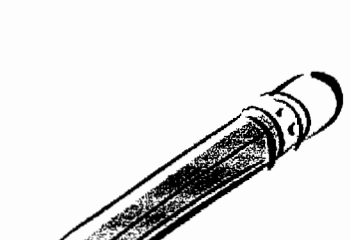
فصل پنجم

عوامل مؤثر در طرح پی‌ها با توجه به وضعیت خاک زیر پی



۱- پی‌سازی روی خاک‌های مختلف:

۱. پی‌سازی روی سنگ:

در احداث پی یا شالوده بر روی سنگ معمولاً با مشکل ظرفیت باربری مواجه نیستیم، ولی از نظر تغییرشکل یا نشست اگر سنگ خرد شده و هوازده باشد احتمال مشکل وجود دارد. معیار ارزیابی خردشدگی و هوازدگی در سنگ، RQD* می‌باشد. اگر RQD از ۹۰٪ بیشتر باشد جنس سنگ خوب است در غیر این‌صورت ممکن است تغییرشکل، از حد مجاز بیشتر باشد.

اگر پی را در معنای وسیعتری در نظر بگیریم مثل شالوده‌ی سدها، در آن‌صورت غیر از ظرفیت باربری و تغییرشکل، باید آبگذرانی را نیز در نظر داشت. برای کاهش ظرفیت آبگذرانی در پی یک پرده آب بند با تزریق در سنگ ایجاد می‌نمایند.

۲. پی‌سازی بر روی خاک مخلوط درشت‌دانه:

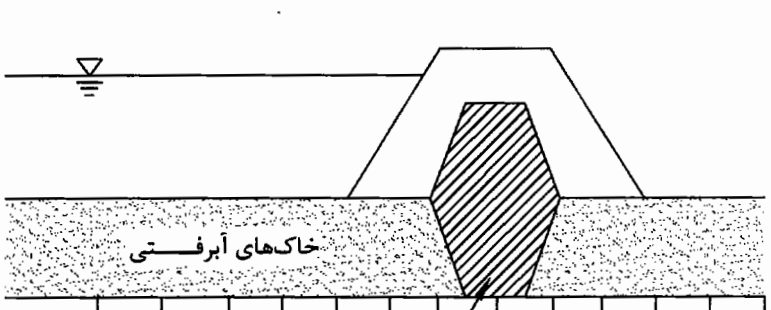
گر چه ظرفیت باربری در خاک‌های درشت‌دانه معمولاً بالاست ولی لازم است کنترل شود. نشست در این خاک‌ها عمدتاً کوتاه‌مدت یا آنی است. در خاک‌های درشت‌دانه الزاماً پی باید در عمق مناسب در داخل خاک قرار گیرد.

---

* RQD (Rock Quality Designation): مجموع طول قطعات بزرگتر از ۱۰ سانتیمتر در هر متر طول از مغزه سنگ موردنظر می‌باشد که از حفاری دورانی (Coring) در سنگ به دست می‌آید.

پارامتر D_r در این خاک‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر $D_r \leq 0.65$ باشد، بهتر است خاک قبل از پی‌کنی با روش‌های مناسب متراکم گردد.

خاک‌های درشت‌دانه در زیر پی سدها که اغلب آبرفتی هستند از نظر نفوذپذیری معمولاً مشکلاتی را برای سد ایجاد می‌نمایند. هنگامی که ضخامت آبرفت کم است هسته‌ی رسی را تا رسیدن به سنگ بستر ادامه می‌دهند. اگر ضخامت آبرفت زیاد باشد از پرده تزریق (Grout curtain) جهت آب‌بندی شالوده‌ی سد استفاده می‌شود.



شکل (۵-۱): شکل شماتیکی از آب‌بندی شالوده‌ی سد با هسته‌ی رسی

۳. پی‌سازی بر روی ماسه:

همانطور که قبلاً گفته شد قراردادن پی بر روی سطح لایه‌ی ماسه‌ای به علت کم‌شدن ظرفیت باربری توصیه نمی‌شود. برای کنترل نشست پی در خاک‌های ماسه‌ای باید ماسه را متراکم کرد تا D_r آن کمتر از ٪۶۵ نگردد. رفتار ماسه‌های درشت‌دانه غالباً زهکشی‌شده است، به همین دلیل نشست در این خاک‌ها آنی (الاستیک) است. با این حال در خاک‌های ماسه‌ای "اشباع" بایستی به احتمال وقوع روانگرایی هنگام وقوع زلزله توجه داشت چون در هنگام روانگرایی ماسه‌ی اشباع رفتار زهکشی نشده از خود نشان می‌دهد.

۴. پی‌سازی بر روی سیلت و رس:

رس‌ها و سیلت‌ها از خیلی نرم و نرم (با تحکیم عادی) تا خیلی سفت و سخت (فوق تحکیم) یافت می‌شوند. مشکل پی‌سازی روی این نوع خاک‌ها بیشتر در حالت نرم و خیلی نرم بروز می‌کند.

سیلت‌ها معمولاً به تنهایی یافت نمی‌شوند و غالباً با ماسه یا رس همراهند. سیلت‌های فاقد رس و مواد نباتی رفتاری شبیه ماسه دارند ولی سیلت با حتی ٪۵ رس دارای چسبندگی می‌شود. وجود ٪۱۰ تا ٪۲۵ رس در سیلت رفتار سیلت را کاملاً مشابه رس می‌نماید. در پی‌سازی روی این نوع خاک‌ها باید در مورد ظرفیت باربری آنها به اطمینان کافی دست یافت، لذا اخذ نمونه‌ی دست نخورده و انجام آزمایشات مقاومت برشی در آزمایشگاه ضروری است. اگر خاک رس یا سیلت حساس است توصیه می‌شود از آزمایش برش پره‌ای (Vane) یا نفوذ مخروط (C.P.T) در محل استفاده نمود. همچنین جهت اطمینان در مورد میزان نشست درازمدت پی بر روی این خاک‌ها، انجام آزمایش تحکیم ضروری است.

۵. پی‌سازی بر روی خاک لاس (Loess):

لاس خاک ریزدانه یکنواختی است که ذرات آن معمولاً توسط باد حمل شده و در جایی جمع می‌شود (خاک‌های بادرفتی). ضخامت لایه‌های این خاک بین ۱ تا ۵۰ متر متغیر است ولی لایه‌های به ضخامت ۲ تا ۳ متر به وفور در طبیعت دیده می‌شود.

از نظر دانه‌بندی در این خاک ماسه و شن وجود ندارد. ٪۹۰ دانه‌های آن از الک شماره‌ی ۲۰۰ عبور می‌کند و بین صفر تا ٪۱۵ آن نیز رس و دارای قطر کمتر از ۰/۰۰۵ می‌باشد، بنابراین لاس (Loess) عمدتاً سیلت (لای) است.

مشکل اصلی این خاک آن است که ظرفیت باربری آن به شدت تابع میزان آب و درجه‌ی اشباع می‌باشد و مقاومت خاک لاس اشباع حدود $\frac{۱}{۵}$ خاک لاس خشک می‌باشد. نفوذپذیری این خاک کم است به نحوی که در اثر بارش باران حداکثر تا عمق ۱ تا ۱/۵ متری آن خیس می‌شود.

برای پی‌سازی روی این خاک باید آن را متراکم کرد تا وزن مخصوص خشک آن حداقل به $15.5\frac{kN}{m^3}$ برسد، راه‌حل دیگر مخلوط کردن این خاک با آهک، خاکستر و یا سیمان می‌باشد. در صورتی که نتوان خاک را به یکی از روش‌های فوق بهسازی کرد به کار بردن پی عمیق (شمع) برای جلوگیری از نشست زیاد سازه در این نوع خاک‌ها الزامی است.

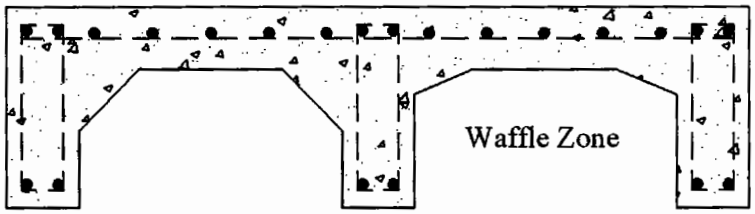
۶. پی‌سازی بر روی خاک‌های منبسط‌شونده (Expansive Clays):

خاک‌های منبسط‌شونده خاک‌هایی هستند که در اثر خیس‌شدن یا خشک‌شدن، تغییرات حجم قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. قسمت اعظم این نوع خاک‌ها از کانی‌های رسی تشکیل شده است. تعیین دقیق میزان افزایش حجم خاک مشکل است زیرا این مسأله به نوع کانی‌ها، ساختار دانه‌ها، فشار روبار خاک و درصد آب محل بستگی دارد.

برای پی‌سازی بر روی این نوع خاک‌ها راه حل‌های مختلفی وجود دارد:

أ) افزودن آهک یا سیمان یا ... به خاک جهت حذف یا کاهش میزان انبساط.

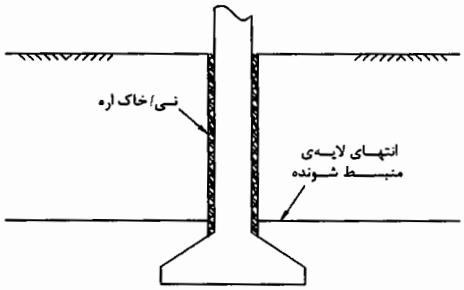
ب) کنترل جهت انبساط یا ایجاد پی‌های خاص مثل Waffle.



شکل (۵-۲): پی‌سازی از نوع Waffle (مقطع پی)

ج) کنترل آب: خاکبرداری تا عمقی که وزن خاک مانع آماس کردن (heave) می‌شود انجام شده و سپس در این عمق یک لایه‌ی پلیمری آب بند قرار داده و خاک کنده شده را دوباره به جای اول بر می‌گردانند. رطوبتی که در اثر بارش‌های جوی در خاک بالای لایه‌ی پلاستیک وارد می‌شود، ایجاد انبساط می‌کند که با وزن روسازی (Pavement) مهار می‌شود.

د) قرار دادن پی در عمقی پائین‌تر از عمق لایه‌ی خاک منبسط‌شونده و ایجاد فضای خالی بین سازه و سطح زمین، تا انبساط خاک مشکلی برای سازه ایجاد ننماید. گاهی برای کم کردن تنش کششی ناشی از انبساط خاک در شمع‌ها، در اطراف شمع نی، خاک اره و امثالهم می‌ریزند.



شکل (۵-۳): قرار دادن پی در ترازی پائین‌تر از لایه‌ی خاک منبسط‌شونده

ه) بارگذاری بر روی خاک به نحوی که با فشار ناشی از انبساط، توازن برقرار نماید. این روش بیشتر در ساختمان‌های چندین طبقه با پی گسترده امکان‌پذیر است.

مشخصات عمومی پی‌ها:

ابعاد پی‌ها همواره بر مبنای ظرفیت باربری خاک زیر پی تعیین شده و سپس نشست آن کنترل می‌شود. در صورتی که ابعاد پی جوابگوی ضابطه‌ی نشست نباشد، اصلاح خواهد شد.

برای ساخت پی همواره باید پی‌کنی نمود. به عبارت دیگر همواره باید پی را در ترازی پائین‌تر از سطح زمین قرار داد. عمق پی‌کنی بر مبنای معیارهای زیر تعیین می‌گردد.

- بیشتر از عمق یخزدگی خاک با توجه به اقلیم منطقه
- بیشتر از عمق لایه‌ی خاک نباتی یا آلی
- بیشتر از عمق لایه‌ی خاک دستی (Fill) یا عمق لایه‌ی نخاله‌ی ساختمانی
- بیشتر از عمق لایه‌ی خاک با تغییرات حجمی زیاد در اثر رطوبت

توصیه می‌شود که جز در شرایط استثنایی، همه‌ی پی‌های ساختمان در یک تراز قرار داده شوند. جنس بتن پی‌ها باید به نحوی طراحی شده باشد که از حمله‌ی سولفات‌ها یا سایر مواد مضر در خاک یا آب زیرزمینی در امان باشد تا به لحاظ مصالح، دوام لازم را داشته باشد.

۲- روش‌های اصلاح و بهبود خواص مکانیکی خاک (بهسازی خاک):

گاهی جنس زمین یا نوع خاک برای پی‌سازی مناسب نیست، در این موارد یکی از کارهای زیر قابل انجام است:

- تغییر محل سازه یا بنا
- تغییر سیستم پی
- تعویض خاک محل تا عمق مناسب
- بهسازی خاک محل

سه روش اول همواره امکان‌پذیر نیست یا با صرف هزینه‌های زیاد همراه است، ولی بهسازی خاک برای بالا بردن ظرفیت باربری خاک و کاهش میزان نشست می‌تواند گزینه‌ای مناسب و اقتصادی باشد. روش‌های معمول در بهسازی خاک ذیلاً توضیح داده می‌شود.

۱- تراکم (Compaction):

تراکم، ارزان‌ترین روش مقاوم کردن خاک است. در این روش ابتدا درصد آب بهینه‌ی خاک در آزمایشگاه تعیین می‌شود. سپس ضخامتی از خاک محل برداشته شده و بعد از آن مجدداً لایه لایه خاک ریخته شده و با درصد آب بهینه مخلوط و بعد کوبیده می‌شوند تا در اثر تراکم، وزن مخصوص خاک افزایش یافته و میزان تخلخل در آن کم شود. خاک‌های چسبنده با غلتک‌های پاچه‌بزی یا چرخ لاستیکی و خاک‌های دانه‌ای با غلتک‌های چرخ‌آهنی کوبیده می‌شوند. این نوع غلتک‌ها معمولاً همزمان با کوبیدن قادرند ارتعاش نیز در خاک ایجاد نمایند (غلتک ویبره). ضخامت معمول در پخش و کوبیدن لایه‌های خاک دانه‌ای و چسبنده ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. در ساختمان‌ها و محل‌های محدود مثل اطراف پی‌ها که امکان استفاده از غلتک‌های بزرگ وجود ندارد از غلتک‌های دستی (compactor) استفاده می‌کنند. ضخامت لایه‌های خاک در این حالت از ۷/۵ تا ۱۰ سانتیمتر تجاوز نمی‌نماید. پس از انجام عملیات تراکم، درصد تراکم را محاسبه و با استانداردهایی نظیر آشتو یا آشتوی اصلاح شده مقایسه می‌نمایند.

۲- پیش‌بارگذاری (Preloading):

یک روش نسبتاً ارزان است که بر روی خاک‌های ریزدانه‌ی نرم انجام می‌شود. در این روش قبل از احداث سازه‌ی اصلی روی سطح زمین بارگذاری انجام می‌شود. بارگذاری معمولاً به وسیله‌ی انباشت خاک و یا سنگ در سطح زمین انجام می‌شود.

با انجام پیش‌بارگذاری اولاً نشست‌هایی که قرار بود بعد از احداث سازه‌ی اصلی رخ دهد حذف می‌شود، ثانیاً در اثر افزایش دانسیته و کاهش فضای خالی در خاک، میزان مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. این روش بهسازی در مورد سیلت‌ها و رس‌های با تحکیم معمولی و خاک‌های آلی بیشترین تأثیر را دارد. در صورتی که ضخامت لایه‌ی ریزدانه زیاد باشد جهت کاهش زمان زهکش شدن آب باید هم‌زمان با پیش‌بارگذاری زهکش‌های افقی و قائم نیز در خاک تعبیه شوند.

لازم است قبل و بعد از «پیش بارگذاری»، مقاومت برشی خاک اندازه‌گیری شده و تأثیر روند بهسازی مورد ارزیابی قرار گیرد. بهتر است برای این کار از آزمایشات تک‌محوری و یا سه‌محوری بر روی نمونه‌های دست‌نخورده استفاده شود.

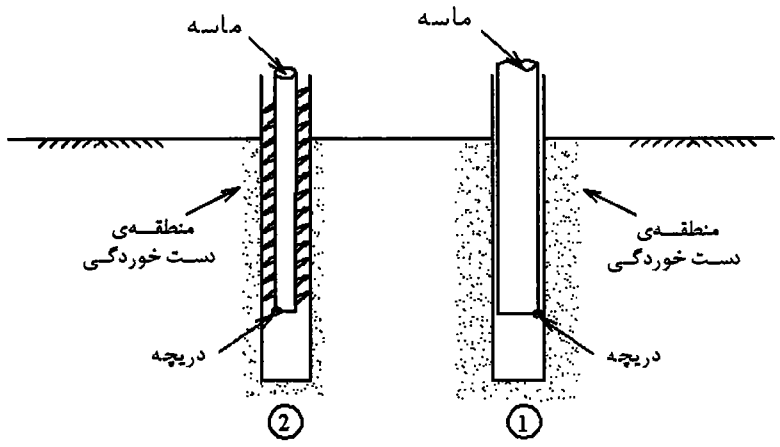
۳- زهکشی (Drainage):

زهکشی غیر از ترکیب با پیش‌بارگذاری، به عنوان یک روش مستقل نیز باعث افزایش ظرفیت باربری خاک می‌گردد. از آنجا که نفوذپذیری شن و ماسه بیشتر از رس می‌باشد برای کم کردن طول مسیر زهکشی در هنگام تحکیم لایه‌های ضخیم رسی از یک لایه افقی ماسه (لحاف ماسه‌ای) استفاده می‌شود. این لایه قبل از خاکریزی یا پیش‌بارگذاری روی زمین اجرا می‌شود.

مشابه زهکش‌های افقی می‌توان زهکش‌های قائم نیز به کمک ستون‌های شن و ماسه‌ای در یک شبکه منظم و طرح‌ریزی شده در داخل خاک ایجاد نمود. ستون‌های ماسه‌ای موجب زهکشی خاک به صورت افقی (شعاعی) می‌شوند و چون ضریب k در جهت افقی همواره بیشتر از جهت قائم است، لذا عمل خروج آب با سرعت زیادتری انجام خواهد شد. قطر ستون‌های ماسه‌ای بسته به روش اجرای آن‌ها بین ۱۵۰ تا ۷۵۰ میلیمتر متغیر است.

ایجاد ستون‌های ماسه‌ای به دو روش کلی صورت می‌گیرد:

- روش کوبیدن لوله (Mandrel) و ریختن ماسه در هنگام بیرون کشیدن لوله (همراه فشار هوا)
- روش اوگری (Auger) و ریختن ماسه در لوله وسط هنگام خارج کردن اوگر



شکل (۵-۴): دو روش در ساخت ستون‌های ماسه‌ای

۱- روش کوبیدن. ۲- روش حفاری با اوگر.

۴- روش‌های ایجاد ارتعاش در خاک:

گفته شد ساختن پی بر روی ماسهٔ سست به دلیل کم بودن ظرفیت باربری و همچنین نشست زیاد در حالت استاتیکی (تحت اثر بار سازه) و در حالت دینامیکی (وقوع زلزله) توصیه نمی‌شود. به علاوه در هنگام زلزله خصوصاً هنگامی که سطح آب زیرزمینی بالاست پدیدهٔ روانگرایی (liquefaction) در ماسه‌های سست ایجاد می‌شود. لذا معمولاً آیین نامه‌ها توصیه می‌کنند که دانسیته نسبی D_r خاک‌های دانه‌ای برای پی‌سازی از حد معینی کمتر نباشد.

جدول (۵-۱): حداقل دانسیته‌ی نسبی خاک در هنگام زلزله

0.1g	54%
0.15g	73%
0.2g	85%
0.25g	92%

ایجاد ارتعاش یکی از روش‌های تراکم خاک‌های دانه‌ای و افزایش D_r می‌باشد. منظور از خاک‌های دانه‌ای شن، ماسه یا مخلوط آن‌ها است که میزان سیلت در آن از ۲۰٪ و یا میزان رس در آن از ۱۰٪ تجاوز ننماید. معمولاً عمل ارتعاش با کوبیدن و بیرون کشیدن یک شمع با چکش ضربه‌ای یا چکش ویبره انجام می‌شود. این کار در تمام عمق لایه‌ی ماسه‌ای انجام می‌شود.

روش دیگر ایجاد ارتعاش، Vibroflotation نام دارد. در این روش یک استوانه‌ی فلزی که به وسیله‌ی یک وزنه خارج از محور در داخل خود می‌تواند لرزش ایجاد کند در محل موردنظر روی زمین قرار گرفته، از محل تعبیه شده در نوک استوانه‌ی فلزی، آب با فشار زیاد خارج می‌شود به نحوی که آب تزریق شده به سرعت از داخل خاک قابل زهکشی و تخلیه نبوده لذا یک حالت سیلان موضعی در خاک ایجاد شده که باعث می‌شود استوانه تحت اثر وزن خود و حرکات ارتعاشی تا عمق دلخواه در زمین فرو رود و موجب تراکم خاک گردد. از Vibroflotation می‌توان در ایجاد ستون‌های ماسه‌ای یا شنی در خاک‌های ماسه‌ای سست یا خاک‌های رسی نرم نیز استفاده نمود. ایجاد ستون‌های ماسه‌ای در یک شبکه منظم ۰/۵ تا یک متری و در سطحی ۲ تا ۳ متر بزرگتر از پلان شالوده (خصوصاً شالوده‌های گسترده و شالوده‌ی مخازن ذخیره مایعات) می‌تواند مقاومت برشی خاک را افزایش و نشست پی را کاهش دهد.

۵- پایدار کردن خاک به کمک مواد شیمیایی (chemical stabilization):

موادی که معمولاً جهت پایدار کردن خاک بکار می‌روند عبارتند از آهک، سیمان، خاکستر (کوره‌های بلند) یا مخلوطی از آنها. البته از برخی مواد شیمیایی دیگر نیز استفاده می‌شود.

پایدار کردن خاک با مخلوط کردن آن با مواد شیمیایی در راهسازی مورد استفاده فراوان دارد ولی در ساختمان‌سازی نیز می‌توان از آن استفاده کرد. آهک موجب کم‌شدن پلاستیسیتهٔ رس‌ها شده و تغییرات حجم در آن‌ها را کاهش می‌دهد. سیمان یا مخلوط سیمان با خاکستر موجب افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. درصد کاربرد این مواد را با توجه به خصوصیات مکانیکی موردنیاز و نوع خاک موجود باید در آزمایشگاه تعیین نمود، ولی در محدوده‌ی ۵ تا ۱۰٪ متداول‌تر است. این نوع بهسازی خاک را بهسازی کم‌عمق (Shallow treatment) می‌نامند.

۶- پائین‌بردن سطح آب زیرزمینی:

پائین‌بردن سطح آب زیرزمینی باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود. گاهی پائین‌بردن سطح آب زیرزمینی برای ایجاد شرایط مناسب کار در کف گودبرداری‌ها لازم است. البته این روش را همیشه نمی‌توان بکار بست و استفاده از آن نیز در بسیاری مواقع جنبه موقتی دارد.

با پائین‌بردن سطح آب زیرزمینی، اثر نیروی شناوری آب از بین رفته، وزن مخصوص مؤثر خاک افزایش یافته و تنش مؤثر در خاک بیشتر می‌شود. باید توجه داشت با افزایش تنش مؤثر، نشست خاک نیز محتمل خواهد بود لذا اثر پائین‌بردن سطح آب زیرزمینی بر ساختمان‌های اطراف و احتمال نشست آنها مسأله‌ی مهمی است که باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

۷- استفاده از ژئوسنتتیک‌ها(Geosynthetics):

ژئوسنتتیک‌ها از موادی پلیمری نظیر پلی‌استر، نایلون، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن ساخته می‌شوند. این مواد می‌توانند مدت زیادی در داخل خاک دوام بیاورند.

ژئوسنتتیک‌ها موارد استفاده گوناگون دارند: آب‌بندکردن قسمتی از خاک، جلوگیری و یا کنترل فرسایش خاک، جداکردن مواد با دانه‌بندی ریز و درشت از یکدیگر، پوشش لایه‌های زهکش افقی و قائم، مسلح‌کردن خاک و...

معروف‌ترین عضو خانواده‌ی ژئوسنتتیک‌ها، ژئوتکستایل نام دارد. ژئوتکستایل به دو صورت بافته (Woven) و نبافته (Unwoven) ساخته می‌شوند و در نوارهایی به عرض ۰/۵ تا ۳ متر بکار می‌روند.

از ژئوتکستایل در افزایش ظرفیت باربری خاک در زیر پی‌های سطحی نیز می‌توان استفاد کرد. از ژئوگریدها نیز عمدتاً در مسلح کردن خاک استفاده می‌شود. کاربرد ژئوممبرین‌ها جلوگیری از نفوذ آب و سایر سیالات است.

۸- تزریق (Grouting):

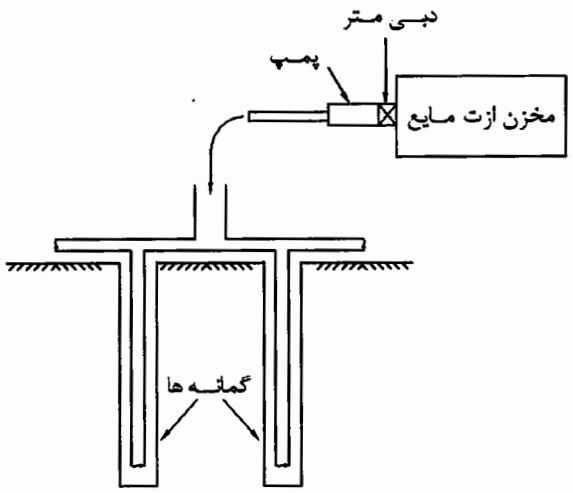
یکی از گران‌ترین روش‌های اصلاح پی است که معمولاً برای بهسازی در اعماق زیاد به کار می‌رود. در این روش یک عامل شیمیایی با فشار در داخل خلل و فرج خاک تزریق می‌شود به طوری که ماده‌ی تزریق شده، دانه‌های خاک را به هم چسبانده و یک توده‌ی توپر و مقاوم تشکیل دهد. معمول‌ترین ماده‌ی شیمیایی جهت تزریق، دوغاب سیمان می‌باشد. از تزریق هم برای بهبود خواص مهندسی خاک، (نظیر افزایش وزن مخصوص و مقاومت باربری خاک) و هم جهت آب‌بند کردن خاک در پی سدها مورد استفاده می‌شود.

عمل تزریق در زمین‌هایی امکان‌پذیر است که ضریب نفوذپذیری آن‌ها بیشتر از 10^{-5} m/Sec باشد. در خاک‌های ناتراوا تزریق به فشارهای خیلی زیادی نیاز دارد که غالباً اقتصادی نبوده و در برخی حالات به لحاظ اجرایی امکان‌ناپذیر است.

۹- انجماد (Freezing):

انجماد، یکی دیگر از روش‌های تثبیت خاک است. این روش عموماً یک تکنیک موقت است. کاربرد این روش در زمین‌های اشباع می‌باشد و هدف از آن ایجاد یخزدگی خاک در منطقه‌ی مشخصی می‌باشد. برای ایجاد انجماد در زمین، ابتدا گمانه‌هایی با فواصل مشخص (حدود یک تا دو متر) و تا عمق موردنظر جهت بهسازی حفر می‌شود. اعماق متداول برای انجماد بین ۱۰ تا ۲۰ متر است. هر گمانه قادر است زمین اطراف خود را به قطر حدود ۳ متر منجمد نماید. در گمانه‌های حفر شده لوله‌هایی مسی قرار می‌دهند و سرلوله‌ها را در سطح زمین به هم متصل می‌نمایند. ازت مایع با تانکر به محل پروژه حمل می‌شود. دمای ازت مایع در مخزن $196^{\circ}C$- بوده و ۵ atm فشار دارد. ازت داخل لوله‌ها جریان پیدا کرده، دمای محیط را جذب کرده و درجه حرارت خاک را به شدت پائین می‌آورد

به نحوی که خاک در یک دورهٔ زمانی خاص (چند ساعت تا چندین ماه) به صورت یخزده در می‌آید. با گذشت زمان ازت به تدریج گرم شده و تبخیر می‌شود.



شکل (۵-۵): تکنیک انجماد

۱۰- تراکم دینامیکی (Dynamic Compaction):

این روش در سال ۱۹۶۵ توسط Menard ابداع شد. در این روش زمین را در یک شبکه مشخص در پلان با رهاکردن وزنه‌ی سنگینی می‌کوبند. وزن کوبه‌ها از ۵ تا ۵۰ تن متغیر است. کوبه‌ها معمولاً مکعب یا استوانه‌ای و از جنس بتن است. گاهی نیز کوبه از جداری فلزی تشکیل می‌شود که داخل آن را با مصالح دانه‌ای پر می‌کنند. ارتفاع سقوط متداول کوبه‌ها در تراکم دینامیکی بین ۱۰ تا ۱۵ متر است ولی تا ۴۰ متر نیز می‌توان وزنه‌ها را بالا برد و از آن ارتفاع رها نمود. انرژی‌ای که به این‌صورت به خاک منتقل می‌شود می‌تواند ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ تن‌متر باشد. عمق نفوذ امواج فشاری حداکثر تا ۱۰ الی ۱۵ متری خاک می‌رسد.

در صورتی که خاک اشباع باشد باید همزمان با انجام عمل تراکم، سیستم زهکشی قائم نیز ایجاد شود، چون در غیر این‌صورت بیشتر انرژی ضربه به آب حفره‌ای منتقل می‌شود و خاک متراکم نمی‌گردد.

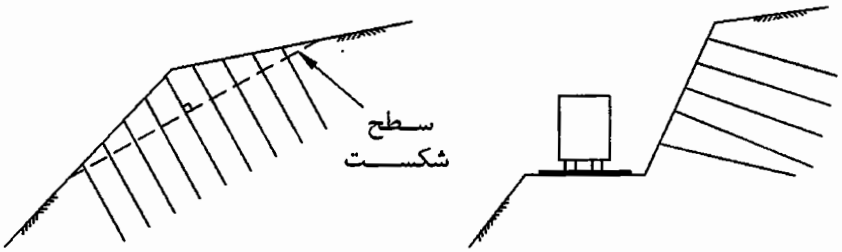
۱۱- شمع‌های خرده سنگی کوبشی (Stone Columns):

این روش جهت پی‌سازی در زمین‌های نرم که دارای ظرفیت باربری کم و نشست‌پذیری زیاد هستند بکار می‌رود. شمع‌های خرده سنگی روش ارزانی است که افزایش نسبتاً خوبی در ظرفیت باربری ایجاد کرده و کاهش نشست‌پذیری قابل‌توجهی در خاک ایجاد می‌نماید و همزمان با آن عمل زهکشی در خاک را تشدید کرده و مقاومت زمین را در مقابل پدیده روانگونگی افزایش می‌دهد. برای ایجاد این شمع‌ها یا چاه‌هایی با دست حفر می‌شود و یا با یکی از روش‌های گفته شده قبلی نظیر Auger و... حفره‌ای در زمین ایجاد شده سپس داخل آن در چند لایه با شن یا سنگریزه پر شده و هر لایه با وزنه‌ای کوبیده می‌شود. معمولاً از یک تا چهار شمع خرده سنگی کوبشی در زیر هر پی سطحی استفاده می‌شود.

۱۲- میخ‌کوبی خاک (Soil Nailing):

میخ‌کوبی خاک، نوعی مسلح کردن زمین است که در پایدارسازی زمین‌های ناپایدار مثل شیب‌ها و ترانشه‌ها و گودهای حفاری شده بکار می‌رود. در میخکوبی خاک، سطح شیب یا گود، بتن‌پاشی (shotcrete) شده و میلگردها یا پروفیل‌های فلزی سبک، با دستگاه مستقیماً در خاک فرو برده می‌شود. در زمین‌های سفت ابتدا سوراخ در راستای

موردنظر در زمین حفاری می‌شود و پس از قرار دادن میلگرد در سوراخ، اطراف میلگرد با دوغاب سیمان پر می‌شود. در میخکوبی خاک برخلاف سیستم‌های مهاری (anchor) که در لایه‌های سنگی خرد شده استفاده می‌شود میلگرد تنیده نمی‌شود.



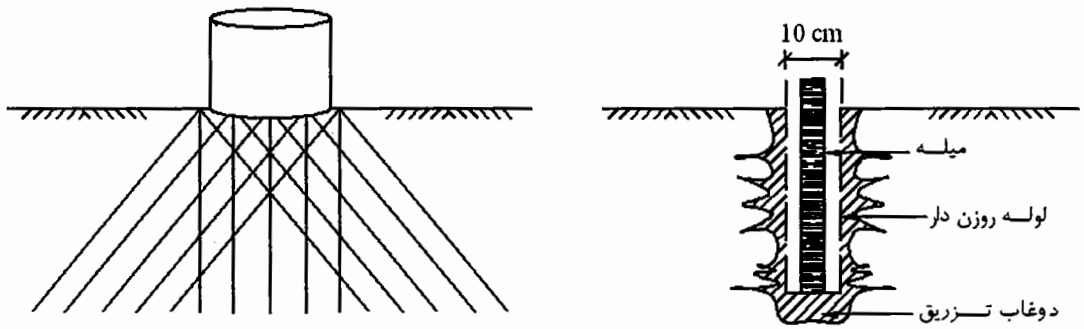
شکل (۵-۶): مسلح کردن شیب‌های خاکی و سنگی با میل‌مهارهای فلزی

میخ‌کوبی خاک در سازه‌های حائل (نگهبان) عموماً به صورت افقی اجرا می‌شوند تا بتوانند در کشش کار کنند، اما وقتی از این روش در پایدارسازی شیروانی‌های خاکریز یا دامنه‌ها استفاده می‌شود میله‌ها معمولاً قائم بر سطح شکست نصب می‌گردند. در چنین حالتی نیروهای عمده‌ای که توسط میله‌ها تحمل می‌شود از نوع برشی و خمشی است.

۱۳- ریزشمع‌ها (Mini Piles):

استفاده از شمع‌های کوچک در یک شبکه‌ی منظم طرح ریزی‌شده به فواصل نسبتاً کم را Mini-Pile یا Micro-Pile می‌نامند. روش‌های اجرای ریزشمع‌ها متعدد است که همه‌ی آنها به قراردادن میله یا لوله‌ای به قطر چند سانتیمتر که به وسیله‌ی دوغاب تزریق در زمین گیردار می‌شود، منتهی می‌گردد.

قطر نهایی ریزشمع‌ها حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر و طول معمول آن‌ها ۳ تا ۱۰ متر است. علت اصلی کاربرد ریزشمع‌ها بهبود ظرفیت باربری خاک‌ها در دو جهت افقی یا عمودی است. اندرکنش خاک و ریزشمع‌ها اساساً اصطکاکی است، زیرا مقاومت نوک شمع به علت قطر کوچک آن قابل صرف‌نظرکردن می‌باشد.



شکل (۵-۷): ریزشمع‌ها

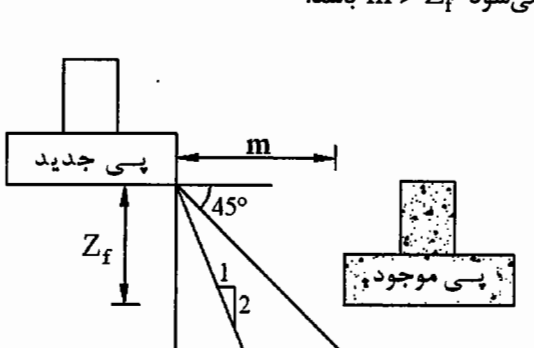
۱۴- الکترواسمز (Electro-Osmosis):

ایجاد میدان الکتریکی در خاک به منظور تحکیم سریع‌تر خاک را الکترواسمز می‌گویند. این تکنیک اساساً برای سرعت بخشیدن به تحکیم لایه‌های رسی با نفوذپذیری کمتر از 10^{-6} cm/s بکار می‌رود. نخستین بار از این روش در جریان ساختن راه‌آهن زیرزمینی شهر برلین استفاده شد. تحکیم خاک باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک می‌گردد.

نکته ۱- ساخت پی در مجاورت پی همسایه:

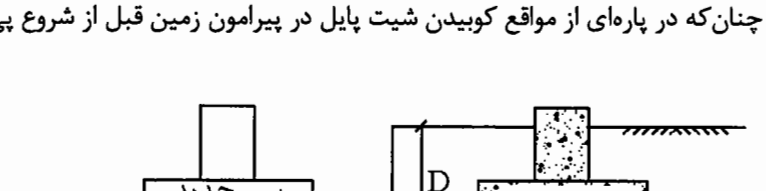
در ساخت پی در مجاورت پی همسایه یکی از دو حالت زیر ممکن است رخ دهد:

۱- اگر پی جدید بالاتر از پی موجود همسایه قرار می‌گیرد برای جلوگیری از افزایش تنش در خاک زیر پی همسایه و نشست احتمالی آن توصیه می‌شود $m > Z_f$ باشد.

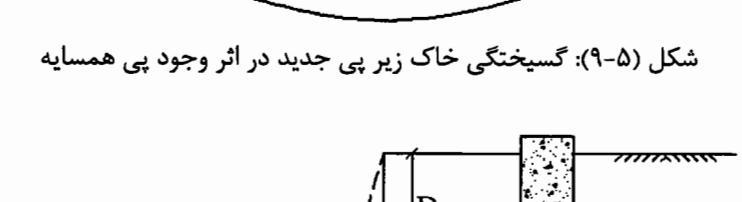


شکل (۵-۸): موقعیت پی جدید نسبت به پی همسایه

۲- اگر پی جدید هم‌سطح یا پائین‌تر از پی موجود همسایه است، احتمال گسیختگی خاک زیر پی (به علت کاهش $\bar{q}$) و یا تورم خاک (bulging) وجود دارد. در چنین حالتی باید به جنس خاک توجه داشت اگر خاک چسبنده باشد احتمال گسیختگی کمتر است ولی اگر خاک دانه‌ای باشد، باید احتمال مسأله‌ی گسیختگی خاک در زیر پی را دقیقاً بررسی کرد چنان‌که در پاره‌ای از مواقع کوبیدن شیت پایل در پیرامون زمین قبل از شروع پی کنی لازم است.



شکل (۵-۹): گسیختگی خاک زیر پی جدید در اثر وجود پی همسایه



شکل (۵-۱۰): تورم خاک در اثر وجود پی همسایه

نکته ۲- فشار خالص و ناخالص (Net & Gross Pressure):

هنگامی‌که مشاور ژئوتکنیک ظرفیت باربری مجاز خاک را تعیین می‌کند و یک رابطه یا نمودار جهت تعیین q_a برحسب B ارائه می‌کند، مهندس سازه با این سؤال روبرو می‌شود که آیا این تنش مجاز، یک تنش خالص است یا ناخالص؟ یعنی فشاری است که علاوه بر فشار روبار موجود می‌توان بر خاک زیر پی وارد کرد؟ یا اینکه q_a مشخص شده یک فشار ناخالص است یعنی کل فشاری است که خاک زیر پی توان تحمل آن را دارد؟

در جواب این سؤال باید گفت اگر q_a براساس معادلات تعیین ظرفیت باربری خاک (روش ترزاقی، میرهوف، هانسن یا...) به دست آمده است، یک فشار ناخالص است ولی اگر q_a براساس نشست معینی تعیین شده است یک فشار خالص می‌باشد.

مراجع برای مطالعه بیشتر

[1] Foundation Analysis and Design, Bowles J.E., 1996, McGraw-Hill.
[2] Foundation Engineering, Peck, Hanson, Thornburn, 1974, 2nd Edition, John Wiley
[3] Geotechnical Engineering: Analysis and Evaluation, Hunt R.E., 1986, McGraw-Hill.
[4] Foundation Design and Construction, Tomlinson, Boorman R., 2001, Longman.
[5] Foundation Engineering, Leonards G.A., 1962, McGraw-Hill.