فصل دوم

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

برای ارائه یک طرح پی مناسب به لحاظ فنی و اقتصادی، بررسی شرایط تحت الارضی و اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های زمین ضروری است. هزینهٔ عملیات ژئوتکنیک صحرایی را بین ۰/۵ تا ۱ درصد کل هزینه‌های اجرایی پروژه برآورد می‌کنند. امروزه پروژه‌های بزرگ و نسبتاً بزرگ عمرانی بدون انجام عملیات ژئوتکنیک صحرایی به مرحلهٔ اجرا درنمی‌آید.

برنامه‌ریزی برای یک عملیات ژئوتکنیک صحرایی:

"**برنامه ریزی**" برای یک عملیات ژئوتکنیک صحرایی تعدادی یا همهٔ مراحل زیر را می‌تواند در برداشته باشد:

۱. جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های موجود
۲. شناسایی عمومی محل موردنظر (Reconnaissance)
۳. عملیات صحرایی مقدماتی (Preliminary Site Investigation)
۴. عملیات صحرایی اصلی (Site investigation)

برای آشنایی با این مراحل توضیحات مختصری داده می‌شود.

۱) جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های موجود:

اطلاعات مورد نیاز عبارتند از نقشه‌های بنای موردنظر (ابعاد بنا، فاصله ستون‌ها، نوع سازه، مسائل خاص سازه‌ای یا معماری و...)، آئین‌نامه‌ها، ضوابط ملی و منطقه‌ای در طراحی پی‌ها و همچنین گزارش‌های آزمایشات صحرایی انجام شده در حوالی سایت مورد نظر.

۲) شناسایی عمومی محل موردنظر:

این مرحله شامل بررسی نقشه‌های توپوگرافی، زمین شناسی، ژئومورفولوژی، آب‌های زیرزمینی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و سایر مدارک فنی موجود می‌باشد. همچنین بازدید از محل در این مرحله ضروری است. هنگام بازدید از محل بایستی به نشست یا ترک‌خوردگی احتمالی ساختمان‌های مجاور، ترانشه‌ها یا گودال‌های موجود در

منطقه که لایه‌بندی خاک را نشان می‌دهند، رخنمون‌های سنگی، چگونگی فرسایش خاک و وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی توجه نمود و در این موارد با کارشناسان و افراد محلی گفتگو کرد.

۳) عملیات صحرایی مقدماتی:

در این مرحله چند چاه گمانه (Borehole) یا گودال دستی (test pit) حفاری می‌شود تا ایده‌ای کلی از وضعیت خاک بدست دهد. طبیعی است در صورتی که با خاک‌های گوناگون یا مسأله‌دار مواجه شویم بایستی در برنامه‌ریزی برای عملیات صحرایی اصلی، دقت بیشتری به خرج داده شود. حداقل یکی از گمانه‌ها یا گودال‌ها بایستی تا آنجا حفر شود که به سنگ بستر یا لایهٔ خاک باربر برسد. این مقدار از عملیات صحرایی ممکن است برای پروژه‌های کوچک کافی باشد. گاهی آزمایش‌های ژئوفیزیک نظیر Geo-seismic و Geo-electric در این مرحله انجام می‌شود. این نوع آزمایش‌ها معمولاً جهت ارزیابی (کیفی) لایه‌های تحت‌الارضی در سایت‌های بزرگ ضرورت می‌یابد.

در فاز شناخت (feasibility study) معمولاً عملیات صحرایی انجام نمی‌شود و یا به عملیات صحرایی مقدماتی بسنده می‌گردد.

۴) عملیات صحرایی اصلی:

بر اساس کلیهٔ اطلاعات بدست آمده تا این مرحله، عملیات صحرایی اصلی برنامه‌ریزی می‌شود. محل گمانه‌ها، عمق گمانه‌ها، تعداد آن‌ها و الگوی قرارگیری آن‌ها با توجه به اهمیت پروژه و وضعیت خاک در این مرحله تعیین می‌گردد. همچنین تعداد نمونه‌های دست‌خورده یا دست‌نخورده‌ای که لازم است در حین حفاری گمانه‌ها از لایه‌های مختلف گرفته شود مشخص می‌گردد. آزمایشات صحرایی (In situ test) موردنیاز نیز بایستی مشخص شده و طی دستور کاری به پیمانکار (مشاور) ژئوتکنیک ابلاغ گردد. برنامه‌ریزی برای عملیات صحرایی اصلی بایستی به نحوی صورت گیرد که کلیهٔ ابهامات و سؤالات موجود در مورد وضعیت خاک قابل پاسخگویی باشد، همچنین کلیهٔ پارامترهای لازم جهت طراحی پی‌ها، شمع‌ها، دیوارها، شیب‌ها و غیره براساس نتایج آزمایش‌های درجا و آزمون‌های آزمایشگاهی قابل تعیین باشند.

مشاور عملیات ژئوتکنیک پس از انجام عملیات صحرایی و نمونه‌برداری و آزمایش بر روی نمونه‌های اخذ شده و تحلیل نتایج به دست آمده یک گزارش ژئوتکنیک تهیه خواهد کرد. یک گزارش ژئوتکنیک معمولی باید دارای اطلاعات زیر باشد:

- تعیین نوع و ضخامت لایه‌های تحت‌الارضی در محدوده اراضی مذکور.
- برآورد خصوصیات فیزیکی (دانه‌بندی، درصد رطوبت، PL، LL، e و γ در حالت‌های مختلف) و مکانیکی خاک (E، υ، φ، C، S_U و C_C).
- برآورد ظرفیت باربری مجاز و نشست شالوده‌ها با توجه به نوع نهشته‌های محلی
- برآورد ضرایب فشارهای جانبی خاک
- تعیین نفوذپذیری خاک
- تعیین نوع سیمان مصرفی
- ارائه ضرایب زلزله و برآورد پدیده روانگرایی
- برآورد شیب مجاز خاک‌برداری
- ارائه توصیه‌ها و پیشنهادات کلی مرتبط با عملیات اجرایی

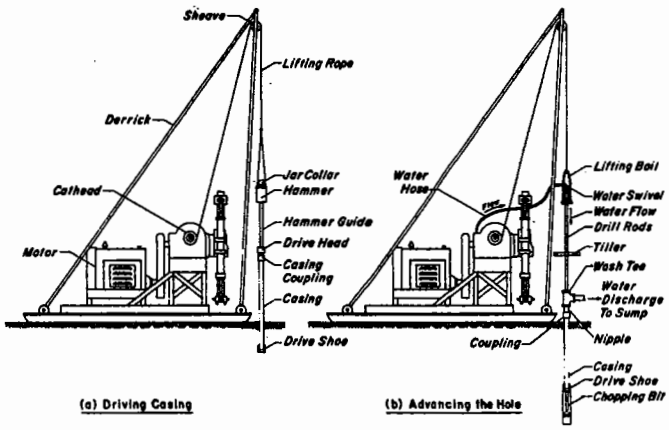
روش‌های حفاری خاک:

۱- گودال‌ها یا چاهک‌های دستی (Test pits):

معمولاً با دست و به وسیلهٔ کلنگ کنده می‌شوند. عمق این نوع گودال‌ها معمولاً حدود ۸ تا ۱۰ متر است.

۲- حفاری شستشویی (Wash Boring)

این روش بسیار معمول است و براساس فهرست بها ارزان‌ترین روش حفاری محسوب می‌شود. در این روش، آب به داخل لوله حفاری پمپ شده و از سوراخ‌های سر لوله با سرعت زیاد خارج شده و خاک را می‌شوید و باعث می‌شود که لولهٔ حفاری بتواند پیشروی نماید. خاک شسته شده به همراه آب از فضای بین لوله‌ی جداره (casing) و لوله حفاری خارج می‌شود که می‌توان آن را در محلی تخلیه کرد و پس از ته‌نشینی آب آن را مجدداً استفاده نمود.

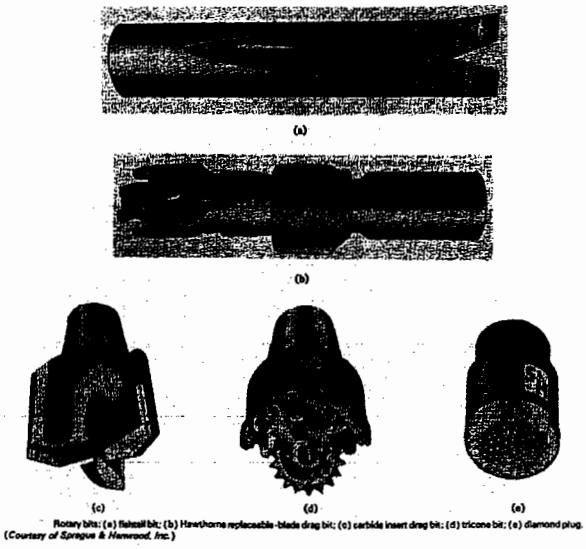


شکل (۲-۱): شکل شماتیکی از حفاری شستشویی

۳- حفاری دورانی (Rotary Drilling):

در این روش چرخش سرمته در انتهای لوله‌ی حفاری همراه با فشار از بالا موجب پیشروی می‌گردد. در غالب سنگ‌ها (غیر از سنگ‌های نرم یا سنگ‌های شدیداً هوازده (heavily fissured)) این روش تنها روش حفاری محسوب می‌گردد. سرمته‌های مختلفی جهت حفاری دورانی وجود دارد که سرمته اوگری (Auger)، سرمته آسیابی (grinding) برای حفاری در خاک یا سنگ و سرمته مغزه‌گیری (coring) برای نمونه برداری از سنگ، بتن و یا آسفالت، از آن جمله هستند.

گاهی جهت به کار بردن حفاری دورانی در خاک نیاز است که از آب یا گل حفاری (مخلوط آب + بنتونیت) جهت جلوگیری از ریزش خاک اطراف گمانه استفاده گردد.



شکل (۲-۲): سرمته‌های مختلف

۴- حفاری ضربه‌ای (Percussion):

در این روش سرمته را متناوباً بالا آورده و به انتهای گمانه رها می‌کنند یعنی به انتهای گمانه ضربه می‌زنند. از آب نیز جهت بالا آوردن خاک‌های حفاری شده (مانند روش شستشویی ولی نه با فشار یا جت آب) استفاده می‌گردد.

نمونه‌گیری از خاک:

مهمترین خواص مهندسی خاک در طراحی پی‌ها مقاومت (strength)، قابلیت فشردگی یا تغییر حجم (compressibility) و نفوذپذیری (permeability) هستند. این پارامترها را می‌توان از آزمایشات صحرایی درجا (In-Situ) تخمین زد، ولی مقادیر دقیق‌تر آن‌ها براساس آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین می‌گردد. برای انجام این آزمون‌ها نیاز به نمونه‌گیری از لایه‌های مختلف خاک می‌باشد. در این نمونه‌گیری‌ها باید سعی شود که حتی‌المقدور وضعیت اصلی خاک حفظ شود و نمونه‌ی دست نخورده (Undisturbed) تهیه شود.

لازم به ذکر است که تهیه نمونه دست نخورده کامل به دلایل زیر ممکن نیست:

۱- وارد شدن لوله نمونه‌گیر در داخل خاک باعث مقدار نامعلومی دست‌خوردگی می‌شود. هر چه ضخامت و حجم لوله نمونه‌گیر کمتر باشد میزان دست‌خوردگی کمتر خواهد بود.

۲- اصطکاک خاک با جداره‌ی لوله‌ی نمونه‌گیر موجب مقداری دست‌خوردگی می‌شود.

۳- باربرداری از روی نمونه به علت حذف فشارهای محصورکننده‌ی درجا(In-Situ Confining Pressures) موجب مقدار نامعلومی افزایش حجم در خاک (Expansion) می‌گردد.

۴- اگر نمونهٔ خاک از زیر تراز ایستابی گرفته می‌شود مقداری تغییر در درصد آب خاک داده می‌شود.

۵- حذف فشار آب هیدرواستاتیکی ممکن است باعث ایجاد حباب‌های هوا در داخل نمونه گردد.

۶- نحوه نمونه‌گیری، انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و نحوه آماده‌سازی نمونه برای آزمایش موردنظر و عوامل انسانی دخیل در آن‌ها، در کیفیت نمونه تأثیر دارد.

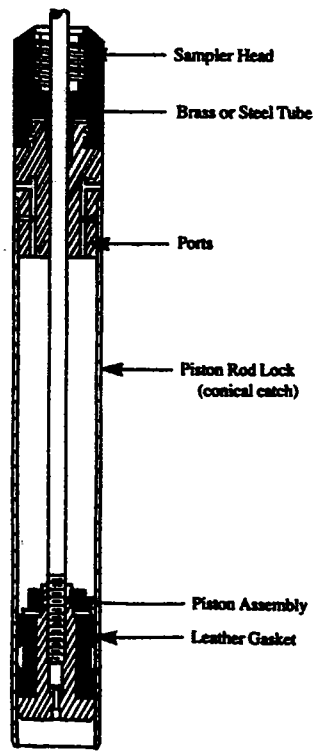
با عنایت به مسائل فوق در بحث مربوط به نمونه‌گیری منظور از نمونه دست‌نخورده آن است که حداکثر تمهیدات و احتیاط‌های لازم برای به حداقل رساندن موارد فوق‌الذکر در تهیه نمونه به عمل آمده باشد.

نمونه‌گیری دست‌نخورده از خاک‌های رسی به علت طبیعت چسبنده و یکپارچه آن‌ها آسانتر است. نمونه‌گیری دست‌نخورده از ماسه‌ها به علت ساختار دانه‌ای و ناپیوسته آن‌ها مشکل است. گاهی تهیه‌ی نمونه‌های دست‌نخورده از ماسه‌ی شل با کیفیت قابل قبول با استفاده از نمونه‌گیر پیستونی جدار نازک (Thin-walled piston sampler) و با ایجاد مقداری مکش در داخل نمونه‌گیر، قابل تهیه است. تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌نخورده از خاک‌های شنی خیلی مشکل می‌باشد. گاهی برای تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک‌های ماسه‌ای و شنی، از تکنیک یخزدگی خاک (Soil Freezing) که تکنیک پرهزینه‌ای است استفاده می‌گردد. نمونه‌های دست‌نخورده از ماسه جهت به‌دست‌آوردن وزن مخصوص، تخلخل و چگالی نسبی در محل تهیه می‌شوند که در ارزیابی مسائلی نظیر روانگونگی از اهمیت خاصی برخوردار هستند.

از آنجا که نمونه‌گیری دست‌نخورده در مورد خاک‌های غیرچسبنده مشکل است، تکیه در این نوع خاک‌ها بر روی پارامترهایی است که از آزمایشات صحرایی درجا حاصل می‌شود.

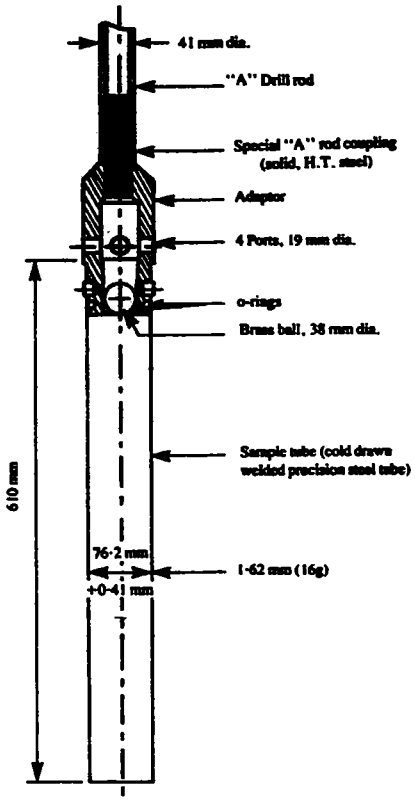
دو نوع نمونه‌گیر معمول در شکل‌های (۲-۳) و (۲-۴) نشان داده شده‌اند.

نمونه‌گیرهای فوق در طول به دو نیم می‌شوند و نمونه‌ی خاک از آن‌ها خارج می‌شود. حجم خاک داخل این نمونه‌گیرها به اندازه‌ای هست که مواد لازم جهت آزمایشات حدود اتربرگ و درصد رطوبت و آزمایش فشار تک‌محوری و سه‌محوری و تحکیم را فراهم نماید. نمونه‌های حاصل از نمونه‌گیر جدار ضخیم به‌خاطر ضخامت زیاد جداره‌ی استوانه‌ی نمونه‌گیر معمولاً دست‌خورده محسوب می‌شوند، ولی نمونه‌گیرهای جداره نازک (U4 یا Shelby) برای تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌نخورده بکار می‌روند.



Piston Sampler (SOURCE: Courtesy Sprague and Henwood, Inc.)

شکل (۲-۴): نمونه‌گیر جداره ضخیم



Thin Walled Samplers—Shelby Tube

شکل (۲-۳): نمونه‌گیر جدار نازک شلبی

معیار دست خوردگی در نمونه‌گیرها براساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$A_r = \frac{D_0^2 - D_i^2}{D_i^2} \times 100$$

که در این رابطه:

D_0: قطر خارجی استوانه‌ی نمونه‌گیر

D_i: قطر داخلی لبه‌ی نمونه‌گیر

می باشد.

نمونه‌گیرهایی که خوب طراحی شده باشند بایستی دارای A_r کمتر از ۱۰ تا ۱۵ درصد باشند.

معیار دیگری که جهت تخمین دست‌خوردگی به کار می‌رود L_r (Recovery ratio) نامیده می‌شود:

$$L_r = \frac{\text{طول واقعی نمونه‌ی خارج شده از نمونه‌گیر (Actual Length of Recovered Sample)}}{\text{طول تئوریک نمونه (Theoretical Length of Sample)}}$$

در خصوص معیار فوق، $L_r=1$ یعنی نمونه در اثر اصطکاک با جداره‌ی نمونه‌گیر اصلاً فشرده نشده است. هر چه L_r به واحد نزدیک‌تر باشد کیفیت نمونه‌ی به دست آمده بهتر است.

نمونه‌گیر Denisson برای نمونه‌گیری دست نخورده به کار می‌رود.

نمونه‌گیر Core barrel (یک جداره و دوجداره) برای نمونه‌گیری از سنگ استفاده می‌شود.

آزمایشات صحرایی:

آزمایش‌های صحرایی معمول عبارتند از:

۱. آزمایش نفوذ استاندارد (Standard Penetration Test (SPT))
۲. آزمایش برش پره‌ای (Vane Shear Test)
۳. آزمایش بارگذاری صفحه (Plate Load Test)
۴. آزمایش نفوذ مخروط (Cone Penetration Test (CPT))
۵. آزمایش لوژن در سنگ‌ها و آزمایش لوفران در آبرفت‌ها جهت تعیین نفوذپذیری خاک
۶. آزمایش پرسیومتر (Pressure meter)
۷. آزمایش دیلاتومتر (Dilatometer)

اکنون مختصری در مورد برخی از این آزمایش‌ها توضیح می‌دهیم:

۱) آزمایش نفوذ استاندارد (SPT):

این آزمایش معمولی‌ترین و کم‌هزینه‌ترین آزمایش درجا محسوب می‌شود. روش کار در این آزمایش بدین صورت است که نمونه‌گیر Split-spoon استاندارد را در دو مرحله ۱۵ و ۳۰ سانتیمتر در داخل خاک فرو می‌برند. برای این کار از وزنه‌ای ۶۳/۵ کیلویی که از ارتفاع ۷۶ سانتیمتری سقوط می‌کند، استفاده می‌نمایند. تعداد ضربه‌های لازم برای فروبردن نمونه‌گیر در مرحله دوم (۳۰ سانتیمتری) را N یاعدد SPT می‌نامند. تعداد ضربه‌های لازم برای فروبردن نمونه‌گیر در ۱۵ سانتیمتر اول ثبت می‌شود ولی به علت دست‌خوردگی به حساب آورده نمی‌شود.

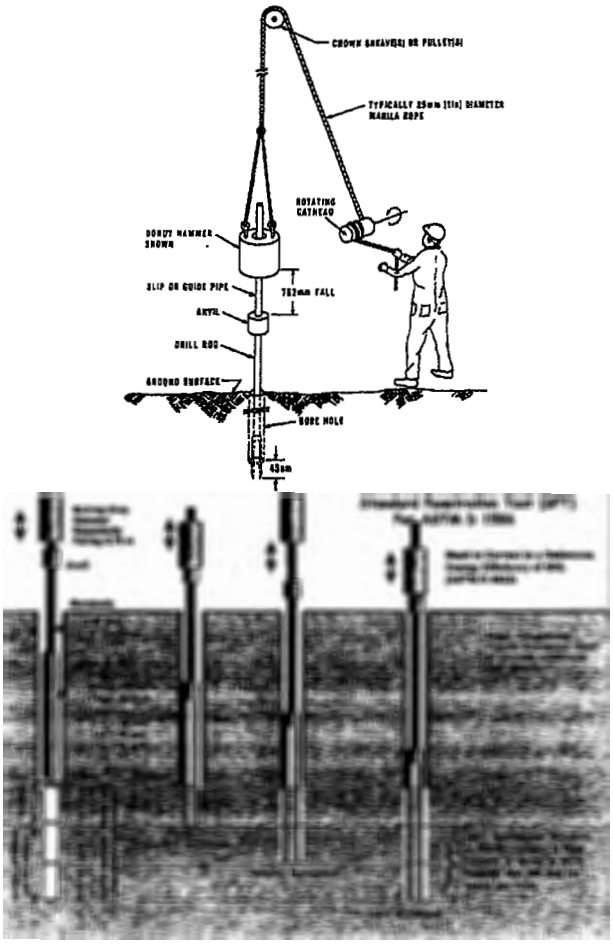
آزمایش SPT، مورد بررسی و تحلیل‌های زیادی قرار گرفته است و پیشنهاداتی جهت اصلاح عدد N در شرایط مختلف ارائه شده است. گرچه اساساً آزمایش SPT برای خاک‌های دانه‌ای پیشنهاد شده بود ولی امروزه برای هر نوع خاکی بکار می‌رود. هنگام حفر گمانه‌ها در خاک‌های درشت‌دانه در هر ۱/۵ متر و در خاک‌های ریزدانه در هر ۲/۰ متر معمولاً آزمایش SPT انجام می‌شود.

جدول (۲-۱): رابطه‌ی عدد N با دانسیته‌ی نسبی و φ' برای خاک‌های دانه‌ای

	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very dense
N	5 ~ 10	8 ~ 15	10 ~ 40	20 ~ 70	>35
D_r	0.15	0.35	0.65	0.85	1.00
φ	27° ~ 32°	30° ~ 35°	35° ~ 40°	38° ~ 43°	

جدول (۲-۲): رابطه‌ی عدد N با q_u برای خاک‌های چسبنده

	Very soft	Soft	Medium	Stiff	Very Stiff	Hard
N	0 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 9	10 ~ 16	17 ~ 30	>30
q_u (kg/cm²)	<25	25 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	>400



شکل (۲-۵): نحوه‌ی انجام آزمایش SPT

در سال ۱۹۸۶ اسکمپتون (Skempton) اصلاح N را بر اساس رابطه‌ی زیر پیشنهاد کرده است:

$$N_1 = C_N \cdot N$$

که در این C_N ضریب تصحیح عدد N می‌باشد و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} C_N = \dfrac{2}{1+\sigma'_{V0}} & \text{برای ماسه‌های ریز با دانسیته‌ی متوسط} \\ C_N = \dfrac{3}{2+\sigma'_{V0}} & \text{برای ماسه متراکم} \end{cases}$$

در این روابط σ'_{V0} تنش مؤثر قائم اولیه در ترازی است که آزمایش SPT در آن انجام می‌شود.

رابطه‌ی دیگری که برای اصلاح ضریب N مطرح شده است، رابطه‌ای است که توسط Liao & Whitman در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است. این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$N_1 = N \times \frac{1}{\sqrt{\sigma'_v}}$$

که محدوده‌ی تغییرات ضریب اصلاحی به صورت زیر می‌باشد.

$$0.5 \langle \frac{1}{\sqrt{\sigma'_v}} \langle 2.0$$

واحد σ'_v در این رابطه $\dfrac{\text{ton}}{\text{ft}^2}$ است.

۲) آزمایش برش پره‌ای:

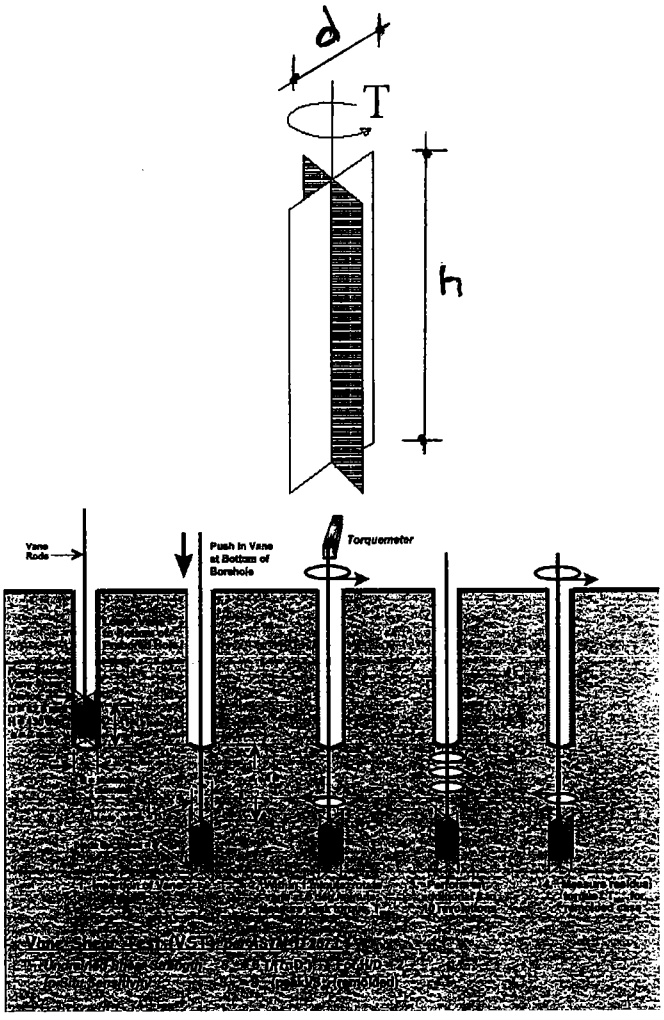
از این آزمایش جهت تعیین مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک‌های رسی نرم یا ماسه‌ای سست استفاده می‌شود. این آزمایش در خاک‌های با مقاومت کمتر از $1.0\frac{kg}{cm^2}$ کاربرد دارد. هنگام حفر گمانه در خاکهای ریزدانه معمولاً در هر ۲/۰ متر (حد فاصل آزمایشات SPT) نمونه‌برداری دست‌نخورده همراه با آزمایش برش پره صورت می‌گیرد.

برای انجام این آزمایش ابتدا گمانه تا عمق موردنظر حفر می‌شود، سپس پره (تیغه‌ی چهارسو) به آرامی به داخل خاک رانده می‌شود و سپس لنگر پیچشی لازم (T) جهت چرخاندن پره در داخل خاک به وسیله پیچش‌سنج (Torque meter) در سر گمانه در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود.

تیغه (پره) مورد استفاده در این آزمایش در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. این پره در سه اندازه‌ی مختلف موجود می‌باشد (جدول(۲-۳)).

جدول (۲-۳): مشخصات انواع پره‌های آزمایش برش پره‌ای

AX	۳۸/۱	۷۶/۲	۱/۶
BX	۵۰/۸	۱۰۱/۶	۱/۶
NX	۶۳/۵	۱۳۷/۰	۳/۲



شکل (۲-۶): پره مورد استفاده در آزمایش برش پره‌ای

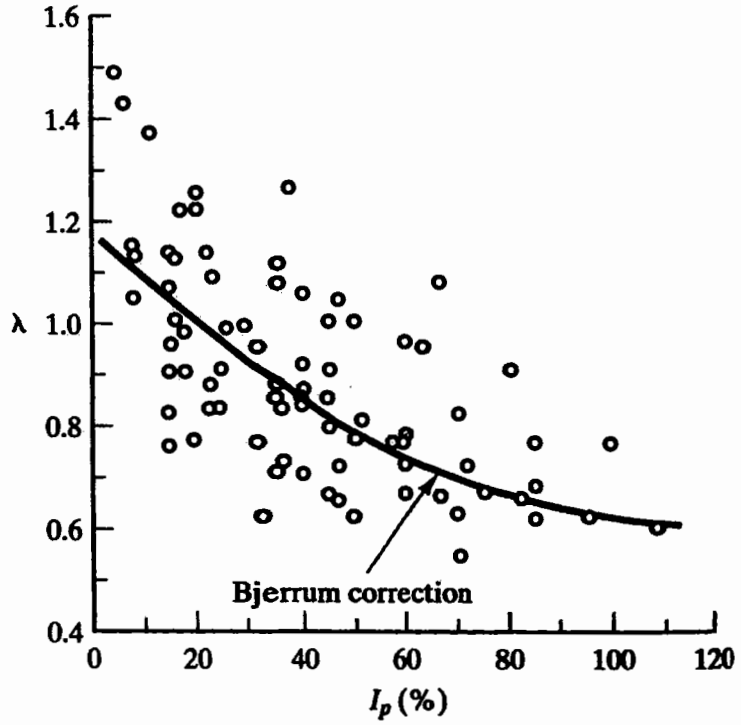
با توجه به مکانیسم انجام آزمایش می‌توان نوشت:

$$T = \left[(d \cdot \pi \cdot h) \times \frac{d}{2} \times S_u \right] + \left[\frac{\pi d^2}{4} \times (a \times d) \times S_u \right]$$

$$T = S_u . \pi \left(\frac{d^2 h}{2} + \frac{a d^3}{4} \right)$$

برای برش انتهایی یکنواخت $a = \frac{2}{3}$

از رابطهٔ فوق S_u بدست می‌آید. در اینکه S_u مقاومت برشی خاک در حالت تحکیم نشده UU (دو برابر چسبندگی زهکشی نشده، C_U) یا حالت تحکیم شده CU است، بین صاحب‌نظران اختلاف‌نظر وجود دارد به‌هرحال تحلیل برگشتی (Back analysis) تعدادی از ناپایداری‌ها و خرابی شیب‌های خاکی نشان داده است که S_u به‌دست‌آمده مقداری دست بالاست و بایستی کاهش داده شود. بیروم (Bjerrum,1972) و لاد (Ladd,1977) پیشنهاد کردند که برای کارهای عملی نتیجه به دست آمده از این آزمایش با ضریب اصلاحی λ که از نمودار (۲-۱) قابل استخراج است اصلاح گردد.



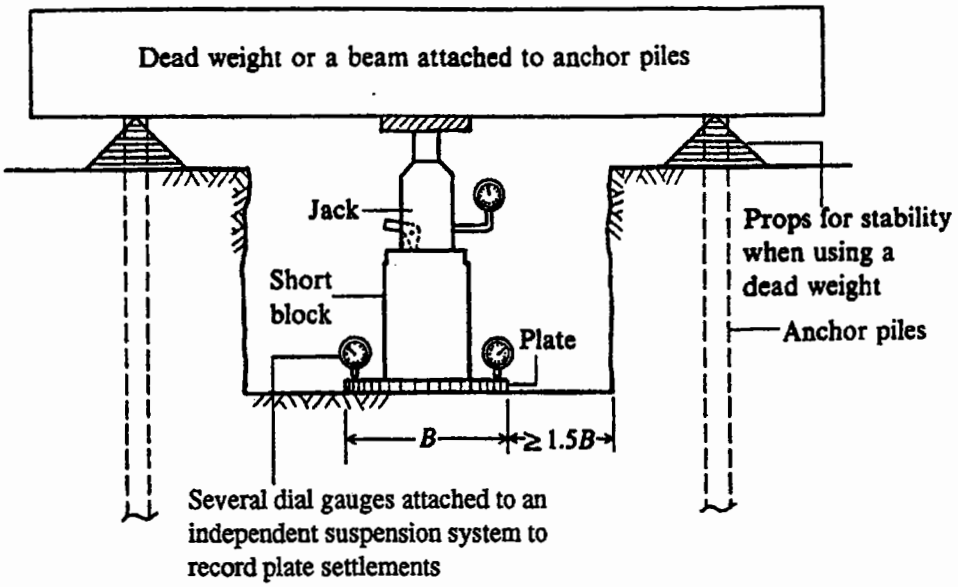
نمودار (۲-۱): ضرایب اصلاحی λ برای تصحیح نتایج آزمایش برش پره‌ای

۳) آزمایش بارگذاری صفحه:

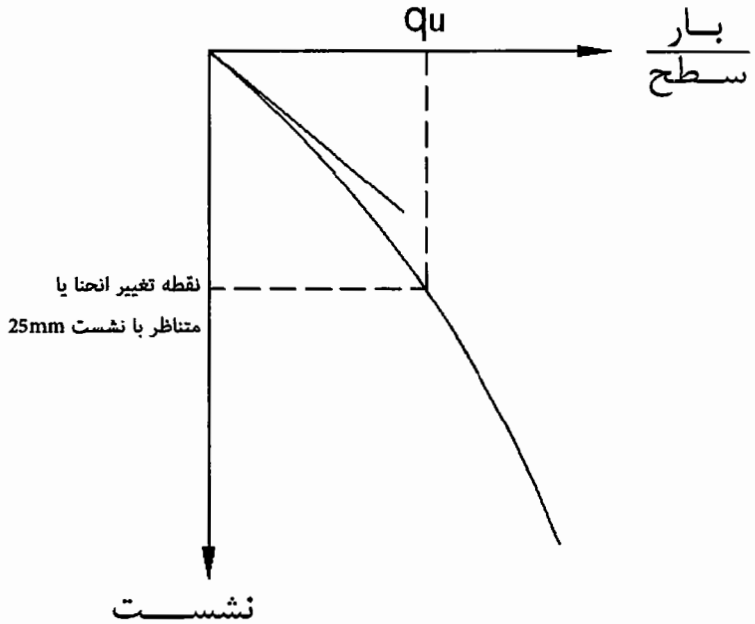
از این آزمایش صحرایی می‌توان ظرفیت باربری نهایی یا ظرفیت باربری مجاز خاک را برای میزان نشست معینی به دست آورد. شمای کلی آزمایش در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.

روش انجام آزمایش بدین صورت است که باربری نهایی محتمل خاک را بر ۴ یا ۵ تقسیم کرده و هر بار $\frac{1}{4}$ یا $\frac{1}{5}$ بار را به وسیله‌ی جک هیدرولیکی بر صفحه وارد می‌کنند (به فواصل زمانی حداقل یک ساعت) و میزان نشست صفحه

را در پایان ساعت اندازه‌گیری می‌کنند. q_U تنش گسیختگی خاک، محل تغییر شیب منحنی یا تنش متناظر با mm ۲۵ نشست می‌باشد که به ظرفیت باربری خاک موسوم است.



شکل (۲-۷): شمای کلی آزمایش بارگذاری صفحه



نمودار (۲-۲): تغییرات نشست بر حسب تنش وارده

اگر $(q_U)_P$ و $(q_U)_F$ ظرفیت باربری خاک در زیر صفحه و زیر پی واقعی باشد و S_P و S_F نیز نشست صفحه و نشست پی واقعی را نشان دهند و اگر B_P و B_F نیز به ترتیب عرض صفحه و عرض پی باشند، آنگاه بین ظرفیت باربری صفحه و پی واقعی و همچنین بین نشست صفحه و نشست پی واقعی در حد گسیختگی، روابط زیر برقرار است:

$$\left.\begin{aligned}(q_U)_F &= (q_U)_p \\ S_F &= S_P \cdot \frac{B_F}{B_P}\end{aligned}\right\}$$ clayey soil خاک‌های رسی (چسبنده)

$$\left.\begin{aligned}(q_U)_F &= (q_U)_p \cdot \frac{B_F}{B_P} \\ S_F &= S_P \cdot \left(\frac{B_F}{B_P}\right)^2 \left(\frac{3.28B_P+1}{3.28B_F+1}\right)^2\end{aligned}\right\}$$ Sandy soil خاک‌های ماسه‌ای (دانه‌ای)

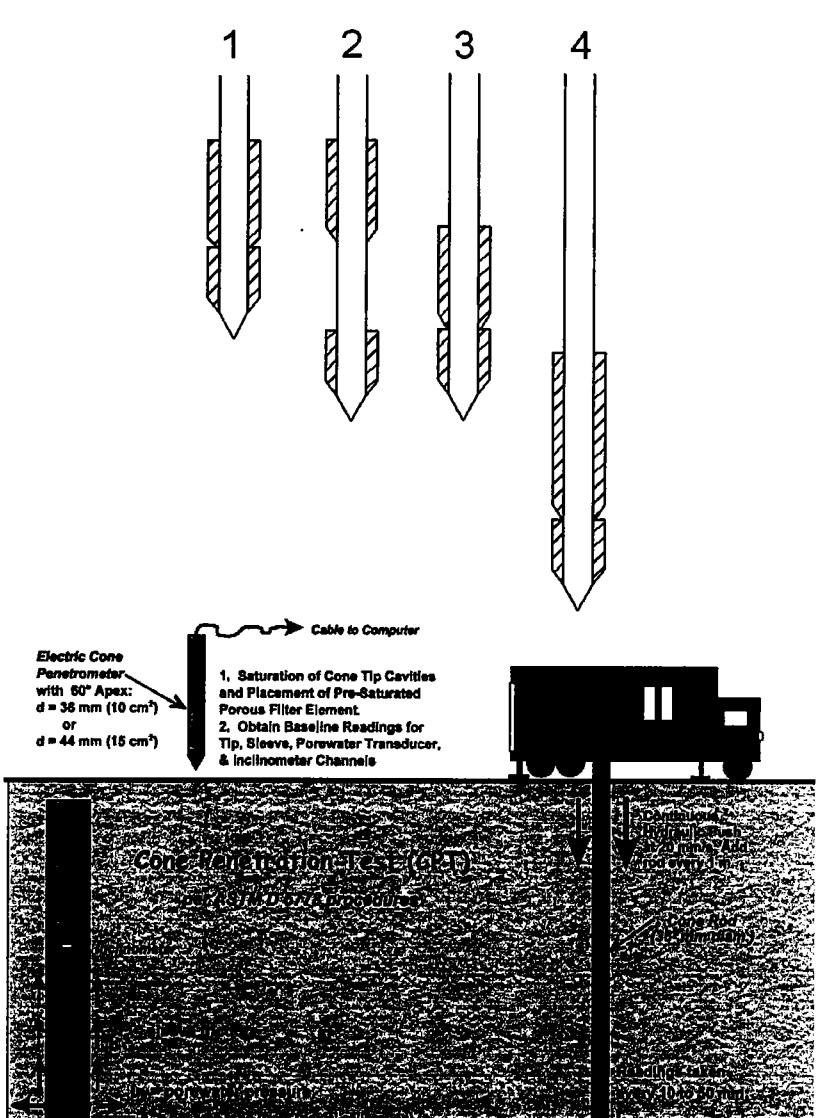
از این آزمایش E اولیه‌ی خاک (که در حقیقت Constrained Modulus است) تعیین می‌شود. همان‌طور که در نمودار (۲-۲) نمایان است رفتار خاک خطی نیست.

۴) آزمایش نفوذ مخروط (CPT):

مزیت اصلی آزمایش نفوذ مخروط بر آزمایش نفوذ استاندارد آن است که این آزمایش برخلاف آزمایش نفوذ استاندارد یک آزمایش ناپیوسته نیست بلکه یک نمودار (لوگ) پیوسته از وضعیت لایه‌های خاک تحت‌الارضی را به دست می‌دهد.

در این آزمایش اساساً یک مخروط و بدنهٔ آن در خاک فرو برده می‌شود و میزان مقاومت خاک در مقابل فرو رفتن مخروط اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. می‌توان مقاومت نوک مخروط و بدنه را هر یک به تنهایی اندازه‌گیری کرد، ولی معمول این است که ابتدا مقاومت نوک مخروط را به تنهایی و سپس مقاومت فرورفتن بدنه را به همراه نوک اندازه‌گیری می‌نمایند. مقاومت نوک مخروط (q_c) مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک (q_u) را نشان می‌دهد، چون فرصت کافی برای زهکشی شدن خاک در هنگام نفوذ مخروط وجود ندارد. مقاومت اصطکاکی نیز به آسانی با کم کردن مقاومت نوک از مجموع "مقاومت نوک + مقاومت اصطکاک بدنه" قابل محاسبه می‌باشد.

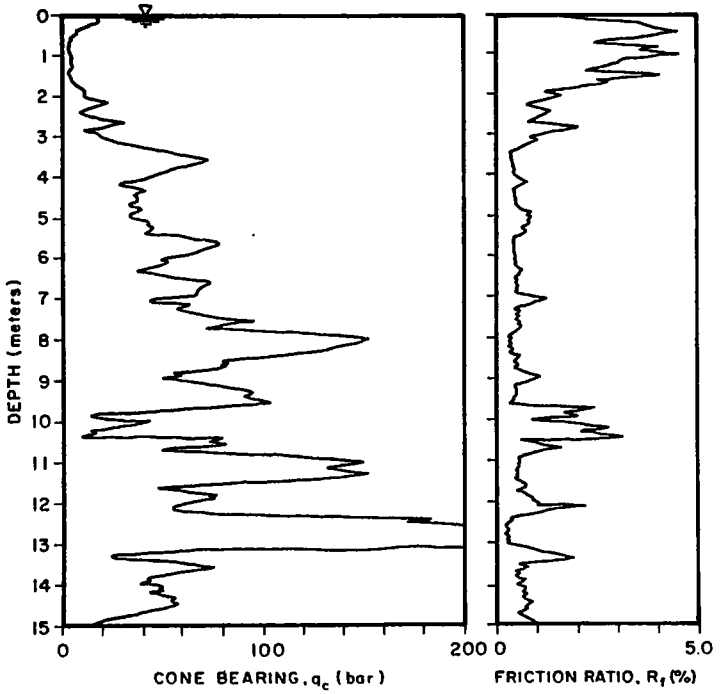
مراحل کار به صورت شماتیک در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.



شکل (۲-۸): شماتیک مراحل انجام آزمایش نفوذ مخروط

نتایج حاصل را معمولاً به صورت تغییرات مقاومت نوک (q_c) در عمق و همچنین تغییرات ضریب اصطکاک (FR) در عمق نشان می‌دهند. ضریب اصطکاک FR به صورت زیر بدست می‌آید.

$$F_R = \frac{\text{friction resistance}}{\text{cone resistance}} = \frac{q_{total} - q_c}{q_c} = \frac{q_f}{q_c}$$



نمودار (۲-۳): تغییرات q_c و FR بر حسب عمق

نوعی از CPT وجود دارد که در نوک و یا بدنه آن سوراخی تعبیه شده و از آن طریق فشار آب منفذی نیز اندازه‌گیری می‌شود. به این دستگاه CPTU می‌گویند. برخی از CPTها قابلیت ارسال امواج را دارند که با ثبت انعکاس امواج می‌توان سرعت حرکت موج برشی و از آنجا نوع خاک را به دست آورد. به این دستگاه‌ها SCPT می‌گویند. برخی از CPTهای جدید قابلیت نمونه‌گیری از خاک را نیز دارند.

نوعی از آزمایش CPT در اروپا معمول است که به آزمایش Dutch Cone (مخروط هلندی) معروف می‌باشد. انواع مختلف مخروط هلندی با قطر میله (rod) یا زوایای نوک مخروط متفاوت موجود است ولی اصول کلی کاربرد آنها مشابه اصول آزمایش CPT می‌باشد.

نوع دیگری از آزمایش نفوذ مخروط، آزمایش CPT دینامیکی است که در آن نوک مخروط با ضربات چکش به داخل خاک فرو برده می‌شود. این آزمایش در مقایسه با آزمایش CPT استاندارد کاربرد کمتری دارد.

مراجع برای مطالعه بیشتر

[1] Geotechnical Engineering Investigation Manual, Hunt R.E., 1984, McGraw-Hill.
[2] Foundation Engineering Handbook, Fang H.Y., 1991, Chapman & Hall.
[3] Geology and Engineering, Leggett R.F., 1962, McGraw-Hill.
[4] Site Investigation, Clayton et al., 1982, Halstead.