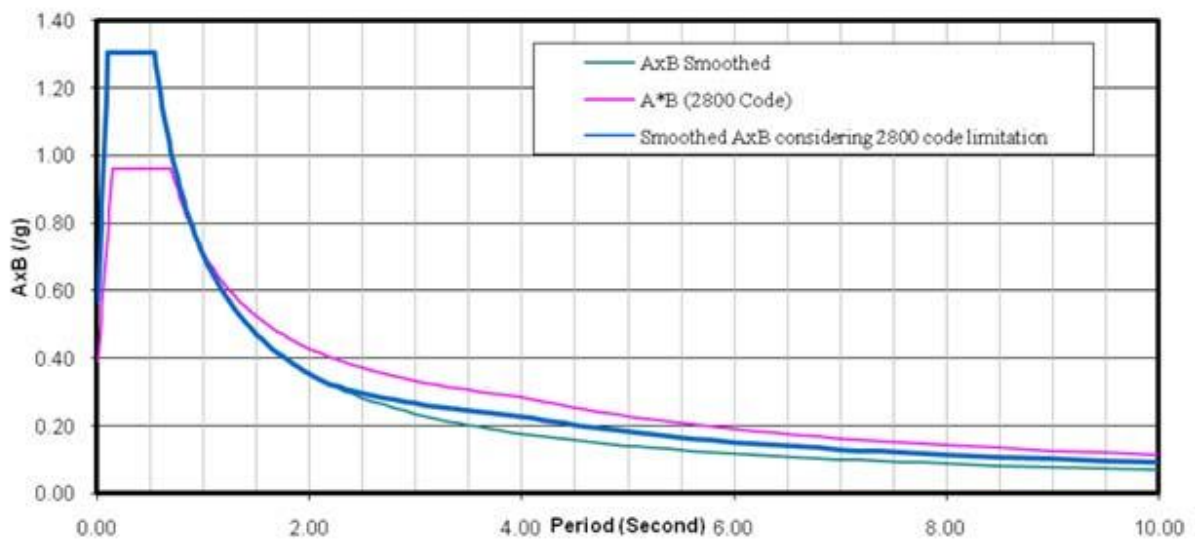
دسته بندی میکروپایل بر اساس روش اجرا

مطالعات لرزه خیزی

برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، شناخت جنبش نیرومند زمین که انتظار می‌رود در طول عمر مفید سازه رخ دهد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهترین راه برای شناخت ویژگی‌های جنبش نیرومند زمین، بدست آوردن نمودار حرکت زمین از جمله شتاب نیرومند زمین در هنگام رویداد زمین لرزه‌های متوسط تا بزرگ می‌باشد و این امر بوسیله دستگاه شتابنگار موجود در محل و رخداد زمین‌لرزه در گستره نزدیک میسر می‌شود. که برای نیل به این هدف مطالعات تحلیل خطر و لرزه خیزی انجام می‌گیرد که بطور خلاصه شامل موارد ذیل می‌باشد.

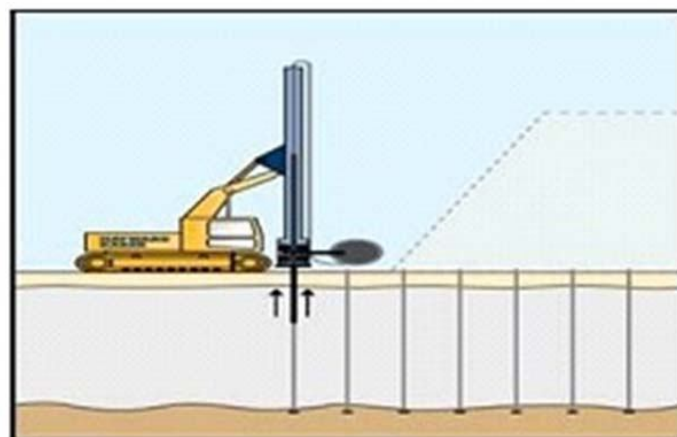
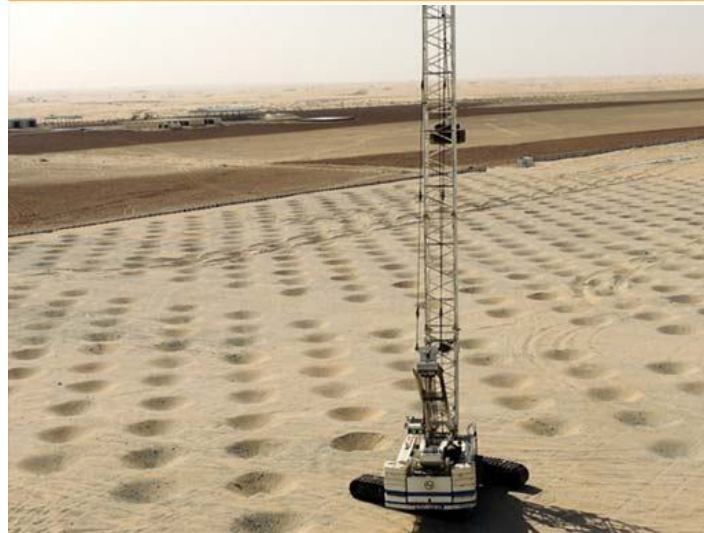
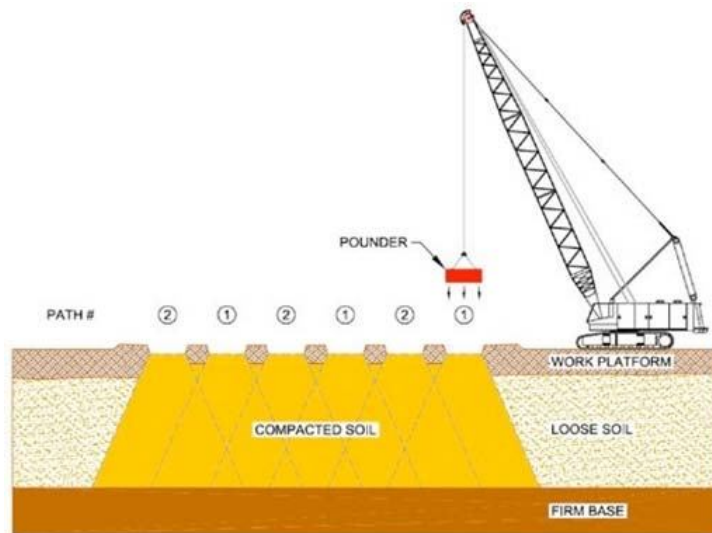
بررسی اجمالی زمین شناسی و لرزه شناسی عمومی منطقه طرح  
 تعیین گسله‌های لرزه زا موجود در منطقه  
 برآورد شتاب مبنای افقی و قائم بستر جهت استفاده در طراحی سازه ای  
 برآورد خطرات جانبی ساختگاه مانند گسلش  
 برآورد طیف پاسخ زمین

*Sa Spectra (AxB)*



معمولترین و قدیمی ترین روش به جهت ممانت از وقوع پدیده روانگرایی است. مهمترین هدف از این راهکار تقویت ظرفیت باربری خاک، تقلیل نشست های ناخواسته و افزایش پایداری شیروانی های خاکی می باشد. در این راهکار با بکارگیری عملیات ارتعاش و ضربه وضعیت مهندسی خاک تقویت می شود. این روش به عوامل متعددی از جمله نوع غلتک، ضخامت لایه، جنس خاک، محتوای رطوبت خاک، سرعت و دفعات عبور غلتک دارد. غلتک های معمول شامل غلتک پاچه بزی، غلتک های استوانه ای صاف، غلتک ارتعاشی و غلتک چرخ لاستیکی می باشد. در واقع با عملیاتی کردن این روش فضای خالی خاک کاهش یافته، تراکم (دانیسته) خاک افزایش و نفوذ پذیری خاک کاهش می یابد و در نتیجه باعث بهبود رفتار مهندسی خاک می گردد.

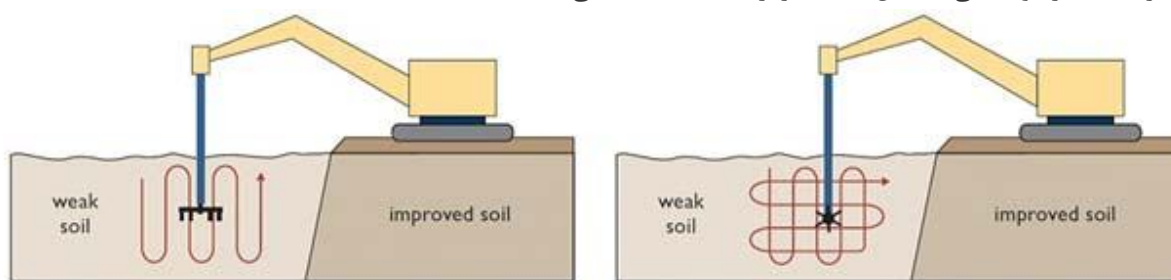




پیش بارگذاری به فرایند متراکم سازی خاک تحت اثر فشار عمودی قبل از ساخت و اعمال بار سازه نهایی گفته می شود. این روش در خاکهایی با رطوبت و تراکم پذیری بالا با مقاومت برشی کم بسیار موثر است اما در سازه هایی با بار متمرکز نتایج مطلوبی ندارد.

معمولا از طریق اجرای خاکریز باری برابر با ۱,۲ تا ۱,۳ بار سازه روی خاک نرم قرار داده می شود. خاکریزهای مورد استفاده در این روش بطور متوسط دارای ۳ تا ۱۰ متر ارتفاع هستند و معمولا یک تا سه متر نشست ایجاد می شود. این بار ابتدا به آب منفذی وارد می شود و در ادامه با تداوم بار فشار آب منفذی بتدریج کاهش می یابد و در نتیجه منجر به بروز مشکلاتی می شود. برای جلوگیری از مشکلات ناشی از این پدیده بار باید در چند مرحله وارد شود. بار اعمالی با رسیدن نشست به مقدار نهایی مورد نیاز می تواند برداشته شود.

تحکیم خاک های رسی و سیلتی با نفوذپذیری پایین در این خاک ها زمانبر بوده و فشار آب منفذی ایجاد شده ناشی از بار استاتیکی در طی زمان از بین می رود بنابراین سرعت روند تحکیم با لوله گذاری زهکش عمودی با نفوذ پذیری بالاتر افزایش می یابد. این تکنیک باعث افزایش مقاومت خاک رس با سرعت بیشتر و امکان بارگذاری مجدد را فراهم میکند. یکی از انواع زهکش های قائم، زهکش های پیش ساخته می باشد که دارای یک هسته پلاستیکی با یک کانال طولی فیتیله ای به عنوان زهکش و یک آستر کاغذی از مواد لیفی که مثل یک فیلتر از هسته محافظت می کند، هستند.



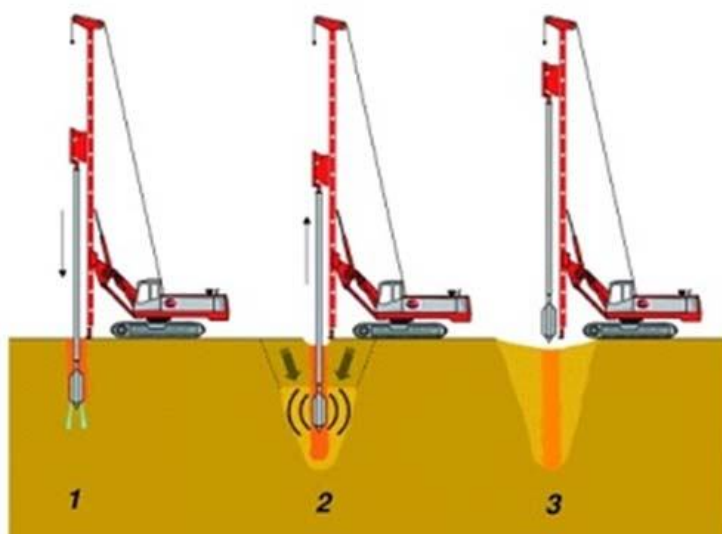
اختلاط عمیق ( به طور اختصار DSM) یکی از روش های بهسازی خاک است که از طریق مخلوط کردن مکانیزه خاک با مخلوط های سیمانی و ... در خاک های ضعیف موجب تقویت خواص مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و تراکم پذیری می شود. اختلاط خاک به دو روش ستونی و توده ای انجام می گیرد و در هر دو می تواند به صورت خشک یا مرطوب انجام شود. در روش مرطوب، خاک با دوغاب ماده مخلوط شونده در هم آمیخته می شود. این روش در خاک های ریزدانه مانند رس نرم، سیلت و ماسه با رطوبت محتوا کم (تا ۶۰٪) و در زمین های لایه ای تشکیل شده از لایه های ضعیف و مقاوم به کار می رود. در روش خشک خاک با پودر ماده مخلوط شونده در هم آمیخته می شود. این روش در خاک هایی با رطوبت بالا جهت ایجاد واکنش بین خاک و اختلاط شونده استفاده می شود. در این روش با اختلاط پودر خشک با خاک از میزان رطوبت کاسته می شود که مطلوب است. اختلاط خشک روشی کم صدا و کم لرزش است. از دیگر مزیت های این روش میتوان به امکان اصلاح خاک های نباتی و لجن تا اعماق زیاد و اقتصادی تر بودن آن اشاره کرد. به طور کلی از آهک یا سیمان مخلوط با آهک برای بهسازی رس های پلاستیک و سیلت و از سرباره کوره برای بهسازی خاک های نباتی استفاده می شود.

در اختلاط ستونی ابتدا تیغه مخلوط کن با حرکت دورانی و رو به پایین سبب برهم خوردن ساختار خاک در آن ناحیه می شود. و با حرکت دورانی معکوس و رو به بالا ماده مخلوط شونده از طریق لوله مخلوط کن به درون محیط اضافه می شود. در این روش ستونهایی با قطر ۶۰ تا ۸۰ سانتیمتر از خاک بهسازی شده تا عمق ۲۵ متر ایجاد می شود.

اختلاط توده ای یا حجیم بوسیله حرکت پیوسته مخلوط کن در جهت های افقی و عمودی از پیش تعیین شده انجام می گیرد و در مواردی استفاده می شود که حجم گسترده ای از خاک خیلی ضعیف یا آلوده با رطوبت بالا همانند رسوبات لجنی و خاک های نباتی مرطوب نیاز به بهسازی داشته باشد. استفاده از این روش در اعماق کم (۴ متر) و در مساحت ۸ تا ۱۰ متر مربع اقتصادی است. از جمله کاربردهای این روش می توان به ساخت خاکریز روی خاک های نرم و دیوارهای آب بند، بستر بی های نواری و گسترده، بستر توربین های بادی و پل ها، پایداری شیروانی، کاهش پتانسیل روانگرایی و کاهش نشست پذیری اشاره کرد.

مروزه از روش های بهسازی بطور گسترده در جهان استفاده می شود. یکی از روش های بهسازی خاک استفاده از تراکم ویبره شناوری است. در این راهکار عامل اصلی تراکم، قسمت لرزاننده است که دارای طول حدود ۲ متر بوده و ارتعاش از طریق چکش لرزاننده و یا از طریق دستگاه وایبر فلوت به توده خاک مورد نظر اعمال می شود. استفاده از این روش راهکار خوبی برای تراکم در جای لایه های ضخیم از خاک های دانه ای می باشد. همانطور که ذکر شد به منظور بهبود وضعیت خاک های فاقد چسبندگی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و از طریق طریق اعمال ویبره به صورت سیکلی انجام گرفته و موجب جریان خاک دانه ای می شود و در نتیجه باعث کاهش حجم فضای خالی و تراکم خاک است.

در واقع با حفظ ارتعاشات و افزودن آب از طریق جت در طول میله منجر به روانگرایی موضعی خاک و چیدمان جدید دانه ها به صورت متراکم تر می شود. در خاک های چسبنده میله ویبره پس از خروج گودالی ایجاد می کند که این گودال باید پس از اتمام کار با سنگدانه پر شود.





ژئوگریدها مصالح ژئوسینتتیک ساخته شده از جنس پلیمر هستند که برای مسلح کردن خاک استفاده میشوند. ژئوگرید صفحه ای مشبک است که با ذرات خاک درگیر شده و مقاومت طولی و عرضی بالایی به بستر خود می دهد. مکانیزم درگیری ژئوگریدها به دو روش اصطکاکی (اصطکاک بین خاک و ژئوگرید) و قفل و بست (فرو رفتن مصالح قرصه داخل ژئوگرید) است. از دیگر کاربردهای عمومی ژئوگریدها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مسلح سازی دیوار حائل
- خاک زیر اساس و بستر راهها
- استحکام و تثبیت شیب های تند برای بزرگراه ها
- جلوگیری از حرکت لایه های خاک با شیب های تند دربالادست و پایین دست سدها
- بهبود ظرفیت باربری فونداسیون های کم عمق
- مسلح سازی بستر خاکریز بر روی خاک نرم

بدون شک آب های زیرزمینی بزرگترین دلیل طبیعی ایجاد مشکلات در ساخت و سازهای عمرانی می باشد. به همین دلیل زهکشی یکی از الزامات همیشگی در پروژه های مختلف، به عنوان مثال در خاکبرداری در زیر سطح آب زیرزمینی می باشد. زهکشی همچنین برای کارهای دائمی مانند شیروانی ها و سدهای خاکی ضروری می باشد. برخی مواقع مشکلات آب زیرزمینی برای مهندسین مجری سازه غافلگیرکننده شده و از آن با عنوان "شرایط آب زیرزمینی غیرمنتظره" یاد می کنند و هزینه قابل توجهی را به کارفرما اعمال می کند. این در حالی است که مطالعات ژئوتکنیکی مناسب، می تواند به راحتی اصطلاح "غیرمنتظره" را از شرایط آب زیرزمینی حذف نمود! در این شرایط یک کارفرمای با تجربه، به سراغ مشاور ژئوتکنیک خواهد رفت و او نیز پس از سازماندهی مطالعات ژئوتکنیکی، احتمالاً زهکشی را توصیه خواهد کرد. در چنین شرایطی انجام هزینه جزئی در ابتدای کار، مانع از هزینه های بسیار بیشتر در حین انجام کار می شود.

روش های مختلفی برای زهکشی آب وجود دارد از جمله:

#### پمپاژ ساده (پمپاژ حوضچه ای)

این روش ساده ترین روش زهکشی می باشد. در این روش به آب زیرزمینی اجازه جریان به داخل گودبرداری داده می شود و در حوضچه هایی جمع می شود و سپس به بیرون پمپ می گردد. در برخی مواقع، این روش می تواند بسیار بهینه و مقرون به صرفه باشد. با این وجود، تراوش کنترل نشده به داخل گود می تواند باعث ناپایداری و مشکلات اجرایی شود. روش پمپاژ ساده، برای

گودبرداری‌های کم‌عمق در خاک نفوذپذیر و یا در گودبرداری‌های عمیق‌تر در سنگ و یا خاک سیمانته که در آن‌ها نگرانی از جهت پایداری زمین وجود ندارد، مناسب می‌باشد

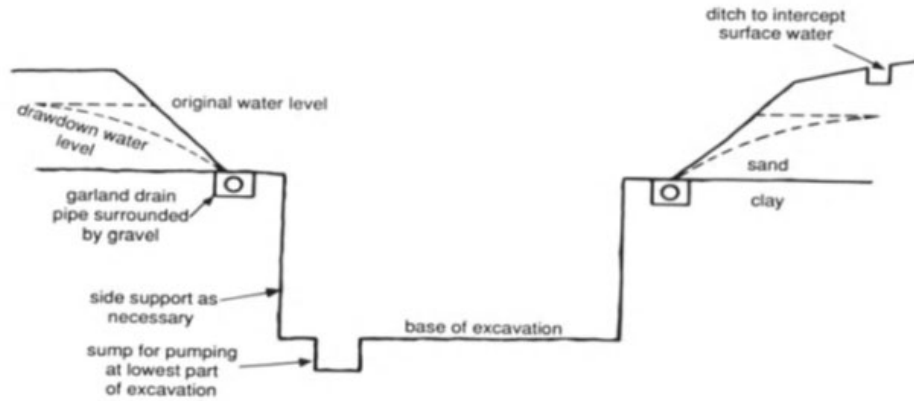
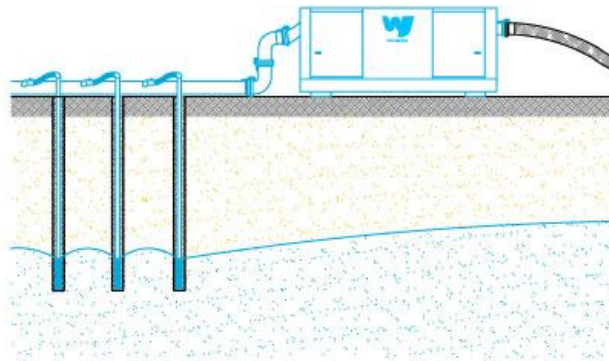
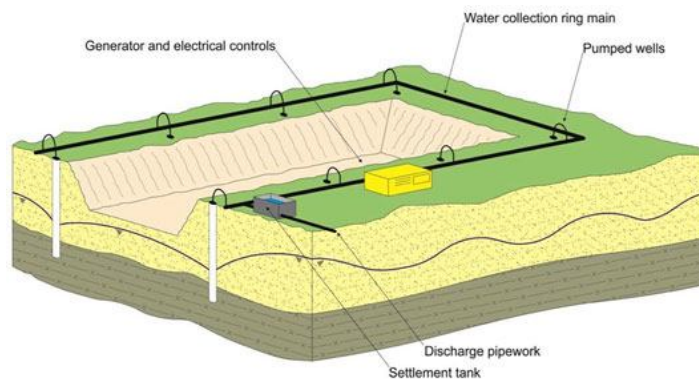


Figure 11.2 Simple drainage from excavation.

## روش Well point

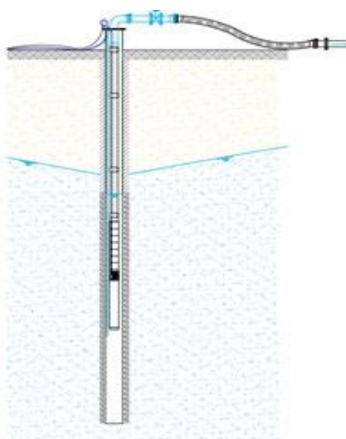
از این روش برای کاهش تراز آب زیرزمینی برای ایجاد شرایط کاری پایدار استفاده می‌شود و مشکل از چاه‌هایی با قطر کم می‌باشد که توسط لوله‌ای به پمپی متصل می‌باشند. پمپ با ایجاد خلأ در لوله، آب را از چاه‌ها به بیرون می‌کشد. این روش در طول و یا دورتادور محل خاکبرداری استفاده می‌شود. حداکثر ارتفاعی که در این روش می‌توان آب را با ایجاد خلأ به بیرون کشید، حدود ۶ متر می‌باشد. برای استفاده از این روش در اعماق بیشتر می‌توان را همزمان با پیشرفت عملیات خاکبرداری، چاه‌ها در تراز مختلف نصب کرد. فاصله بیا چاه‌ها بستگی به ارتفاع افت تراز مورد نظر و دانه‌بندی خاک (ماسه) دارد (جدول زیر). زمان مورد نیاز برای زهکشی مؤثر نیز بستگی به دانه‌بندی خاک دارد به‌عنوان مثال برای این زمان برای خاک ماسه‌ای ۱ یا ۲ روز و برای خاک ماسه سیلتی تا چند هفته متغیر خواهد بود.





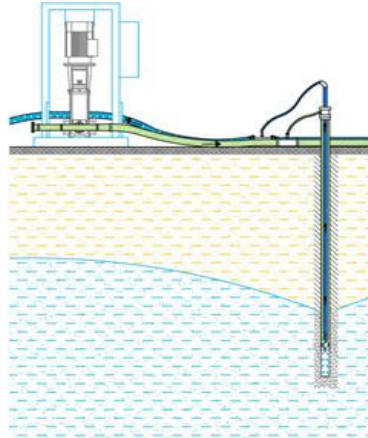
### روش چاه عمیق ( deep well system)

این روش از آرایشی از چاه‌های حفاری شده که هر کدام دارای یک پمپ شناور الکتریکی چندمرحله‌ای تشکیل شده است. زمانی که آب از هر چاه پمپ می‌شود، تراز آب زیرزمینی پایین تر می‌رود. این روش برای خاکبرداری های عمیق، خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد و حجم بالای آب زیرزمینی مناسب می‌باشد.

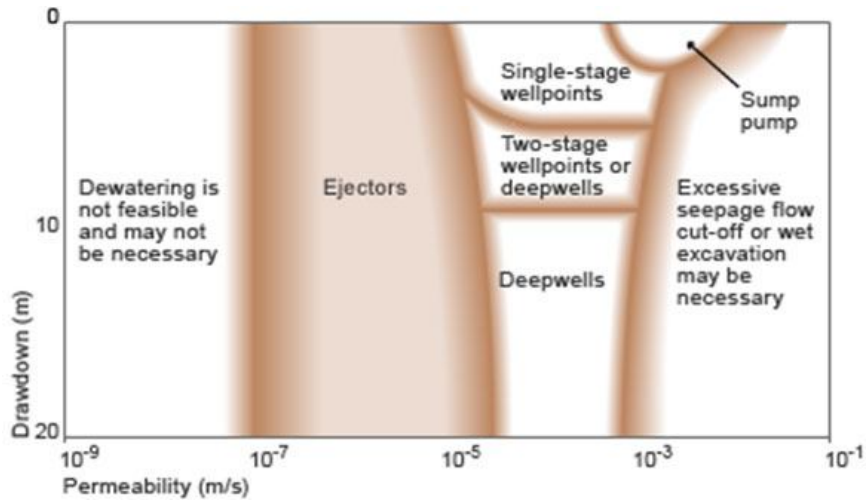


### روش Ejector Systems

این روش با ایجاد چرخه آب پرفشار که از یک مخزن و پمپ که در سطح زمین قرار دارند تغذیه می‌شود. با جریان آب از درون نازل، در چاه خلأ ایجاد می‌شود که باعث زهکشی آب درون چاه خواهد شد. این روش مناسب‌ترین روش برای خاک‌های با نفوذپذیری کم مانند سیلت و ماسه‌های ریز می‌باشد.

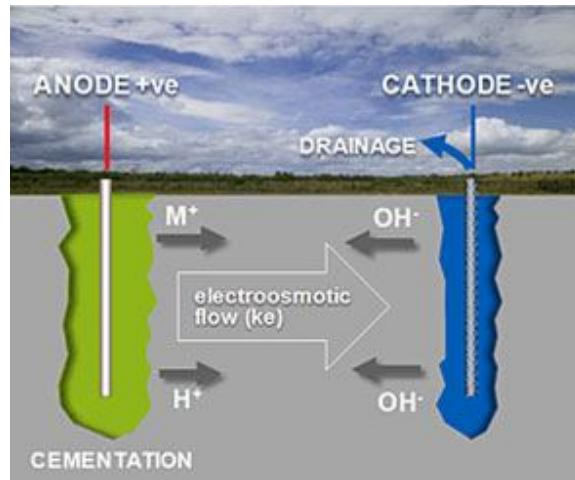


محدوده کاربردی هر یک از روش‌های زهکشی که در بالا اشاره شد به‌عنوان تابعی از ارتفاع مورد نظر برای کاهش تراز و میزان نفوذپذیری خاک، در شکل زیر نشان داده شده است.



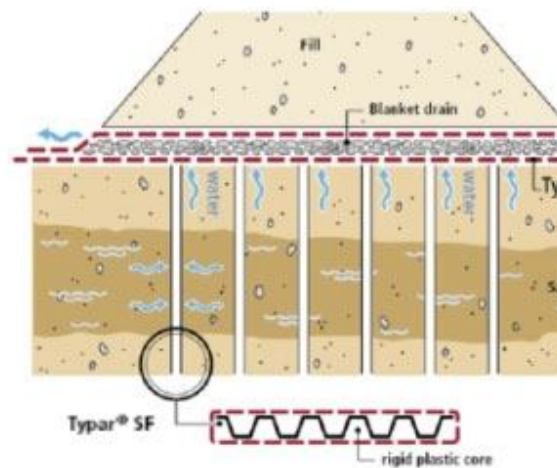
### الکترواسمزیک

الکترواسمزیک روشی است که کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در مواقعی برای زهکشی خاک‌های بسیار ریزدانه مانند سیلت‌ها از آن استفاده می‌شود. در این روش القای جریان الکتریکی در خاک باعث حرکت آب زیرزمینی از قطب مثبت به قطب منفی می‌شود.



### زهکش های قائم

قبل از اجرای خاکریزها، زهکش های قائمی اجرا می شود تا مسیر زهکشی را کوتاه و سرعت آن را زیاد کند. زهکش های قائم عموماً با الگوی لوزی شکل و در فواصل ۲ تا ۴ متر ایجاد می شود. فاصله دقیق آن ها بستگی به ضریب نفوذپذیری افقی و سرعت مدنظر بستگی دارد.



### لایه زهکش افقی

خاکریزهایی که روی خاک نرم ساخته می شوند با یا بدون زهکش قائم نیاز به زهکش افقی در سطح زمین دارند. زهکش های سنتی لایه ای خاک با ضخامت حدود ۱ متر و متشکل از مصالح درشت دانه بودند در سال های اخیر استفاده از مصالح پلیمری مانند ژئوتکستایل ها و ... به عنوان زهکش استفاده شده است

### زهکش های ژئوسینتتیک

در سال های اخیر استفاده از ژئوسینتتیک ها در مسائل ژئوتکنیکی با اقبال گسترده ای مواجه شده است. زمینه کاربرد وسیع این محصولات با اهداف مختلف از جمله زهکشی، آب بندی، فیلتراسیون، جدایش، تسلیح و... در کنار آسانی حمل و نصب و دوام بالا و مقاومت در برابر شرایط محیطی و ... باعث شده استفاده از آن ها در زمینه های مختلف راهسازی، دیوار حائل، پایداری شیروانی ها، کوله پل ها و... طرفداران بسیاری داشته باشد. یکی از موارد کاربرد ژئوسینتتیک ها، استفاده از آن ها در سیستم های زهکش می باشد. زهکش های سنتی لایه ای خاک با ضخامت



حدود ۱ متر و متشکل از مصالح درشت‌دانه بودند اما در حال حاضر با ضخامت و فضای اشغالی بسیار متر و دوام بسیار بیشتر و حتی گاه‌ها هزینه بسیار کمتر می‌توان از آن‌ها استفاده نمود.

موارد کاربرد این ژئوسینتتیک‌ها در زهکشی خاک عبارتند از:

زهکشی زیرسطحی

زهکشی اساس راه

زهکشی سازه‌ها، دیوارهای حائل و کوله‌های پل

زهکشی شیرابه‌های لندفیل‌ها

**بهسازی خاک و راهکار مقابله با خاکهای مساله دار**

• تغییر ابعاد شالوده سطحی

• بهسازی خاک

• شالوده عمیق

## روش‌های معمول بهسازی خاک

۱- حفاری و برداشت، جابه‌جایی و یا جایگزینی

۲- تراکم سطحی

۳- تراکم دینامیکی

۴- تراکم ویبره - شناوری در عمق

۵- انفجار

۶- پیش فشردگی از طریق پیش بارگذاری

۷- تزریق

۸- استفاده از مواد افزودنی

۹- سیستم‌های حرارتی

۱۰- تسلیح خاک

## اهداف اصلی بهسازی:

• افزایش ظرفیت باربری خاک

• کاهش نشست پذیری

• افزایش مقاومت برشی خاک

• کاهش نفوذپذیری

• کاهش تخلخل (افزایش وزن مخصوص)

• همگن کردن پارامترهای تغییر شکل پذیری

## خاکهای مشکل ساز یا مسأله دار

- خاکهای سست و نشست پذیر
- خاکهای روانگرا
- خاکهای انبساطی (تورمی)
- خاکهای رمنده (فرو ریزشی)
- خاکهای دستی
- رسهای حساس
- خاکهای واگرا
- مدفن های زباله

### روشهای تراکمی

- تراکم دینامیکی
- بارگذاری
- زهکش های مصنوعی
- تراکم ارتعاشی
- ایجاد ستون های سنگی با جایگزینی ارتعاشی
- تزریق تراکمی

### روشهای ایجاد چسبندگی

- تزریق شیمیایی
- تزریق های دوغابی (سیمان و ...)
- یخ زدگی

### روشهای حفاری و جایگزینی

- اجرای دیوارهای دوغابی (سیمان، بتنونیت، بتن پلاستیک و...)
- تزریق با فشار بالا

### روشهای تغییرات فیزیکی و شیمیایی

- الکترو اسموز
- ستونهای آهکی (اختلاط)
- سیستم های تزریق شیمیایی
- ایجاد لعاب
- اختلاط خاک

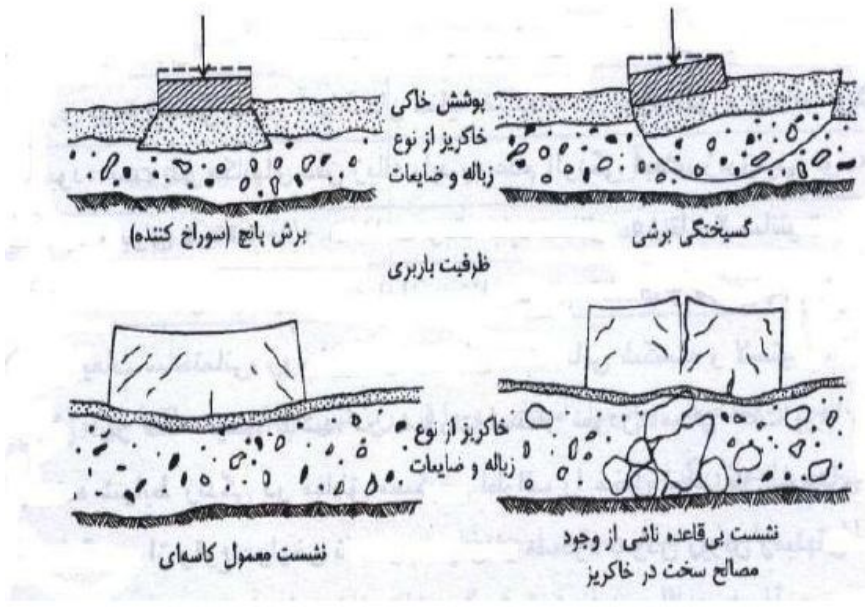
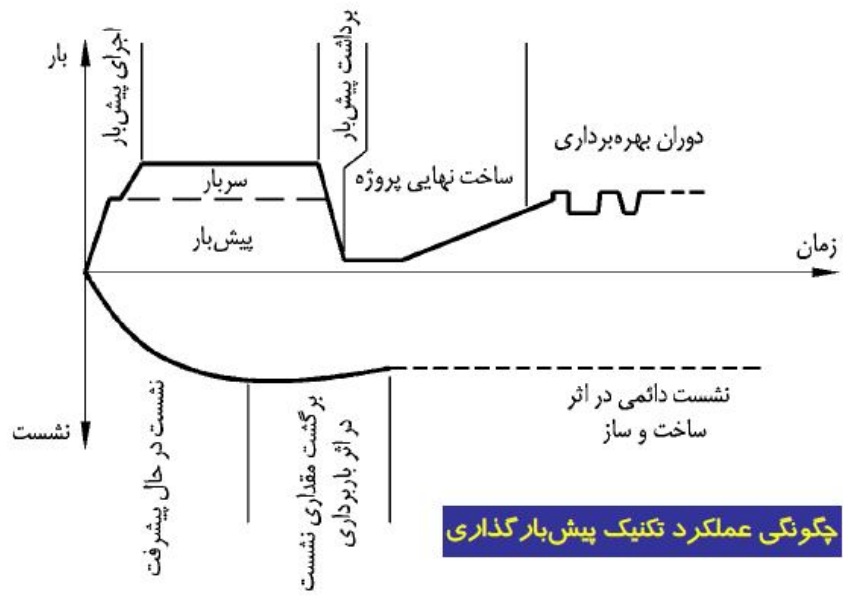
### روشهای مسلح سازی

- آنکورهای خاک و سنگ
- ستون های سنگی با جایگزینی ارتعاشی
- ستون های سنگی با جابجایی ارتعاشی
- ستون های بتنی ارتعاشی
- ریز شمع ها
- دیوارهای باربر بتنی زیرزمینی (دیافراگم و ...)
- میخ کوبی

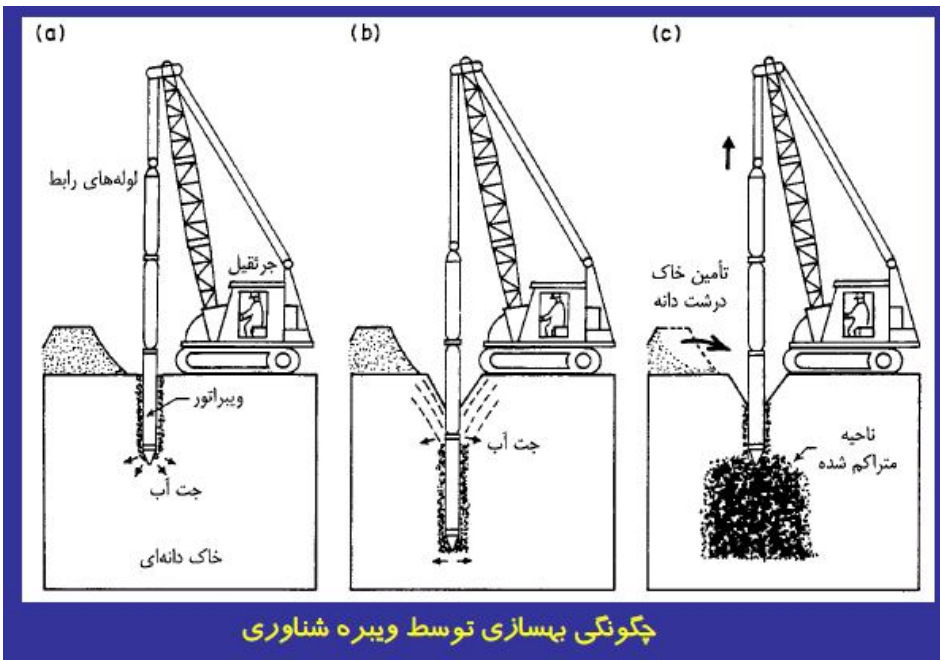
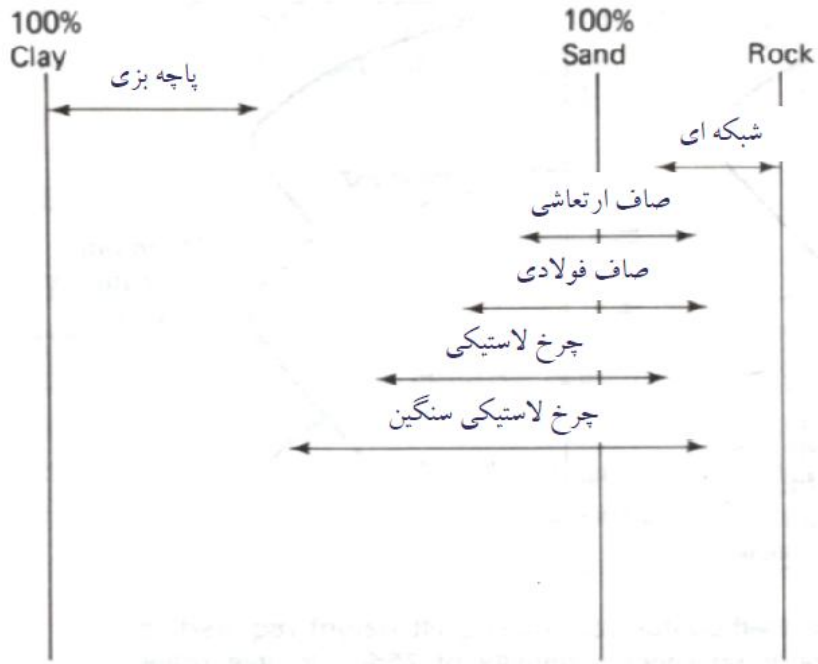
- ژئوسنتیک ها
- تزریق های شکافتنی
- اختلاط خاک

### روشهای تبدیل بیولوژیکی

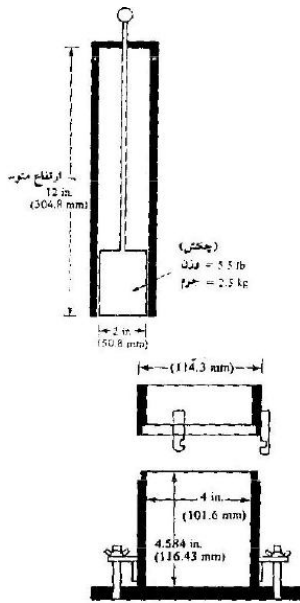
- سیستم های بیولوژیکی و یا تزریق های محرکی
- تقویت ریشه ای
- کاهش آنزیمی



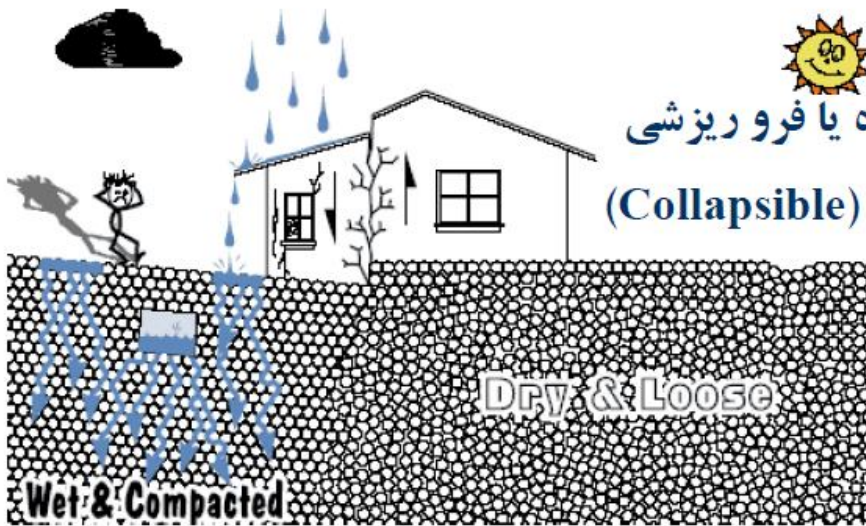
## محدوده کاربرد غلطک‌ها



آزمایشی که بوسیله آن حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و رطوبت بهینه خاک مورد نظر بدست می آید آزمایش پروکتور نامیده می شود.



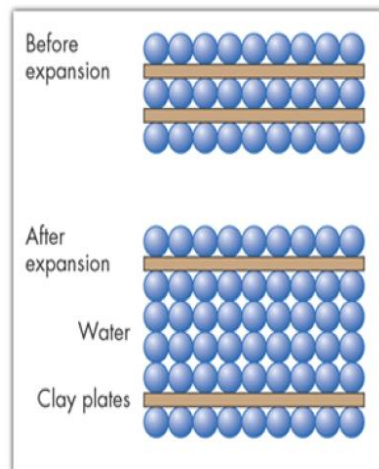
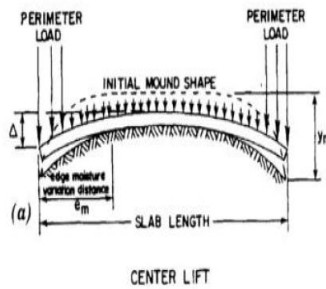
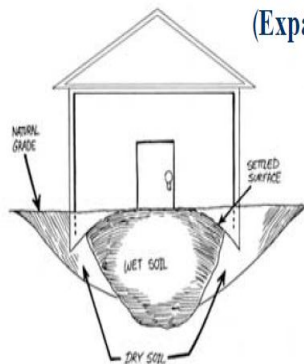
پروکتور اصلاح شده	پروکتور استاندارد	
152.4 mm	152.4 mm	قطر قالب
2124 cm <sup>3</sup>	2124 cm <sup>3</sup>	حجم قالب
4.54 kg	2.5 kg	وزن چکش
457.2 mm	304.8 mm	ارتفاع پرتاب
56	56	تعداد ضربات به هر لایه
5	3	تعداد لایه ها
2700 kN·m/m <sup>3</sup>	600 kN·m/m <sup>3</sup>	انرژی وارد

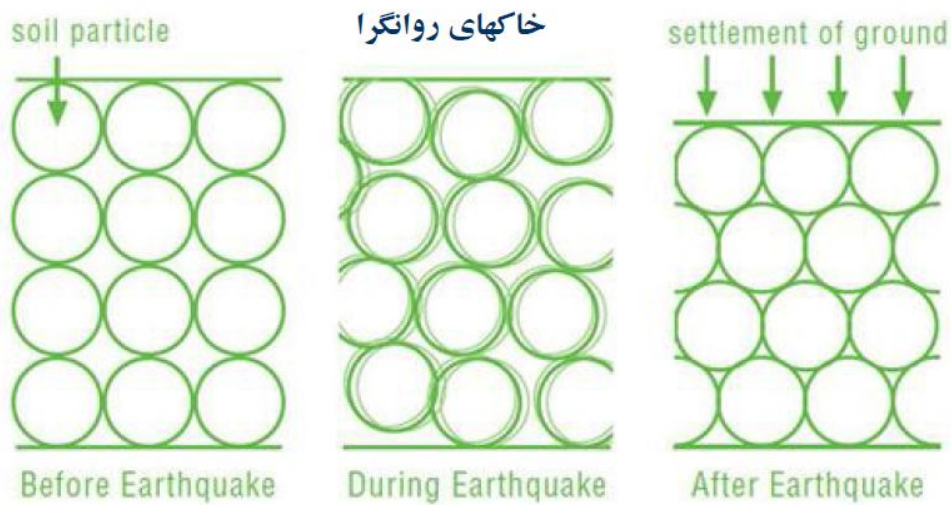


خاکهای رمبنده یا فرو ریزشی

(Collapsible)

خاکهای تورمی (Expansive)



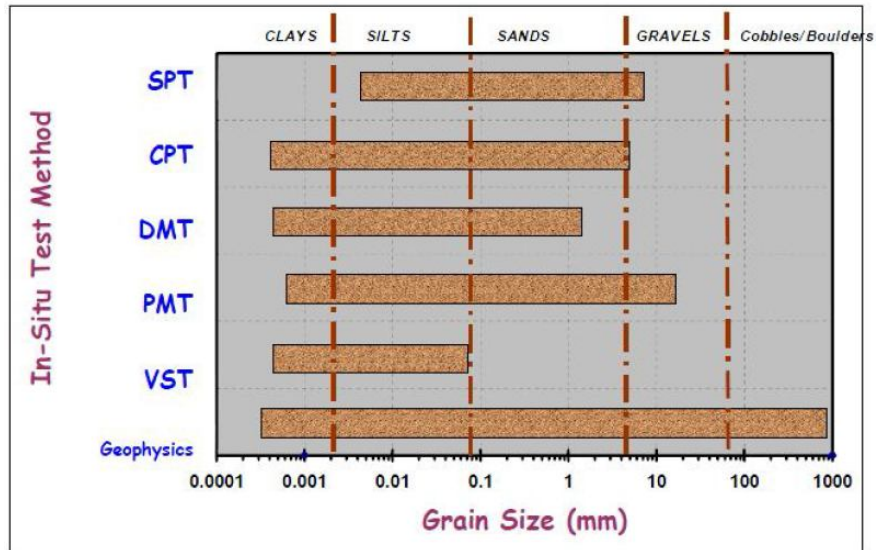
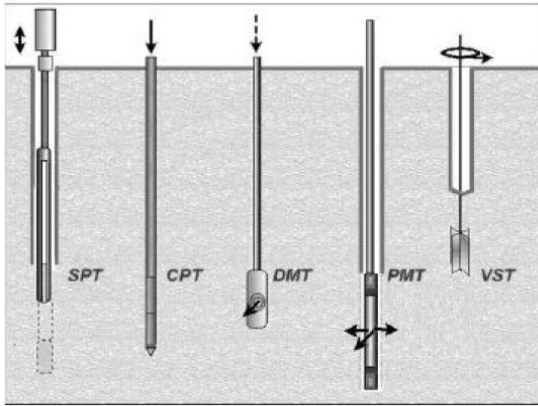


### مقایسه برخی آزمونهای برجای صحرایی متداول

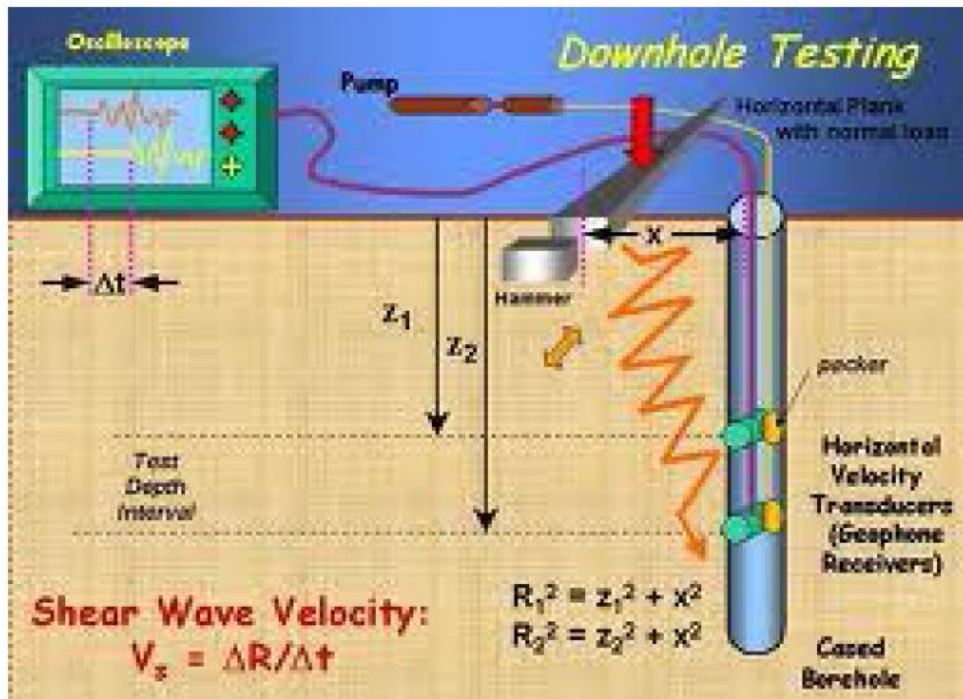
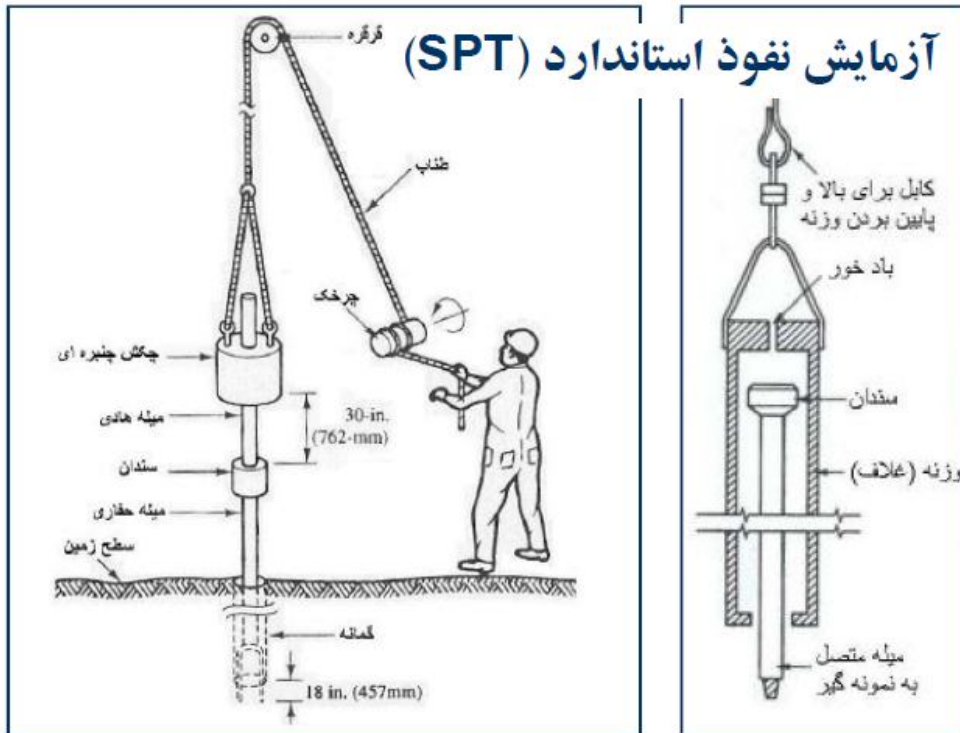
بارگذاری صفحه (PLT)	دایالاتومتر تخت (FDMT)	پرسیو متری (PMT)	برش پره (VST)	نفوذ مخروط (CPT)	نفوذ استاندارد (SPT)	
ساده و با دوام	پیچیده و نسبتاً با دوام	پیچیده و ظریف	ساده و با دوام	پیچیده و نسبتاً با دوام	ساده و با دوام	سادگی و دوام تجهیزات
متوسط	ساده	پیچیده	ساده	ساده	ساده	سهولت انجام آزمایش
نقطه ای	نقطه ای	نقطه ای	نقطه ای	پیوسته	نقطه ای	نتایج پیوسته یا نقطه ای
تجربی و نظری	تجربی و نظری	تجربی و نظری	نظری	تجربی و نظری	تجربی	مبانی تفسیر نتایج
همه خاکها	همه خاکها به جز شنها	همه خاکها	ریز دانه اشباع	همه خاکها به جز شنها	ماسه ها	خاک مناسب
فراگیر	در پروژه های خاص	در پروژه های خاص	کم	نسبتاً فراگیر	فراگیر	فراوانی استفاده
محدود	زیاد	زیاد	محدود	زیاد	محدود	پتانسیل توسعه در آینده

می توان آزمونهای صحرائی ژئو تکنیک را به سه دسته زیر تقسیم کرد:

- (۱) آزمونهای نفوذسنج
- (۲) آزمونهای سنجش مقاومت و تراکم پذیری خاک
- (۳) آزمونهای تعیین نفوذپذیری

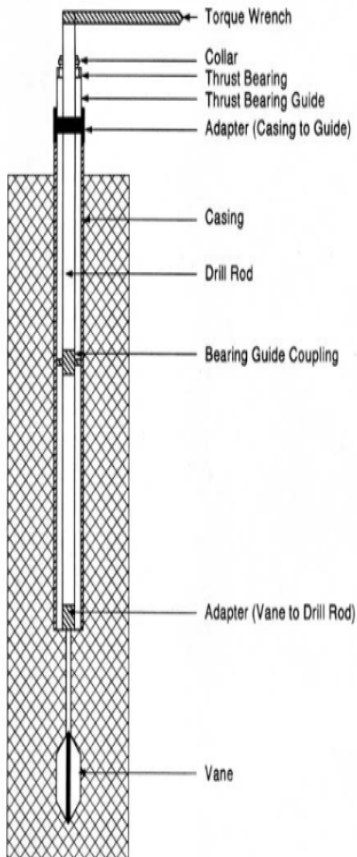
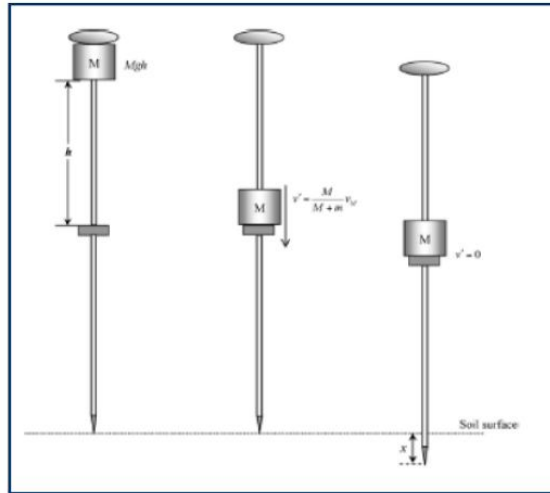
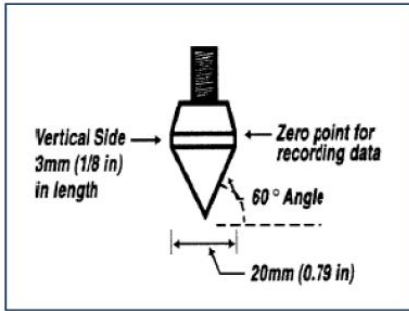


## آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

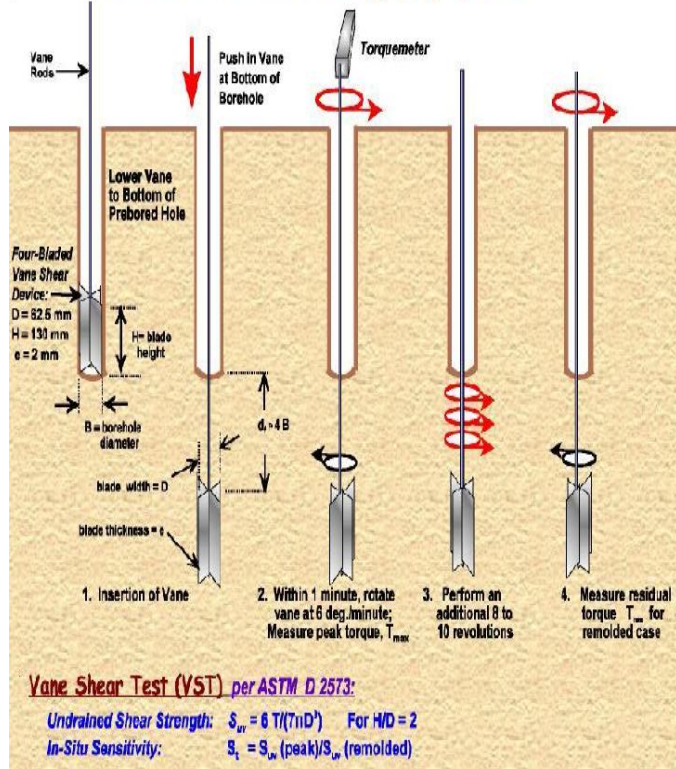


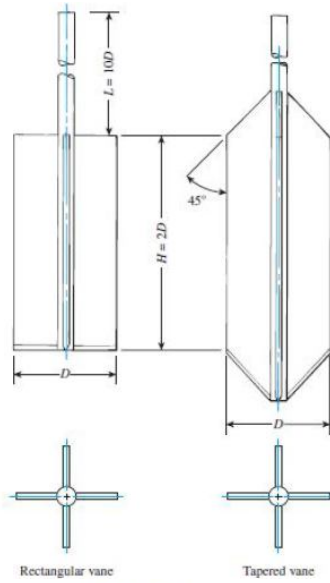


## آزمایش نفوذگر دینامیکی



## آزمایش برش پره (Vane Shear Test)

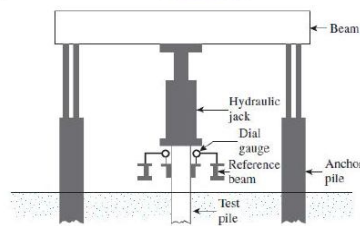
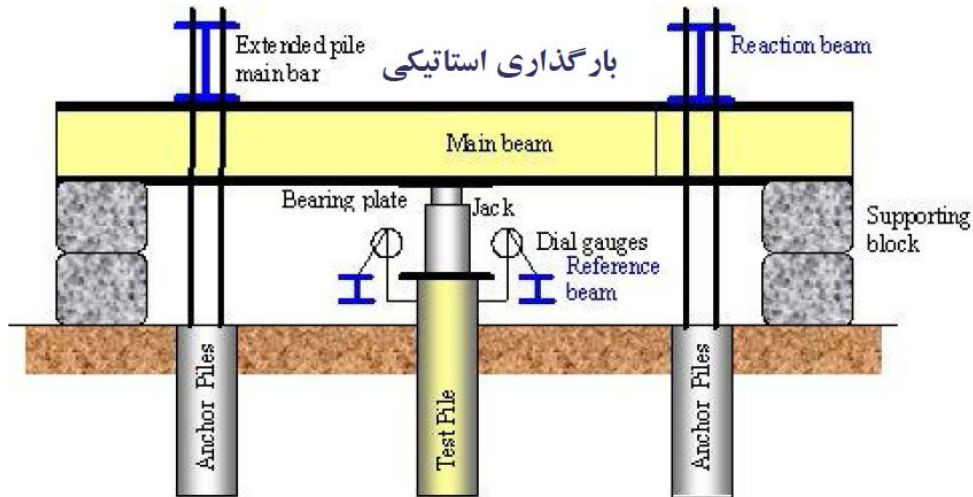




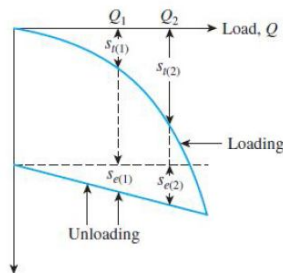
$$c_u = \frac{T}{K}$$

$T$  is in  $N \cdot m$ ,  $c_u$  is in  $kN/m^2$ .

$$K = \left( \frac{\pi}{10^6} \right) \left( \frac{D^2 H}{2} \right) \left( 1 + \frac{D}{3H} \right)$$



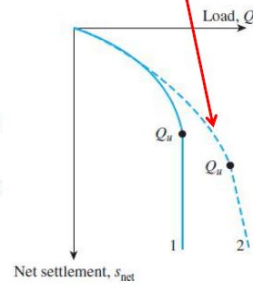
در برخی حالات منحنی کاملاً قائم نمی شود.



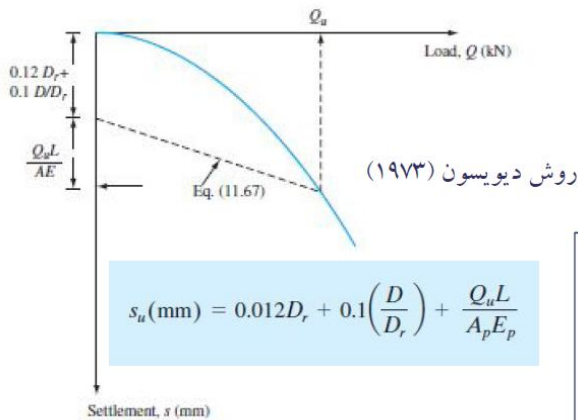
بارگذاری استاتیکی

$$\text{Net settlement, } s_{\text{net}(1)} = s_{r(1)} - s_{e(1)}$$

$$\text{Net settlement, } s_{\text{net}(2)} = s_{r(2)} - s_{e(2)}$$



بارگذاری استاتیکی



$$s_u(\text{mm}) = 0.012D_r + 0.1\left(\frac{D}{D_r}\right) + \frac{Q_u L}{A_p E_p}$$

$Q_u$ : بار نهایی بر حسب kN  
 $S_u$ : نشست نهایی بر حسب mm  
 $D_r$ : قطر مبنا بر حسب mm (300 فرض شود)  
 $D$ : قطر شمع بر حسب میلی متر  
 $L$ : طول شمع بر حسب میلی متر  
 $A$ : مساحت بر حسب میلی متر مربع  
 $E$ : مدول الاستیسیته بر حسب  $\text{kN/mm}^2$

محدودیتها	مزایا	میزان اصلاح قابل دسترس	جا نهایی معمول و فواصل نهایی	عمق موثر (m)	نوع خاک مناسب	روش
عمق تاثیر محدود، آلودگیهای صوتی و ارتعاشی	قیمت پایین و سادگی	$D_r = 80\%$ $q_c = 10-15$ MPa	آرایش مربعی در فواصل ۲ تا ۶ متری	۱۰-۱۲	خاکهای درشت دانه، ماسه های اشباع و ماسه های لای دار، ماسه های نیمه اشباع	تراکم دینامیکی
نیاز به ابزار ویژه، نامناسب در خاکهای قلوه سنگی	یکنواختی با عمق	$D_r = 80\%$ $q_c = 10-15$ MPa	آرایش مربعی یا مثلثی در فواصل ۱.۵ تا ۳ متری	۳۰	ماسه ها، ماسه های لای دار و ماسه های شن دار (ریز دانه کمتر از ۳۰ درصد)	تراکم ارتعاشی
نیاز به ابزار ویژه، غیر قابل استفاده در خاکهای قلوه سنگی	زهکشی، یکنواختی با عمق	$q_c = 10-12$ MPa	آرایش مربعی یا مثلثی در فواصل ۱.۵ تا ۳ متری	۲۰	خاکهای نرم، ماسه های رسی یا لای دار، لای رس دار	تراکم استاتیکی سنگین
آلودگی صوتی و ارتعاشی	ارزان و تکنولوژی ساده	$D_r = 75\%$ $q_c = 10-12$ MPa	آرایش مربعی یا مثلثی در فواصل ۳ تا ۸ متری	نامحدود	ماسه ها و ماسه های لای دار اشباع	تراکم انفجاری

روش	نوع خاک مناسب	عمق موثر (m)	جا نمایی معمول و فواصل نهایی	میزان اصلاح قابل دسترس	مزایا	محدودیتها
زهکش های ششی	ماسه ها، ماسه های لای دار	۲۰	فواصل با هدف حداقل کردن نسبت فشار آب منفذی اضافی انتخاب میشوند	کم کردن فشار آب منفذی	ارزان، نیاز به اصلاح کلی منطقه نیست	ممکن است نیاز به اجرا در فواصل خیلی نزدیک باشد
اختلاط عمیق خاک	در تمامی خاکها	۲۰	بسته به نوع کاربرد	بستگی به اندازه و قدرت و نوع دستگاه و نوع خاک دارد	مقاومت بالا و مسلح کردن زمین	نیاز به ابزار خاص، المان های شکننده ایجاد میگردد
تزیین با فشار بالا	در تمامی خاکها (در خاکهای رسی با خاصیت خمیری بالا مشکل است)	نامحدود	بسته به نوع کاربرد	بستگی به اندازه و قدرت و نوع دستگاه و نوع خاک دارد	تحت کنترل است، قابل استفاده در فضاهای محدود شهری	هزینه زیاد

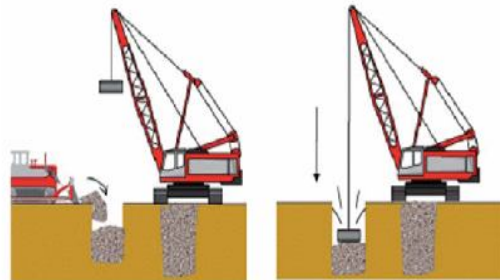
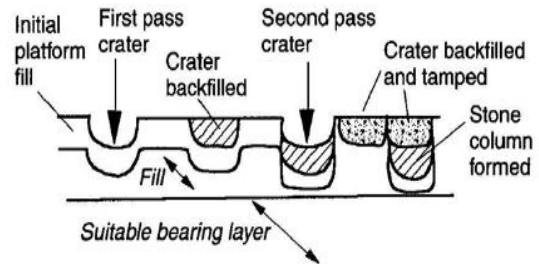
روش	نوع خاک مناسب	عمق موثر (m)	جا نمایی معمول و فواصل نهایی	میزان اصلاح قابل دسترس	مزایا	محدودیتها
زهکش قائم شیشه ای	خاکهای با قابلیت فشردگی متوسط تا زیاد، ماسه های رس دار، لای ها، رس ها	تا ۶۵ متر (بیش از ۳۵ متر به جرتفیل نیاز دارد)	ارایش مربعی یا مثلثی در فواصل ۱/۵ تا ۶ متری	بستگی به فشار تحکیمی نهایی دارد	قیمت کم و ساده	نامناسب، اگر در بالای لایه نفوذ پذیر موانعی باشد
جایگزینی	تمامی خاکها	در عمق های کم	-	مصالح پر کننده یا دانسیته زیاد تا مصالح سمنتته شده	میتوان تا تراز اصلاح مناسب طراحی شود	گران، ممکن است به سازه نگهبان در گود برداری نیاز باشد
اختلاط	از سیمان برای اصلاح ماسه، ماسه های لای دار، و از آهک برای اصلاح رس ها و ماسه های رس دار	در عمق های کم	-	مصالح پر کننده یا دانسیته زیاد تا مصالح سمنتته شده	میتوان تا تراز اصلاح مناسب طراحی شود	نتایج به میزان مواد افزودنی و تراکم در محل بستگی دارد
پیو تکولوژی	تمامی خاکها	در عمق های کم	بسته به نوع کاربرد	پایدار سازی شیبها	تطابق با طبیعت	تا وقتی گیاه زنده است شیب پایدار است، برای شیب تندتر از ۱:۱ تا ۱:۰.۵ بسختی میتوان از این روش استفاده کرد

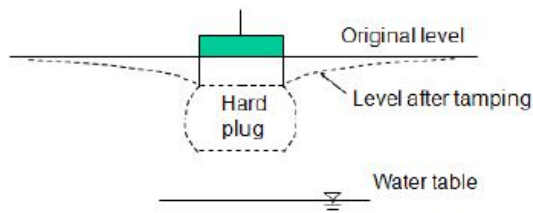
(US ARMY-a, 1994 Hausmann, 1990)

Method	اصول عمل	مناسبتین خاک	ماکزیم عمق موثر m	مزایا و محدودیتها
الف - تراکم و بیره ای Vibrocompaction				
انفجار Blasting	شوک امواج موجب روانگرایی جابجائی و ایجاد فرم جدید در خاک	ماسه های اشباع و نیمه اشباع لای ها پس از غرقاب شدن	۲۰	سریع، هزینه پائین عمل آوری مناطق کوچک، عدم تثبیت در اعماق سطحی و تهدید محیط زیست، حصول دانسیته نسبی تا ۸۰٪
کوبنده ها Terraprobe	متراکم سازی خاک ها با ویبراسیون عمودی، داخل لوله های قالب	ماسه های خشک و یا اشباع تمیز ( اثر کم در ماسه های ریز)	۲۰ متر ( در ۴ متر بالایی موثر نیست)	سریع، ساده و مناسب در زیر آب لایه های نرم زیر زمین ممکن است موجب میرایی ارتعاشات گردند، مشکل نفوذ در لایه های سفت و سخت
غلتکها Dynamic Static or Rollers	متراکم سازی با وزن و ارتعاشات غلتکها	انواع خاکها	<۲	بهترین متد برای لایه های کم ضخامت شل سطحی و خاکریز ها

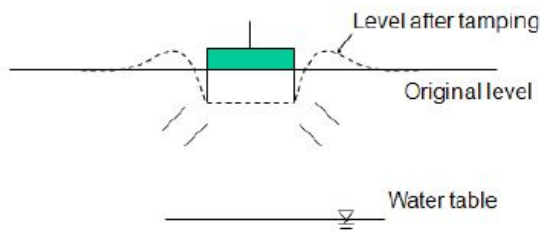
## روشهای بهسازی: تراکم دینامیکی

- کاهش نشست پی
- کاهش نشست های ناشی از زلزله
- کاهش پتانسیل روانگرایی
- امکان ساخت و ساز بر خاکهای دستی
- متراکم نمودن محل دفن زباله ها برای ساخت و ساز
- اصلاح محل های دپوی مازاد معادن
- اصلاح نشست خاکهای رمبنده





کوبش مناسب با کاهش تراز خاک



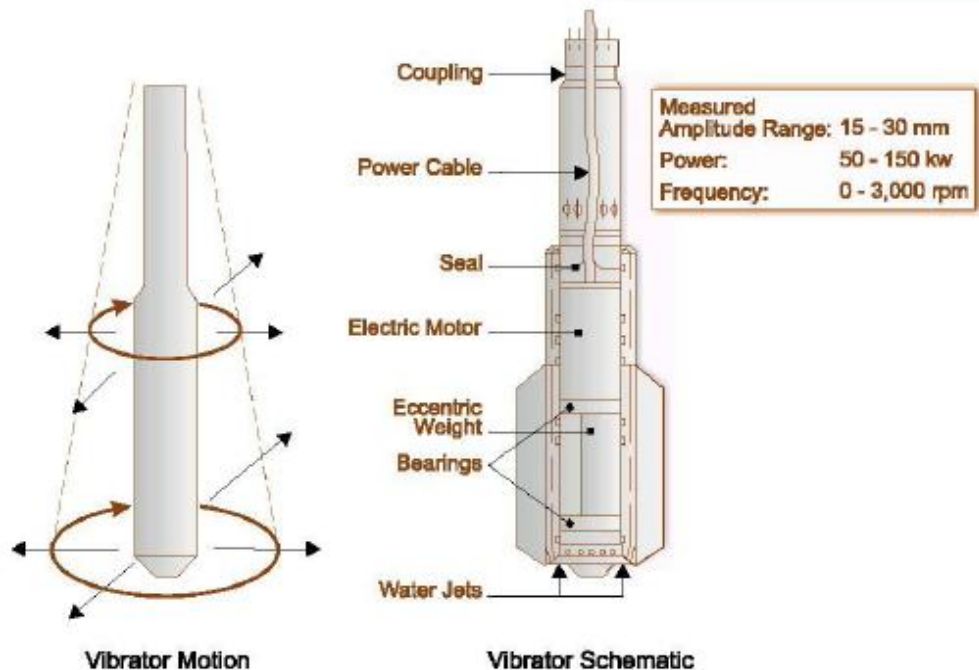
بالا زدگی خاک (Heave) نشانه ای از تغییر شکل‌های پلاستیک می باشد و نشانگر لزوم توقف عملیات است.

### (Suitability Number)

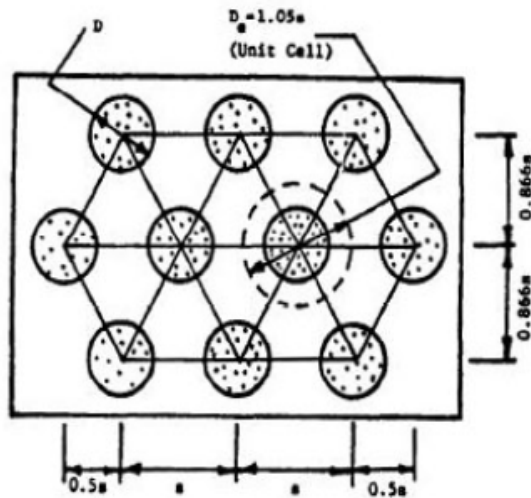
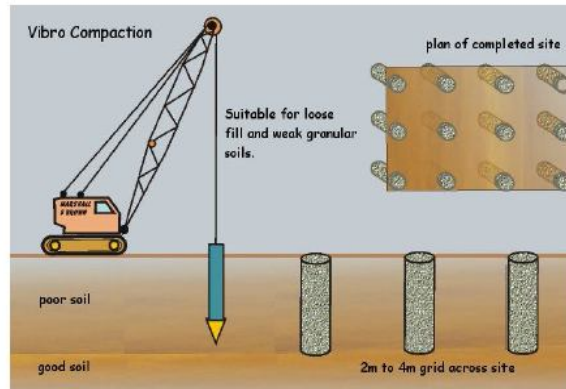
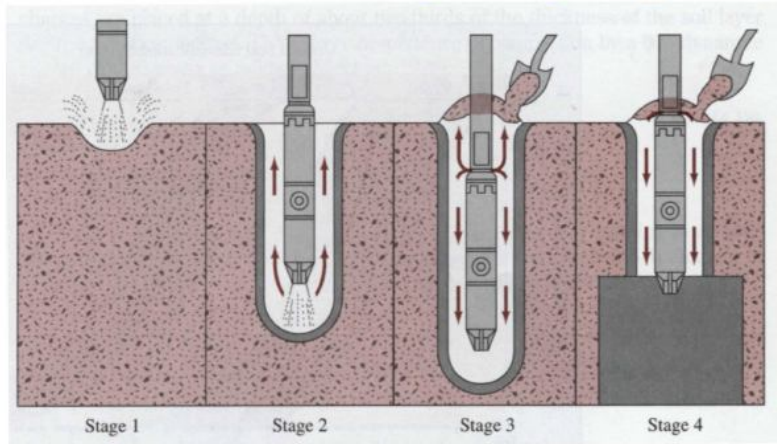
$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

قطر بهبود خاک بین ۵ الی ۱۵ برابر قطر کاوشگر است

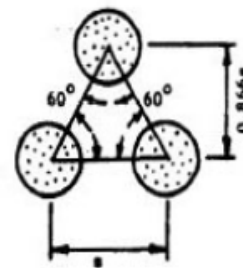
Range of $S_N$	Rating as backfill
0-10	Excellent
10-20	Good
20-30	Fair
30-50	Poor
>50	Unsuitable



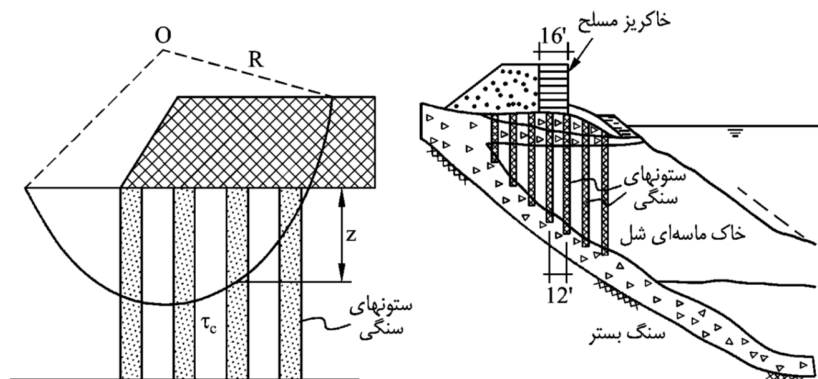
مراحل اجرای تراکم ارتعاشی + جایگزینی = ستون سنگی



(a) Foundation Layout



(b) Geometry



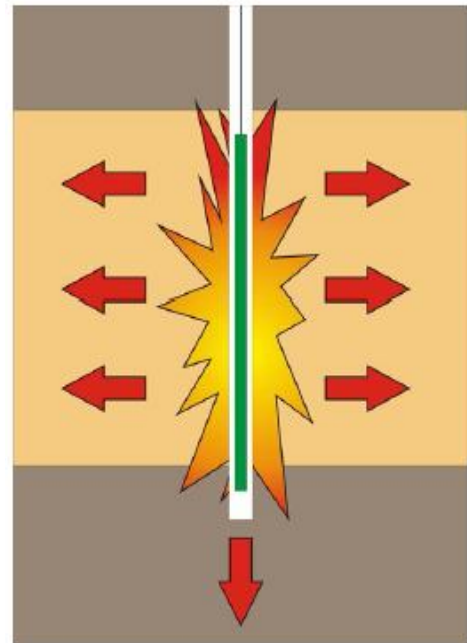
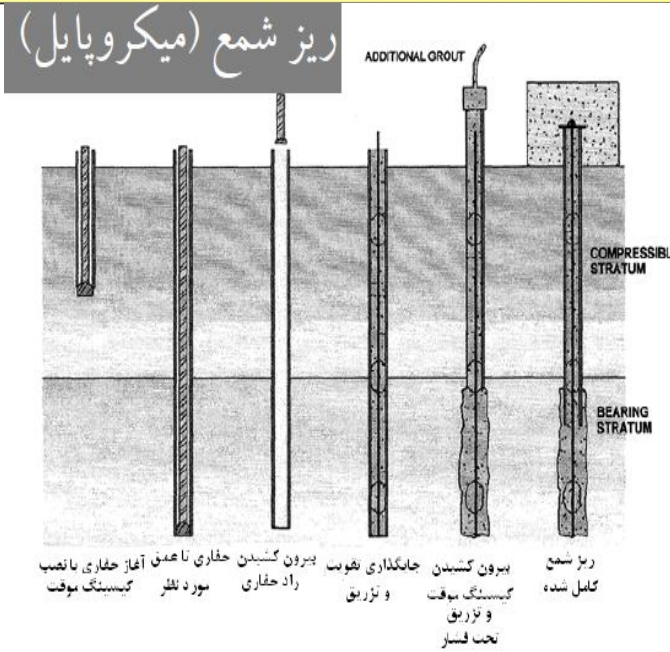
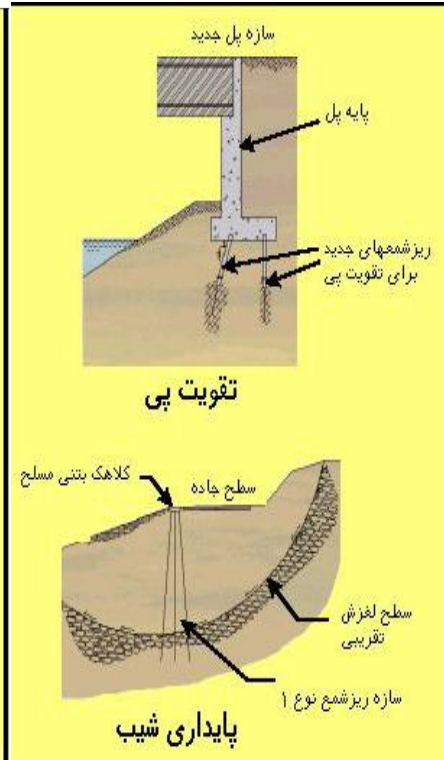
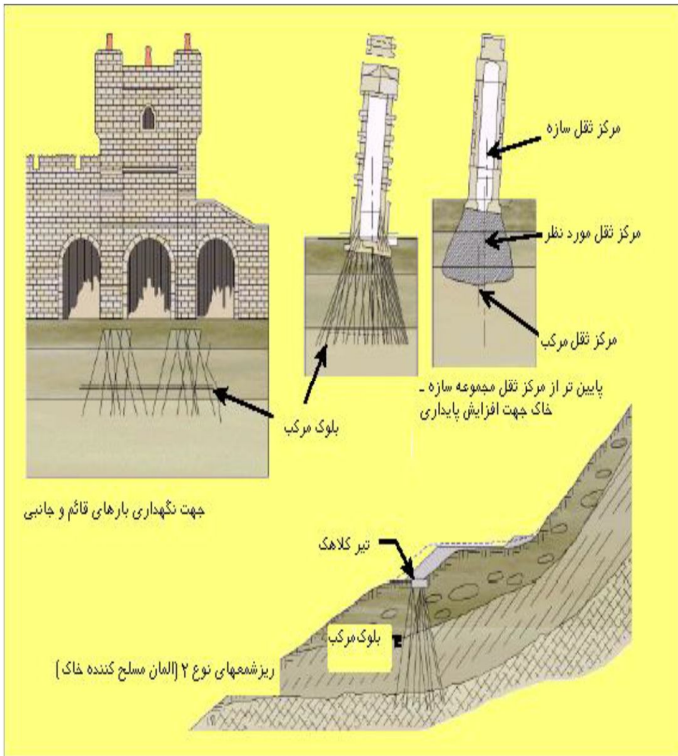
### کاربرد میکروپایل ها

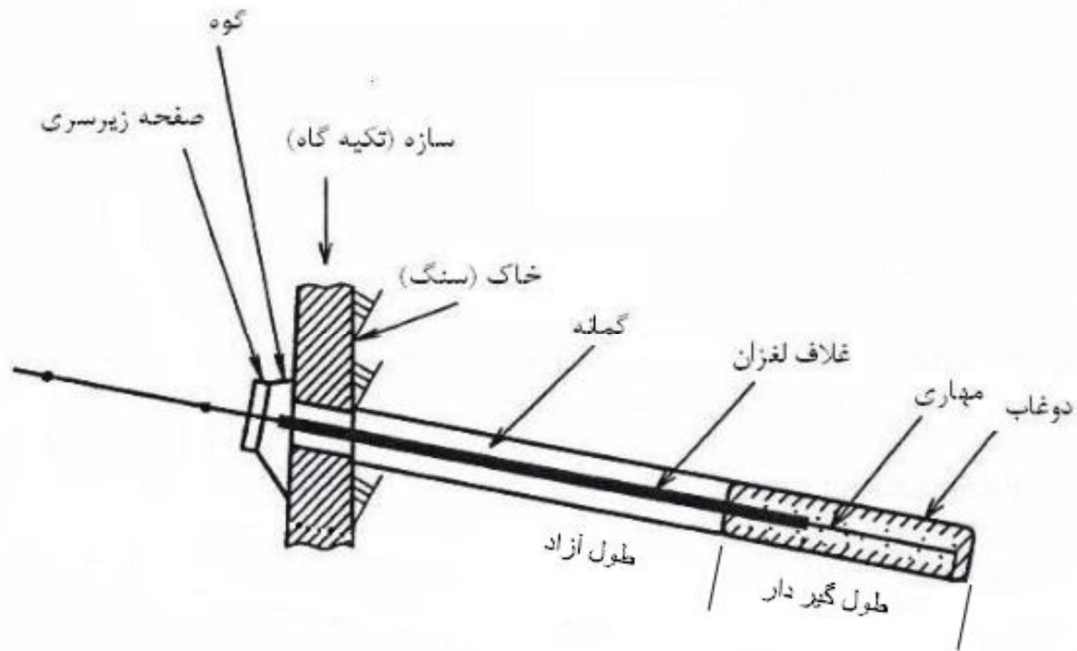
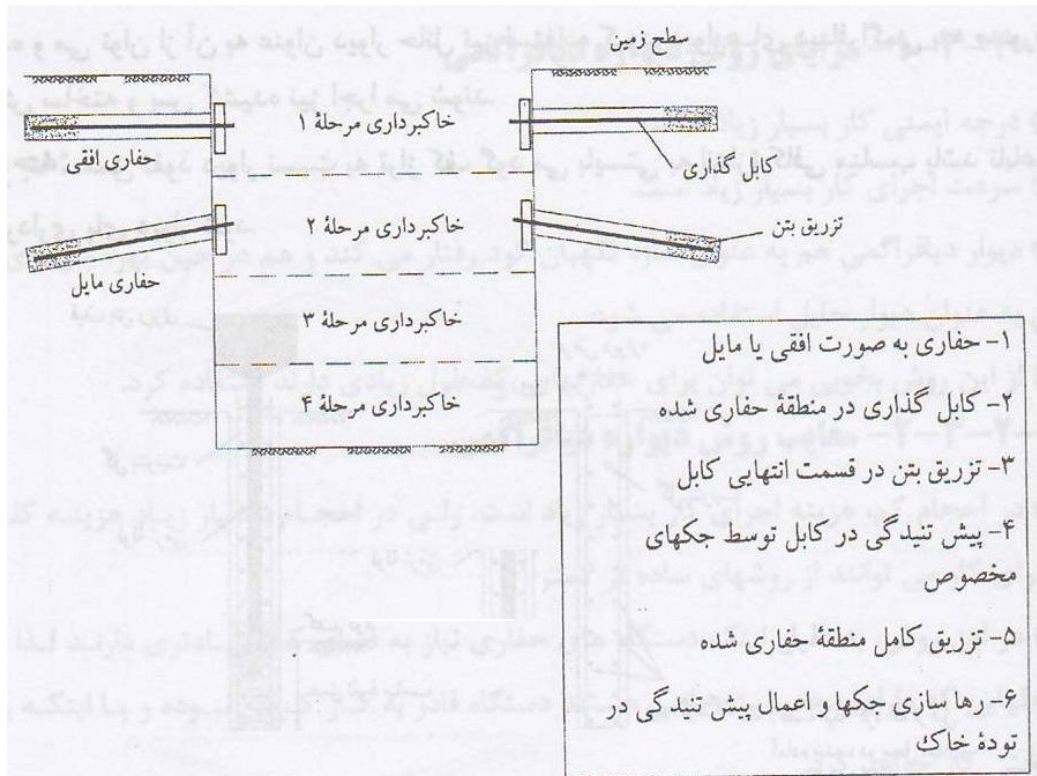
استفاده در بستر پی سازه‌ها

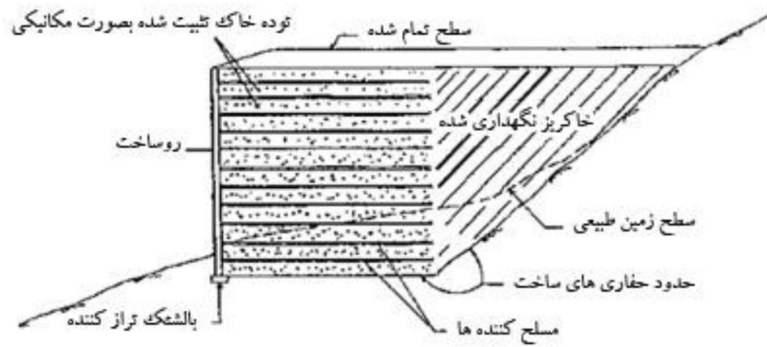
اصلاح و بهسازی خاک

- پایدارسازی شیبها
- ساخت دیواره‌های نگهدارنده
- مقابله با روانگرایی
- افزایش مقاومت توده خاک با اهداف خاص نظیر تونلسازی و ...
- حفاظت شیمیایی بخشهای مدفون سازه‌ها



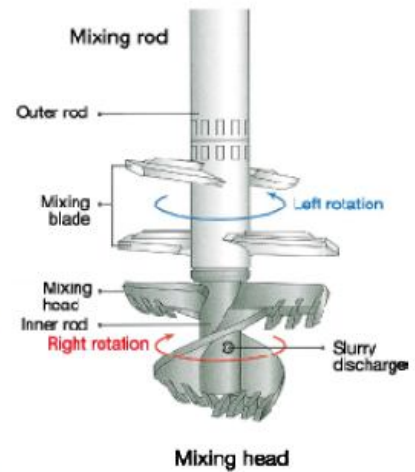
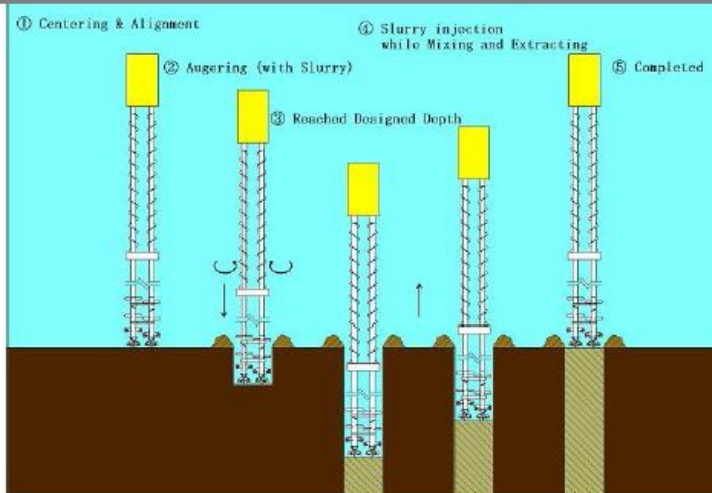


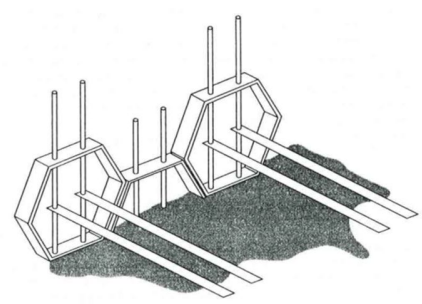
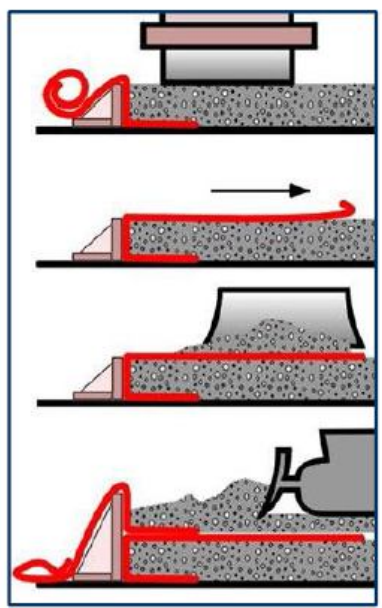
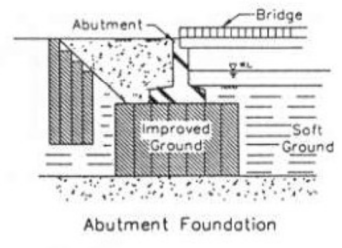
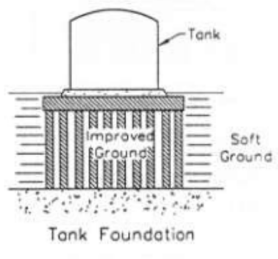
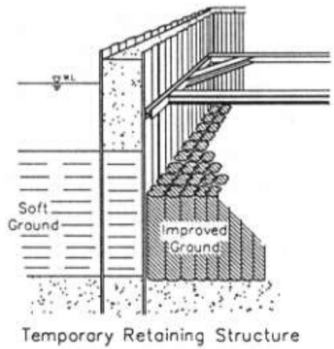
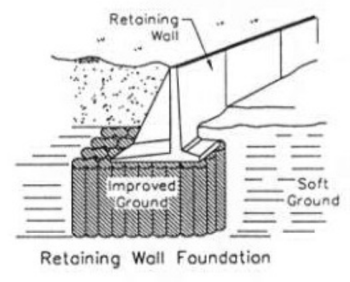
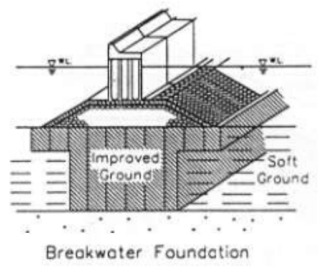
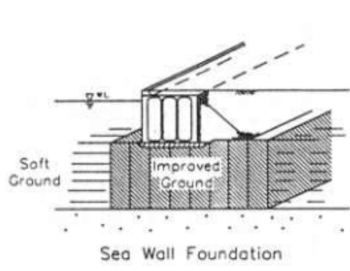


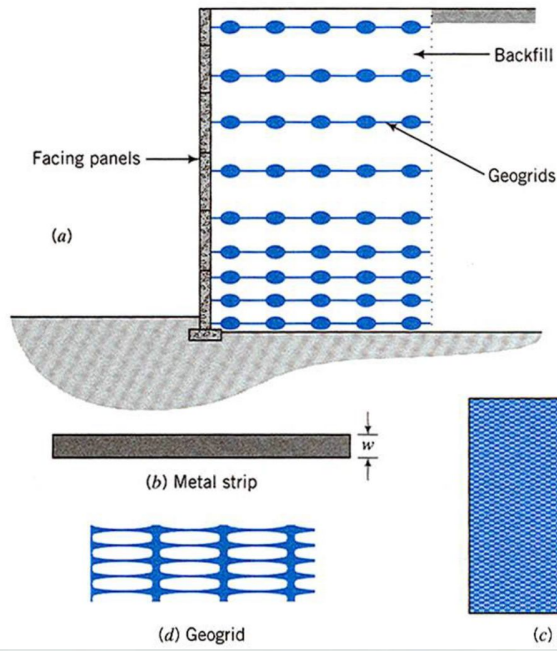


اجزای اساسی توده ی خاک تثبیت شده بصورت مکانیکی

## اختلاط عمقی خاک (Deep Soil Mixing)

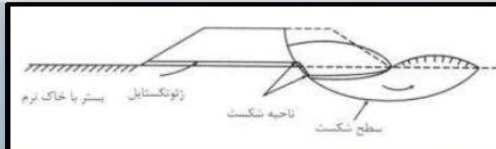




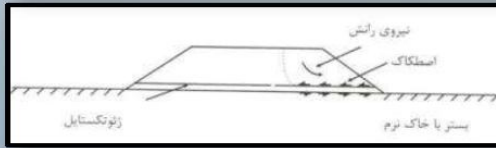


### تثبیت بستر با لایه های ژئوتکستایل

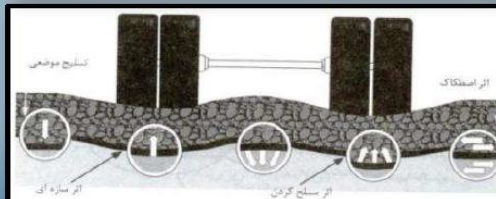
جلوگیری از رانش خاکریز



جلوگیری از شکست خاکریزها

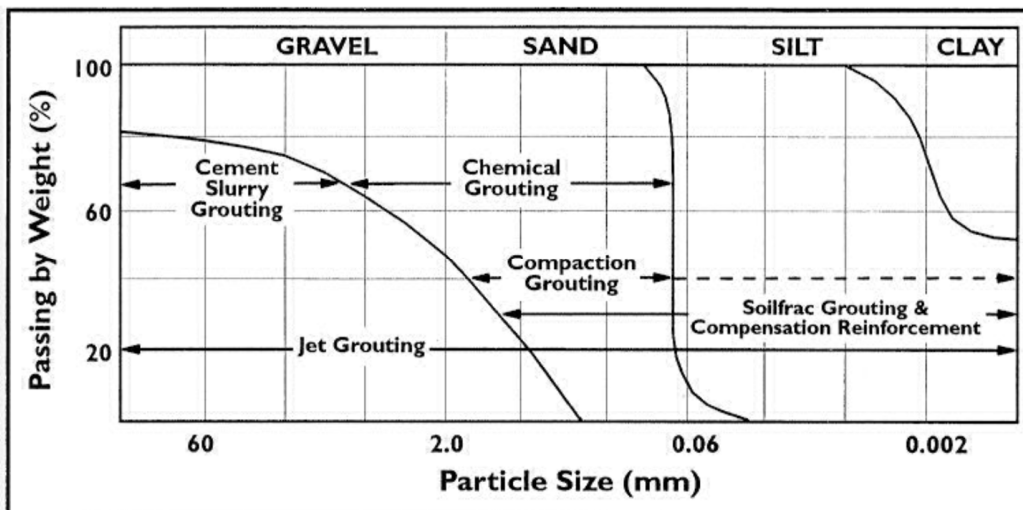


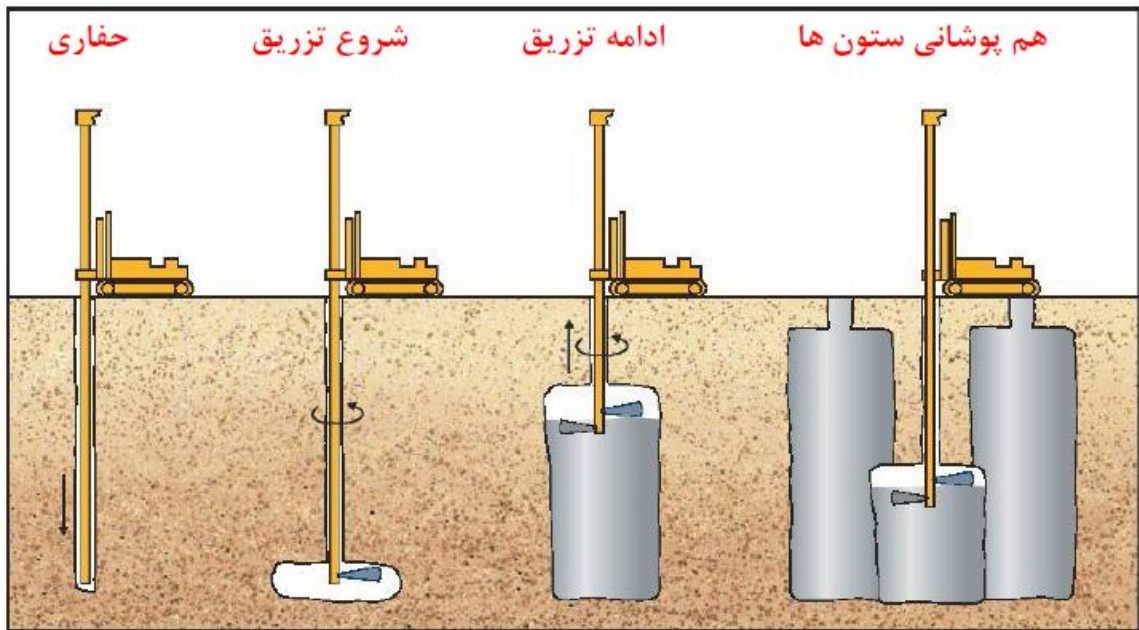
جلوگیری از رانش خاکریز روی بستر

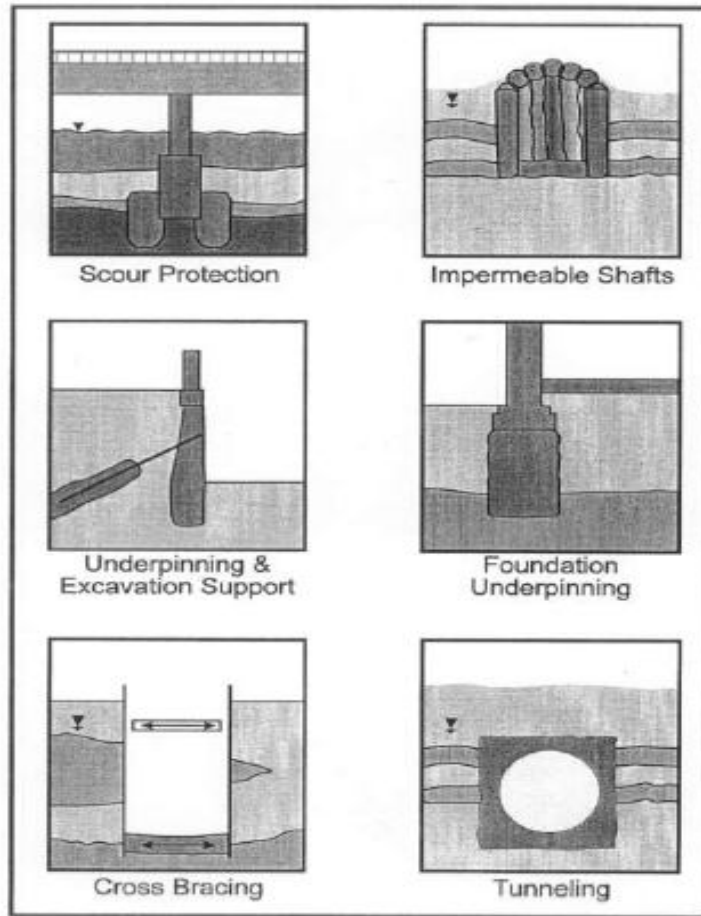


## کاربردهای تزریق در بهسازی خاک

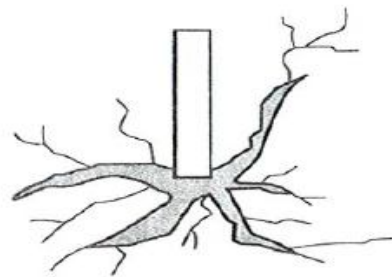
- ۱- پر کردن فضاهاى خالى جهت جلوگیری از نشست های زیاد و تقویت خاک زیر پی
- ۲- کنترل نشست و کاهش قابلیت نفوذپذیری خاک و یا ایجاد پرده های آب بند در سازه های خاکی جهت جلوگیری از فرار آب
- ۳- مقاوم سازی خاک زیر سازه موجود به منظور جلوگیری از جابه جایی ساختمان به دلیل خاکبرداری در همسایگی، کوبیدن شمع و اجرای شمعک های تزریقی
- ۴- کنترل جابه جایی زمین در حین عملیات احداث تونل
- ۵- مقاوم سازی خاک برای کاهش سیستم های حفاظت جانبی
- ۶- مقاوم سازی خاک برای افزایش مقاومت در برابر بارگذاری جانبی شمع
- ۷- تثبیت ماسه های شل در مقابل روانگرایی
- ۸- کنترل ناپایداری در خاک های مستعد واگرایی
- ۹- تثبیت شیروانی ها
- ۱۰- کنترل تغییر حجم خاک های انبساطی به کمک تزریق دوغاب آهک



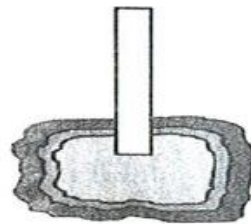




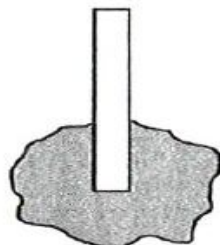
موارد استفاده از تزریق با فشار بالا



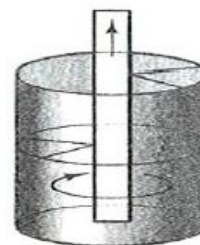
Intrusion grouting



Compaction grouting



Permeation grouting



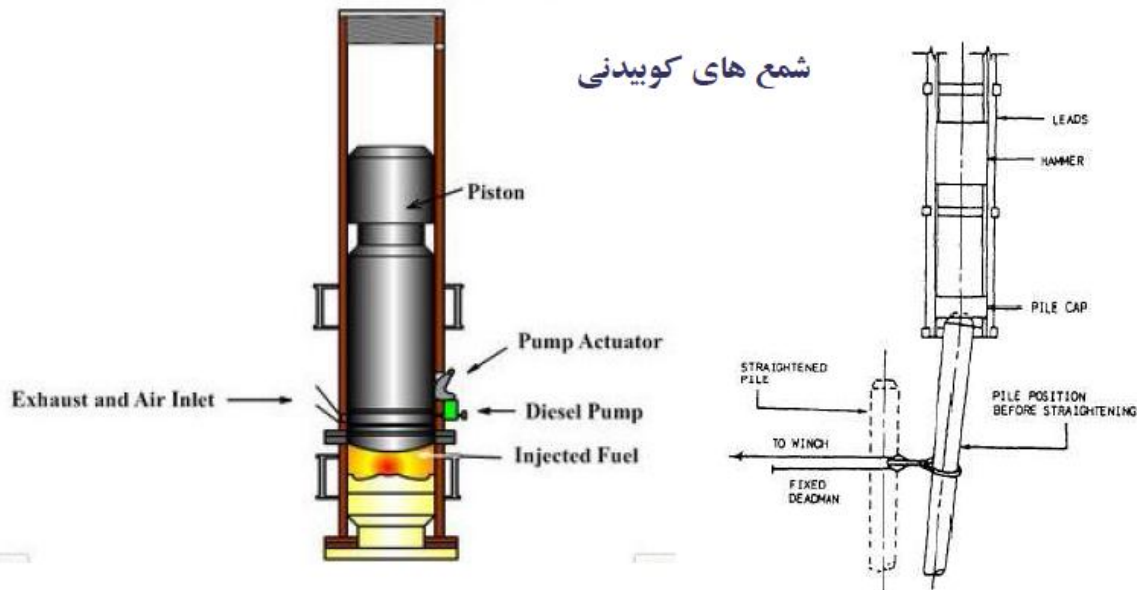
Jet grouting

تزریق خاکها توسط تکنیک تزریق



### DIESEL PILE DRIVER

شمع های کوبیدنی



شن	ماسه	سیلت	رسی
	تراکم ویبره‌ای		
	تفجاری		
	تزریق انبوهی		
	تزریق شیمیایی		
	تزریق تراکمی		
	پیش فشردگی		
	ضربه زنی سنگین (تراکم دینامیکی)		
	الکترواسمز		
	تسلیح (فشاری، کششی و برشی)		
	بهسازی حرارتی		
	افزودنی ها		

اندازه ذرات، mm

ردیف	مشکل ژئوتکنیکی	روش های مناسب بهسازی به ترتیب الویت
۱	کمی ظرفیت باربری و نشست غیرمجاز پی	۱- تراکم دینامیکی ( بیرون از محیط شهری ) ۲- تراکم لرزه ای / جایگزینی ۳- اختلاط عمقی خاک ۴- پی های عمیق ۵- میکروپایل ۶- تزریق با فشار بالا
۲	روانگرایی	۱- تراکم دینامیکی ( بیرون از محیط شهری ) ۲- تراکم لرزه ای / جایگزینی ۳- اختلاط عمقی خاک ۴- تزریق با فشار بالا
۳	علاج بخشی پی	۱- میکروپایل ۲- تزریق با فشار بالا ۳- تزریق شکافتنی
۴	نشست آب	۱- سپرکوبی ( بیرون از محیط شهری ) ۲- اختلاط عمقی خاک ۳- دیوار آب بند ۴- تزریق با فشار بالا ۵- تزریق نفوذی
۵	پایدار سازی گود • با و یا بدون مهار • حایل داخلی	۱- پائین انداختن سطح آب ۲- سپرکوبی ( بیرون از محیط شهری ) ۳- اختلاط عمقی خاک ۴- شمع های هم پوشان ۵- تزریق با فشار بالا ۶- دیوار دیافراگمی

### مراحل اجرای تثبیت با آهک

- ۱- شخم زدن
- ۲- دانه کردن خاک
- ۳- پخش آهک
- ۴- مخلوط کردن
- ۵- افزودن آب برای حصول به رطوبت بهینه
- ۶- کوبیدن مخلوط
  - استفاده از غلتک های پاچه بزی
  - استفاده از غلتک های چرخ لاستیکی
  - استفاده از غلتک های چرخ فولادی در برخی از موارد
- ۷- تسطیح و فرم دادن
- ۸- مرطوب نگه داشتن به منظور عمل آوری
- ۹- اجرای روکش در صورت لزوم

