سازمان نظام مهندسی ساختمان
استان تهران

نسخه پیش نویس

پیش نویس نظام نامه
مطالعات صحرایی و آزمایش های ژئوتکنیک

بهار ۹۸

نسخه ۱/۰۰

پیش نویس غیر قابل استناد

هیات تدوین کنندگان نظام نامه مطالعات ژئوتکنیک و مطالعات صحرایی

الف) اعضاء کمیته اجرایی و راهبردی

۱- مهندس سیامک الهی‌فر

۲- مهندس امیررضا امین جواهری

۳- دکتر بهنام برومندزاده

۴- مهندس مهیار فرنیا

۵- دکتر حامد میرزایی‌فر

ب) اعضاء کمیته تخصصی تدوین

۱- مهندس امین اسکندری

۲- دکتر علی افراسیابی

۳- دکتر احمدرضا حسینی

۴- مهندس عماد زرگران

۵- دکتر سهیل سربیشه‌ای

۶- مهندس فرید شعبانی

۷- مهندس علیرضا فرازمند

۸- مهندس محمد گنابادی

۹- مهندس داریوش مرادی

۱۰- مهندس علی وحیدی

نسخه پیش نویس

فصل اول ۲
۱- مقدمه ۲
فصل دوم ۴
۲- حفاری ۴
۲-۱- اهداف حفاری ۴
۲-۱-۱- برآورد حفاری ها و مطالعات صحرایی ۴
۲-۲- انواع حفاری ۵
۲-۲-۲- روش های حفاری گمانه ۷
۲-۳- تجهیزات سیستم های حفاری ۱۱
۲-۴- ریزش و تثبیت جدار گمانه ۱۱
۲-۵- تراوش آب و تورم در جدار گمانه ۱۲
۲-۶- کاربرد انواع روش های گمانه زنی ۱۲
۲-۷- انواع سرمته ها ۱۳
۲-۷-۱- سرمته های حفاری شستشویی ۱۳
۲-۷-۲- سرمته های حفاری دورانی بدون مغزه گیری ۱۳
۲-۷-۳- سر مته های مغزه گیر ۱۳
فصل سوم ۱۶
۳- نمونه گیری از خاک و سنگ ۱۶
۳-۱- مقدمه ۱۶
۳-۲- طبقه بندی نمونه های خاک ۱۶
۳-۳- مقدار نمونه ۱۹
۳-۴- روشهای نمونه گیری ۲۰
۳-۴-۱- نمونه گیری از چاهکها ۲۰

۳-۴-۲- نمونه گیری از گمانه ۲۱
۳-۴-۳- نمونه گیرهای رانشی ۲۳
۳-۴-۴- نمونه گیرهای پیستونی ۲۳
۳-۴-۵- نمونه گیرهای دورانی ۲۴
۳-۵- دستخوردگی نمونه ها ۲۵
۳-۵-۱- دست خوردگی های ناشی از نوع و مشخصات نمونه گیر تیوبی ۲۵
۳-۵-۲- دست خوردگی های ناشی از روش وارد کردن نمونه گیر در خاک ۲۶
۳-۵-۳- دست خوردگی های ناشی از تغییر وضعیت تنشهای خاک ۲۶
۳-۵-۴- دست خوردگی های زمان حمل و نگهداری نمونه ۲۷
۳-۵-۵- دست خوردگی ناشی از بریدن نمونه برای انجام آزمایش ۲۸
۳-۶- محافظت و نگهداری از نمونه های دست نخورده خاک ۲۸
۳-۷- نمونه گیری دست خورده از خاک ۲۸
۳-۷-۱- نمونه گیری دستی ۲۹
۳-۷-۲- نمونه گیری بلوکی ۲۹
۳-۷-۳- نمونه گیری دست خورده با اوگر ۲۹
۳-۷-۴- نمونه گیری دست خورده با نمونه گیرهای جدا شونده ۳۰
۳-۸- نمونه گیری دست نخورده از خاک ۳۰
۳-۸-۱- نمونه گیر جدار نازک ۳۱
۳-۸-۲- نمونه گیر پیستون ثابت ۳۲
۳-۸-۳- نمونه گیر پیستون هیدرولیکی ۳۳
۳-۸-۴- نمونه گیر دو جداره دنیسون ۳۳
۳-۸-۵- نمونه گیر پیچر ۳۴
۳-۸-۶- نمونه گیر سوئدی ۳۴

۳-۹- مغزه گیری از سنگ ۳۵
۳-۹-۱- کربارل های یک جداره ۳۵
۳-۹-۲- کربارل های دو جداره ۳۶
۳-۹-۳- کربارل های سه جداره ۳۶
۳-۹-۴- کربارل های کابلی ۳۷
۳-۱۰- پیشنهاداتی در خصوص حفاری های ماشینی و دستی ۳۷
فصل چهارم ۴۱
۴- آزمایش های صحرایی و برجا ۴۱
۴-۱- آزمایش‌های صحرایی ۴۱
۴-۱-۱- آزمایش وزن مخصوص خاک در محل (Sand Bottle) AASHTO-T191، ASTM –D1556 ۴۲
۴-۱-۲- آزمون ضربه و نفوذ استاندارد SPT مطابق استاندارد ASTM – D1586 ۴۴
۴-۱-۳- آزمایش‌های نفوذ مخروط اصطکاکی و مخروط شبه استاتیک در خاک ۵۰
۴-۱-۴ - آزمایش پرسیومتری ۵۶
۴-۱-۵-آزمایش دیلاتومتری تخت (اتساع سنجی یا انبساط سنجی) ASTM-D6635 ۶۶
۴-۱-۶- آزمایش برش پرّه‌ای صحرایی در خاکهای چسبنده ASTM – D2573 ۶۹
۴-۲- برش برجا ۷۳
۴-۲-۱- مقدمه ۷۳
۴-۲-۲-محل و تعداد انجام آزمایش ۷۳
۴-۲-۳- عمق انجام آزمایش ۷۴
۴-۲-۴- ابعاد گالری ۷۴
۴-۲-۵- ابعاد جعبه آزمایش ۷۴
۴-۲-۶- تعداد جعبه آزمایش ۷۴
۴-۲-۷- تعداد جک ها ۷۴

۴-۲-۸- تعداد گیج ها ۷۴
۴-۲-۹- نحوه انجام آزمایش ۷۴
۴-۳- بارگذاری صفحه ای ۷۸
۴-۳-۱- مقدمه ۷۸
۴-۳-۲-تجهیزات و نحوه انجام آزمایش ۷۹
۴-۳-۳-روش معمول انجام آزمایش(در ایران) ۸۲
۴-۳-۴-خطاهای معمول شده در انجام آزمایش ۸۲
فصل پنجم ۸۴
۵- آزمایش های آزمایشگاهی ۸۴
۵-۱- مقدمه ۸۴
۵-۱-۱- اهداف ۸۴
۵-۱-۲- مزایا و معایب ۸۵
۵-۱-۳- جمع بندی ۸۶
۵-۲- انتخاب پارامترهای مورد نیاز در طراحی‌های ژئوتکنیکی ۸۶
۵-۳- آزمایشها و تجهیزات لازم برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی ۸۹
۵-۳-۱- آزمایش تعیین درصد رطوبت ۹۰
۵-۳-۲- آزمایش توده ویژه ۹۰
۵-۳-۳- آزمایش دانه‌بندی ۹۰
۵-۳-۴- آزمایش هیدرومتری ۹۰
۵-۳-۵- آزمایش حدود اتربرگ ۹۱
۵-۳-۶- آزمایش تحکیم ۹۱
۵-۳-۷- آزمایش برش مستقیم ۹۲
۵-۳-۸- آزمایش تک‌محوری ۹۲

۵-۳-۹- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم نیافته زهکشی نشده UU ۹۲
۵-۳-۱۰- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم یافته زهکشی نشده CU ۹۳
۵-۳-۱۱- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم یافته زهکشی شده CD ۹۳
۵-۳-۱۲- آزمایش سه‌محوری سیکلیک (دینامیک) ۹۴
۵-۳-۱۳- آزمایش نفوذپذیری ۹۴
۵-۴- آماده سازی نمونه‌ها ۹۶
۵-۴-۱- ملاحظات حمل، نگهداری، انتخاب و آماده سازی نمونه‌ها ۹۶
۵-۴-۲- ملاحظات حمل نمونه‌ها از محل به آزمایشگاه ۹۶
۵-۴-۳- ملاحظات مربوط به نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه ۹۷
۵-۴-۴- نحوه انتخاب نمونه جهت انجام آزمایش ۹۷
۵-۴-۵- نحوه آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش ۹۸
۵-۵- کالیبراسیون دستگاهها ۹۹
۵-۵-۱- نکات فنی، خطاهای رایج، خطاهای دستگاهی و کالیبراسیون دستگاهها ۹۹
فصل ششم ۱۰۹
۶- مطالعات ژئوفیزیک ۱۰۹
۶-۱- مطالعات ژئوفیزیک کم عمق در پروژه های شهری ۱۰۹
۶-۱-۱- مطالعات ژئوالکتریک برای تعیین مقاومت الکتریکی به منظور طراحی سیستم اتصال به زمین ۱۰۹
۶-۱-۲- روش مطالعات ژئوالکتریک برای تعیین مقاومت الکتریکی به روش ونر ۱۰۹
۶-۱-۳- برداشتهای صحرایی روش ژئوالکتریک ۱۱۰
۶-۱-۴-تحلیل برداشت های تعیین مقاومت الکتریکی خاک ۱۱۲
۶-۱-۵- دستگاه و تجهیزات برداشت های مقاومت الکتریکی خاک ۱۱۲
۶-۱-۶- بررسی دادهای برداشت شده ۱۱۳
۶-۱-۷-بررسی شبکه یا جاهک برق گیر ۱۱۳

۶-۱-۸-خطاهای احتمالی در برداشت های تعیین مقاومت الکتریکی ۱۱۴
۶-۲-مطالعات لرزه نگاری ۱۱۵
۶-۲-۱- مطالعات لرزه نگاری درون چاهی (Downhole) ۱۱۵
۶-۲-۱-۱-آماده سازی گمانه برای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی ۱۱۶
۶-۲-۱-۲-پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی ۱۱۷
۶-۲-۱-۳-داده برداری، ثبت امواج لرزه ای و فرمت ثبت (آزمایش لرزه نگاری درون چاهی) ۱۱۷
۶-۲-۱-۴- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی ۱۱۸
۶-۲-۱-۵- دستگاه و تجهیزات ۱۱۹
۶-۲-۱-۶- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری درون چاهی ۱۲۰
۶-۲-۱-۷- خطا های احتمالی در برداشت های درون چاهی ۱۲۰
۶-۲-۲- مطالعات لرزه نگاری چاه به چاه (Crosshole) ۱۲۱
۶-۲-۲-۱-آماده سازی گمانه برای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه ۱۲۲
۶-۲-۲-۲-پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه ۱۲۳
۶-۲-۲-۳- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای و فرمت ثبت (آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه) ۱۲۴
۶-۲-۲-۴-قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه ۱۲۴
۶-۲-۲-۵- دستگاه و تجهیزات ۱۲۴
۶-۲-۲-۶- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه ۱۲۴
۶-۲-۲-۷- خطا های احتمالی در برداشت های چاه به چاه ۱۲۴
۶-۲-۳- مطالعات لرزه نگاری شکسته مرزی (Refraction) ۱۲۵
۶-۲-۳-۱- پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی ۱۲۸
۶-۲-۳-۲- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای (آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی) ۱۲۹
۶-۲-۳-۳- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی ۱۳۰
۶-۲-۳-۴- دستگاه و تجهیزات ۱۳۰

۶-۲-۳-۵- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی ۱۳۰
۶-۲-۳-۶- خطا های احتمالی در برداشت های شکسته مرزی ۱۳۱
۶-۲-۴- روشهای دست یابی به سرعت موج برشی از امواج سطحی ۱۳۱
۶-۲-۴-۱- پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری طیفی ۱۳۲
۶-۲-۴-۲- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای (آزمایش لرزه نگاری طیفی) ۱۳۲
۶-۲-۴-۳- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری طیفی ۱۳۳
۶-۲-۴-۴- دستگاه و تجهیزات ۱۳۳
۶-۲-۴-۵- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری طیفی ۱۳۳
۶-۲-۴-۶- خطا های احتمالی در برداشت های لرزه نگاری طیفی ۱۳۳
۶-۳-مطالعات ژئوفیزک خاص در پروژه های شهری ۱۳۴
فصل هفتم ۱۳۷
۷- ظرفیت باربری انواع پی ها ۱۳۷
۷-۱- مقدمه ۱۳۷
۷-۲- معیار گسیختگی برشی ۱۳۹
۷-۲-۱- گوه گسیختگی و پارامترهای معادل ۱۳۹
۷-۲-۲- تأثیر نوع گسیختگی برشی ۱۳۹
۷-۲-۳- تأثیر سطح ایستابی ۱۴۰
۷-۲-۴- معادلات ظرفیت باربری ۱۴۲
۷-۲-۵- اثر شالودههای بزرگ ۱۴۵
۷-۳- معیار کنترل نشست ۱۴۶
۷-۳-۱- عمق موثر در نشست ۱۴۶
۷-۳-۲- نشست الاستیک ۱۴۸
۷-۳-۲-۱- روش تئوری الاستیسیته ۱۴۸

۷-۳-۲-۲- روش اشمرتمن ۱۵۰
۷-۳-۲-۳- روش جانبو ۱۵۲
۷-۳-۲-۴- روش مارچتی ۱۵۴
۷-۳-۲-۵- استفاده از تاریخچه تنش خاک (Er/Es) ۱۵۵
۷-۳-۲-۶- محاسبه نشست الاستیک در محیط چند لایه ۱۵۶
۷-۳-۳- نشست تحکیمی اولیه ۱۵۹
۷-۳-۴- نشست تحکیمی ثانویه ۱۶۰
۷-۴- ظرفیت باربری مجاز ۱۶۱
۷-۵- ضریب عکس العمل بستر ۱۶۱
۷-۵-۱- آزمایش بارگذاری صفحه ای ۱۶۱
۷-۵-۲- استفاده از روابط ۱۶۳
۷-۵-۳- روش شبه همبسته ۱۶۳
۷-۵-۴- بررسی و مقایسه روشها ۱۶۴
۷-۵-۵- نتیجهگیری و تعیین ضریب عکس العمل بستر ۱۶۵
۷-۵-۶- ضریب عکس العمل بستر در پیهای منعطف ۱۶۵
۷-۵-۷- ضریب عکس العمل بستر در پیهای صلب ۱۶۶
۷-۶- مبانی تعیین نشست و ظرفیت باربری نهایی شالوده سطحی با استفاده از تحلیلهای عددی ۱۶۷
۷-۶-۱ - ضرورت استفاده از تحلیلهای عددی ۱۶۷
۷-۶-۲- مبانی مدل عددی ۱۶۷
۷-۶-۳- نوع هندسه ۱۶۸
۷-۶-۴- شرایط مرزی ۱۷۰
۷-۶-۵- ابعاد مدل ۱۷۰
شکل ۷-۱۵- نحوه تعیین ابعاد مناسب در مدل عددی ۱۷۱

شکل ۷-۱۶- ابعاد مناسب توصیه شده مدل شالوده سطحی ۱۷۲
۷-۶-۶- شبکه بندی ۱۷۲
۷-۶-۷- مدل رفتاری ۱۷۲
۷-۶-۸- مراحل تحلیل ۱۷۳
۷-۶-۹- اعمال اثر گودبرداری ۱۷۴
شکل ۷-۱۷- مراحل در نظر گرفتن اثر گودبرداری بصورت تقریبی و ساده شده ۱۷۵
۷-۷- شمع ها ۱۷۵
۷-۷-۱- ظرفیت باربری شمع ها ۱۷۶
۷-۷-۲- ظرفیت باربری نوک شمع ۱۷۶
۷-۷-۲-۱- روش مایرهوف ۱۷۶
۷-۷-۲-۲- روش وسیک ۱۷۸
۷-۷-۲-۳- روش جانبو ۱۷۹
۷-۷-۲-۴- روش کویل و کاستلو ۱۸۰
۷-۷-۲-۵- استفاده از روابط همبستگی ۱۸۱
۷-۷-۲-۶- توصیههای API ۱۸۲
۷-۷-۳- ظرفیت باربری اصطکاک جدار شمع ۱۸۳
۷-۷-۳-۱- روش α ۱۸۳
۷-۷-۳-۲- روش β ۱۸۴
۷-۷-۳-۳- روش λ ۱۸۴
۷-۷-۳-۴- روش داس ۱۸۵
۷-۷-۳-۵- روش کویل و کاستلو ۱۸۶
۷-۷-۳-۶- استفاده از روابط همبستگی ۱۸۸
۷-۷-۳-۷- توصیههای API ۱۸۸

۷-۸- نشست شمع ۱۸۹
۷-۸-۱- نشست الاستیک شمع منفرد ۱۸۹
۷-۸-۲- نشست الاستیک گروه شمع ۱۹۰
۷-۸-۳- نشست تحکیمی گروه شمع ۱۹۱
۷-۹- سختی شمع ۱۹۱
فصل هشتم ۱۹۵
۸- گزارش مطالعات مکانیک خاک ۱۹۵
۸-۱- مقدمه ۱۹۵
۸-۲- فصل اول – کلیات ۱۹۶
۸-۲-۱- مقدمه، اطلاعات پروژه، اطلاعات همجواری، اطلاعات پیرامونی و سایت پلان ۱۹۶
۸-۲-۲- زمین‌شناسی ۱۹۸
۸-۲-۳- زلزله‌خیزی ۱۹۹
۸-۳- مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی ۱۹۹
۸-۳-۱- حفاری و مطالعات صحرایی ۲۰۰
۸-۳-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی ۲۰۰
۸-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها ۲۰۱
۸-۵- جمع بندی پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی ۲۰۱
۸-۶- توصیه های فنی ۲۰۲
۸-۷-پیوست ها ۲۰۲

نسخه پیش نویس

فصل اول

مقدمه

نسخه پیش نویس

فصل اول

۱– مقدمه

امروزه به دلیل توسعه روزافزون شهرها، افزایش تراکم جمعیت و به تبع آن کمبود و قیمت قابل توجه زمین، نیاز به ساخت ساختمان‌ها در شهرها افزایش یافته است. پیش از انجام هرگونه ساخت و ساز، ضروری است ساختگاه و محل احداث فونداسیون آن بصورت دقیق شناسایی و مطالعات لازم از لحاظ جوانب ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی صورت گیرد تا کلیه طراحی های سازه و فونداسیون ساختمان براساس آن صورت گیرد.

این نظام نامه در ۸ فصل به شرح زیر به تبیین اصول ، حفاری، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، مطالعات ژئوفیزیک و محاسبات و تهیه گزارش ژئوتکنیک در قالب یک راهنمای جامع می پردازد:

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: حفاری

فصل سوم: نمونه گیری از خاک و سنگ

فصل چهارم: آزمایش های صحرایی و برجا

فصل پنجم: آزمایش های آزمایشگاهی

فصل ششم: مطالعات ژئوفیزیک

فصل هفتم: ظرفیت باربری انواع پی ها

فصل هشتم: گزارش مطالعات مکانیک خاک

نسخه پیش نویس

فصل دوم

حفاری

نسخه پیش نویس

نسخه پیش نویس

فصل دوم

۲- حفاری

۲-۱- اهداف حفاری

حفاری به دلایل و اهداف مختلفی صورت می پذیرد . اصلی ترین اهداف حفاری به قرار زیر است :

۱- شناسایی منابع قرضه

۲- شناسایی ساختار پی سازه ها

۳- نصب تجهیزات زهکشی و یا ابزار دقیق

۴- گمانه برای تزریق و یا سایر تکنیک های اصلاح زمین

۲-۱-۱- برآورد حفاری های و مطالعات صحرایی

کلیه ضوابط کاوش‌های صحرایی بر اساس مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان و آیین نامه ۲۸۰۰ درنظر گرفته می‌شود که ضوابط مربوطه، در جدول ذیل بطور خلاصه گردآوری شده است.

مشخصات گمانه های حفاری و آزمایشات مربوطه								
سطح اشغال: S	$0 < S \le 300m^2$		$300m^2 < S \le 1000m^2$			$1000m^2 < S$		
عمق گود:D	$1m \le D \le 10m$	$10m < D \le 20m$	$1m \le D \le 10m$	$10m < D \le 20m$	$D > 20m$	$1m \le D \le 10m$	$10m < D \le 20m$	$D > 20m$
عمق گمانه از تراز شروع حفاری	$2B + D_{Var}$	$2B + D_{Var}$	$1.5B + D_{Var}$	$1.5B + D_{Var}$	$1.5B + D_{Var}$	$B + D_{Var}$	$B + D_{Var}$	$B + D_{Var}$
تعداد گمانه	1	1	2	2	2	2+N	2+N	2+N
تعداد چاهک گود	1	2	2	3	3+M	3	4	4+M
عمق گمانه از تراز زیرپی	2B	2B	1.5B	1.5B	1.5B	B	B	B
عمق چاهک گود	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}	D_{max}
پارامتر B، عرض موثر سطح اشغال بوده و پارامتر D، عمق گود(اختلاف تراز ±0.00 تا تراز زیر پی) برحسب مترمیباشد.								
N: به ازای هر ۱۰۰۰ مترمربع مساحت سطح اشغال، یک واحد به عنوان پارامتر N به تعداد گمانه ها اضافه میشود.								
M: به ازای هر ۱۰ مترعمق اضافی گود، یک واحد به عنوان پارامتر M به تعدادچاهک های دستی اضافه میشود.								
D_{max} :عمق چاهک دستی از بالاترین تراز موجود درملک تا تراز زیر پی و D_{Var} : فاصله تراز محل شروع گمانه تا تراز زیر پی.								
تذکر: حداکثر تعداد چاهک دستی گود، برابر 8 میباشد که رعایت حفاری حداکثر سه چاهک دستی در هر ضلع ساختمان، الزامیست.								

۲-۲- انواع حفاری

انواع روش های حفاری به لحاظ شکل حفره ایجاد شده :

۱- حفر چاه دستی توسط مقنی

۲- حفر چاله آزمایشی و یا ترانشه توسط بیل مکانیکی .

۳- حفاری گمانه توسط دستگاههای حفاری

در چاله هایی که به روش دستی حفاری می گردند لازم است امکان ریزش جدار چاله مورد توجه بوده و در صورت نیاز تمهیدات لازم برای مقابله با مخاطرات احتمالی صورت پذیرد .

۲-۲-۱- حفاری چاله، چاه آزمایشی و ترانشه:

در سازه های سبک با عمق مورد بررسی محدود اگر ساختار پی ریزشی نباشد، می توان به جای حفاری گمانه از حفاری چاله، چاه و یا ترانشه برای شناسایی های زیر سطحی استفاده کردهمچنین اگر به علت درشت دانه بودن جنس خاک امکان نمونه گیری در روش حفاری گمانه وجود ندارد، می توان با حفاری یک چاه قطور نمونه های مناسبی از پی اخذ نمود . بررسی و شناسایی چاهکها می تواند بخش مهمی ار تحقیقات ژئوتکنیکی باشد . نظزیه های کلی در ارتباط با چاههای دستی در جدول زیر (Many , 2001) به اختصار ارائه شده است .

روش اکتشافی		کاربرد	قابلیتها	محدودیتها
چاهکهای حفر شده	Hand-excaved test	نمونه گیری حجمی ، تستهای	قابل اجراء و مناطق با دسترسی مشکل ، دست	پرهزینه ، زمان بر ، محدوده به

توسط دست	pites and terches	برجا ، شناسایی چشمی	خوردگی مکانیکی کمتر زمین اطراف	اعماق بالای سطح آب
چاهکها و ترانشه ها حفر شده توسط ماشینهای حفاری با بکهو	Bachhoe Hand-excaved test pites and terches	نمونه گیری حجمی ، انجام تستهای درجا ، شناسایی چشمی ، قابلیت شناسایی مصالح با توجه به سرعت حفاری ، عمق سنگ بستر و آب زیر زمینی	سریع ، اقتصادی ، معمولا تا عمق کمتر از ۵ متر ، اما تا ۱۰ متر نیز حفاری میشود .	دسترسی محدود تجهیزات به اعماق بالای تراز آب ، نمونه کپی دست نخورده محدود
چاه عمیق	Drilled shaft	پیش خاکبرداری چاهها و پی هی عمیق ، تحقیقات مرتبط با زمین لغزش ، چاهای زهکشی	سریع ، اقتصادی تر از گودبرداری دستی ، محدوده قطر ۷۶۰mm تا ۲ m	صعوبت در دسترسی تجهیزات ، اخذ مشکل نمونه های دست نخورده و بلوکی ، سنگ شکافدار شناسایی چشمی را محدود می مکند
ترانشه زنی ها توسط بلدوزر	Dozer cuts	ویژگی های سنگ بستر ، عمق سنگ بستر و آب زیرزمینی ، تعیین قابلیت شکافتن ، افزایش عمق دسترسی حفاری ماشین معکوس ، ایجاد مکانی برای سایر تجهیزات اکتشافی	هزینه نسبتا کم ، زخمنونهای مناسب جهت پیمایش زمین شناسی	اکتشافات به اعماق بالای سطح آب محدود می شود
ترانشه ها جهت شناسایی گسل ها	Trenches for Fault investigation	ارزیابی وجود فعالیت کسل ها و در برخی موارد مشخصه های زمین لغزش	تعیین موقعیت گسل ها ، مشاهدات زیر تا ۱۰ m	کران ، زمان بر ، نیاز به شمع کوبی ، مناسب تنها در مواقعی که مصالح را بتوان تاریخ نگاری نمود ، محدودیت تا بالای سطح آب

حفاری چاله آزمایشی Test Pit

چاله های آزمایشی با ۳ تا ۵ متر عمق و ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی متر قطر به منظور شناسایی لایه سطحی خاک و یا انجام آزمایش بارگذاری صفحه توسط مقنی حفر می شوند به ویژه در پروژه های خطی نظیر بزرگراه ها و کانال های انتقال آب امکان انجام برخی آزمون های برجا و نمونه گیری دست خورده از جدار چاله، امکان اخذ نمونه دست نخورده وجود دارد.

حفاری این چاله ها توسط مقنی و به روش سنتی صورت می پذیرد . در مواردی که تعداد چاله ها خیلی زیاد است و یا سطح آب زیرزمینی مانع حفاری دستی است بهتر است حفر این چاله ها با بیل مکانیکی و یا وسایل مشابه صورت گیرد .

حفاری چاه Well- Drilling

چاه با عمق ۵ تا ۳۰ متر و قطر ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی متر و توسط مقنی در پروژه های ساختمان سازی درون شهری که نقل و انتقال دستگاه حفاری امکان پذیر نباشد در لایه هایی که به دلیل ریزشی بودن امکان اخذ نمونه دست نخورده از آنها نیست، اجرا می شود برای توده های غیر ریزشی ریزدانه و آبرفتهای سمانته مناسب است . حفاری چاه امکان تهیه لوگ دقیق لایه های زیر سطحی و همچنین طور انجام برخی آزمونه های برجا نظیر بار گذاری صفحه و دانسیته در محل را فراهم می کند .

از آزمون SPT در جاه خودداری شود و یا با انجام تحقیقات گسترده ضریب اصلاحی ویژه ارائه شود .

حفاری ترانشه های طویل با طول بیش از ۱۰۰ متر معمولاً توسط ماشین آلات مخصوص حفاری ترانشه انجام می شود .

حفاری ترانشه اکتشافی Exploration Trenches

ترانشه به عرض ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی متر و عمق ۳ تا ۵ متر توسط بیل مکانیکی و به صورت طولی حفاری می گردد . این روش شناسایی نسبت به سایر روش ها کاربرد و کارایی کمتری دارد ، ولی در مواردی که تعیین امتداد یک عارضه زیر سطحی نظیر یک لنز ماسه ای و یا وجود ناپیوستگی های خاص نظیر نواحی خرد شده و یا گسل ها مورد نظر بوده و عمق مطالعه نیز کمتر از ۵ متر باشد ، از حفاری ترانشه به عنوان یک راهکار سریع و آسان برای جمع آوری اطلاعات استفاده کرد .

پس از حفر ترانشه شناسایی زیر سطحی از طریق مشاهده مستقیم لایه ها در جدار ترانشه و همچنین نمونه گیری انجام می شود.

۲-۲-۲- روش های حفاری گمانه:

سوراخی به قطر ۵ تا ۲۵ سانتی متر که توسط دستگاه های حفاری حفر شده و بسته به روش حفاری امکان نمونه گیری و انجام آزمایش های برجا و یا تزریق دوغاب را فراهم می سازد . گمانه برای جاسازی خرج انفجار نصب ابزار دقیق، تجهیزات زهکشی و یا بهسازی زمین استفاده شود. انتخاب روش حفاری تابع جنس لایه های زمین و همچنین اهداف حفاری بوده به لحاظ قابلیت حفاری در عمق، امکان نمونه گیری و انجام آزمایش های برجا و همچنین دقت و سرعت از مشخصات ویژه ای برخوردار است .

حفاری گمانه به یکی از پنج روش زیر صورت می پذیرد:

۱- حفاری مته ای Auger Boring

۲- حفاری ضربه ای Percussion Drilling

۳- حفاری شستشویی Wash Boring

۴- حفاری دورانی Rotary Drilling

۵- حفاری چکشی Hammer Drilling

انتخاب روش حفاری تابع جنس لایه های زمین و همچنین اهداف حفاری می باشد.

حفاری مته ای اوگر Auger Drilling

با توجه به سرعت بالای حفاری با اوگر و همچنین قابلیت انواع دستی آن برای بکارگیری در محدوده هایی که دسترسی ماشن آلات حفاری به آنها مشکل است . استفاده از این روش برای کاوش های ژئوتکنیکی درون شهری و عمدتا برای تعیین ضخامت خاک دستی

توصیه می شود . همچنین برای پروژه های خطی نظیر مطالعه بستر خطوط را ه آهن ، بزرگراه ها و کانال های آبیاری ، حفاری با اوگر می تواند با سرعت قابل ملاحضه ای مشخصات کلی سیستم را را به دست دهد .

با این حال در مورد خاک غیر چسبنده در زیر سطح آب زیرزمینی به علت ریزش جدار و همچنین در خاک های سخت و سیمانته شده به علت عدم توانایی نفوذ قابل استفاده نیستند .

یکی از روش های حفاری گمانه استفاده از مته ای مخصوص به نام اوگر است که دارای شکل های متنوع است . در تمام انواع آنها با چرخاندن سرمته و فشار همزمان رو به پایین ، مته در داخل زمین نفوذ می کند . به طور کلی اعمال بار به صورت دستی و یا ماشینی صورت می پذیرد که بر این اساس به انوع مختلف تقسیم بندی می شود .

اوگرهای دستی : Hand Operator Augers

اوگرهای دستی معمولاً با چرخاندن و به پایین فشار دادن یک دسته فلزی توسط کارگر به داخل زمین نفوذ داده می شوند . اوگرهای دستی را به شش گروه زیر تقسیم کرده است:

اوگرهای ایوان ، که سرمته آن شکل قاشقی داشته و برای نمونه گیری مناسب است .

اوگرهای مارپیچی ، که سرمته آنها شکلی شبیه پیچ دارد.

اوگرهای شن ، که دارای نوک تیز و سختی است.

اوگرهای هلندی، که سرمته آن شکلی شبیه د□م ماهی دارد.

اوگرهای حلزونی ، که سرمته آنها شکلی شبیه فنر دارد.

اوگرهای خمره ای ، که سرمته آن شکل استوانه ای دارد.

اوگرهای ماشینی:

اوگر ماشینی که دارای میله های مارپیچی بوده و می تواند با نفوذ در زمین نسبت به حفر گمانه و ارسال خاک به سطح زمین اقدام کند. در اندازه های مختلفی ساخته می شوند برخی از انوا ع قدرتمند که قابلیت حفاری در اعماق زیاد را نیز دارند برپشت کامیون جاسازی می شوند . همچنین با توجه به سختی پره ها و قدرت سر مته و موتور محرک، برخی از اوگرهای ماشینی برای حفاری در سنگ نیز بکار گرفته می شوند.

اوگرهای ماشینی به سه دسته اوگرهای پره بلند، اوگرهای پره کوتاه و اوگرهای سطلی تقسیم می شوند .

اوگرهای ماشینی پره کوتاه Short Flight Auger

اوگرهای پره کوتاه شامل یک میله حفاری یک نوک برنده شبیه سر مته عمل می نماید و چند پره در انتهای میله و بالای نوک است است یکی از معایب اصلی اوگرهای پره کوتاه آن است که به دلیل محدود بودن طول پره ها لازم است برای خالی کردن خاک و نمونه گیری متناوباً تشکیلات حفاری از گمانه بیرون کشیده شده و خاکهایی که در لای پر ه های آن قرار دارند تخلیه گردد .

اوگرهای ماشینی پره بلند C ontinuous F light Auger

اوگرهای پره بلند در سراسر طول میله حفاری خود دارای پره هایی هستند که با توجه به شکل مارپیچی خود در برخی از موارد قادر هستند که تا اعماق ۳۰ وحتی ۷۰ متری نیز حفاری نمایند

تشکیلات حفار این دستگاهها شامل سرمته، میله حفاری و پره هایی است که در پیرامون میله حفاری جاسازی شده اند، در این اوگرها خاک بر روی پره های حلزونی بالا آمده و پس از نمایان شدن در سطح زمین نمونه گیری می شود . میله ها در قطعات طولی به هم پیچ می شوند،

اوگرهای پره بلند در مقایسه با اوگرهای پره کوتاه از این مزیت برخوردار هستند که اعماق بیشتری را می توانند حفاری کنند و در طول حفاری نیاز نیست که سیستم حفار مرتبا برای تخلیه خاک از لای پره ها بالا کشیده شود . با این حال این عیب را نیز دارند که امکان مخلوط شدن خاکهای یک لایه مشخص با لایه خاک های دیگر وجود دارد .

اوگرهای سطلی Bucket Auger

اوگرهای سطلی برای که برداشت و تهیه نمونه دست خورده در حجم زیادی از خاک و برای حفاری شمع ها و یا شفتهای آزمایشی استفاده می شود که یک سطل استوانه ای شبیه بشکه به قطر ۶۰ الی ۱۰ سانتی متر در انتهای میله حفاری قرار گرفته و امکان تهیه زیادی از خاک را فراهم می کند . .به رغم مزایای مذکور در خاک های غیرچسبنده و زیر سطح آب زیر زمینی استفاده از اوگرهای سطلی به دلیل احتمال ریزش جدار توصیه نمی شود.

حفاری به روش شستشویی Wash Drilling یا Wash Boring

برای حفاری گمانه های با قطر کم در خاکهای ریزدانه و درشت دانه و احیاناً سنگ کاربرد دارد .

سیستم حفاری شستشویی به لحاظ عملکرد به روشی اطلاق می گردد که ترکیبی از سه عملیات زیر می باشد:

۱- حفاری گمانه با ترکیبی از ضربه زدن و خرد کردن توسط ادوات حفاری.

۲- تبدیل قطعات خاک و سنگ به تکه های کوچکتر بوسیلهٔمایع تحت فشار

۳- ا رسال خرده ریزه ها به سطح زمین با استفاده از جریان مایع

با توجه به پیشرفت هایی که در ساخت مته های حفاری حاصل گردیده است ، عملا مرحله دوم نیز توسط ادوات حفاری دورانی انجام شده و بدین ترتیب روش حفاری شستشویی کاربرد خود را از دست داده است . با این حال از آنجایی که خرده ریزها همچنان توسط جریان سیال به سطح زمین ارسال می گردن ، در متون علمی جدید چنین مرسوم است که روش حفاری دورانی بدون کرگیری را حفاری شستشویی می گویند .

در واقع در روش حفاری شستشویی اولیه که در متون علمی قدیمی تشریح شده است عمدهٔ عمل حفاری توسط فشار آب صورت می گرفته است و تفاوت اساسی روش های دورانی و شستشویی در وجود این عمل در روش شستشویی بود ه است . در حالی که با حذف این قابلیت در دستگاههای جدید و تاکید بر قابلیتهای حفاری سرمته ها عملاً تفاوتی بین این دو روش وجود ندارد . بر همین اساس در متون علمی جدید از عمل حفاری دورانی بدون کُرگیری، که در آن مغزه گیری صورت نگرفته و کُل نمونه بصورت کاتینگ توسط جریان آب بالا می آید، به عنوان حفاری شستشویی یاد شده است

حفاری دورانی Rotary Drilling

حفاری دورانی ترکیبی از دوران و نیروی رو به پایان برای خرد کردن مصالح داخل گمانه است و معمولا برای حفاری در سنگ و یا خاک های سیمانته شده به کار پگرفته می شود . در این روش سرمته های حفاری با قدرت بالایی به چرخش در آمده و در زمین نفوذ می کند . در شرایطی که نمونه گیری از توده حفاری شده مورد نظر باشد از سرمته های تو خالی به همراه گربارل و در صورتی که نمونه گیری مد نظر نباشد صرفا از سرمته های توپر استفاده شده و خرده ریزه های حفاری از طریق سیرکولاسیون سیال حفاری به سطح زمین ارسال می گردند . معمولا هم زمان با حفاری از مایع حفاری نیز استفاده می شود . مایع حفاری به صورت همزمان دو وظیفه را انجام میدهد . از یک طرف سرمته ها را خنک می کند و از خرابی آنها بواسطه ی حرارت بالای حفاری جلوگیری می کند و از طرف دیگر در حین برگشت به سطح زمین خرده ریزهای حفاری را با خود به سطح زمین می آورد .

روش حفاری ضربه ای

حفاری ضربه ای معمولاً برای حفاری گمانه در سنگ های سخت به منظور کاوش های زیر سطحی ژئوتکنیک و یا ایجاد یک گمانه برای نصب ابزار دقیق، پمپ آب و یا عملیات تزریق مورد استفاده واقع می شود

چکش های حفاری نوعی از سیستم های حفاری ضربه ای هستند که عمدتاً برای حفر چاه هایی با قطر کمتر از ۵ سانتی متر به کار برده می شوند . انرژی این نوع ماشی ن ها توسط هوای فشرده تامین ومعمولاً از آنها جهت حفر چاه های با عمق کم استفاده می شود .

ضربات این دستگاهها می تواند با سرعتی معادل ۲۲۰۰ بار در دقیقه نیز بر زمین اعمال گردد . در برخی سیستم ها در نوک دستگاه به جای مته از چکش های نوک تیز ومیخ مانندی استفاده می شود که این دستگاهها را پیکور می نامند و از آنها برای حفر چال ه های انفجار و یا خرد کردن قطعات بزرگ سنگ در کارگاهها استف اده می گردد. دریفترها نیز نوع دیگر دستگاههای حفاری ضربه ای هستند که معمولاً از چک ش های حفاری سنگین تر بوده و قادر هستند چاله های تا قطر ۱۵ سانتی متر و اعماق ۳۰ متر را حفاری کنند . همچنین دریل واگن ها که معمولاً توسط اراب ههای چرخ لاستیکی جابجا می شوند نیز از سیستم حفاری ضربه ای برای حفر چاله استفاده می کنند . این دستگاهها برای حفر چاله بر روی سطح به منظور نصب راکبولت و یا عملیات تزریق تحکیمی به کار می آیند.

حفاری چکشی

حفاری چکشی روشی مناسب برای حفاری در آبرفت می باشد که توسط یک شرکت حفاری کانادایی ابداع شده است .این روش بطور خاص برای حفاری در شن و ماسه های متراکم و قلوه سنگ دار بوجود آمده است.

در این روش غلافی دوجداره به وسیله یک شمع کوب دیزلی به درون زمین رانده شده و به طور هم زمان از طریق فضای حلقوی بین دو لوله جدار آب و یا هوای تحت فشار به درون گمانه و نهایتاً به سر مته دندانه داری که در انتهای غلاف جاسازی شده است هدایت می شود . مصالح انتهای گمانه تحت ضربات چکش و عملکرد سر مته های انتهای لوله جدار به قطعات کوچکتر تبدیل شده و توسط جریان سیال یا هوای فشرده به سطح زمین ارسال می گردند.

۲-۳- تجهیزات سیستم های حفاری:

موارد مورد استفاده برای حفاری گمانه های اکتشافی و نمونه گیری که متشکل از ادوات زیر:

۱- موتور، که برای تامین انرژی مورد نیاز برای جرخاندن مته ها و دستگاه نمونه گیر ، اعمال فشار لازم برای فرو بردن غلاف در زمین
۲- پمپ و یا کمپرسور، که جریان سیال با گل حفاری در داخل گمانه را برقرار کرده
۳- دکل حفاری، که یک قاب ۳ یا ۴ پایه است و قرقره ای به آن متصل می باشد.
۴- تجهیزات حفاری که شامل میله حفاری Rods ، غلاف Casing ، سرمته Bit و نمونه گیر Sampler می باشد .
۵- حوضچه ته نشینی برای رسوب کردن خرده های حفاری
۶- سیستم وینچ مشتمل بر ریل های جابجایی دستگاه حفاری

۲-۴- ریزش و تثبیت جدار گمانه:

اگر مصالحی حفاری از چسبندگی و یا سیمانتاسیون کافی برخوردار نباشد، حفاری موجب ریزش جدار گمانه می شود . گمانه هایی که در خاک های چسبنده حفاری می شوند حتی تا چندین متر زیر سطح آب زیر زمینی هم بدون غلاف گذاری کیسینگ میتوانند پایدار بمانند. هر چه عمق حفاری در آب زیر زمینی افزایش می یابد خطر ریزش جدار افزایش یافته و حتی ممکن است در اعماق زیاد حفاری در سنگ نیز به علت شرایط خاص درزه ها با ریزش مواجه شود . در مواردی که احتمال ریزش جدار وجود دارد باید دیوارهٔ گمانه، مخصوصاً قسمتی که در زیر سطح آب زیر زمینی حفاری می گردد، توسط غلا ف های فلزی موسوم به کیسینگ پایدار می شود .راه حل های دیگری نظیر تثبیت بوس یله گل حفاری یا گل های پلیمری ، تزریق دوغاب و یا منجمد کردن محیط پیرامون گمانه نیز برای پایدار نگه داشتن جدارگمانه وجود دارد انتخاب قطر کیسینگ وابسته به قطر مورد نظر برای حفاری معمولاً دارای قطر بین ۶۰ تا ۱۳۰ میلی متر است . در برخی از حفاری ها چند متر از لایه رویی که ا ز خاک دستی تشکیل شده و احتمال ریزش دارد، غلاف گذاری می گردد . در موارد دیگر، ممکن است غلاف گذاری تا انتهای گمانه ادامه یابد

۲-۵- تراوش آب و تورم در جدار گمانه:

در مورد گمانه هایی که در زیر سطح آب زیرزمینی حفاری می گردند تورم مذکور می تواند همراه تراوش آب های زیرزمینی به درون گمانه بوده و باعث دست خوردگی مصالح گردد. که اگر سطح آب گمانه بالاتر از سطح آب زیر زمینی قرار گیرد، جریان آب از گمانه به محیط اطراف برقرار شده و ا ندکی جدارگمانه را تثبیت می کند

حفاری مته ای حفاری با اوگر یکی از روش های حفاری گمانه استفاده از مته ای مخصوص به نام اوگر است که با چرخاندن سر مته و بطور همزمان اعمال ف شار رو به پایین به آن، مته در داخل زمین نفوذ می کند.تقسیم بندی ساده ای برای انواع اوگرها ارائه شده است.

۲-۶- کاربرد انواع روش های گمانه زنی

روش های گمانه زنی فوق از لحاظ هدف عملیات گمانه زنی، نوع زمین، عمق حفاری وکیفیت نمونه برداری با یکدیگر متفاوت می باشند.

نوع زمین : برای حفاری در سنگ معمولا از از حفاری ضربه ای و حفاری دورانی خشک و برای حفاری در خاک از روش دورانی آبشویی و اوگر استفاده می شود.

عمق حفاری : با استفاده از روش اوگر دستی و پره کوتاه می توان گمانه های کم عمق و با روش حفاری ضربه ای و چکشی دورانی می توان گمانه های با عمق متوسط و با روش حفاری دورانی می توان گمانه های عمیق را حفاری نمود.

کیفیت نمونه : در روش حفاری ضربه ای اصولا نمونه ای حاصل نمی گردد .نمونه های حاصل از حفاری دورانی آبشویی کاملا دست خورده و خرد شده بوده و قابلیت دانه بندی و آزمایش را از دست داده اند .نمونه های حاصل از حفاری اوگر دست خورده بوده لیکن

برای دانه بندی و طبقه بندی خاک قابل استفاده می باشد .نمونه های بدست آمده از حفاری دورانی خشک(با مغزهگیر)قابلیت انجام آزمایش های دانه بندی و مقاومتی را دارند و بهترین نمونه ها از این روش قابل بدست می آید در مجموع حفاری دورانی پرکاربرد ترین روش گمانه زنی در مطالعات ژئوتکنیک می باشد.

۲-۷- انواع سرمته ها:

سرمته در واقع انتهایی ترین بخش تجهیزات درون گمانه در حین حفاری می باشد و وظیفه آن خرد کردن خاک و سنگ و آماده نمودن آن برای انتقال به سطح زمین بوسیلۀ فشار آب یا باد می باشد. بطورکلی سرمته هاعلاوه بر حفاری ممکن است قابلیت مغزه گیری هم داشته باشند. سرمته های توپر تیغه ای ، اوگرها و سرمته های حفاری شستشویی قابلیت مغزه گیری نداشته و تودۀ سنگ یا خاک مقابل خود را تا حدود زیادی و یا بطور کامل تخریب می نمایند .

هر یک از انواع سرمت ه های مذکور برحسب شکل، جنس و قابلیت هایی که دارند به اقسام مختلفی تقسیم می گردند:

۲-۷-۱- سرمته های حفاری شستشویی:

سرمته های حفاری شستشویی علاوه بر ضربه و دوران برای تخریب خاک و سنگ داخل گمانه از جت آب هم برای حفاری استفاده می کنند . علاوه بر این در برخی موارد جهت آب به چرخیدن مته هم کمک می کند .

۲-۷-۲- سرمته های حفاری دورانی بدون مغزه گیری:

سرمته هایی که برای حفاری دورانی مورد استفاده قرار می گیرند در حالت کلی به دو گروه سرمته های فاقد قابلیت مغزه گیری و سر مته های مغزه گیر تقسیم می شوند و سرمته های فاقد قابلیت مغزه گیری خود دارای دو دسته سرمته های تیغه ای و سرمته های توپر می باشند.

۲-۷-۳- سر مته های مغزه گیر:

سر مته های مغزه گیر در مواردی به کار گرفته می شوند که مغزه گیری از سنگ یا خاک در ضمن حفاری مورد نظر باشد . این سر مته ها به نحوی طراحی شده اند که شکل چنبره ای و استوانه توخالی دارند و مغزه سنگ بصورت استوانه ای در درون آنها واقع می شود . در برخی از گمانه ها ممکن است لازم باشد تمام طول گمانه مورد مغزه گیری واقع شود. در این صورت در حین حفاری همواره سر مته مغزه گیر به انته ای میله های حفاری متصل است .

به طور کلی سر مته های مغزه گیر به ۳ گروه اصلی تقسیم می شوند:

الف : سر مته های مغزه گیر الماسه

ب ;سر مته های مغزه گیر کاربیدی

ج :سر مته های دندانه اره ای

۲-۸- انتخاب نوع سرمته:

انتخاب نوع سرمته براساس ساختار و جنس تودۀ سنگ، خاک و همچنین سیال مورد نظر برای حفاری صورت می پذیرد . در واقع جنس سرمته بقدری باید سخت و مقاوم باشد که با توجه به سختی سنگ و فشار توده قادر به خرد کردن سنگ و یا مغزه گیری از آن باشد و از طرف دیگر از لحاظ اقتصادی هم استفاده از آن به صرفه بوده و سرعت حفاری با آن نیز متناسب با اهداف طرح باشد .سرمته های الماسه از سختی بالایی برخوردار بوده و در همه نوع سنگی قابلیت حفاری دارند . همچنین در مقایسه با سایر انواع سرمته در حین حفاری از سرعت بالاتری برخوردار هستند .با این حال به دلیل قیمت بالای آنها از این نوع سرمته صرفاً در حفاری مخصوصاً مغزه گیری از سنگ های سخت استفاده می گردد .سرمته های کاربیدی از سرمته های الماسه ارزان تر هستند و برای استفاده در سنگهای نرم تا سنگهایی با سختی متوسط هم کارائی خوبی دارند . با این حال سرمت ه های دندانه اره ای که معمولاً از سایر سرمته ها ارزانتر هستند صرفاً برای حفاری در خاک و سنگ های نرم کارائی دارند و از طرف دیگر سرعت حفاری با آنها در سطح پایینی قرار دارد .در میان سرمته های مغزه گیر سرمته های الماسه در مقا یسه با سایر سرمته ها در محدودۀ وسیعی از سنگهای با سختی متفاوت کارائی دارند و قادر به نمونه گیری در سنگهای نرم تا سنگهای سخت می باشند .البته در سنگهای بسیار سخت و یا در نهشته های دارای لایه های متناوب نرم و سخت هیچیک از سرمته های مذکور مغزه ایده آلی به دست نمی دهند . با این حال در مجموع سرمته های الماسه نسبت به سایر سرمته ها از سرعت حفاری و مغزه گیری بیشتری برخوردار هستند . ضمن آنکه تنش های پیچشی کمتری به نمونه وارد کرده و بر همین اساس تهیه مغزه های با طول بیشتر و قطر کمتر توسط این سرمته ها عملی تر است . قابل ذ کر است که سرمته های کاربیدی مغزه گیر نیز برای مغزه گیری از سنگهای نرم تا سنگهای با سختی متوسط کاربرد دارند .در واقع در مته های تیغه ای تیغه ها هیچگونه چرخش مستقلی ندارند و صرفاً با چرخش میله های حفاری دوران می نمایند . بر همین اساس این مته ها در حفاری سنگهای سخت با مشکل مواجه می شوند و تخریب تیغه ها با سرعت بیشتری صورت می پذیرد .در مقابل، سرمته های غلتکی و مخروطی که در آنها اجزاء برنده سرمته به صورت مستقل چرخش می نماید از انعطاف بیشتری در مواجه با سنگهای نیمه سخت و سخت برخوردار هستند و در این توده ها کارائی بالاتری دارند .جنس تیغه ها در سرمته های تیغه ای معمولاً از کربور تنگستن است و روی آنها منافذی تعبیه شده که سیال حفاری پس از عبور از این منافذ ق طعات خرد شده ته گمانه را به سطح زمین منتقل می کند . عمر سرمته های تیغه ای به دلیل کاربرد آنها در سنگهای نرم معمولاً بیش از ۳۰۰ متر برای هر سرمته می باشد .

فصل سوم

نمونه گیری از خاک و سنگ

نسخه پیش نویس

فصل سوم

۳– نمونه گیری از خاک و سنگ

۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا شرایط کلی نمونه گیری بیان شده و سپس نمونه گیری از خاک و سنگ بیان می گردد. نمونه اخذ شده از محل پروژه پس از حفاری تا عمق مورد نظر باید :

۱. نماینده زمینی باشد که از آن برداشت شده است.
۲. اندازه نمونه باید به قدر کافی بزرگ باش تا شامل محدوده وسیعی از اندازه های دانه ها ، آرایش ذرات ، ترک ها و شکست های موجود باشد .
۳. زمانی که هدف انجام آزمایش ها سنجش مقاومت و تراکم پذیری باشد نمونه ها به هیچ عنوان نباید در معرض دستخوردگی قرار گیرند.

۳-۲- طبقه بندی نمونه های خاک

معمولا ابعاد نمونه برای آزمایش باید حداقل بین ۵ تا ۱۰ برابر بزرگترین ذرات موجود در نمونه خاک باشد. بطور کلی قطر استاندارد برای مغزه های سنگ ۵۴ میلیمتر است . البته مغزه هایی با قطری بیشتر از مقدار مذکور، خردشدگی مکانیکی کمتر و بازیافت بالاتری دارند ولی هزینه بیشتری را بر طرح تحمیل می کند . توصیه شده است که در نواحی خرد شده و ضعیف حداقل طول مغزه گیری ۱،۵ متر و با توجه به احتمال خرابی و شکست طولی در نمونه های طویل حداکثر طول مغزه گیری ۳ متر باشد.

نسخه پیش نویس

A. طبقه بندی **Hvorslev**

یک طبقه بندی ساده با این دیدگاه که تمامی نمونه های خاک پیش از رسیدن به آزمایشگاه دچار مقداری دست خوردگی می گردند:

۱. نمونه های غیر بارز: که به د لیل حذف قسمت هایی از خاک یا سنگ در مطالعات ژئوتکنیکی مفید محسوب نمی شوند . روش تهیه این نوع نمونه به ۳ صورت زیر انجام می پذیرد:

- شستشو: پیشروی با فشار آب انجام شده
- چمچه زنی: استفاده از بیلچه یا پمپ ماسه به همراه ضربه هایی که خاک را در انتهای چاله در آب معلق می کند . بخش درشت دانه هابه سرعت ته نشین شده و ریزدانه معلق باقی می ماند و بعداز نمونه برداری نیز در چاله باقی می ماند.
- گمانه زنی دورانی باز : از روش آب پاشی برای کندن چاله استفاده می شود سرعت آب باید خیلی زیاد باشد که خود باعث فرسایش چاله خواهد شد.

۲. نمونه های بارز : از لایه های خاصی از خاک تهیه شده که شامل مواد معدنی یا ذرات موجود در سایر ترازها نمی باشد. دچار تغییر شیمیایی نشده اما امکان بازسازی و تغییر میزان رطوبت نمونه وجود دارد. درصورتی این نمونه ها بدست می آید که از نمونه گیرهای نا متناسب برای شرایط خاص موجود در خاک استفاده شود یا زمانی که پیش از آب بندی نمونه ها آنها را از کفشک برنده جدا کنند . در صورت استفاده از دستگاه برش خاک رس یا برداشتن سریع نمونه از نمونه گیر و حمل آن در محفظه های آب بندی نشده که اجازه ی تغییررطوبت نمونه را می دهدف نمونه های دست خورده بدست می آید.

۳. نمونه های دست نخورده : نمونه هایی که دست خوردگی خاک کم بوده و مشخصات فیزیکی خاک نظیر مقاومت ، تراکم پذیری و نفوذپذیری ، توسط تست های آزمایشگاهی تعیین می گردد.

B. طبقه بندی **Rowe**

این طبقه بندی تاکید زیادی بر متعادل کردن آب در چاله دارد. این امر به معنای آن است که در زمان وقوع شرایط آرتزین باید نمونه های نوع ۱ یا ۲ با استفاده از دستگاه حفاری نصب شده به روی یک سکو بالای سطح زمین یا با گل حفاری تهیه گردد.

شماره رده	روند نمونه گیری معمول	هدف	مشخصات لازم خاک
۱	نمونه گیر پیستونی جدارنازک با متعادل کردن آب	داده های آزمایشگاهی از خاک های برجا	مشخصات بازسازی شده بافتار میزان رطوبت چگالی و تخلخل تراکم پذیری پارامترهای مقاومت موثر پارامترهای مقاومت کل نفوذپذیری ضریب تحکیم
۲	نمونه گیر فشاری جدارنازک یا جدار ضخیم با متعادل کردن آب	داده های آزمایشگاهی از خاک های برجا	مشخصات بازسازی شده بافتار میزان رطوبت چگالی و تخلخل تراکم پذیری پارامترهای مقاومت موثر پارامترهای مقاومت کل
۳	نمونه گیر فشاری جدارنازک یا جدار ضخیم با متعادل کردن آب در خاک با نفوذپذیری بالا	آزمایش با فتار و داده های آزمایشگاهی از خاک های بازسازی شده	مشخصات بازسازی شده بافتار A ۱۰۰٪ بازیابی پیوسته B ۹۰٪ باز یابی متوالی
۴	نمونه های فله ای و ظرفی	داده های آزمایشگاهی از خاک های بازسازی شده	مشخصات بازسازی شده
۵	شستشو	فقط ترتیب تقریبی لایه ها	

نسخه پیش نویس

C. طبقه بندی بریتانیا و **BS 5930**

مطالعات انجام شده در بریتانیا ، نمونه ها را به دسته های زیر طبقه بندی می کند:

۱. نمونه های دست خورده

- نمونه های دست خورده کوچک (ظرفی)
- نمونه های دست خورده بزرگ (کیسه ای)

۲. نمونه های دست نخورده :

- نمونه های بلوکی
- نمونه های باز
- نمونه های پیستونی
- مغزه های دورانی (مغزه گیری)

تمامی این نمونه ها می تواند به صورت نمونه های بارز باشد.

از سوی دیگر نمونه ها را به دو دسته معرف و غیر معرف تقسیم می کنند

نمونه های شسته شده که در آنها ذرات خاک بوسیله جریان آب شسته شده و ذرات درشت نیز در اثر تماس با سرمته خرد شده اند مثالی برای نمونه های غیر معرف هستند .همچنین در توده های سنگی نمونه ای که از قسمت سالم و بدون درز و ترک سنگ اخذ می گردد را نمونه بکر یا سالم می گویند نمونه های دست خورده صرفاً برای انجام آزمایشهای دانه بندی، حدود اتربرگ، تشریح نظری، تعیین حد رطوبت، هیدرومتری و آزمایشهای تعیین خواص شیمیایی خاک مناسب هستند . با این حال حتی در مواردی ممکن است روش حفاری و یا نمونه گیری منجر به تغییر درصد رطوبت نمونه و یا شسته شدن برخی از عناصر خاک گردد . در این موارد نمونه غیر معرف محسوب شده و صحت انجام آزمایشهای مذکور نیز ممکن است خدشه دار شود.

۳-۳- مقدار نمونه

ابعاد نمونه باید حداقل ۵ تا ۱۰ برابر بزرگترین ذرات موجود در نمونه خاک بوده و وزن آن نیز باید کفاف انجام آزمایش های مورد نظر را بدهد .قطر استاندارد برای مغزه گیری در سنگ ۵۴ میلیمتر می باشد .حدقل قطر و وزن نمونه خشک خاک بر اساس نوع آزمایش در جدول زیر آورده شده است.

حداقل قطر و وزن مخصوص نمونه ها برحسب نوع آزمایش برای مصالح عبوری از الک شماره ۴ (US Army,2001)

	نام آزمایش	حداقل قطر نمونه (cm)	حداقل وزن خشک (kg)		نام آزمایش	حداقل وزن خشک (kg)
نمونه دست نخورده	وزن واحد حجم	۷/۶	-	نمونه های باز سازی شده	تراکم استاندارد	۱۳/۵
	نفوذپذیری	۷/۶	-		نفوذپذیری	۰/۹
	تحکیم	۱۲/۷	-		تحکیم (به قطر۱۰/۲ cm)	۰/۹
	سه محوری	۱۲/۷	-		برش مستقیم	۰/۹
	تک محوری محدود نشده	۷/۶	-		سه محوری (به قطر ۳/۶ cm)	۰/۹
	برش مستقیم	۱۲/۷	-		سه محوری (به قطر ۷/۲ cm)	۴/۵
نمونه دست خورده	درصد آب نمونه	-	۰/۲			
	حدود اتر برگ	-	۰/۲			
	حد انقباض	-	۰/۲			
	وزن مخصوص	-	۰/۱			
	دانه بندی	-	۰/۲			

۳-۴- روشهای نمونه گیری

روش های گرفتن نمونه به دو گروه کلی استفاده از روش های مختلف در شفتها و چاهک ها و استفاده از روش های رانشی و دورانی در گمانه ها تقسیم می شوند.

۳-۴-۱- نمونه گیری از چاهکها

در شفتها و چاهکها از نمونه گیری بلوکی و یا رانشی استفاده می شود. در خاکهای سیمانته شد و پایدار تحت وزن خود میتوان از روش بلوکی جهت نمونه گیری بهره برد.نمونه گیری بلوکی در اعماق زیاد برای رسهای عادی تحکیم یافته کاربرد ندارد زیرا برای این خاکها در انتهای گمانه تورم رخ می دهد. نمونه گیر شربروک یک نمونه گیر بلوکی می باشد که مشکلات نمونه گیری بلوکی را به حداقل رسانده و نمونه ای با کیفیت بالا ارائه می دهد. لازم به ذکر است که این روش یک روش سخت و زمان بر است و تنها در مواقعی که نمونه گیری دست نخورده از رس های نرم و حساس موردنظر است کاربرد دارد.

۳-۴-۲- نمونه گیری از گمانه :

تحقیقات محلی ژئوتکنیک به روش گمانه زنی باید براساس استانداردها و مقررات ملی و آئین نامه های معتبر انجام شود. در این خصوص در جدول زیر به شماره استانداردهای ASTM و AASHTO مربوط به تحقیقات محلی اعم از گمانه زنی و آزمایش های صحرایی اشاره شده است. نسخ این استانداردها به عنوان مرجع باید در دفتر آزمایشگاه های ژئوتکنیک موجود باشد.

نسخه پیش نویس

FREQUENTLY-USED STANDARDS FOR FIELD INVESTIGATIONS

Standard		*Title*
AASHTO	*ASTM*	
M 146	C 294	Descriptive Nomenclature for Constituents of Natural Mineral Aggregates
T 86	D 420	Guide for Investigating and Sampling Soil and Rock
-	D 1194	Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load on Spread Footings
-	D 1195	Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Airport and Highway Pavements
-	D 1196	Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements
T 203	D 1452	Practice for Soil Investigation and Sampling by Auger Borings
T 206	D 1586	Standard Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils
T 207	D 1587	Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils
T 225	D 2113	Practice for Diamond Core Drilling for Site Investigation
M 145	D 2487	Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes
-	D 2488	Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)
T 223	D 2573	Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil
-	D 3550	Practice for Ring-Lined Barrel Sampling of Soils
-	D 4220	Practice for Preserving and Transporting Soil Samples
-	D 4428	Test Method for Crosshole Seismic Test
-	D 4544	Practice for Estimating Peat Deposit Thickness
-	D 4700	General Methods of Augering, Drilling, & Site Investigation
-	D 4719	Test Method for Pressuremeter Testing in Soils
-	D 4750	Test Method for Determining Subsurface Liquid Levels in a Borehole or Monitoring Well (Observation Well)
-	D 5079	Practices for Preserving and Transporting Rock Core Samples
-	D 5092	Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells in Aquifers
-	D 5777	Guide for Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation
-	D 5778	Test Method for Electronic Cone Penetration Testing of Soils
-	D 6635	Procedures for Flat Plate Dilatometer Testing in Soils
-	G 57	Field Measurement of Soil Resistivity (Wenner Array)

۳-۴-۳- نمونه گیرهای رانشی

در روش رانشی نمونه گیر بصورت فشاری و بدون دوران درون خاک رانده می شود و خاک را با نفوذ در ان جابجا می کند. از اینرو این نمونه گیرها دارای نوکهای تیز و برنده می باشد.

حجم خاک متناظر با حجم جدار نمونه گیر در خاک اطراف جابجا و فشرده می شوند.

نمونه گیرهای رانشی به دو گروه تقسیم می شوند :

i. نمونه گیرهای رانشی ته باز
ii. نمونه گیرهای رانشی پیستونی

نمونه های پیستونی می توانند با نفوذ به درون خاک نرم به سطح دلخواه از نمونه گیری برسند، در صورتی که نمونه گیرهای رانشی ته باز به محض تماس با خاک اجازه ورود خاک را می دهند.

از معایب نمونه گیرهای رانشی ته باز می توان به عدم پاکسازی کامل گمانه در هنگام نمونه گیری اشاره کرد ، ریزش دیواره گمانه پس از تمیز کردن بدین معناست که نمونه بدست آمده بطور خالص دست نخورده نمی باشد. عیب دیگر آن دستخوردگی نمونه در صورت بزرگ بودن نسبت مساحت (AR) می باشد

از مزایای این نوع نمونه گیری ارزان و ساده بود ن می باشد . نوع جدار ضخیم آنها بدلیل داشتن نسبت مساحت بزرگتر نسبت به نوع جدارنازک، دستخوردگی نمونه ها در آنها بیشتر است (مثل نمونه گیر مشهور u100).البته نوع جدار نازک این نمونه گیرها آسیب پذیر تر بوده و ممکن است در هنگام نمونه گیری در خاکهای سخت و سنگی دچار کج شدگی ، کند شدن و یا پارگی لبه های برشی شود (مثل نمونه گیر معروف شلبی).

نمونه گیر لاوال جدارنازک است که برای نمونه گیری از خاکهای بسیار حساس کاربرد دارد. بدلیل گران بودن و زمان بر بودن برای نمونه گیری های معمول توجیه ندارد و تنها کاربرد آن در رس های نرم و حساس می باشد .

۳-۴-۴- نمونه گیرهای پیستونی

نمونه گیر های پیستونی دارای یک پیستون در لوله نمونه گیر می باشند که نسبت به لوله نمونه گیر در مرحله نمونه گیری بالا می آید. از جمله اهداف طراحی پیستون در نمونه گیر جلوگیری از ورود خاک به لوله نمونه گیر قبل از رسیدن به موقعیت نمونه گیری، جلوگیری از اتلاف نمونه با ایجاد یک هوای فشرده در بالای نمونه که هرگونه لغزش نمونه بیرون

در نمونه گیر های پیستونی ثابت یک پیستون بصورت ثابت در نوک لوله گیردار است و بعداز رسیدن به سطح مورد نظر باین پیستون آزاد شده و دوباره در سطح خاک گیردار می شود تا عمل نمونه گیری انجام شود.

۳-۴-۵- نمونه گیرهای دورانی

در نمونه گیرهای دورانی برخلاف نمونه گیرهای رانشی دارای لبه های برشی نسبتا ضخیم بوده ,و درحالیکه دوران می کند به آرامی بسمت پایین فشار داده می شود.اصلی ترین روش برای نمونه گیری از سنگها استفاده از نمونه گیرهای دورانی می باشد. استفاده از این نمونه گیرها به انواع رس های سخت و سنگهای نرم و هوازده بسط داده شده است.

روشهای اصلی نمونه گیری از زمین که توسط غالب مراجع معتبر کاوشهای صحرایی معرفی شده است، شامل موارد زیر می باشد:

۱. نمونه گیری دستی (فله ای)
۲. نمونه گیری بلوکی
۳. نمونه گیری با اوگر
۴. نمونه گیری با نمونه گیرهای تیوبی
۵. نمونه گیری با کربارل

روش های تهیه نمونه می تواند صدمات مهمی به خاک وارد کند . استفاده از نمونه گیر باز با دیواره های ضخیم در خاک های سخت به همراه ضربات متوالی چکش موجب شکستهای شدید در خاک شده و ظاهر ان را تبدیل به شن زاویه دار می کند.چکش زنی روشی است که برای وارد کردن لوله های باز به داخل زمین استفاده می گردد و معمولا با دریل های ضربه ای سبک همراه می باشد عمل چکش زنی می تواند در انتها و یا در بالای چاله انجام شود . در روش اول لوله نمونه گیر از وزنه توسط یک اتصال لرزشی جدا می گردد . با حرکات دائمی کابل کشیدن و رهاکردن میل وزنه ، لوله نمونه گیر تکان های جانبی داشته باشد و نمونه دچار شکستگی می گردد. اگر میل وزنه خیلی بالا کشیده شود موجب بالا آمدن لوله نمونه گیر و واردشدن کشش به نمونه خواهد شد. اگر عمق چاله زیاد باشد می توان از اسپیسرهایی (تقسیم کننده) برای کاهش کمانش میله ها دراثر انتقال انرژی چکش به انتهای چاله استفاده کرد. چکش زنی روشی ارزان بوده اما نمونه هایی با کیفیت پایین را به دست می دهد. همچنین روش تک ضربه و یا استفاده از انفجار انرژی ورودی زیادی دارد که کنترل آن مشکل می باشد. یکی از مشکلات این روش ها فرورفتن بیش از حد نمونه گیر در خاک و تراکم مصالح در اثر آن می باشد .

بهترین روش عملی برای تهیه نمونه ،فشار ثابت می باشد. اغلب مته های مدرن یک نیروی ثابت رو به پایین بدون وقفه وارد می کند .

عوامل اصلی دست خوردگی درآزمایشگاه خاک :

- خارج کردن نادرست نمونه در اثر فشار بیش از حد به خاک
- استفاده از لوله های غیر استاندارد برای تهیه نمونه های
- آسیب دیدن ساختار خاک در اثر روش های غیر اصولی اشباع کردن و باز تحکیم.

اثرات دست خوردگی نمونه در حین نمونه گیری به هر میزان که باشد مقاومت زهکشی نشده و تراکم پذیری را تحت تأثیر قرار خواهد داد. به علاوه اثرات شیمیایی می تواند موجب تغییر خمیری و حساسیت نمونه خاک گردد.

❖ **اگر نمونه های خاک از بین می روند روش های ساده ای برای بهبود بازیابی وجود دارد:**

i. وقفه زمانی بعد از فروبردن نمونه گیر وقبل از بیرون کشیدن آن امکان تورم خاک در داخل لوله را داده و چسبندگی رس های بیش تحکیم یافته متورم به جداره لوله را افزایش می دهد.

ii. اندکی دنده ای کردن جدار لوله موجب می شود که نمونه خاک به صورت مایل نسبت به جدار قرار گرفته و در نتیجه حفظ خاک های چسبنده و غیر چسبنده داخل لوله بهتر انجام گیرد ، هرچند که این کار دست خوردگی خاک را افزایش می دهد.

iii. استفاده از نگهدازنده مغزه (گیره های مغزه) در کفشک برنده در لوله های نمونه گیر باز سبب بهبود بازیابی نمونه می شود . نگهدارنده های مغزه اغلب موجب دست خودگی های شدیدی در اطراف لبه های نمونه می شود و باید نسبت سطح نمونه گیر زیاد باش تا این اثر کاهش یابد.

۳-۵- دستخوردگی نمونه ها

بطور کلی عوامل موثر بر دست خوردگی نمونه ها به پنج دسته تقسیم می شوند:

۱. دست خوردگی های ناشی از نوع و مشخصات نمونه گیر
۲. دست خوردگی های ناشی از روش وارد کردن نمونه گیر در خاک
۳. دست خوردگی های زمان حمل و نگهداری نمونه
۴. دست خوردگی های ناشی از تغییر وضعیت تنش های خاک
۵. دست خوردگی های ناشی از بریدن نمونه برای انجام آزمایش

در این میان دست خورده ترین نمونه ها که در واقع کم ارزشترین نمونه ها نیز می باشند، نمونه های اخذ شده از خرده ریزه های حفاری به روش دورانی با سرمته توپر و یا روش قدیمی شستشویی است . این نمونه ها که به نمونه شسته شده معروف هستند حتی برای دانه بندی مکانیکی نیز مناسب نیستند.

۳-۵-۱- دست خوردگی های ناشی از نوع و مشخصات نمونه گیر تیوبی

چهار خصوصیت زیر را اصلی ترین عوامل موثر در میزان دست خوردگی نمونه ناشی از نوع و مشخصات نمونه گیر معرفی کرده است:

a) نسبت مساحت نمونه گیر AR
b) زاویه تیزی نوک نمونه گیر

c) صافی جدار نمونه گیر ICR

d) نسبت طول به قطر نمونه گیر (فاصله آزاد داخلی)

هر چه AR کمتر باشد دست خوردگی نمونه نیز کمتر بوده ولی نمونه گیر تردتر و شکننده تر می شود (بین ۱۰ الی ۳۰ درصد).

به منظور کاهش نسبت مساحت و افزایش قابلیت نفوذ نمونه گیردر زمین، لبه های آن را زاویه دار (پخ شده) باشد.

حداکثر زاویه پخی را ۶۰ درجه و حداکثر ضخامت لبه را ۰,۳ میلیمتر و در خاکهای دانه ای ضخامت لبه را ۱۰٪ اندازه دانه های خاک در نظر گرفته می شود.

صافی و تمیزی جدار نمونه گیر پارامتر موثر دیگری در دست خوردگی نمونه است . باید جدارداخلی استوانه های به کار رفته با رنگ لاکی یا ضد زنگ پوشش داده شود و یا از استوانه های ضد زنگ نظیر استوانه های برنجی استفاده گردد. برای کاهش دست خوردگی مذکور جدار داخلی نمونه گیر باید به طور مرتب پرداخت گردد . باید توجه داشت روغن کاری جدار مذکور جهت خروج ساده نمونه از نمونه گیر اقدام مطلوبی نیست و میزان دست خوردگی نمونه را افزایش می دهد.

نسبت طول استوانه نمونه گیر به قطر(L/D) خاک اجازه می دهد که مقداری تورم و کرنش جانبی در اثر کاهش تنش افقی داشه باشد، اما چسبیدن خاک به داخل لوله نامطلوب تر است نسبت طول به قطر نمونه گیر برای نمونه گیری از خاکهای درشت دانه بین ۵ تا ۱۰ و برای خاکهای چسبنده بین ۱۰ تا ۲۰ انتخاب شود.

۳-۵-۲- دست خوردگی های ناشی از روش وارد کردن نمونه گیر در خاک

روشهای نمونه گی را به صورت ضربه ا ی بیشترین دست خوردگی و روشهای نمونه گیری را بطور پیوسته کمترین دست خوردگی در نمونه را ایجاد می کنند .

بهتر است سرعت ورود نمونه گیر به درون زمین معادل ۲۵ میلیمتر در ثانیه باشد.

۳-۵-۳- دست خوردگی های ناشی از تغییر وضعیت تنشهای خاک

در این ارتباط می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فشارهای افقی و قائم محلی وارد بر نمونه پس از اخذ نمونه از روی آن برداشته شده و مجددا در آزمایشگاه اعمال می گردد . تخمین این سیکل باربرداری و بارگذاری ممکن است منجر به تغییر خواص مصالح گردد.

❖ جهت لایه بندی و تشکیل ساختار نمونهٔ محلی در میزان بارهای وارد بر آن تاثیر دارد . ممکن است زاویه بین بار و لایه بندی نمونه در محل و آزمایشگاه متفاوت باشد.

❖ مسیر تنشهای وارده بر نمونه باید منطبق بر مسیر تنش محلی باشد . در واقع نه تنها مقدار و جهت تنشهای وارده به یک نمونه اهمیت دارد، بلکه مسیر طی شده در صفحه تنشها برای دستیابی به مقادیر تنش اهمیت دارد . در همین ارتباط پله ای یا پیوسته بودن روش اعمال بار بر نتایج آزمایش نیز موثر خواهد بود.

در خاک دانه ای نفوذ پذیری بالاست و در نتیجه ارتعاش و نیروهای فشاری وارد برخاک در زمین و یا در لوله نمونه گیری می تواند منجر به تغییر چگالی گردد. تراکم خاک سبب تغییر پارامتر های موثر مقاومت و سختی در خاک می گردد.

بلندشدگی انتها ، ایجاد رگاب و حفره شدگی خاک در اثر آزادسازی تنش ایجاد می گردد. در زمانی که مقدا ر آزادسازی تنش کل در انتهای چاله حفاری بسیار بیشتر از مقاومت برشی زهکشی نشده خاک باشد ممکن است جریان خمیری در خاک به سمت بالای چاله اتفاق افتد . این پدیده می تواند در زمان بیرون کشیدن لوله نمونه گیری از خاک در انتهای چال روی دهد.

۳-۵-۴- دست خوردگی های زمان حمل و نگهداری نمونه

برخی از عوامل افزایش دست خوردگی نمونه در فاصله نمونه گیری تا آزمایشگاه عبارتند از:

a. کاهش رطوبت نمونه در اثر ناقص بودن شرایط موم اندود و یا وضعیت دمای نگهداری

انتقال رطوبت در داخل نمونه می تواند تغییرات زیادی نظیر مقاومت زهکشی نشده و تراکم پذیری ایجاد کند. برای مثال مقاومت برشی اندازه گیری شده بلافاصله بعداز نمونه گیری نسبت به مقاومت نمونه منتقل شده به آزمایشگاه و نمونه انبارشده متفاوت خواهد بود. به علت بازسازی شدن نمونه و انتقال رطوبت در آن رطوبت موجود در ۵ سانتی متر خارجی نمونه های رسی معمولا ۳ الی ۴٪ کمتر از مرکز نمونه هاست . برای جلوگیری از این امر، کازاگرانده توصیه می کند که بلافاصله پس از خارج کردن نمونه از چاله حفاری باید لایه خارجی دست خورده را از روی آن تراشید.

b. تغییر وضعیت نمونه در اثر یخبندان

یخ در داخل ترک ها افزایش حجم داده و نمونه به تدریج دچار شکست می گردد. بنابراین هرگز نباید دمای محل نگه داری نمونه ها به زیر ۴ درجه سلسیوس برسد.

c. وارد آمدن ضربه و یا ارتعاش به نمونه

ارتعاش ناشی از جمل نمونه به آزمایشگاه می تواند موجب کاهش مقاومت نمونه گردد ، بخصوص در رس های ماسه ای یا سیلتی با نگهداری قائم نمونه ها به روی یک بستر ترکم پذیر همانند قوم می تواند این اثرات نا مطلوب را کاهش دهد.

d. واکنش شیمیایی بین ذرات نمونه در دوران نگهداری

خاک های اسیدی قلیایی و نمک دار در معرض این نوع واکنش ها قرار دارند بخصوص اگر لوله و سرپوش های آن از فلزات مختلفی ساخته شده باشد .

۳-۵-۵- دست خوردگی ناشی از بریدن نمونه برای انجام آزمایش

برای انجام هر آزمایشی سر و ته نمونه باید بریده شده و قطر آن متناسب با قطر تعریف شده برای آزمایش اصلاح شود . که موجب دست خورد گی نمونه می شود.

۳-۶- محافظت و نگهداری از نمونه های دست نخورده خاک

نمونه گیری مناسب انتقال نمونه و روشهای انبار کردن نمونه جهت به حداقل رساندن دست خوردگی از موارد بسیار مهم است. قبل از انجام نمونه گیری ، لوله های نمونه گیری (باید از نظر شکل ظاهری) تیوبها خم نشده و لبه های آنها آسیب ندیده باشند و بخشهای داخلی از نظر خوردگی و زنگ زدگی کنترل شوند. نمونه ها باید در مقابل درجه حرارتهای بالا و تابش مستقیم خورشید محافظت شوند .در چنین موارد ی می توان با استفاده از پارچه های کیسه ای مرطوب یا مواد مشابه دیگر نمونه ها را پوشاند. در زمستان باید نمونه را از یخ زدگی در زمان انتقال آن به آزمایشگاه محافظت نمود . تا حد امکان باید تیوبهای جدار نازک به حالت عمودی نگه داشته شوند به نحوی که قسمت فوقانی نمونه به سمت بالا قرار گیرد . خارج کردن خاک از نمونه گیر تیوبی در محل عملی نامطلوب است و اغلب باعث تورم و ایجاد دست خوردگی بالا در نمونه می شود . بدون شک رها شدن تنشها به نمونه این اجازه را می دهد که از خود رفتار نرم شوندگی بروز داده و افزایش حجم دهد و در چنین شرایطی نمونه ها بیشتر مستعد دست خوردگی در حین انتقال یافتن به آزمایشگاه خواهند بود. تجربه نشان می دهد که پلاستیک نسبت به فویل تاثیرکمتری دارد . بنابر این توصیه شده است که ابتدا نمونه های خاک اخذ شده جهت محافظت در صفحات پلاستیکی پیچیده شوند و سپس یک لایه فویل دور آنها پیچیده شود .هر چند که مجددا تاکید میشود نمونه ها بهتر است از تیوبهایی که داخل آنها هستند بیرون آورده نشوند تا مقدار تورم، دستخوردگی و موارد مربوط به حمل و نقل آنها به حداقل ممکن برسد.

۳-۷- نمونه گیری دست خورده از خاک

روشهای اخذ نمونه دست خورده شامل نمونه گیری دستی، نمونه گیری با اوگرهای پره دار و سطلی، نمونه گیری با نمونه گیر جدا شونده SPT و برخی روشهای پیشرفته نمونه گیری نظیر نمونه گیری به روش آزمون نفوذ حجیم (LPT) می باشد.

۳-۷-۱- نمونه گیری دستی

ساده ترین روش باید ابتدا چاله ای به روش دستی یا ماشینی حفر شده و سپس از جدار آن در اعماق مورد نظ ر نمونه گیری گردد. برای نمونه گیری از منابع قرضه مورد استفاده در ساختمان یک سد و یا قشر زیر اساس یک بزرگراه معمولاً چاله هایی به عمق ۳ تا ۵ متر حفاری شده و نمونه های ۲۵ تا ۵۰ کیلویی به آزمایشگاه ارسال می گردد .علاوه بر آزمایشهای مذکور آزمایشهای مقاومتی و نفوذپذیری نیز به طور معمول بر روی نمونه های باز سازی شده انجام می شود.

۳-۷-۲- نمونه گیری بلوکی

برای انجام نمونه برداری بلوکی حفاری دستی خاک انجام می شود و خاک به شکل بلوکم موردنظر در می آید . سپس این بنلوک با لایه های پارچه ا ی، مومی و نوارهای چسبنده پوشانده می شود تازمانی که از ز مین بریده شده و در جعبه سخت قرار بگیرید.

نمونه های بلوکی با ۲ میلیمتر پارافین جامد برس زنی شده و با پارچه توری یا نوار سلفون پوشانده می شود و با فوم پلی اتیلن روکش می شود. بهترین روش آب بندی برای نمونه های لوله ای استفاده از در پوش های پلاستیکی محکم است که البته ممکن است درزهای هوایی در درپوش موجود باشد که سبب از دست رفتن رطوبت گردد. باید فاصله میان نمونه و درپوش پر گردد . این کار هم به جلوگیری از خروج رطوبت کمک می کند و هم از لغزش نمونه در لوله جلوگیری می شود. نفوذ پارافین به داخل نمونه می تواند از ارزش آن نمونه بکاهد . می توان لابه اول پارافین را با برس به سطح نمونه مالید و به روی آن توری یا فویل کشیده و سپس لایه های بعدی پارافین را اضافه کرد. شرایط انبار نمونه ها نیز اهمیت دارد همان طور که در بالا مشاهده شد آب بندی با پارافین بعداز چند ماه اثر خود را از دست می دهد . نمونه ها در محلی خنک با دمای زیر ۳۰ در جه سلسیوس انبار شود.

نمونه برداری بلوکی یک روش عالی برای تضمین جلوگیری از تغییرشکل برشی در طی نمونه برداری است اما نمونه های حاصل از این روش ممکن است در اثر تورم تنش های موثر یکسانی با وضعیت طبیعی زمین داشته باشد. بنابراین مقاومت و تراکم پذیری خاک ممکن است تغییر کند.

۳-۷-۳- نمونه گیری دست خورده با اوگر

هر چند که ممکن است در حفاری های عمیق مصالح حفاری شده توسط اوگرها در حین بالا آمدن با هم مخلوط شده و تعیین عمق آنها اندکی مشکل شود، با این حال سرعت حفاری و نمونه گیری با این دستگاه قابل توجه بوده و در مواردی که حجم زیادی از نمونه

برای آزمایشهای آزمایشگاهی مورد نیاز است این روش بر نمونه گیری دستی ارجحیت دارد. اوگرهای پره بلند و اوگرهای سطلی از جمله روشهای مناسب برای نمونه گیری دست خورده هستند.

۳-۷-۴- نمونه گیری دست خورده با نمونه گیرهای جدا شونده

اصطلاح نمونه گیر جداشونده به نمونه گیرهایی اطلاق می شود که جدار آنها به دو نیم تقسیم شده و خاک دست خورده از درون هر یک از دو نیمه خارج می شود متداول ترین روش نمونه گیری دست خورده از درون گمانه می باشد و نوع معمول آن نمونه گیر آزمایش استاندارد SPT است تدابیری که در این نمونه گیرها برای جلوگیری از خروج نمونه های غیر چسبنده از درون نمونه گیر در حین بالا کشیدن آن از درون گمانه در نظر گرفته شده است شامل استفاده از ضامن در پایین نمونه گیر و توپی در بالای آن می باشد . سوپاپ توپی در بالای نمونه قرار گرفته و هنگام بالا کشیدن نمونه گیر بسته می شود . بدین ترتیب از خارج شدن نمونه تحت اثر فشار آب وارد بر بالای آن جلوگیری می شود .همچنین بواسطه عملکرد توپی، اگر نمونه بخواهد تحت اثر وزن خود به بیرون بلغزد در بالای آن خلاء بوجود آمده و از افتادن آن جلوگیری می شود نمونه های حاصله از این نمونه گیر صرفاً برای انجام آزمایش های شاخص و شناسایی کلی جنس خاک به کار می آیند. در برخی از مناطق دنی ا انواع غیر استاندارد آزمون نفوذ با اندازه نمونه گیر و چکش بزرگ برای نمونه گیری از خاکهای درشت دانه و آبرفتهای حاوی قلوه سنگ ابداع شده است که از آن جمله می توان به می SPTآزمون نفوذ حجیم ۱ اشاره کرد . این آزمون دارای چکش ۱۶۰ کیلویی و نمونه گیری بزرگتر از باشد و برای نمونه گیری از شن و ماسه مناسب است. نمونه گیری بوسیله نمونه گیر جدا شونده در مواردی به کار می رود که تعیین جنس لایه های زیر سطحی، طبقه بندی، خصوصیات خمیری و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک مورد نظر باشد.

۳-۸- نمونه گیری دست نخورده از خاک

نمونه گیری دست نخورده در خاک درشت دانه مشکل تر از نمونه گیری در ریزدانه و چسبنده بوده و انجام آن نیاز به نمونه گیری پیشرفته تری دارد. هرچند در خا های درشت دانه با اندازه گیری دانسیته صحرایی و آزمایش برروی نمونه های بازسازی شده می توان مشخصات واقعی خاک را تا حدودی اندازه گیری نمود . در جدول زیر انواع نمونه گیری دست نخورده آورده شده است.

COMMON SAMPLING METHODS

Sampler	Disturbed / Undisturbed	Appropriate Soil Types	Method of Penetration	% Use in Practice
Split-Barrel (Split Spoon)	Disturbed	Sands, silts, clays	Hammer driven	85
Thin-Walled Shelby Tube	Undisturbed	Clays, silts, fine-grained soils, clayey sands	Mechanically Pushed	6
Continuous Push	Partially Undisturbed	Sands, silts, & clays	Hydraulic push with plastic lining	4
Piston	Undisturbed	Silts and clays	Hydraulic Push	1
Pitcher	Undisturbed	Stiff to hard clay, silt, sand, partially weather rock, and frozen or resin impregnated granular soil	Rotation and hydraulic pressure	<1
Denison	Undisturbed	Stiff to hard clay, silt, sand and partially weather rock	Rotation and hydraulic pressure	<1
Modified California	Disturbed	Sands, silts, clays, and gravels	Hammer driven (large split spoon)	<1
Continuous Auger	Disturbed	Cohesive soils	Drilling w/ Hollow Stem Augers	<1
Bulk	Disturbed	Gravels, Sands, Silts, Clays	Hand tools, bucket augering	<1
Block	Undisturbed	Cohesive soils and frozen or resin impregnated granular soil	Hand tools	<1

برای شناسایی رفتار خاک ، تعیین مقاومتهای برشی و فشاری و خواص تحکیمی خاک از انواع نمونه گیرهای دست نخورده استفاده می گردد:

۳-۸-۱- نمونه گیر جدار نازک

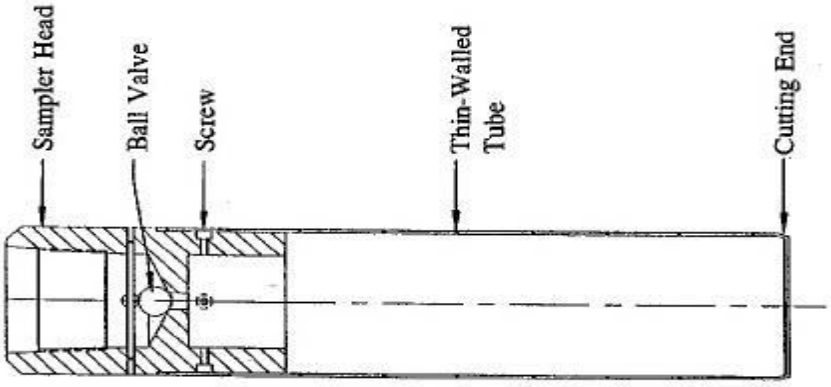
متداولترین روش برای نمونه گیری از خاکهای نرم تا سخت چسبنده

۱. استوانه جدار نازک، که دارای لبه تیزی بوده و نمونه را در خود جا می دهد.
۲. شیر توپی ، که از طریق دریچه هایی خروج سیال حفاری و هوا را از استوانه تسهیل می کند.
۳. کلاهک نمونه گیر، که نمونه گیر را به میله های حفاری متصل می کند.

نسبت مساحت این نمونه گیر حدود ۹٪ است و در شمار نمونه گیرهای مناسب برای تهیه نمونه دست نخورده محسوب می شود.

در حالت کلی قطر نمونه گیرهای جدار نازک بین ۵۱ تا ۷۶ میلیمتر و طول آنها بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ میلیمتر است . قطرهای بزرگتر زمانی کاربرد دارند که خاک درشت دانه است و یا نمونه گیری با کیفیت بالا و دست خوردگی کمتری مورد نظر باشد نمونه گیر جدار نازک فاقد ضامن تحتانی بوده و اصولاً برای خاکهایی مناسب است که دارای چسبندگی لازم برای جدا نشدن نمونه از جدار نمونه گیر در حین بالا کشیدن دستگاه نمونه گیر از گمانه با شند برای نمونه گیری از

خاکهای سخت بهتر است که از فولاد کربن دار با روپوش گالوانیزه استفاده برای نمونه گیری از خاک سواحل و در شرایط آب زیرزمینی، لوله های فولادی ضد زنگ مناسب تر می باشند.



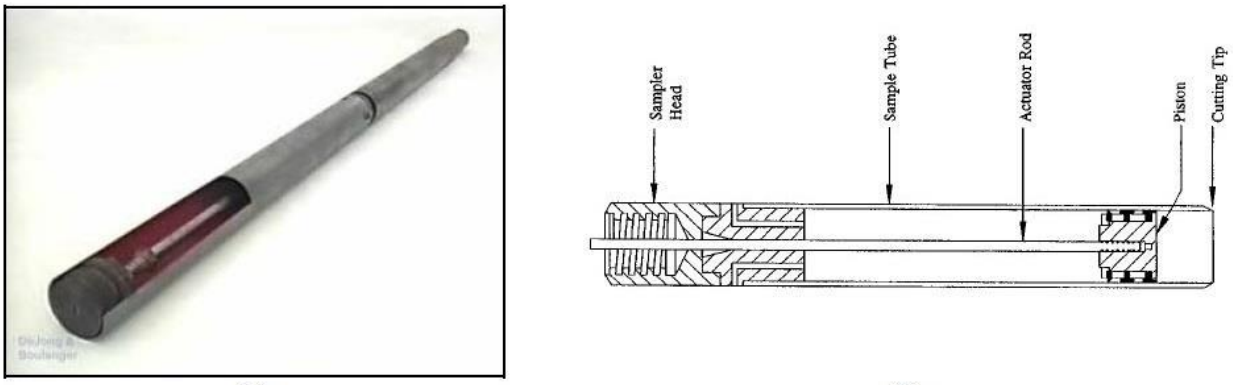
Schematic of Thin-Walled Shelby Tube
(After ASTM D 4700).

۳-۸-۲- نمونه گیر پیستون ثابت

نوع اصلاح شده نمونه گیرهای جدار نازک است که به انتهای میله حفاری متصل شده و برای نمونه گیری به درون گمانه فرستاده می شود.

۱. جدار نمونه گیر ، که متشکل از یک میله ا ستوانه ای نوک تیز فولادی و یا برنجی است و
۲. نمونه را در خود جا می دهد.
۳. پیستون، که در انتهای نمونه گیر واقع شده و کیفیت نمونه گیری را افزایش می دهد.
۴. میله پیستون ، که میله ای باریک است و بین پیستون و کلاهک نمونه گیر قرار می گیرد.
۵. کلاهک نمونه گیر ، که نمونه گیر را به میله های حفاری متصل می کند.

روش نمونه گیری با این ابزار بدین طریق است که پس از اتصال نمونه گیر به میله های حفاری و ارسال آن به انتهای گمانه، میله پیستون نسبت به سطح زمین ثابت نگه داشته شده و استوانه جدار ن ازک با سرعت یک چهارم تا یک دوم فوت بر ثانیه با ضربات پیوسته به درون زمین فرو می رود. یکی از مزیت های اصلی نمونه گیرهای پیستونی نسبت به نمونه گیرهای جدار نازک آن است که پیستون ثابت انتهای نمونه گیر از ورود سیال و خاکهای دست خورده و آلوده به نمونه گیر
جلوگیری می کند و بدین ترتیب درصد بازیافت نمونه افزایش می یابد . همچنین کلاهک اصلاح شده این نمونه گیر قادر است خلاء به وجود آمده مابین پیستون و بالای نمونه را از بین برده و شرایط بهتری برای نمونه گیری ایجاد نماید. نمونه گیر پیستون ثابت برای نمونه گیری از خاکهای نرم سیلتی و رسی از کارایی مناسبی برخوردار است.



(a) (b)

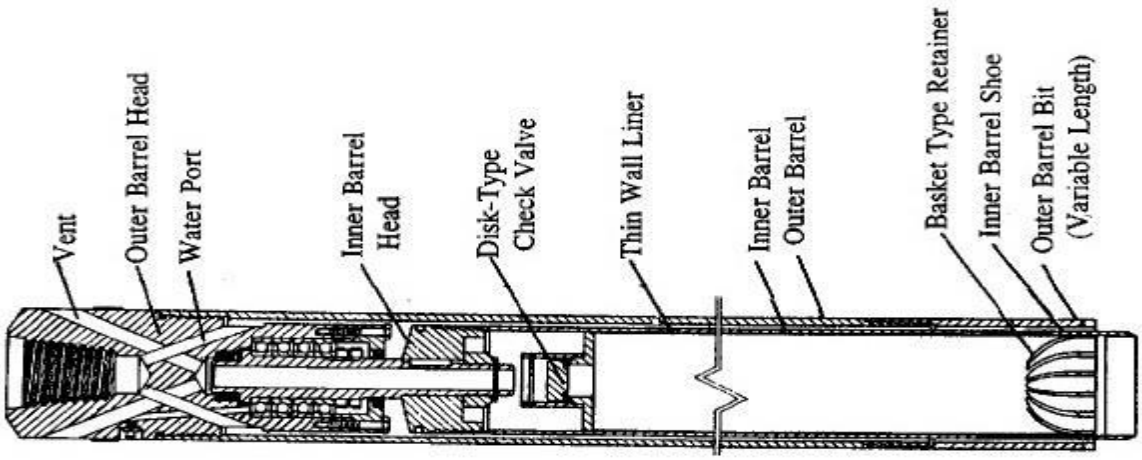
Piston Sampler. (a) Picture with thin-walled tube cut-out to show piston, (b) Schematic (After ASTM D 4700).

۳-۸-۳- نمونه گیر پیستون هیدرولیکی

به نمونه گیر استربرگ ۳ نیز شهرت دارد نوع پیشرفته نمونه گیر جدار نازک پیستون ثابت می باشد که علاوه بر تجهیزات نمونه گیر مذکور دارای یک پیستون متحرک و سیستم اعمال فشار هیدرولیکی است. در خاکهای ماسه ای نیز تا حدودی قابلیت نمونه گیری دارند.

۳-۸-۴- نمونه گیر دو جداره دنیسون

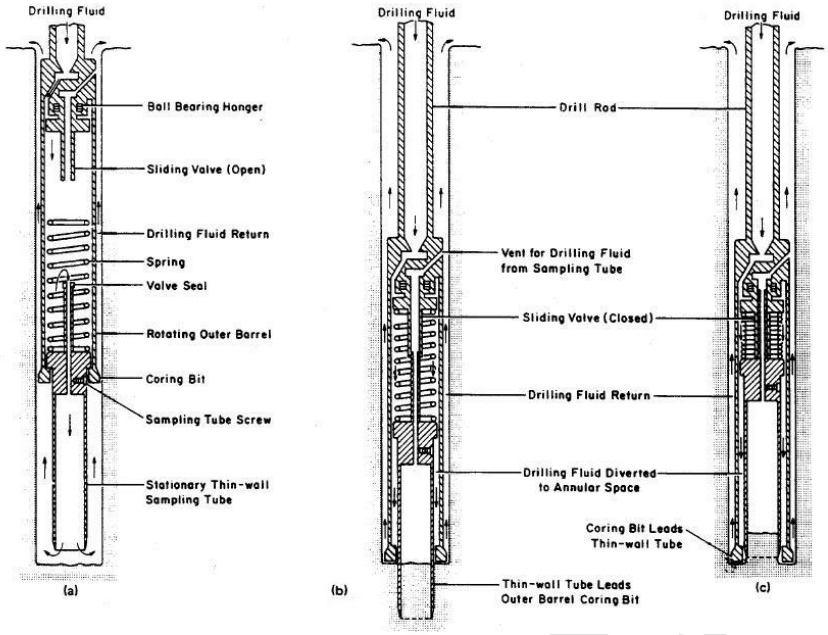
این نمونه گیر نظیر کربارل های دو جداره سنگ دارای دو استوانه جدار داخلی و خارجی است و برای نمونه گیری از خاکهای سخت (رس های سخت، سیلیت ها و ماسه های سیمانته شده) و سنگهای نرم مناسب است.



Denison Double-Tube Core Barrel Soil Sampler (Courtesy of Sprague & Henwood, Inc.)

۳-۸-۵- نمونه گیر پیچر

عملیات نمونه گیری با دوران استوانه خارجی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰ دور در دقیقه و اعمال فشار رو به پایین انجام می شود. نمونه گیر پیچر ترکیبی از نمونه گیر جدار نازک و نمونه گیر دنیسون است کاربرد آن را برای نمونه گیری از خاکهای فاقد چسبندگی نامناسب می داند.



Pitcher Sampler.
(a) Sampler Being Lowered into Drill Hole;
(b) Sampler During Sampling of Soft Soils,
(c) Sampler During Sampling of Stiff or Dense Soils.
(Courtesy of Mobile Drilling, Inc.)

۳-۸-۶- نمونه گیر سوئدی

اجزاء این نمونه گیر شامل کلاهک، که در انتهای نمونه گیر قرار گرفته و نوک تیزی دارد، پیستون شناور، غلطکهای هدایت کننده نوار روکش فلزی و قطعات استوانه ای که به بالای کلاهک نمونه گیر وصل شده و تا زمین ادامه دارند، می باشند.

طریقه نمونه گیری در این روش به این ترتیب است که با ضربات آرام نمونه گیر به درون زمین نفوذ داده می شود . بطور خاص برای نمونه گیری از خاکهایی که دارای لایه بندی نازک هستند ، خاکهای حساس و همچنین خاکهای بسیار نرم و آبکی که در سواحل دریاها پیدا می شوند مناسب است.

۳-۹- مغزه گیری از سنگ

مغزه گیری از سنگ ، اندازه و نوع مغزه گیر ، نوع سرمته و نوع سیال مورد استفاده در حفاری متغیرهای مهمی هستند که با توجه به جنس سنگ، میزان دقت اطلاعات مورد نظر و مکانیزم حفاری در مورد آنها تصمیم گیری می شود . اصطلاحا نمونه گیرهای مورد استفاده برای مغزه گیری از سنگ و یا خاکهای سیمانته و بسیار سخت را کربارل گویند

کربارل ها دارای پنج نوع اصلی هستند:

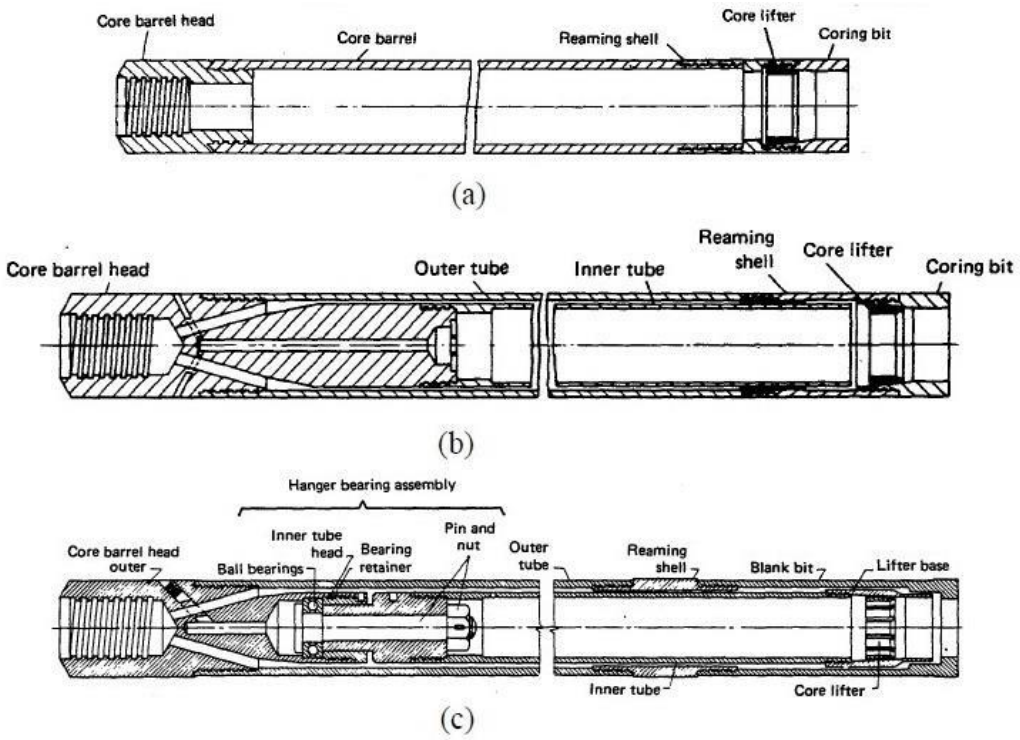
۱. کربارل یک جداره
۲. کربارل دوجداره صلب
۳. کربارل دو جداره چرخان
۴. کربارل سه جداره
۵. کربارل کابلی

بخش اصلی همه کربارل ها استوانه ای توخالی است که در نوک آن مته های الماسی کار گذاشته شده است.

۳-۹-۱- کربارل های یک جداره

نحوه مغزه گیری توسط کربارل های یک جداره به این ترتیب است که مغزه گیر با چرخش و فشار رو به پایین، وارد توده سنگ شده و نمونه ای استوانه ای شکل را در درون خود جای می دهد . نمونه ای که توسط این سیستم اخذ می شود در معرض مستقیم جریان آب قرار دارد بر همین اساس توصیه شده است که از این مغزه گیرها صرفاً برای مغزه گیری از سنگهای سخت و مقاوم در مقابل جریان آب استفاده گردد.

نسخه پیش نویس



(a) Single Tube Core Barrel; (b) Rigid Type Double Tube Core Barrel; (c) Swivel Type Double Tube Core Barrel, Series "M" with Ball Bearings. (Courtesy of Sprague & Henwood, Inc.)

۳-۹-۲- کربارل های دو جداره

نوع اصلاح شده کربارل یک جداره است که دارای دو جدار داخلی و بیرونی بوده و سیال حفار ی از بین دو جدار به سرمته ها ارسال می گردد . بدین ترتیب نمونه کمتر در تماس با آب قرار دارد.

در واقع در کربارل های یک جداره آب تحت فشار

موجب انحلال و دست خوردگی در نمونه می گردد . همچنین در سنگهای درزه دار ک آب موجب انحلال و شسته شدن پر شدگی درزه ها شده و حتی در بعضی سنگها، نظیر شیل های نرم، باعث تخری ب نمونه می گردد . برای رفع این نقیصه هم اکنون در بسیاری از استانداردهای معتبر دنیا استفاده از مغزه گیر دو جداره مورد تاکید است.

کربارل های دو جداره به دو دسته کربارل های دو جداره صلب و کربارل های دو جداره چرخان تقسیم می شود.

۳-۹-۳- کربارل های سه جداره

مغزه گیرهای سه جداره کاملا مشابه مغزه گیرهای دو جداره هستند با این تفاوت که سومین جدار نیز د ر درون جدار داخلی جاسازی شده است . این جدار سوم که به صورت آستری برای جدارهای داخلی عمل می کند معمولاً از فولاد یا برنج و یا

کامپوزیتهای انعطاف پذیر ساخته می شود. مزیت استفاده از کربارل های سه جداره آن است که نمونه های دریافتی به این طریق از کیفیت و بازیافت بالایی بر خوردار هستند و دست خوردگی آنها حداقل مقدار می باشد.

۳-۹-۴- کربارل های کابلی

در حالتی که از تجهیزات معمو ل حفاری استفاده می شود، برای آنکه مغزه از درون مغزه گیر بیرون آورده شود لازم است مجموعه لوله های حفاری و کربارل به سطح زمین بالا کشیده شده و مغزه خارج گردد . انجام این مراحل زمان قابل توجهی از عملیات حفاری را به خود اختصاص می دهد . در سیستمهای حفاری کابلی ام کان جدا شدن جدار داخلی مغزه گیر از جدار خارجی آن وجود داشته و بنابراین برای بیرون آوردن مغزه از درون مغزه گیر صرفاً جدار داخلی بوسیله سیستم کابل ها به سطح زمین کشانده شده و مغزه از درون آن بیرون آورده می شود. این سیستم ها، به خصوص در سنگهای نرم، مغزه های دست نخورده تری را به دست می دهند.

۳-۱۰- پیشنهاداتی در خصوص حفاری های ماشینی و دستی

❖ **نکات حفاری دستی:**

۱- قطر چاه دستی باید به‌اندازه‌ای باشد که آزمایش‌کننده بتواند به‌راحتی آزمایش دانسیته صحرایی یا SPT دستی را انجام دهد.

۲- درصورتی‌که بالای گمانه ریزشی است، توسط گچ کاملاً اندود و پایدار شود. ضمناً نباید گچ با نمونه برداشته‌شده مخلوط شود.

۳- در صورت برخورد با زمین‌های سفت‌وسخت چه از نوع درشت‌دانه و چه ریزدانه، نباید عملیات قطع شود بلکه با حفظ اصول ایمنی، با استفاده از کمپرسور عملیات انجام شود.

۴- ریختن آب داخل چاه به‌منظور مرطوب نمودن و کاهش سختی حفاری مجاز نمی‌باشد.

۵- لازم است جهت حفاری دستی از بالابر استفاده شود. در صورت نبودن برق در محل از نزدیک‌ترین محل برق تأمین شود. درصورتی‌که امکان تأمین برق نباشد با اطمینان از استحکام پایه‌های چرخ چاه، چرخ چاه و طناب اقدام به حفاری بشود.

۶- در صورت برخورد با آب زیرزمینی، ممکن است آب زیرزمینی کاذب و از چاه یا قنات یا حوض انبار یا استخر مجاور نشست کرده باشد لذا با تحقیقات محلی موضوع روشن شود و حفاری ادامه یابد. درصورتی‌که وجود سطح آب زیرزمینی قطعی شود، می‌توان با آبکشی توسط دلو و یا قرار دادن پمپ در چاه حفاری را تا حدود ۳ متر زیر سطح ایستابی ادامه داد.

۷-در صورت برخورد با بولدر یا سنگ‌بستر، حفاری دستی توسط کمپرسور انجام خواهد گردید و هزینه مربوطه قبلاً پیش‌بینی شود.

۸-یکی از بهترین روش‌های تهیه نمونه دستنخورده در گمانه‌های دستی استفاده از نمونه‌گیرهای دوکفه‌ای می‌باشد. روش دیگر استفاده از کرکاتر و روش دیگر تهیه بلوک یا کلوخه‌های درشت (مونولیت) است. درصورتی‌که نمونه فروریزشی (رُمبنده) باشد مانند سیلت‌های

ماسه‌ای نمونه‌گیرهای دوکفه‌ای برای سه محوری و تحکیم خوب می‌باشد. البته نمونه‌های مونولیت را هم می‌توان با سیم مخصوص برش قطعه‌قطعه نموده و سپس در دستگاه تراش به شکل استوانه‌ای تبدیل نمود. نمونه خارج‌شده از کرکاتر به دلیل اینکه ۳ بار تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد (یک‌بار وقتی‌که از زمین نمونه داخل کرکاتر می‌رود و زمانی که به داخل سیلندر فلزی می‌رود و زمانی که از سیلندر خارج می‌شود) لذا برای کارهای حساس مقداری دستخورده می‌شود.

نتیجه‌گیری: به روش مونولیت از هرگونه رسوبات درشت یا ریز, نرم یا سفت خاک‌های مسئله‌دار را می‌توان نمونه دستنخورده تهیه نمود. روش نمونه‌گیر دو کفه سریع و اقتصادی است و از روش کرکاتر برای تهیه نمونه سه‌قلو برای برش مستقیم یا سه محوری می‌توان استفاده کرد.

❖ **نکات حفاری ماشینی:**

۱-در حفاری اُگری به دلیل اینکه حرکت عمودی سیستم حفار تا سه متر و بیشتر (کورس دستگاه) توانائی دارد میتوان یک گمانه را در خاک‌های نرم را به سرعت حفاری نمود و نمونه گیری خوب و با کیفیتی نیز انجام داد.

۲-حفارهایی مانند D750 یا به شکل آن حرکت عمودی (کورس) محدود مثلاً ۸۰ سانتیمتر تا ۱/۵ متر دارند و زمان حفاری طولانی است. این دستگاه ها معمولا به روش شستشویی عمل می‌نمایند و لازم است جهت نمونه‌برداری خوب ، از نمونه‌گیرهای کربارل دوجداره استفاده کرد. این نوع دستگاه‌ها در هرگونه رسوبات نرم، سفت‌وسخت و سنگ حفاری و نمونه‌برداری را انجام می‌دهند.

نکته حائز اهمیت در نمونه‌برداری است که برای انواع خاک و سنگ به روش مناسب خود نیاز دارد. مثلاً برای سنگ‌های یکپارچه از کربارل استفاده شود. برای خاک‌های خمیری با فشار هیدرولیک شبلی پر شود و خاک‌های سفت‌تر از u4 استفاده شود.

۳-نمونه‌برداری دستنخورده از لایه‌های شن یا ماسه‌ای تمیز چه روش حفاری دستی و چه روش حفاری ماشینی ممکن نیست و لازم است از طریق آزمایش SPT تراکم این‌گونه خاک‌ها به‌طور نسبی تخمین زده شود. البته درصورتی‌که سطح ایستابی پایین باشد بهترین روش برای تعیین دانسیته طبیعی خاک، دانسیته صحرایی است.

۴-درصورتی‌که محل پروژه بر روی رسوبات درشت‌دانه بولدر دارمی باشد، ابتدا لازم است قطر مته حفاری، کیسینگ و نمونه‌گیر افزایش یابد. درصورتی‌که حفاری و نمونه گیری امکانپذیر نبود و یا پرهزینه بود، از سرمته ها و یا نمونه گیرهای کوچکتر استفاده شود لیکن مقدار نمونه با چندین نمونه گیری بدست آید.

۵-درصورتی‌که در زمان حفاری گل حفاری خالی شد لازم است موضوع مورد بررسی قرارگرفته و درصورتی‌که خالی شدن گل حفاری مرتبط با قنات، چاه فاضلاب ، خاک دستی یا حفرات طبیعی و غیره باشد مشخص شود. پیشنهاد می‌شود اگر تا عمق محدودی مانند ۱۲ متر این پدیده رخ داد، یک گمانه دستی حفر شده و رد گل حفاری گرفته شده تا موضوع روشن شود. برخی زمین‌ها بخصوص گچی و آهکی که جریان آب در آن وجود داشته ممکن است در لایه‌های سطحی یا زیرسطحی حفراتی وجود داشته باشد.

۶-برخی دستگاه‌های حفار هم توان حفاری اُگری و هم شستشویی در اندازه‌های مختلف و نمونه‌گیری ممتد را دارند. بهتر است برای هر پروژه انتخاب دستگاه و توان آن قبل از استقرار دستگاه حفار بررسی شده تا هزینه‌های عملیاتی کاهش یابد.

نسخه پیش نویس

فصل چهارم

آزمایش های صحرایی و برجا

نسخه پیش نویس

فصل چهارم

۴– آزمایش های صحرایی و برجا

۴-۱- آزمایش‌های صحرایی

❖ آزمایش‌های صحرایی به آن دسته از آزمایش‌های مکانیک خاک گفته می‌شود که در صحرا، در محل طرح و بر روی لایه‌های طبیعی خاک انجام می‌پذیرد.

❖ از طریق آزمایش‌های صحرایی می‌توان درزمینه های مختلف از قبیل: مقاومت، مقاومت برشی، دانسیته، تراکم نسبی (Relative density)، نفوذپذیری، پیزومتری، پرسیومتری و نشست پذیری (compressibility) اطلاعات ارزشمندی به دست آورد. و مقادیر مربوط به هر یک را مشخص نمود.

❖ آزمایش‌های صحرایی را می‌توان به‌طورکلی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی نمود :

❖ الف - آزمایش‌های ژئوتکنیکی صحرایی

❖ ب – آزمایش‌های ژئوفیزیکی

❖ ج- آزمایش‌های هیدروژئولوژی

❖

الف- آزمایش‌های ژئوتکنیکی صحرایی که عبارت‌اند از :

۱- آزمایش‌های نفوذ دینامیکی استاندارد Standard Penetration Test

۲- آزمایش‌های نفوذ استاتیکی مخروط Dynamic Penetration Tests

۳- آزمایش‌های نفوذ استاتیکی Con Penetrometer

۴- آزمایش‌های پرسیومتری	Pressuremeter
۵- آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای	Plate Loding Test
۶- آزمایش‌های نفوذپذیری	Permeability
۷- آزمایش‌های برش مستقیم برجا یا برش پره	Direct shear or vane

ب- آزمایش‌های ژئوفیزیکی، که به‌طورکلی رفتار زمین را در مقابل آزمایش‌های فیزیکی مختلف موردمطالعه قرار می‌دهد، در پروژه‌های بزرگ ساختمانی عمدتاً در مرحله اول مطالعات محلی، برای کاهش هزینه‌های تحقیقات محلی، از آزمایش‌های ژئوفیزیکی استفاده می‌نمایند، که رایج‌ترین آن‌ها آزمایش لرزه‌نگاری از زمین(GeoSeismic) و آزمایش مقاومت الکتریکی زمین(Resistivity) می‌باشد.

ج- آزمایش‌های هیدروژئولوژی، که وضعیت آب‌های زیرزمینی و چگونگی حرکت آب‌ها را در زمین موردبررسی قرار می‌دهد و مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از آزمایش‌های پیزومتری و نفوذپذیری.

۴-۱-۱- آزمایش وزن مخصوص خاک در محل (Sand Bottle) AASHTO-T191، ASTM –D1556

۱- ماسه مورداستفاده باید تمیز و خشک باشد و نیز کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر (الک نمره ۱۰) باشد. درصد عبوری از الک نمره ۶۰ کمتر از ۳ درصد وزنی آن باشد به‌عنوان‌مثال: به ترتیب عبوری و باقیمانده روی زوج الک‌های (۱۶-۳۶) یا (۲۰-۴۰) و یا (۲۵-۵۲) باشد.

در صورت موجود بودن منحنی دانه‌بندی: $cu = \frac{D60}{D10} < 2$ برقرار باشد.

۲- این آزمایش بر روی مصالح یا حداکثر اندازه ذرات $1\frac{1}{2}''$ معتبر می‌باشد.(مصالح عبوری الک $2''$)

۳- برای تعیین درصد رطوبت خاک چاله، حداقل $200gr$ برای خاک‌های ریزدانه (مصالح عبوری الک $\frac{3}{16}''$) و حداقل 400gr برای خاک‌های دیگر توزین گردد. (استفاده از ترازوی شارژی در محل تأکید می‌گردد). توزین با دقت $\pm 5gr$ انجام شود.

۴- آزمایش می‌تواند به علت درشتی دانه‌ها و عدم تراکم کافی، قادر به انجام نباشد.

۵- اگر خاک کنده‌شده چاله از الک $\frac{3}{16}''$ عبور نماید، می‌توان از Sand Bottle، به قطر $4''$ استفاده نمود. در غیر این صورت آزمایش با Sand Bottle به قطر $6''$ انجام شود.

۶- حداقل ضخامت لایه به قطرSand Bottle ، ۶ اینچی برحسب درشتی دانه‌های موجود در خاک کنده‌شده از چاله، به شرح زیر می‌باشند:

الف – اگر خاک کنده‌شده چاله از الک یک اینچ عبور کند، حداقل ضخامت لایه (عمق چاله)، $8cm$ می‌باشد.

ب – اگر خاک کنده‌شده چاله از الک دو اینچ عبور کند، حداقل ضخامت لایه (عمق چاله)، $10cm$ می‌باشد.

ج – اگر خاک کنده‌شده چاله دارای مصالح مانده روی الک دو اینچ باشد، حداقل ضخامت لایه، $13cm$ می‌باشد.

۷- چاله می‌بایست با مقطع استوانه‌ای و کاملاً ایستا باشد.

۸- بر اساس حداکثر اندازه اسمی ذرات خاک کنده‌شده از چاله، حداقل حجم چاله در استاندارد به‌صورت جدول ذیل ارائه‌شده است.

حداکثر اندازه ذرات (mm)	12.5	25	38
حداقل حجم چاله (cm^3)	1415	2125	2830

۹- ماسه طبیعی مورداستفاده باید گرد گوشه یا نیم گرد گوشه و بادوام باشد. ماسه‌های شکسته و یا زاویه‌دار، جریان روانی ندارند و باعث خطا در آزمایش می‌شوند.

۱۰- آزمایش کنترل وزن مخصوص ماسه، هر ۱۴ روز یک‌بار و یا برحسب تغییرات رطوبت محیط بایستی مجدداً انجام گردد. اغلب ماسه‌ها جاذب رطوبت هوا می‌باشند و مقدار کمی رطوبت، وزن مخصوص ماسه را عوض می‌کند. در محل‌هایی که تغییرات رطوبت آن زیاد است، کنترل وزن مخصوص ماسه بایستی در فواصل کمتر از ۱۴ روز انجام گردد.

۱۱- به هنگام آزمایش هیچ‌گونه لرزش از طریق افراد، لوازم و محیط نبایستی به وجود آید.

۱۲- موارد مندرج در گزارش: (تخصصی)

۱۲-۱- مشخصات وسیله آزمایش کالیبراسیون حجم (cone و اندازه‌گیری‌ها با ماسه یا آب)

۱۲-۲- وزن مخصوص حقیقی ماسه مورداستفاده

۱۲-۳- روش اندازه‌گیری حجم قیف یا وزن ماسه‌ای که داخل قیف جای می‌گیرد.

۱۳- قطر داخلی ظرف کالیبراسیون ماسه (Cone) می‌بایست مساوی و یا اندکی کمتر از قطر سوراخ صفحه سینی زیرین باشد.

۱۴- ماسه آزمایش می‌بایست تمیز، خشک، روان، دارای کمی (اگر داشته باشد) رد شده از الک نمره ۲۰۰ یا مانده روی الک ۲ میلی‌متر (۱۰#) باشد.

۱۵- برای انتخاب ماسه، چندین بار آزمایش دانسیته اندازه‌گیری می‌شود، درصورتی‌که اختلاف بین دانسیته ها بیشتر از یک درصد نباشد، ماسه قابل‌قبول است.

۱۶- دانسیته خشک در محل را باید با دقت $0.001\frac{gr}{cm^3}=1\frac{kg}{m^3}$ محاسبه و گزارش شود.

۴-۱-۲- آزمون ضربه و نفوذ استاندارد SPT مطابق استاندارد ASTM – D1586

۱- ضرایب اصلاح بر روی نتایج خام SPT : $N_{60}=E_m\times C_b\times C_s\times C_r\times N/60$

E_m = ضریب بازدهی چکش (برحسب نوع چکش بین 0.45 تا 0.85)

C_b = ضریب اصلاح قطر گمانه (بین 1.0 تا 1.15) هر چه قطر گمانه بزرگ‌تر باشد، C_b بزرگ‌تر انتخاب می‌شود.

C_s = ضریب اصلاح نمونه‌گیر است (برای نمونه‌گیرهای بدون آستری1.2 در نظر گرفته می‌شود)

C_r = ضریب اصلاح طول میله است (هر چه طول میله بلندتر باشد، C_r بزرگ‌تر می‌شود البته این افزایش محدود به عمق ۱۰ متر است)

N = عدد خام آزمون SPT در محل

جدول (۴-۱) ضریب اصلاح برای نتایج آزمون نفوذ استاندارد

نام ضریب	نام متغیر	اندازه متغیر	مقدار ضریب اصلاح
ضریب اصلاح قطر گمانه C_b	قطر گمانه (میلی‌متر)	65-115	1.00
		150	1.05
		200	1.15
ضریب اصلاح نمونه‌گیر C_s	نوع نمونه‌گیر	نمونه‌گیر استاندارد	1.00
		نمونه‌گیر بدون پوشش (توصیه نشده)	1.20
ضریب اصلاح طول میله C_r	طول میله حفاری (متر)	3-4	0.75
		4-6	0.85
		6-10	0.95
		بزرگ‌تر از ۱۰	1.00

جدول (۴-۲) ضریب بازدهی چکش‌های معمول در آزمون نفوذ استاندارد

کشور	نوع چکش	مکانیزم رهاسازی چکش	کارایی چکش (Em)
آرژانتین	چنبره	چرخک (Cathead)	0.45
برزیل	وزنه سوزنی	دستی	0.72
چین	خودکار	لغزیدن (Trip)	0.60
	چنبره	دستی	0.55
	چنبره	چرخک	0.50
کلمبیا	چنبره	چرخک	0.50
ژاپن	چنبره	ماشه‌ای (Tombi Trigger)	0.78-0.85
	چنبره	دو دور چرخک + رهاسازی مخصوص	0.65-0.67
انگلیس	خودکار	لغزیدن	0.73
آمریکا	محفوظ	دو دور چرخک	0.55-0.60
	چنبره	دو دور چرخک	0.45
ونزوئلا	چنبره	چرخک	0.43

❖

• اصلاح سربار ارتفاع خاک برای شرایطی که فشار سربار غیر از $a'_z = 100Kpa$ است باید انجام شود:

برای خاک‌های ماسه‌ای $(N_1)_{60} = N_{60}\sqrt{\frac{100Kpa}{a'_z}}$

a'_z = تنش مؤثر قائم در تراز انجام آزمون

۲- SPT آزمایشی است که از تکرارپذیری پایینی برخوردار است. به دلایل :

۲-۱-روش‌های مختلف حفاری

۲-۲-وجود گل حفاری در داخل گمانه

۲-۳-قطر گمانه می‌تواند بین ۲/۵ تا ۸ اینچ باشد. نتایج SPT متأثر از قطر گمانه است.

۲-۴-میزان به‌هم‌ریختگی خاک انتهای گمانه در نتایج مؤثر است.

۲-۵-تغییر موقعیت چکش در طول میله‌های حفاری نتایج آزمایش را تغییر می‌دهد.

۲-۶-نوع چکش و دستی یا خودکار بودن نحوه عملکرد آن نتایج آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۲-۷-تعداد حلقه‌های طناب که به دور طبلک می‌چرخد در نتایج تأثیر دارد.

۲-۸-در سیستم چکش دستی، ارتفاع واقعی سقوط ممکن است تا ۲۵ درصد خطا داشته باشد.

۲-۹-وزن سندان (Anvil) که چکش روی آن ضربه می‌زند در نتایج مؤثر است.

۲-۱۰-میزان اصطکاک بین قرقره و طناب‌ها درنتیجه آزمون مؤثر است.

۲-۱۱-درصورتی‌که کفشک نمونه‌گیر پوشش داشته باشد، بر روی نتایج تأثیر می‌گذارد.

۲-۱۲-میزان مستقیم بودن میله‌های حفاری در نتایج آزمون مؤثر است.

۲-۱۳-سرعت سقوط وزنه در میزان نفوذ نمونه‌گیر در خاک مؤثر است.

۲-۱۴-لبه نمونه‌گیرهای مستعمل، سائیده شده و سخت‌تر از نمونه‌گیرهای جدید در خاک نفوذ می‌کنند.

۳- توصیه‌های Seed برای افزایش قابلیت SPT و بالا بردن میزان تکرارپذیری آزمایش:

۳-۱-برای حفاری از سیستم حفاری دورانی استفاده شود و قطر گمانه بین ۲۰ تا ۲۵ سانتیمتر باشد.

۳-۲-برای حفاری در اعماق کمتر از ۱۵ متر از میله‌های حفاری با اندازه A یا AW و برای حفاری در اعماق بیشتر از میله‌های با اندازه N یا NW استفاده شود.

۳-۳-برای ضربه زدن از چکشی استفاده شود که دارای بازدهی ۶۰٪ باشد.

۳-۴-ضربات چکش با سرعت ۳۰ تا ۴۰ ضربه در دقیقه به نمونه‌گیر اعمال شود.

۴- خطاهای معمول شده در ایران برای انجام آزمایش SPT و توصیه‌های فنی :

۴-۱- استفاده از مخروط توپر= اصلاح نتایج از رابطه: $N_{spt} = (0.57 - 0.67)N_{Dcpt}$ این رابطه برای اعماق کمتر از ۹ متر توصیه‌شده است.

۵- بهره‌برداری‌های مستقیم از نتایج SPT در ژئوتکنیک :

۵-۱- محاسبه نشست پی‌های منفرد واقع بر ماسه

۵-۲- محاسبه ظرفیت باربری پی‌های واقع بر ماسه

۵-۳- ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها

۵-۴- تعیین مقاومت جداره و نوک شمع‌ها

۵-۵- ارزیابی قابلیت سپرکوبی زمین

۵-۶- تعیین تیپ مقاومتی زمین طبق استاندارد ۲۸۰۰

- دستورالعمل آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (**S.P.T**) در مطالعات ژئوتکنیک

الف – نشریه شماره ۲۲۴ – سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور – ۱۳۸۰/۸/۱۶

۱- آزمایش عمدتاً برای تعیین خصوصیات مقاومتی و نشست پذیری خاک‌های غیر چسبنده بکار می‌رود.

۲- وزن مجموعه کوبش (چکش) $63.5 \pm 0.5kg$ می‌باشد.

۳- تعاریف :

۳-۱- شمارش N : شمارش ضربه‌های لازم برای نفوذ نمونه‌گیر در فاصله ۱۵ تا ۴۵ سانتیمتر از کف گمانه

۳-۲- نسبت انرژی واقعی ER_1 : نسبت انرژی واقعی رسیده به میله‌های حفاری زیر کلاهک به انرژی تئوریک سقوط آزاد چکش برحسب درصد. (Energy Ratio)

۳-۳- شمارش N_{60}: آن مقدار از N، که نسبت به انرژی مرجع (ER_r) ، معادل ۶۰٪ انرژی تئوریک سقوط آزاد، اصلاح‌شده است. Reference Energy Ratio

۳-۴- شمارش $(N_1)_{60}$: آن مقدار از N، که نسبت به انرژی مرجع (ER_r)و فشار روباره برابر100kpa ، اصلاح‌شده است.

۴- اگر آزمایش با دستگاه و حفار واحد در یک خاک انجام شود، اختلاف نتایج تا ۱۰٪ در گمانه مجاور مجاز است.

۵- از نتایج آزمایش برای طراحی پی‌های سطحی در خاک‌های چسبنده نباید استفاده نمود، مگر بااحتیاط‌های ویژه مهندسی.

۶- در خاک‌های درشت‌دانه که درصد دانه‌ها شنی و قلوه‌سنگ در آن‌ها زیاد است، از نتایج آزمایش باید بااحتیاط استفاده نمود.

۷- دقت آزمایش در اعماق بیش‌ازحدود ۳۵ متر به دلیل مشکلات اجرایی، سختی حفاری و احتمال دست‌خوردگی خاک کف چاه، کاهش می‌یابد.

- روش حفاری و تجهیزات :

۸- در حفاری Wash Boring از مته با تخلیه جانبی (Slid discharge) باید استفاده شود، به‌کارگیری مته از نوع تخلیه تحتانی (Bottom discharge) مجاز نیست.

۹- روش استفاده از جریان آب از داخل لوله نمونه‌گیر برای حفاری تا رسیدن به عمق آزمایش و سپس انجام آزمایش در آن عمق، اجازه داده نمی‌شود.

۱۰- در حفاری percussion با Shell و Auger که همراه با نصب لوله جدار (Casing) باشد، قطر ابزار حفاری نیز نباید از ۹۰٪ قطر داخلی لوله جدار بیشتر باشد.

۱۱- در خاک‌هایی که دیواره گمانه در آن‌ها پایدار نیست، استفاده از لوله جدار و یا گل حفاری (بنتونیت) اجباری است.

۱۲- قطر گمانه آزمایش باید بین۶۳/۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر باشد

۱۳- استفاده از نتایج آزمایش SPT در گمانه‌های دستی برای برآوردهای کمّی مجاز نیست.

۱۴- در خاک‌های شنی درشت‌دانه، مخروط توپر ۶۰ درجه، جایگزین کفشک (Shoe) می‌شود.

- روش آزمایش :

۱۵- دستور کار اعماق آزمایش را معمولاً کارشناس ژئوتکنیک تعیین می‌کند، عموماً در لایه‌های یکنواخت فواصل آزمایش و نمونه‌برداری، ۱/۵ متر و یا در محل هر تغییر لایه انتخاب می‌شود.

۱۶- هنگامی‌که در حفاری از لوله جدار استفاده می‌شود، راندن لوله جدار جلوتر از محل آزمایش مجاز نیست.

۱۷- شمارش ضربه‌های وارده برای هر ۱۵ سانتیمتر نفوذ تا رسیدن به یکی از شرایط زیر ادامه می‌یابد :

۱۷-۱- روی‌هم ۵۰ ضربه برای هر یک از ۳ فاصله ۱۵ سانتیمتر نفوذ نمونه‌گیر زده شود.

۱۷-۲- روی‌هم ۱۰۰ ضربه چکش رده می‌شود.

۱۷-۳- بعد از ۱۰ ضربه پیاپی چکش بر نمونه‌گیر، هیچ‌گونه نفوذی مشاهده نشود.

۱۷-۴- نمونه‌گیر، ۴۵ سانتیمتر نفوذ نماید.

۱۸- اگر نمونه‌گیر با وزن میله‌های حفاری و یا میله‌ها به‌اضافه وزن چکش به‌صورت آزاد در کف گمانه فرو رود، عدد N معادل صفر در نظر گرفته می‌شود.

- گزارش :

۱۹- اطلاعات زیر ثبت و گزارش شوند :

۱۹-۱- روش حفاری و تمیز نمودن گمانه

۱۹-۲- روش نگهداری جدار گمانه

۱۹-۳- عمق سطح گمانه و عمق حفاری که در آن عمق فرار مایع حفاری رخداده است همراه بازمان و تاریخ قرائت یا مشاهده آن

۱۹-۴- محل تغییر لایه

۱۹-۵- اندازه لوله جدار، عمق لوله‌گذاری شده گمانه

۱۹-۶- تجهیزات و روش فرو راندن نمونه‌گیر (نوع چکش، مکانیزم سقوط، وزن کلاهک، نسبت انرژی مرجع ER_r و ...)

۱۹-۷- نوع نمونه‌گیر، طول و قطر لوله داخلی نمونه‌گیر (در صورت استفاده از لوله داخلی)

۱۹-۸- اندازه، نوع و طول میله‌های نمونه‌گیری

۲۰- اطلاعات نمونه‌های حفاری‌شده زیر ثبت و گزارش شوند :

۲۰-۱- عمق و شماره نمونه

۲۰-۲- تشریح نظری خاک طبق استاندارد ASTM- D2488 شامل ترکیب خاک، رنگ، لایه‌بندی و وضعیت تراکمی

۲۰-۳- تغییر لایه‌ها در نمونه

۲۰-۴- طول نفوذ و طول نمونه‌های بازیافتی

۲۰-۵- شمارش ضربه‌ها در هر ۱۵ سانتیمتر یا کسری از آن

نکات فنی و تکمیلی آزمایش

۲۱- انجام SPT و نیز نمونه‌گیری، بایستی تا عمق ۱۵ متر زیرتراز پی، به ازای هر ۲ تا ۳ متر و پس‌ازآن هر ۴ تا ۵ متر اقدام و فیلم آن ارائه گردد.

۲۲- طناب آزمایش SPT باید از جنس نخی باشد و از سیم، کابل و موارد مشابه استفاده نگردد.

۲۳- در پروژه‌هایی که گمانه اصلی آن‌ها به‌صورت دستی می‌باشد، ضروری است که حداقل تعداد ۵ آزمایش SPT تا عمق ۱۵ متری زیر تراز فونداسیون انجام گردیده و فواصل اعماق انجام آزمایش، حداقل برابر ۲ متر باشد.

۲۴- جهت تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های بالای تراز پی و جدار گود، طبق نظر مشاور ژئوتکنیک، عملیات نمونه‌گیری و SPT می‌تواند انجام گردد.

۲۵- سیستم سقوط چکش شامل : خودکار، نیمه‌خودکار، لغزشی و قرقره طنابی استفاده می‌شود، مشروط بر این‌که سیستم بالابرنده چکش در هنگام بلند کردن آن برای ضربه بعدی باعث نفوذ نمونه‌گیر نگردد.

۲۶- قرقره باید از عاری از زنگ‌زدگی، روغن و گریس بوده و قطر آن بین ۶ تا ۸ اینچ باشد.

۲۷- قرقره باید با حداقل سرعت دوران ۱۰۰ دور در دقیقه کار کند.

۲۸- نمونه‌گیر را از گمانه خارج کرده، درصد بازیافت یا طول بازیافت را یادداشت و نمونه را کامل تشریح نمایید.معمولاً نمونه‌ها را جهت تعیین درصد رطوبت بکار می‌برند.

۲۹- ارتفاع سقوط چکش به میزان 760 ± 25^{mm} می‌باشد.

۳۰- شمارش تعداد دورهای طناب: زاویه تماس کل، بین طناب و قرقره در شروع کم شدن طناب متصدی، تا سقوط چکش، تقسیم‌بر ۳۶۰ درجه .

۴-۱-۳- آزمایش‌های نفوذ مخروط اصطکاکی و مخروط شبه استاتیک در خاک

CPT=Cone Penetration Test * ASTM-D3441

۱- این روش آزمایش، باربری انتهائی و اصطکاک اطراف، اجزای مقاومت نفوذ که دراثنای نفوذ آرام و یکنواخت میله نوک‌داری به داخل خاک تعمیم می‌یابد، را تعیین می‌کند.

۲- اصطلاحات: مخروط – پنترومتر مخروطی- مقاومت مخروط یا مقاومت باربری انتهایی(qc) –سونداژ مخروط- پنترومتر الکتریکی- پنترومتر مخروط اصطکاکی– سونداژ مخروط اصطکاکی – نسبت اصطکاک (Rf)- مقاومت اصطکاکی (fs)- اسلیو اصطکاکی – میله‌های داخلی – پنترومتر مکانیکی – نوک پنترومتر –سونداژ پیزوکن – میله‌های فشار

۳- این روش آزمایش برای استفاده در ساحل مناسب می‌باشد.

۴- ملاحظات:

۴-۱- در موقع به دست آوردن اطلاعات، سرعت نفوذ عمقی، ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه نگه‌داشته می‌شود. سرعت ۱۰ در مواقع کاربرد مخروط اصطکاک مکانیکی و سرعت ۲۰ برای قرائت مقاومت ساده در موقع استفاده از پنترومتر مخروط مکانیکی مناسب می‌باشد و عملیات مؤثر پنترومتر های الکتریکی را فراهم می‌آورد.

۴-۲- فشارهای حفره‌ای ایجادشده در امتداد حرکت و پیرامون مخروط نفوذ یا نوک پنترومتر مخروط اصطکاکی می‌تواند دارای اثر مهمی روی مقادیر اندازه‌گیری شده fs , qc باشد.

۵- نکات :

۵-۱- کاهش اصطکاک در امتداد میله‌های فشار (هدف، افزودن قابلیت عمق پنترومتر می‌باشد)

۵-۲- روش‌های غیر مکانیکی در کاهش دادن اصطکاک، مانند استفاده از گل حفاری روی نوک مجاز می‌باشد.

۵-۳- جلوگیری از خم شدن میله بالای سطح

۵-۴- انحراف نوک: برای اعماق نفوذ بیش از ۱۲ متر، احتمالاً نوک از مسیر عمودی خارج خواهد شد و همچنین عبور کردن از میان یا کنار مانعی مانند تخته‌سنگ‌ها، لایه‌های نازک سنگ یا لایه‌های متراکم شیب‌دار ممکن است نوک را انحراف داده و وادار به تغییر جهت نماید.

۵-۵- زیر یا نزدیک به گمانه‌ها (سونداژ مخروط یا مخروط اصطکاکی از ۲۵ برابر قطر گمانه لوله‌گذاری نشده خاکریزی نشده موجود، نباید نزدیک‌تر اجرا شود)

۶- انواع پنترومتر:

۶-۱- پنترومترهای مکانیکی شامل: پنترومتر مخروطی و پنترومتر مخروط اصطکاکی

۶-۲- پنترومترهای الکتریکی

۷- گزارش شامل: نمودار مقاومت مخروط qc – پنترومتر مخروط اصطکاکی (نمودار مقاومت اصطکاکی fs، نمودار نسبت اصطکاک Rf) – نمودار پنترومتر پیزوکن (Piezocone)

۸- گزارش شامل:

نام اپراتور- نام محل کار- تاریخ سونداژ- شماره سونداژ- مختصات محل – ارتفاع زمین و سطح آب (در صورت وجود) –نوع نوک پنترومتر- نوع ماشین فشار- اطلاعات کالیبراسیون – فشار نوک - روش تهیه نیروی واکنش – روش پیش روی نوک –روش یادداشت کردن – وضعیت میله‌ها و نوک بعد از بیرون آوردن

۹- دقت و خطا

۹-۱- نوک‌های مکانیکی: انحراف استاندارد ۱۰٪ در qc و ۲۰٪ در fs

۹-۲- نوک الکتریکی: انحراف استاندارد ۵۰٪ در qc و ۱۰٪ در fs

۱۰- در ایران به دلیل محدود بودن پهنه‌های رسی و همچنین عدم اطلاع از کارایی‌های گسترده این آزمایش، آزمون CPT گسترش چندانی نیافته است.

۱۱- آزمون CPT، صرفاً برای مطالعه مقاومت رس‌های خیلی نرم تا ماسه‌های متراکم کارایی دارد و در مصالح شنی و رسوبات حاوی قطعات سنگی توصیه نمی‌شود.

۱۲- سیستم مخروط هلندی (Dutch Cone) مقاومت نفوذی خاک را در فواصل ۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری می‌کند. هم‌اکنون این دستگاه مخروط مکانیکی (Mechanical CPT) نامیده می‌شوند و اندازه‌گیری داده‌ها در آن‌ها به‌طور ناپیوسته انجام می‌شود.

۱۳- مخروط‌های الکتریکی (Electrical CPT) به نحوی طراحی گردیدند که از قابلیت ارائه نتایج به‌صورت پیوسته برخوردار بودند.

۱۴- کامیون یا وانت حمل دستگاه که حداقل وزن آن معادل ظرفیت دستگاه (حدود ۲۰ تن) می‌باشد.

۱۵- دستگاه‌های جدید SCPTU ، علاوه بر ثبت مقادیر fsc, qc, u سرعت امواج برشی تولیدشده در سطح زمین را به‌وسیله یک ژئوفون که نیم متر بالای مخروط نوک نصب‌شده است، اندازه‌گیری می‌نماید.

۱۶- اصلی‌ترین خصوصیات خاک که از طریق نتایج CPT تخمین زده می‌شوند:

مدول الاستیسیته (E) و مدول برش(G) – زاویه اصطکاک داخلی – مقاومت برشی زهکشی نشده خاک- طبقه‌بندی خاک- دانسیته نسبی خاک- ضریب نفوذپذیری و شرایط تحکیم خاک

۱۷- انواع تجهیزات و روش‌های تأمین نیروی عکس‌العمل در آزمایش:

بلوک بتنی- ارابه (شاسی چرخ‌دار) و قطعات فلزی – وزنه‌های سربی- وزن ماشین‌آلات آزمایش- سیستم انکر (میل مهارهای کوبیده شده در زمین) – استفاده از کامیون با جک هیدرولیکی مخصوص آزمایش

۱۸- هدف عمومی آزمایش، تعیین پارامترهای خاک یا سنگ ضعیف (در بخش نرم و هوازده آن) است.

۱۹- حداکثر بار اعمالی در این آزمایش 20^{ton} و میزان نفوذ مخروط در مرحله اول و دوم 8^{cm} و در مرحله سوم 12^{cm} است.

۲۰- چون در عمق بیشتر، اصطکاک بیشتری خواهیم داشت، مقدار مقاومت خاک که از طریق این آزمایش به دست می‌آید، یک مقدار متوسط دقیق خواهد بود.

موارد کاربردی و سایر ملاحظات آزمایش **CPT** تحت استاندارد **ASTM-D3441**

۱- CPT به‌جای SPT ، به‌خصوص برای رس‌ها، لایهای نرم ، رسوبات ماسه‌ای ریز تا متوسط برای نواحی دارای رسوبات عمیق از خاک‌های حمل شده نظیر دشت‌های سیلابی، دلتاهای رودخانه‌ای و خطوط ساحل مورداستفاده قرار می‌گیرد.

۲- اساس آزمایش شامل فشردن مخروط استاندارد به داخل زمین با سرعت $10-20\frac{mm}{\sec}$ و ثبت مقاومت‌ها می‌باشد. مقاومت کلی شامل اصطکاک جداری روی محیط اطراف میله مخروط و فشار نوک مخروط می‌باشد.

۳- اطلاعات ثبت‌شده معمولاً مقاومت جانبی مخروط (qs)، مقاومت انتهایی (qc) و عمق باشند. درصورتی‌که ترکیب ابزار اجازه دهد فشارهای آب منفذی ، انحراف از زاویه قائم، درجه حرارت و سرعت موج‌برشی نیز ثبت می‌شود.

۴- انواع مخروط‌های CPT:

مشخصات ۳ نوع مخروط در استاندارد ۳۴۴۱، توضیح داده‌شده است، اما در حال حاضر ۵ نوع مخروط استفاده می‌شود. در تمام این مخروط‌ها، مساحت تصویر شده $10cm^2$ می‌باشد، اگر مخروط‌های بزرگتر استفاده شوند می‌توانند فشار منفذی مطمئن‌تری حاصل کنند.

۴-۱ مخروط مکانیکی: موسوم به مخروط هلندی(dutch cone)

۴-۲- مخلوط الکتریکی – اصطکاکی: مخروطی که در اولین اصلاح، برای اندازه qc (مقاومت نوک) و qs (مقاومت اصطکاکی) با به‌کارگیری مدرج‌های کرنش در آن صورت گرفت.

۴-۳- مخروط فشارسنج الکتریکی: شکل اصلاح‌شده‌ای از مخروط الکتریکی- اصطکاکی می‌باشد که در حین آزمایش امکان اندازه‌گیری فشار آب منفذی در نوک مخروط را فراهم می‌نماید.

۴-۴- مخروط فشارسنج الکتریکی-اصطکاکی: شکل اصلاح‌شده دیگری از مخروط نوع سوم برای اندازه‌گیری هم‌زمان مقاومت نوک، اصطکاک جداری و فشار منفذی می‌باشد.

۴-۵- مخروط لرزه‌ای : با افزودن یک حسگر ارتعاشی، اصلاح بیشتری صورت گرفته تا سرعت موج‌برشی ناشی از ضربه چکش وارده بر سطح زمین را محاسبه نماید، به‌نحوی‌که بتوان ضریب برشی دینامیکی را محاسبه نمود.

۵- مخروط مکانیکی به دو شکل Begemann , deleft استفاده می‌شوند که نوع Begemann به‌طور دقیق‌تری فشار اصطکاک جدار را به دست می‌آورد.

۶- زاویه نوک مخروط ۶۰ درجه و سطح جانبی آن $10cm^2$است. قسمت نوک مخروط، مقاومت برشی و از قسمت بدنه، اصطکاک اندازه‌گیری می‌شود.

۷- در خاک‌های ماسه‌ای متراکم، میزان دست‌خوردگی و مقدار qc (مقاومت انتهایی) خیلی زیاد است، بنابراین اصطکاک اندازه‌گیری شده هم زیاد می‌باشد. لذا نتایج به‌دست‌آمده بایستی موردبررسی قرار گیرد.

۸- اطلاعات CPT برای طبقه‌بندی خاک، تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی یا طراحی شمع‌ها (به‌ویژه برای ستون‌های حفاری دریایی) استفاده می‌شوند.

۹- Bowles توصیه می‌کند که اطلاعات CPT با نتایج روش‌های اکتشافی دیگر (معمولاً آزمایش SPT) تکمیل گردد، زیرا اطلاعات حاصل از CPT می‌تواند کاملاً اشتباه باشد.

۱۰- از نسبت اصطکاک ($fr = \frac{qs}{qc} \times 100$)، طبق منحنی استاندارد برای طبقه‌بندی خاک استفاده می‌شود.

۱۱- منحنی، جداول و روابط مفیدی برای طبقه‌بندی خاک ، حساسیت خاک، تشخیص نوع لایه، مقاومت برشی زهکشی نشده، ظرفیت باربری، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی موجود می‌باشند.

۱۲- SCPT= Static Cone Penetration Test * اندازه‌گیری پیوسته با سرعت $20\frac{mm}{\sec}$

۱۳- DCPT = Dynamic Cone Penetration Test * شبیه SPT (نفوذ با چکش)

۱۴- CPTU(Piezocone) = یک مخروط استاتیکی مدرن که فشار آب حفره‌ای را نیز اندازه‌گیری می‌کند.

۱۵- آزمایش نفوذ مخروط باقابلیت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای (CPTU) ASTM- D5778

۱۵-۱ هدف اندازه‌گیری هم‌زمان و مستقل qc= مقاومت نوک مخروط و مقاومت اصطکاکی جداره جانبی آن =fs ، در انواع خاک‌های رسی بسیار نرم و اشباع تا ماسه‌های متراکم با امکان اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای

۱۵-۲ مقاومت اندازه‌گیری شده در قسمت نوک مخروط (qc) باید برای اعمال فشار آب حفره‌ای به‌ویژه در خاک‌های رسی نرم تا سخت و لای ها و همچنین برای اعماق بالا که ممکن است فشار هیدرو استاتیکی زیاد باشد اصلاح گردد. این روش استاندارد و دستگاه مربوطه، امکان اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای هنگام نفوذ به داخل زمین را فراهم می‌سازد.

علاوه بر این وجود حسگرهای انحراف سنج از قائم که ممکن است در اثر برخورد به سنگ‌های درشت یا توده‌های بسیار متراکم خاک در حین نفوذ اتفاق افتد، آگاهی یافته و از آسیب دیدن به دستگاه و برداشت داده‌های نادرست می‌توان جلوگیری کرد.

۱۵-۳ آزمایش CPTU به دلیل تکرارپذیری، قابلیت اطمینان و پیوستگی داده‌ها، یک آزمایش برجای مناسب برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد.

۱۵-۴ از این آزمایش می‌توان علاوه بر تعیین نوع خاک (طبقه‌بندی لایه‌ها) و لایه‌بندی زمین، تخمین دانسیته نسبی- تخمین زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی زهکشی شده، خصوصیات تغییر شکل‌پذیری، مدول یانگ و مدول برشی دینامیکی ماسه‌ها و تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده، حساسیت خاک، نسبت پیش تحکیمی، خصوصیات تغییر شکل‌پذیری و مدول یانگ خاک‌های رسی بهره برد.

۱۶- مخروط الکترونیکی برخلاف مخروط مکانیکی در هنگام آزمایش ، باز و بسته نمی‌شود.

۱۷- مخروط الکترونیکی به‌صورت پیوسته در زمین رانده می‌شود و مقاومت نوک و جدار با حس‌گر اندازه‌گیری می‌شوند.

۱۸- مخروط مکانیکی، ارزان‌قیمت بوده اما سرعت اجرای آن کم و در خاک‌های نرم کارایی لازم را ندارد و اندازه‌گیری‌های آن پیوسته نیست.

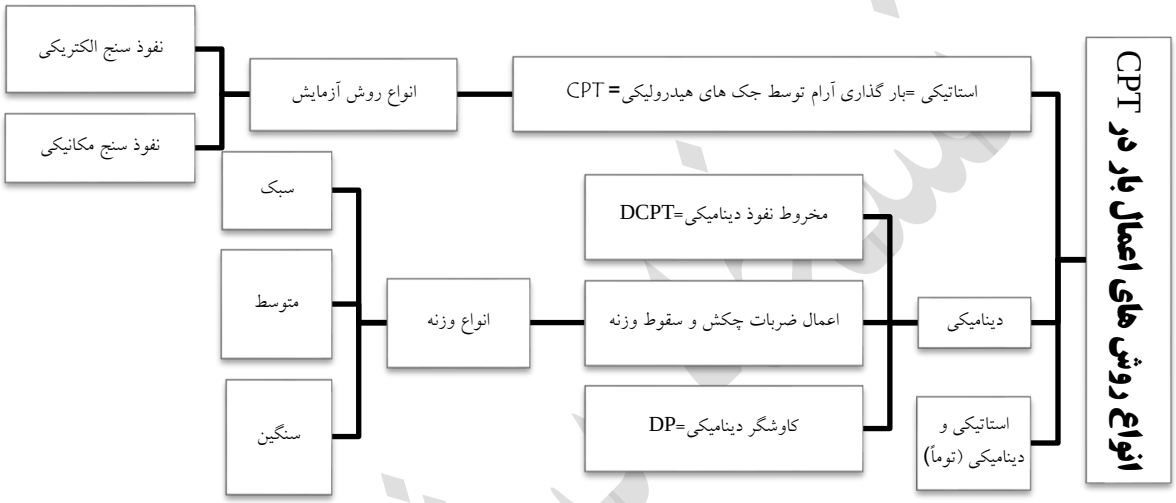
۱۹- مخروط الکتریکی، بسیار گران‌قیمت و پیچیده بوده اما سرعت کار آن بالا و ثبت نتایج آن به‌صورت پیوسته می‌باشد.

نکات فنی و کارشناسی آزمون نفوذ مخروط **CPT**

۱- نفوذسنج دارای نوک مخروطی با زاویه پخی ۶۰ درجه و قطر 35.7^{mm} است که با سرعت $20\frac{mm}{\sec}$ به داخل زمین نفوذ می‌کند.

۲- آزمون صرفاً برای مطالعه مقاومت رس‌های خیلی نرم تا ماسه‌های متراکم کارایی دارد و در مصالح شنی و رسوبات حاوی قطعات سنگ توصیه نمی‌شود.

۳- شماره استاندارد آزمایش CPT برای سیستم‌های مکانیکی ASTM-D3441 و برای سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی ASTM-D5778 می‌باشد. همچنین انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی پی دستورالعمل مرجع ISSMFE , 1988 را ارائه نموده است.



۴- مقادیر F_{sc} (مقاومت جدار) qc (مقاومت نوک) و U (فشار آب حفره‌ای) در فواصل ۲ تا ۵ دقیقه‌ای می‌بایست اندازه‌گیری و ثبت شوند.

۵- در خصوص صحت داده‌های فشار آب حفره‌ای (U) می‌بایست از اشباع کامل فیلترهای متخلخل دستگاه اطمینان داشته باشیم.

۶- لازم است قبل و بعد از اضافه کردن میله به مجموعه میله‌های حفاری، اطلاعات به‌دقت ثبت‌شده و اصلاحات لازم در نتایج، مطابق آنچه شرکت‌های سازنده دستگاه برای این منظور به دست می‌دهند انجام گردد. (توجه : در حین اضافه کردن میله، اختلالاتی در سیستم اعمال فشار به وجود می‌آید.)

۷- ضریب اصلاح سربار در نتایج CPT می‌بایست اعمال گردد :

$$Fscl = Fsc\sqrt{\frac{100}{a'_z}} \qquad q_{cl} = q_c\sqrt{\frac{100(kpa)}{a'_z}}$$

q_c = مقاومت نوک مخروط که مستقیم از آزمایش حاصل‌شده است.

q_{cl} = مقاومت نوک مخروط اصلاح‌شده برای تنش سربار

F_{sc} = اصطکاک جانبی مخروط که مستقیم از آزمایش حاصل‌شده است.

F_{scl} = مقاومت اصطکاک جانبی مخروط اصلاح برای اثر تنش سربار

a'_z = تنش قائم مؤثر در عمق انجام آزمایش (برحسب kpa)

۸- آزمایش در خاکی که مقاومت آن کمتر از $1^{kg}/_{cm^2}$ باشد، نتایج خوبی به دست می‌دهد.

۴-۱-۴ - آزمایش پرسیومتری

« نشریه شماره ۲۲۳ سازمان مدیریت- دستورالعمل آزمایش پرسیومتری(در مطالعات ژئوتکنیک) »

۱- اندازه‌گیری توأم پارامترهای تغییر شکل و مقاومت مقدور است.

۲- نوع خاصی از پرسیومترها که با فشار زیاد کار می‌کنند و برای زمین‌های بسیار سخت و یا سنگ‌ها استفاده می‌شوند به دیلاتومتر(Dilatometer) معروف بوده که عملکرد آن بر پایه پرسیومتر معمولی می‌باشد.

۳- کالیبراسیون (هم سنجی) دستگاه در شرایط مرزی مشخص بسیار مهم می‌باشد.

۴- از مهم‌ترین مواردی که بر نتایج آزمایش تأثیر می‌گذارد، روش حفر گمانه و نحوه قرار دادن محفظه اندازه‌گیر در آن است به حداقل رساندن دست‌خوردگی دیواره‌های گمانه بسیار بااهمیت است.

۵- این دستور کار مربوط به آزمایش در سنگ‌ها نیست (آزمایش دیلاتومتری مربوط به سنگ است)

۶- دانستن نوع خاک در آزمایش به دو منظور است :

۶-۱- تعیین روش حفر گمانه و محل استقرار محفظه فشار پرسیومتر (سوند)

۶-۲- به دست آوردن نتایج منطقی و تفسیر نتایج آزمایش

۷- این دستور کار برای پرسیومترهای خودحفار (SBP) نبوده و به کاربرد پرسیومترهای مستقر در گمانه‌های آماده محدود می‌شود. این پرسیومترها عمدتاً از نوع منارد(Menard) هستند. این دستور کار همچنین پرسیومترهایی را که با رعایت دستورالعمل‌های سازنده آن به داخل زمین کوبیده شده‌اند، را در برمی‌گیرد.

۸- از مهم‌ترین مسائل این است که قطر حفره‌ایجادشده باید بسیار نزدیک به قطر محفظه باشد، زیرا در این صورت می‌توان مطمئن شد که تغییرات حجم گمانه به‌طور مناسبی صورت می‌گیرد.

۹- این دستور کار برای دستگاه‌هایی است که تغییرات حجم در آزمایش را ثبت می‌نمایند.

۱۰- موضوع دست‌خوردگی و تأثیر آن در تحلیل نتایج ، به‌خصوص در رس‌های خیلی نرم و ماسه‌های سست از اهمیت بیشتری برخوردار است .

۱۱- توصیه می‌شود برای عدم آسیب دیدن، هنگام کالیبراسیون دستگاه، محفظه را درون یک سیلندر محافظ قرار داد .

۱۲- تصحیح تغییرات دما و افت سربار (ارتفاع) به سبب جریان سیال فشار در خاک‌ها همیشه کوچک بوده و برای آزمایش‌های معمولی قابل‌چشم‌پوشی است . اگر آزمایش در عمق بیش از ۴۵ متر انجام شود ، روش‌های ویژه‌ای برای تصحیح افت سربار لازم است.

۱۳- دو شرط برای حفاری صحیح باید مدنظر باشد:

۱۳-۱- قطر حفره دارای رواداری مشخص باشد.

۱۳-۲- استقرار دستگاه و روش حفاری کمترین دست‌خوردگی را در دیواره گمانه‌ایجاد کند.

۱۴- عوامل مؤثر در بروز دست‌خوردگی:

ریزش دیواره گمانه - فرسایش دیواره گمانه - نرم شدگی دیواره گمانه

۱۴-۱- توصیه می‌شود که بلافاصله پس از حفر گمانه آزمایش انجام شود. در خاکهای بسیار ریزشی استفاده از نگه‌دارنده‌هایی مثل گل حفاری توصیه می‌شود.

۱۴-۲- استفاده از سیال‌های شستشویی (Flushing fluids) مقدار فرسایش را کاهش می‌دهد.

نسخه پیش نویس

جدول – راهنمای مقدماتی انتخاب روش‌های آماده‌سازی گمانه و گزینش ابزار برای آزمایش پرسیومتری

نوع خاک	روش حفاری	اوگر دستی	اوگر دستی همراه با گل حفاری ۰	نمونه‌گیر حفاری ۱	حفاری مغزه گیری	حفاری ضربه‌ای - دورانی	نمونه‌گیر فشاری با لوله شیاردار ۲	حفاری با آب ۴	نمونه‌گیر فشاری ۵	گمانه پیشتاز همراه با نمونه‌گیری فشاری ۶	گمانه پیشتاز همراه با اصلاح جدار ۷	اوگر (نعل بری)
خاکهای رسی	نرم	C	A	C	C	C	C	BE	BE	B	B	C
	محکم تا سفت	A	A	C	C	C	C	AE	A	B	B	AE
	سفت تا سخت	D	D	D	AE	BE	C	A	B	A	A	AE
خاکهای لای دار	بالای تراز آب	A	B	B	C	C	C	AE	BE	B	BE	A
	زیر تراز آب	C	A	C	C	C	C	AE	C	C	BE	C
خاک‌های ماسه‌ای	سست و بالای تراز آب	B	A	B	D	C	C	AE	C	C	B	B
	سست و زیر تراز آب	C	A	C	D	C	C	AE	C	C	B	C
	متوسط تا متراکم	A	A	B	C	BE	C	AE	C	C	B	A
ماسه شن دار و شن ماسه دار در زیر تراز آب	سست	D	D	C	D	B	B	B	D	D	D	D
سنگ هوازده	متراکم	D	D	A	B	B	C	A	D	BE	D	A

A: قابل توصیه، B: مجاز، C: غیرقابل توصیه، D: غیرمجاز، E: مشروط، F: با حفر گمانه پیشتاز

1- Hand auger with mud 2- Driven Sampler 3- Driven slotted tube
4- Drilling fishtail 5- Pushing Sampler 6- Pilot hole+ Pushing Sampler 7- Pilot hole + Shaving

۱۴-۳- نرم شدگی دیواره گمانه به علت آزاد شدن تنش در دیواره گمانه و اعمال آن به سیال داخل چاه و نتیجتاً ایجاد یک مکش در دیواره آن اتفاق می‌افتد. استفاده از گل حفاری نسبت به هوا برتری دارد .

۱۵- شرایط حفره آزمایش: $1.03 < \frac{DH}{Dpm} < 1.2$

D_H= قطر حفره ، D_{PM}= قطر محفظه

۱۶- در حفاری دورانی معمولاً در رس‌ها از سرمته های نوع انگشتی و در ماسه‌ها و شن‌ها از نوع غلتکی استفاده می‌گردد.

۱۷- این آزمایش را می‌توان در یک یا چند چرخه بارگذاری - باربرداری در محدوده کشسان اجرا کرد .

۱۸- فاصله و توالی آزمایش :

۱۸-۱- فاصله میان آزمایش‌های مجاور(مرکز به مرکز محفظه) از ۱/۵ برابر طول قسمت قابل باد شدن محفظه نباید کمتر باشد. معمولاً این فاصله از ۰/۹ تا ۳ متر تغییر می‌کند .

۱۸-۲- در خاکهای نرم، سست و حساس ، عمق حفاری باید کمی بیشتر از عمق موردنظر برای آزمایش باشد.

۱۸-۳- در خاکهای سخت و سنگ‌های هوازده‌ای که هوازدگی آنها به سبب قرار گرفتن در معرض عوامل طبیعی، بی‌اهمیت است، کل عمق گمانه می‌تواند برای چند آزمایش از پیش حفاری گردد.

۱۹- گزارش کار:

۱۹-۱- ثبت اطلاعات زیر برای هر گمانه : شماره گمانه – لوگ گمانه - ارتفاع مبنا - عمق آب در گمانه – نام حفار- روش حفاری و آماده‌سازی گمانه - مقاومت خاک (مثلاً N آزمایش SPT)- وضعیت آب‌وهوا و دما

۱۹-۲- موارد ثبت در هر آزمایش : نوع دستگاه - روش آزمایش- شماره گمانه - اندازه محفظه - توضیحات غشاء، غلاف محفظه و کالیبراسیون - عمق نقطه مرکزی محفظه – گام‌های افزایش فشار یا حجم- قرائت حجم در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ ثانیه پس از هر گام افزایش بار یا قرائت فشار

۲۰- از نتایج آزمایش پرسیومتری می‌توان برای محاسبه ضریب کشسانی برشی (G) و ضریب فشار جانبی در حال سکون خاک (K_0) استفاده نمود.

❖ نکات فنی و کارشناسی آزمایش پرسیومتری (فشارسنجی)

در این آزمایش یک بالن استوانه‌ای تحت‌فشار سیال درون گمانه انبساط می‌یابد و تغییرات حجم و فشار به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شود.

۱- آزمایش هم در خاک و هم در سنگ قابل انجام است و برترین آزمایش صحرایی مکانیک خاک قلمداد می‌گردد.

۲- از معمول‌ترین ویژگی‌هایی که بر اساس این آزمایش ارزیابی می‌گردد، مدول تغییر شکل خاک ، مقاومت زهکشی نشده خاک‌های رسی اشباع و فشار جانبی است و نیز برای تخمین میزان تراکم نسبی و زاویه اصطکاک داخلی خاک کارایی دارد .

۳- پرسیومتری های پیش حفار(PBP) (نوع منارد) بیشترین استفاده را در بین پرسیومتر ها دارد. در کلیه خاک‌ها و سنگ‌های ضعیف که امکان ایجاد گمانه در آنها باشد قابل‌استفاده می‌باشند و در دو نوع تغییر حجمی و نوع تغییر شعاعی.

۴- پرسیومتر های خود حفار(SBP) در خاک‌های فاقد شن و قلوه‌سنگ و در سنگ ضعیف قابل‌استفاده است .

۵- پرسیومترهای تغییر مکانی(DP) استفاده‌های دریایی دارند.

۶- آزمایش پرسیومتری به دو روش تنش کنترل‌شده و کرنش کنترل‌شده انجام می‌گیرد .

۷- نتایج حاصل از این آزمایش تا حد زیادی به دست‌خوردگی خاک و نحوه جایگذاری دستگاه درون خاک وابسته است .

۸- به‌طورکلی انجام آزمایش پرسیومتری شامل مراحل زیر می‌باشد :

۹-۱- کالیبراسیون تجهیزات

۹-۲- حفاری (برای پرسیومتر های پیش حفار)

۹-۳- جایگذاری سوند درون زمین

۹-۴- اعمال فشار و تشکیل حلقه‌های باربرداری- بارگذاری مجدد و ثبت همزمان داده‌ها

۹-۵- اصلاح داده‌های خام

۹-۶- تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و استخراج پارامترهای مهندسی

۱۰- آزمایش در محدوده کرنش‌های بزرگ و نزدیک به واقعی انجام می‌شود و لذا مدول برشی خاک مناسب‌تری می‌دهد.

۱۱- پرسیومتری تجهیزات ظریف و حساسی دارد و باید برای جلوگیری از آسیب دیدن دستگاه تحت حفاظت قرار گیرد و همچنین باید دستگاه به‌طور مرتب کالیبره شود.

۱۲- انجام آزمایش:

۱۲-۱- بعد از حفر چاه شناسایی، سوند و بلوک را در عمق موردنظر قرار می‌دهیم.

۱۲-۲- تحت‌فشار قرار دادن سوند در پریودهای متناسب با نوع خاک (معمولاً بین ۷ تا ۱۴ مرتبه ، تغییر فشار انجام می‌گردد و در هر مرتبه تغییر فشار افزایشی، افزایش حجم در زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ ثانیه پس از تغییر فشار اندازه‌گیری می‌گردد .

۱۲-۳- در پایان، حصول یک منحنی کامل بارگذاری آزمایش تا زمانی که تغییر حجم به مقادیر $700\text{-}750\ cm^3$ برای لایه‌های خاک با مقاومت ضعیف($PL<0.8\ Mpa$) و تا $800\ cm^3$ برای خاکهای متوسط برسد، ادامه می‌یابد($0.8Mpa<PL<1.5Mpa$)

۱۲-۴- برخی پرسیومتر های طراحی‌شده برای لایه‌های مقاوم می‌تواند تا ۷ و ۱۰ مگا پاسکال فشار را نیز متحمل گردند.

۱۳- تصحیح‌ها لازم جهت منحنی‌های اولیه:

۱۳-۱- تصحیح فشار ناشی از ستون آب موجود در لوله‌ها و سلول

۱۳-۲- فشار Pi ناشی از اینرسی اولیه سوند، Pi= مقاومت اولیه سوند در مقابل تغییر شکل الاستیک

۱۳-۳- تغییر حجم لوله‌ها ناشی از اعمال فشار

۱۴- مقادیرE (مدول یانگ) وPL (فشار گسیختگی خاک) برای اعماق مختلف خاک (معمولاً هر یک متر) بر روی دیاگرام ارائه می‌گردد.

۱۵- این آزمایش تنها آزمایشی است که منحنی تغییر شکل و تنش در محل را ارائه می‌دهد و اجازه می‌دهد در این حال ظرفیت باربری خاک سنجیده شود .

۱۶- این آزمایش برای انواع خاک‌ها ممکن است دارای مشکل باشد، به همین دلیل اخیراً از گل حفاری بنتونیت در حین حفاری استفاده می‌شود تا دیواره چاه شناسایی، به‌خوبی حفظ گردد.

۱۷- مزایای آزمایش پرسیومتری:

۱۷-۱ - پارامترهای بیشتری از خاک را به دست می‌دهد.

۱۷-۲- بنیان نظری محکم‌تری دارد و بر همین اساس نتایج آزمایش از تکرارپذیری مناسبی برخوردار است.

۱۷-۳- نسبت به سایر آزمایش‌های برجا و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی حجم بیشتری از خاک را تحت آزمایش قرار می‌دهد و بر همین اساس به لحاظ حجم نمونه انطباق بیشتری با شرایط واقعی دارد.

۱۷-۴- آزمایش در محدوده کرنش‌های بزرگ و نزدیک به واقعی انجام می‌شود و لذا مدول برشی خاک را به‌طور مناسب‌تری به دست می‌دهد.

۱۷-۵- منحنی کاملی از رفتار تنش - کرنش خاک به دست می‌دهد و پارامترهای رفتاری نظیر مدول شکل‌پذیری که در تحلیل نشست اهمیت ویژه‌ای دارند ، به‌طور مستقیم از آزمایش حاصل می‌شوند.

۱۷-۶- دست‌خوردگی محیط ، به‌ویژه در پرسیومتر های خودحفار، چندان زیاد نیست.

۱۷-۷- برای تخمین فشار افقی خاک و همچنین موارد ویژه دیگری نظیر طراحی شمع‌های تحت بار جانبی، از کاربردهای منحصربه‌فردی برخوردار است.

۱۸- سوند منارد دارای یک سلول آزمایش و دو سلول محافظ در طرفین آن که برای کنترل انبساط استوانه‌ای سلول آزمایش طراحی‌شده‌اند ، می‌باشد.

۱۹- غشاء معمولاً از جنس لاستیک ، نئوپرن و یا فلز انعطاف‌پذیر می‌باشد. برای مکان‌هایی که احتمال تغییر مکان‌های کوچک می‌باشد، از غشاء فلزی استفاده می‌شود.

۲۰- آزمایش پرسیومتری، مدول تغییر شکل خاک ، مقاومت زهکشی نشده خاک‌های رسی اشباع و فشار جانبی را ارزیابی می‌کند و همچنین برای تخمین میزان تراکم نسبی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، کاربرد دارد .

۲۱- اندازه‌گیری‌هایی که با آزمایش پرسیومتری انجام می‌شود، به لحاظ مکانیزم بارگذاری، انطباق بیشتری با بارگذاری‌های وارده بر توده خاک دارد.

۲۲- از معایب آزمایش، اعمال بار بر محیط به‌صورت افقی است، درحالی‌که بار وارده بر سازه‌ها غالباً در جهت قائم می‌باشد.

۲۳- پرسیومتر های خودحفار، بدون تغییر در خواص خاک ، با استفاده از تئوری‌های انبساط حفره ،خواص اساسی خاک را ارائه می‌کنند. ولیکن در پرسیومتر های پیش حفار(منارد)، مشکلات مربوط به آماده‌سازی حفره و ریزش جداره گمانه در خاک‌های ناپایدار وجود دارد.

۲۴- سوندهای نوع تغییر حجم، به‌طور مستقیم تغییر مکان متوسط دیواره حفره آزمایش را نشان می‌دهند.

۲۵- آزمایش می‌تواند از نوع تنش کنترلی یا از نوع کرنش کنترلی و یا ترکیبی از این دو باشد. در آزمایش تنش کنترلی، حجم یا تغییر مکان غشاء اندازه‌گیری می‌شود و در آزمایش کرنش کنترلی ، فشار اندازه‌گیری می‌گردد .

۲۶- ساده‌ترین روش آزمایش، روش تنش کنترل‌شده می‌باشد که در حین آن فشارها و تغییر مکان‌ها ثبت می‌گردند ، فشار سیال (گاز یا روغن)، در صورت استفاده از منبع گاز با استفاده از یک تنظیم‌کننده دقیق و در صورت استفاده از منبع روغن با استفاده از یک پمپ دستی در گام‌هایی اضافه می‌شود و تغییرات حجم قسمت آزمایشی به‌وسیله واحد تغییر حجم اندازه‌گیری می‌شود.

۲۷- پرسیومتر menard از خانواده پیش حفار بوده و از نوع تغییرات حجمی می‌باشد که اندازه‌گیری می‌شود .

۲۸- نوع GB پرسیومتر منارد برای سنگ‌های ضعیف به کار می‌رود که دارای قطر 74 mm و سوند ۳ سلولی می‌باشد، هر ۳ سلول توسط آب و یا یک فشار مساوی، منبسط می‌شوند. حداکثر فشار اعمالی به سوند ، 100Mpa است .

۲۹- نوع GC پرسیومتر منارد در خاک‌ها استفاده می‌گردد و دارای قطر 74 mm می‌باشد. سوند آن به‌گونه‌ای است که سلول آزمایش درون یک غلاف قرار می‌گیرد. این سلول با آب، تحت‌فشار قرار می‌گیرد و فضای باقی‌مانده که در نقش سلول‌های محافظ ظاهر می‌شود، با گاز پر می‌شود. فشار حداکثر اعمالی به این نوع تا 4MPa است .

۳۰- سختی زمین را می‌توان با کمک یک سیکل باربرداری - بارگذاری مجدد، از هر نوع روش پرسیومتری به دست آورد، مشروط به اینکه انبساط حفره به قسمت‌های به هم نخورده زمین رسیده باشد. بنابراین آزمایش‌های روش پیش حفار، به‌طور گسترده‌ای در تعیین سختی سنگ‌های نرم و یا خاکهای سخت موردتوجه قرار می‌گیرد.

جدول- مقایسه انواع آزمایش‌های برجا در قابلیت ارزیابی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیک

نوع آزمایش	نوع خاک	پروفیل خاک	دانسیته نسبی	زاویه اصطکاک داخلی	مقاومت برشی زهکشی نشده	فشار آب منفذی	درجه پیش تحکیمی OCR	مدل یانگ E.G	ضرایب فشردگی	ضرایب تحکیم	ضریب نفوذپذیری	منحنی تنش - کرنش	پتانسیل روانگرایی
CPT	B	A	B	C	B	-	C	B	C	-	-	-	B
CPT الکتریکی	B	A	B	C	B	-	C	B	C	-	-	-	B
CPTu	A	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
DMT	B	A	B	C	B	-	B	B	C	-	-	C	B
VST	B	C	-	-	A	-	B	-	-	-	-	-	-
SPT	B	B	B	C	C	-	-	-	C	-	-	-	A
PMT منارد	B	B	C	B	B	-	C	B	B	-	-	C	C
PMT خود حفار	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A

در جدول فوق B,A و C به ترتیب درجه قابلیت آزمایش در ارزیابی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی را نشان می‌دهد.

❖ کاربردهای آزمایش پرسیومتری

۱- ایده اصلی آزمایش پرسیومتری عبارت است از انبساط حفره‌ای استوانه‌ای در زمین، با هدف اندازه‌گیری رابطه بین فشار وارده و تغییر شکل حاصله

۲- اعمال فشار منبسط کننده در این آزمایش می‌تواند توسط گاز، آب یا روغن تأمین شود .

۳- بخش‌های دستگاه پرسیومتر: سوند(Pressuremeter Probe) + واحد کنترل + میله حفاری ، کابل و شلنگ متصل‌کننده سوند به واحد کنترل

۴- انواع پرسیومتر بر اساس روش قرار دادن سوند در داخل زمین:

۴-۱- پرسیومترهای پیش حفاری‌شده Pre-Bored Pressuremeters (PBP)

۴-۲- پرسیومترهای خود حفار Self-Boring Pressuremeters (SBP)

۴-۳- پرسیومترهای فشاری (رانشی) Push-In Pressuremeters (PIP)

۴-۱- پرسیومترهای پیش حفاری‌شده - PBP

نیاز به حفاری و آماده نمودن گمانه دارند. فراگیرترین نوع پرسیومتر در مطالعات ژئوتکنیک هستند. "منارد" (Menard) رایج‌ترین نوع پرسیومتر است که با سیستم اندازه‌گیری تغییر شکل حجمی عمل می‌کند. پرسیومتر GC منارد گسترده‌ترین مدل منارد است که دارای یک سلول اندازه‌گیر مجزا بوده که در داخل غشای بزرگتر محصورشده است، فضای خالی ایجادشده در دو انتهای سلول اندازه‌گیر، سلول‌های محافظ را تشکیل می‌دهد. سلول اندازه‌گیر توسط آب و غشاء محافظ، توسط گاز منبسط می‌گردد. کاربرد این پرسیومتر برای خاکهای متراکم و سخت توصیه‌شده است.

پرسیومتر E در زمین‌های نرم تا متراکم توصیه‌شده است.

پرسیومترGB، گرچه از توسعه خاصی در مطالعات ژئوتکنیک برخوردار نبوده است ولی به‌هرحال برای به‌کارگیری در انواع خاک و به‌ویژه برای سنگ توصیه‌شده است.

۴-۲- پرسیومترهای خود حفار – SBP

مسیر انتقال خود به داخل زمین را حفاری می‌نمایند، به هم خوردگی خاک جدار گمانه به حداقل ممکن می‌رسد زیرا کاهش تنش یا اضافه تنش بر جدار گمانه اعمال نمی‌شود. اندازه‌گیری تنش برجای خاک مقدور است.

۴-۳- پرسیومتر های فشاری- PIP

سوند، مانند مخروط نفوذ استاتیکی یا نمونه‌گیر شلبی به داخل زمین فروبرده می‌شود. چون خاک جدار سوند فشرده می‌گردد، نمی‌توان منحنی تنش - کرنش سالم به دست آورد ولی می‌توان از حلقه‌های باربرداری - بارگذاری مجدد و نیز از بخش باربرداری انتهایی آزمایش، جهت استخراج برخی متغیرهای مهندسی خاک استفاده نمود. از منحنی‌های فشار - جابجایی نیز می‌توان مستقیماً برای طراحی شمع‌ها با بارگذاری جانبی به کار برد.

۵- حوزه به‌کارگیری انواع پرسیومتر

پرسیومتر PBP : می‌توان در هر نوع خاک و سنگ که در آن امکان ایجاد حفره آزمایش وجود داشته باشد، به کار گرفت.

پرسیومتر SBP: می‌توان در خاک‌هایی که فاقد شن و قلوه‌سنگ بوده یا مقدار شن در آنها ناچیز باشد و نیز در سنگ‌های ضعیف به کار گرفت.

پرسیومترPIP : در خاک‌هایی می‌توان استفاده نمود که امکان نفوذ مخروط در آنها میسر باشد.

۶- مراحل انجام آزمایش

۶-۱- کالیبراسیون (واسنجی) پرسیومتر

۶-۱-۱- کالیبراسیون اتلاف فشار

۶-۱-۲- کالیبراسیون اتلاف حجم

۶-۲- نصب سوند پرسیومتر در مقطع مورد آزمایش(Installation)

۶-۳- انجام آزمایش پرسیومتری(Expanding Test / Pressuremeter Test)

۶-۴- اصلاح داده‌ها و ترسیم منحنی فشار - حجم

۷- تحلیل نتایج و استخراج پارامترهای مهندسی از آزمایش پرسیومتری

۷-۱- مدول پرسیومتری یا مدول الاستیسیته منارد Em (Pressuremeter Menard Modulus)

۷-۲- فشار حدی PL (Limit Pressure)

۷-۳- مدول برشی

۷-۴- مقاومت برشی زهکشی نشده

۷-۵- زاویه اصطکاک داخلی(φ) و زاویه اتساع(Ψ) در ماسه‌ها

۸- استفاده از نتایج آزمایش پرسیومتر در طراحی پی

۸-۱- پی‌های سطحی

۸-۱-۱- ظرفیت باربری پی‌های سطحی

۸-۱-۲- نشست پی‌های سطحی

۸-۲- شمع‌های تحت بار محوری

۸-۲-۱- ظرفیت باربری انتهایی(Qp)

۸-۲-۲- ظرفیت باربری اصطکاکی (Qf)

۴-۱-۵-آزمایش دیلاتومتری تخت (اتساع سنجی یا انبساط سنجی) ASTM-D6635

۱- برای برآورد رفتار خاکهای ریزدانه و گهگاه دانه‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرد.(به‌غیراز خاکهای شن دار)

۲- این آزمون با آزمایش صحرایی دیلاتومتری که در سنگ انجام می‌شود، تفاوت‌های عمده‌ای دارد.

۳- لازم است در ابتدای آزمایش، سختی غشاء انعطاف‌پذیری کالیبره گردد. (معمولاً غشاء برای فشار هوا کالیبره می‌شود)

۴- به‌طورکلی محققین، این آزمون را برای برآورد مشخصات خاک‌های ماسه‌ای، سیلتی و رسی مناسب می‌دانند، ولی در خاک‌های حاوی درشت‌دانه و قلوه‌سنگ، هرچند که تیغه آن محکم و سخت باشد مورد توصیه واقع نشده و مناسب نیست.

۵- با استفاده از نتایج آزمایش دیلاتومتری در خاک می‌توان به‌طور مناسبی طبقه‌بندی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده رس‌ها، فشار آب حفره‌ای، تنش افقی خاک در عمق موردبررسی و همچنین مدول فشاری زهکشی نشده را برآورد نمود.

۶- علاوه بر موارد فوق، به‌طور غیرمستقیم و در درجه دوم می‌توان پارامترهایی نظیر وزن مخصوص خاک، مدول برشی، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک را برای مصالح مورد آزمایش تخمین زد.

۷- برای برآورد پارامترهای استخراج‌شده از آزمایش، ابتدا لازم است با استفاده از فشارهای اصلاح‌شده، شاخص‌های سه‌گانه I_D (شاخص مصالح)،E_D (مدول دیلاتومتری) و K_D (شاخص تنش‌های افقی) محاسبه گردد.

۸- با توجه به اینکه در این آزمون از تجهیزات آزمایش CPT برای جایگذاری دستگاه و نفوذ آن در زمین استفاده می‌شود، استفاده توأم از آزمون‌های CPT و FDMT، ضمن کاهش هزینه‌های مطالعات، می‌تواند نتیجه مفیدی برای تخمین پارامترهای رفتاری زمین به دست دهد.

۹- نتایج را می‌توان به مقاومت برشی زهکشی نشده، فشارهای جانبی خاک ، پیش تحکیمی و مدول الاستیسیته مرتبط دانست.

۱۰- به‌طور کل با سرعت $20\ \frac{mm}{Sec}$ فرو می‌رود و آزمایش در هر ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر انجام می‌شود.

۱۱- مقادیر k، Cv، OCR، Ko و Cu و سختی خاک را می‌توان به دست آورد.

❖ استاندارد **ISRM** به‌منظور انجام آزمایش دیلاتومتری

۱- دستگاه‌های دیلاتومتر متداول مورداستفاده در ایران ، به‌منظور مطالعات برجا و تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری، از نوع دیلاتومتری انعطاف‌پذیر با اندازه‌گیری تغییر شکل شعاعی بوده که به دستگاه دیلاتومتر IFO96 معروف می‌باشند.

۲- عملکرد دیلاتومتر به‌صورت واردکردن بار شعاعی به دیوار گمانه و اندازه‌گیری تغییر شکل‌های ناشی از اعمال بار در سه جهت می‌باشد.

۳- قطر خارجی دستگاه 96mm و طول بدنه اصلی دستگاه (Probe) یک متر می‌باشد.

٤- محدوده عملکرد دستگاه:

۴-۱- اندازه‌گیری جابه‌جایی حداکثر تا ۲۰ میلی‌متر

۴-۲- اعمال فشار حداکثر 100 bar توسط کپسول گاز نیتروژن

۴-۳- محدوده اندازه‌گیری مدول تغییر شکل از ۵ مگا پاسکال به بالا

۴-۴- عمق انجام آزمایش، حداکثر ۱۰۰ متر

۴-۵- طول درگیری پکر با دیواره گمانه ۵۷۰ میلی‌متر

۴-۶- قطر مقطع مورد آزمایش ۱۰۱ میلی‌متر

❖ **انجام آزمایش دیلاتومتری**

۱- آماده‌سازی گمانه

حفر گمانه با دقت و کیفیت بالا به قطر ۱۰۱ میلی‌متر در مقطع آزمایش، افزایش قطر گمانه به ۱۳۱ میلی‌متر در قسمت بالای مقطع آزمایش تا عمقی که مغزه‌های موجود به‌صورت آبرفت یا مغزه‌های سنگی با درزه و شکاف و خردشوندگی بالا باشند. سپس عملیات تمیز کردن گمانه انجام می‌گیرد. انجام آزمایش در کوتاه‌ترین وقفه ممکن از زمان حفر گمانه به‌منظور حذف تأثیر عامل هوازدگی بر روی نتایج و اطمینان خاطر از کسب نتایج مربوط به سنگ کاملاً بکر، صورت می‌پذیرد. جهت محافظت از دیواره گمانه در بالای مقطع انجام آزمایش، به‌منظور اطمینان از پایداری دیواره با کار گذاشتن لوله جدار محافظ به قطر ۱۳۱ میلی‌متر اقدام می‌شود.

۲- آماده‌سازی دستگاه و کالیبراسیون

برای کنترل عملکرد و کالیبراسیون، بدنه اصلی دستگاه را درون لوله استوانه‌ای فلزی با قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر گذاشته، با اعمال بار ثابت 5-10 bar به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه ، نشتی احتمالی را چک می‌کنیم. در ادامه مراتب کنترل صحت عملکرد حس‌گرها را بر اساس برگه کالیبراسیون آنها انجام می‌دهیم .

۳- اعمال سیکل‌های بارگذاری و باربرداری

در هر سیکل، فشار (Pi)، طی حداقل ۴ پله افزایش بار به ماکزیمم مقدار پیش‌بینی‌شده در آن سیکل افزایش می‌یابد. بار اعمال‌شده در هر پله، تا زمانی که میزان تغییر شکل‌های ثبت‌شده، کوچک‌تر از $0.02\frac{mm}{min}$ شود، ثابت نگه‌داشته می‌شود. بار ماکزیمم هر سیکل به مدت ۱۰ الی ۲۰ دقیقه ثابت، و سپس کاهش بار تا رسیدن به (Pi) انجام می‌گیرد. مرحله باربرداری نیز به‌صورت پلکانی ۴ مرحله‌ای می‌باشد. در شرایط مطلوب، فشار اولیه آزمایش(Pi)، ۵-۲ درصد فشار مؤثر ماکزیمم(P_{Max}) را در نظر گرفته می‌شود. مقدار (P_{Max})

معمولاً دو برابر فشار وارد بر سازه مورد طراحی در مرحله بهره‌برداری می‌باشد. طبق استاندارد، ۳ سیکل بارگذاری - باربرداری جهت تفسیر نتایج کافی می‌باشد. ماکزیمم بار در سیکل اول و دوم به ترتیب ۳۳٪ و ۶۷٪ ماکزیمم بار در سیکل سوم در نظر گرفته می‌شود. مقدار مدول تغییر شکل‌پذیری با افزایش فشار، افزایش می‌یابد که به دلیل بسته شدن درزه و ترک‌های توده سنگ تحت‌فشار می‌باشد و سنگ را در فشار بالاتر، سخت‌تر می‌سازد. از داده‌های سیکل اول هیچ‌گاه نباید برای محاسبه مدول تغییر شکل‌پذیری استفاده شود، زیرا عمده جابجایی‌ها ناشی از بسته شدن درزه و شکاف‌ها در این مرحله اتفاق می‌افتد.

روش میانگین‌گیری از مدول های حاصل‌شده از سیکل‌های دوم به بعد، پیشنهاد می‌گردد.

❖ نکات کارشناسی و سایر ملاحظات آزمایش دیلاتومتری **ASTM – D4719 – Dilatometer**

۱- هدف اندازه‌گیری تغییر شکل درجای سنگ و خاک از طریق اندازه‌گیری انبساط شعاعی گمانه، تحت‌فشار یکنواخت اعمال‌شده به‌وسیله پروب استوانه‌ای دیلاتومتر است.

۲- این روش برای سنگ‌های سخت و نرم و با تجهیزات خاکی برای خاک‌های نرم و سخت توصیه‌شده است.

۳- نتایج برای تعیین خصوصیات تغییر شکل و خزش درجا، در سنگ بکر استفاده می‌شود.

۴- در سنگ‌های رسی یا شکننده و یا ساختگاه های دارای ترک و درزه که در آن به دست آوردن نمونه از گمانه سخت و یا ناکافی می‌باشد، دیلاتومتر استوانه‌ای برای به دست آوردن مشخصات گمانه و مقایسه‌های تغییر شکل‌پذیری نسبی لایه‌های مختلف سنگ به کار می‌رود.

۵- انواع مستندات کالیبراسیون؛

۵-۱- کالیبره دقیق وسایل اندازه‌گیری شامل؛ کرنش‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها

۵-۲- کالیبره دستگاه برای محاسبه اثر تغییر شکل غشاء لاستیکی(Probe)

۵-۳- کالیبره دستگاه برای ملاحظه اثر سختی غشاء لاستیکی

۶- روش مناسب بررسی رفتار تنش - تغییر شکل سنگ و تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری سنگ می‌باشد.

۷- آزمایش برای سنگ‌های نسبتاً سخت (مدول در محدوده ۱ تا ۲۵ گیگا پاسکال) قابل‌استفاده می‌باشد.

در سنگ‌های بسیار سخت از روش جک گمانه‌ای و در سنگ‌های بسیار نرم و خاک‌ها از پرسیومتری استفاده می‌شود.

به‌عنوان یک آزمایش برجا که توده سنگ را تحت بارگذاری قرار می‌دهد، آزمون دیلاتومتر نتایج واقعی‌تری نسبت به آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد.

۴-۱-۶- آزمایش برش پرّه‌ای صحرایی در خاکهای چسبنده ASTM – D2573

۱- آزمایش محدود به خاک‌هایی می‌گردد که چرخش آرام تیغه‌ها (۶ درجه در دقیقه) بتواند باعث گسیختگی برشی زهکشی نشده در آنها گردد.

۲- معمولاً پرّه‌هایی با قطر ۳۸ تا ۹۲ میلی‌متر، ارتفاع ۷۶ تا ۱۸۴ میلی‌متر و ضخامت ۱/۶ تا ۳/۲ میلی‌متر مورداستفاده قرار می‌گیرند. پرّه‌های بزرگتر برای خاکهای سخت به کار گرفته می‌شوند.

۳- برای حداقل نمودن اثر دست‌خوردگی ناشی از نصب پرّه‌ها، بهتر است فاصله انتهای گمانه از بالای پرّه‌ها بیشتر از ۴ برابر قطر گمانه باشد.

٤- آزمایش ۵ دقیقه پس از جایگذاری دستگاه در خاک شروع می‌شود. سرعت چرخش پرّه‌ها برابر ۶ درجه در دقیقه، ظرف مدت ۲ تا ۵ دقیقه خاک گسیخته می‌گردد. (زمان گسیختگی در رس‌های خیلی نرم، ممکن است بین ۱۰ تا ۱۵ دقیقه به طول انجامد)

۵- در گزارش خروجی دستگاه دیجیتالی، نمودار کامل گشتاور نیرو در مقابل زمان و یا زاویه چرخش رسم می‌گردد. در دستگاه معمولی، در فواصل زمانی ۳۰ تا ۶۰ ثانیه ثبت داده‌ها انجام می‌گردد.

٦- آزمایش برش پرّه برای ارزیابی مشخصات خاکهای ریزدانه اشباع کاربرد دارد.

۷- درصورتی‌که برای انجام آزمایش، کمانه غلاف گذاری نشده باشد، بین خاک و میله‌های آزمایش، اصطکاکی به وجود می‌آید، این اصطکاک باعث می‌شود که نیروی گشتاور بیشتری توسط دستگاه ثبت گردد. لازم است قبل از انجام محاسبات، گشتاور ناشی از اصطکاک میله‌ها $T_{(rod)}$ از گشتاور ثبت‌شده دستگاه $T_{(Max)}$ کسر گردد:

مقدار خالص گشتاور = $T_{(net)} = T_{(Max)} - T_{(rod)}$

* **<u>آزمون برش پرّه در حالت بازسازی (آزمایشگاهی) $Sr_{(VST)}$</u>**

۱- روابط موجود در آزمون برش پرّه صحرایی و سایر ملاحظات نیز در این آزمایش مصداق دارد.

۲- تفاوت؛ در روش بازسازی برای قرائت $T_{(net)}$ ، لازم است پرّه‌ها به میزان ۱۰ دور و به‌طور سریع در داخل خاک چرخانده شوند.

۳- فاکتور حساسیت خاک نیز قابل‌محاسبه است : $St_{(VST)} = \frac{Su_{(VST)}}{Sr_{(VST)}}$

۴- با افزایش PI (شاخص خمیری خاک) دقت آزمون برش پرّه در تخمین مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد.

۵- برخی محققین توصیه کرده‌اند که نتایج صحرایی را در ضریب اصلاح μ_R ضریب نمود:

$$Su = \mu_R * Su_{(VST)} \quad , \quad \mu_R = 1.05 - b\,(PI)^{0.5} \quad , \quad b = 0.015 + 0.0075\,\mathrm{Log}\,(t_f)$$

t_f = زمان وقوع گسیختگی برحسب دقیقه

۶- از نتایج برش پرّه ، تنش پیش تحکیمی خاکهای رسی (σp) نیز قابل‌محاسبه است:

$$\sigma p = 3.54 * Su_{(VST)} \quad \text{Kulhawy and Mayne (1990)}$$

❖ نکات فنی و کارشناسی آزمایش برش پرّه‌ای صحرایی در خاکهای چسبنده ASTM – D2573

۱- این روش شامل آزمایش در خاکهای نرم چسبنده اشباع می‌باشد.

۲- یک اصل مهم آن است که اصطکاک دستگاه و میله پره در محاسبه منظور شود.

۳- دستگاه‌هایی که موجب رانش جانبی می‌گردند، توصیه نمی‌شوند.

۴- ارتفاع پرّه باید ۲ برابر قطر آن باشد.

۵- اگر منحنی‌های چرخشی برحسب پیچش تعیین می‌شوند، اساسی است که میله‌های پیچشی (قبل از استفاده در محل) کالیبره شوند. مقدار تاب میله (هرچقدر که باشد) باید برحسب درجه بر فوت برای واحد پیچش بیان شود. این تصحیح مهم‌تر می‌شود، همان‌طور که عمق آزمایش افزایش می‌یابد و کالیبره باید حداقل، با حداکثر عمق پیش‌بینی‌شده برای آزمایش انجام گیرد.

۶- پیچش، باید به میله‌های پیچشی اعمال شود تا به پرّه انتقال یابد.

۷- بهتر از پیچش توسط یک وسیله چرخ‌دنده‌ای به پرّه اعمال شود.

۸- هرچه خاک نرم‌تر باشد، قطر پرّه آزمایش بزرگتر باشد.

۹- در حالتیکه محفظه پرّه به کار می‌رود، محفظه به عمقی که حداقل ۵ برابر قطر محفظه پرّه‌ها، کمتر از عمق موردنظر برای نوک پرّه است جلو برده شود.

۱۰-در جاییکه از محفظه پرّه استفاده نشود، گمانه‌زنی را پایین‌تر از عمقی که ممکن است نوک پرّه نفوذ کند و در خاک دست‌نخورده، در عمقی حداقل ۵ برابر قطر گمانه متوقف کنید.

۱۱-سرعت پیچش، بیشتر از یک‌دهم درجه بر ثانیه باشد.

۱۲-زمان گسیختگی خاک‌های مرسوم بین ۲ تا ۵ دقیقه و در خاکهای رس خیلی نرم، زمان ممکن است بیشتر از ۱۰ تا ۱۵ دقیقه به طول انجامد.

۱۳-آزمایش را در هر خاکی که در طی زمان آزمایش اجازه زهکشی یا اتساع را به خاک بدهد، انجام ندهید. مانند ماسه‌ها یا سیلت ها یا خاک‌هایی که پرّه با سنگ‌ها یا شیل ها برخورد می‌کند.

۱۴-ابعاد قطر و ارتفاع پرّه می‌بایست به‌صورت دوره‌ای کنترل و اندازه‌گیری شوند تا از کج نبودن و فرسوده نبودن پرّه اطمینان حاصل کنیم.

۱۵-موارد تخصصی گزارش:

اندازه و شکل پرّه (نوک‌تیز یا راست‌گوشه) + عمق نوک پرّه + عمق نوک پرّه در زیر محفظه یا ته گمانه + قرائت حداکثر پیچش و قرائت‌های متوسط چنانچه برای آزمایش دست‌نخورده لازم باشد + زمان گسیختگی + سرعت بازسازی + روش ایجاد گمانه + توصیف پرّه (آیا محفظه دارد یا خیر) + روش اعمال و اندازه‌گیری پیچش

❖ نکات کارشناسی دیگر و سایر ملاحظات آزمایش برش پره‌ای

۱- برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده در خاکهای ریزدانه (رس و سیلت) نرم تا متوسط به کار می‌رود.

۲- انجام این آزمایش در خاک‌های درشت‌دانه (شن و ماسه) به دلیل زهکشی بالا در این خاکها و عدم حصول شرایط زهکشی نشده امکان‌پذیر نیست.

۳- مدل دستگاه موجود در ایران Geonor H-10 (نروژی) می‌باشد که برای اعماق تا ۳۰ متر قابل‌استفاده است.

٤- در عمل تجربه‌شده که مقادیرSu آزمایش، دست بالا بوده و ضریب اصلاح کاهش که به PI بستگی دارد، باید اعمال شود. برای تغییرات PI در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ درصد، مقادیر ضریب اصلاح به قرار ۱ تا ۰/۶ می‌باشد .

٥- در برخی از خاک‌ها به علت خصوصیات ویژه آن، نتایج آزمایش دارای خطا می‌باشند (مانند خاکهای آلی حاوی ریشه درختان و...)

٦- به علت دست‌خوردگی خاک در هنگام قرار دادن پرّه برش در عمق موردنظر و همین‌طور تأثیر مقاومت اصطکاکی میله‌های آهنی، امکان وجود اشتباه در نتایج حاصله وجود دارد.

۷- این آزمایش هم به‌صورت صحرایی و هم به‌صورت آزمایشگاهی انجام می‌شود.

۸- سرعت اعمال لنگر پیچشی با نرخ ۶ تا ۱۲ درجه در دقیقه می‌باشد.

۹- آزمایش برش پرّه در محل رسوبات خیلی نرم، حساس و ریزدانه به کار می‌رود. این آزمایش معمولاً در ۰/۵ تا ۱ متر در رس‌های نرم و ماسه‌های لای دار ریز انجام می‌شود.

۱۰- در خاک‌های بسیار نرم، انجام آزمایش بدون حفاری قبلی، تا عمق ۱۵ متری نیز امکان‌پذیر است.

۱۱- چنانچه شروع آزمایش در کمتر از زمان یادشده انجام شود، اثرات ناشی از فروبردن پرّه در خاک، مقدار مقاومت موردراندازه‌گیری را کاهش می‌دهد و چنانچه زمان زیادتری بعد از فروکردن پرّه در خاک، آزمایش صورت گیرد، خاک تمایل به تثبیت یا تحکیم داشته و با افزایش در مقاومت همراه خواهد بود.

۱۲- حفاری قبل از آزمایش باید به صورتی باشد که لایه زمین در عمق مورد آزمایش، به هم خوردگی پیدا نکرده باشد.

۱۳- سنگ‌هایی که احتمالاً در مجاورت دستگاه برش قرار دارند، روی نتایج آزمایش مستقیماً تأثیر می‌گذارند. این تأثیرگذاری در مواردی که زمین از جنس لای و ماسه است، در مجاورت لایه‌های شنی یا سنگ‌های منفرد در خاک، محتمل است.

پیش نویس

۴-۲- برش برجا

۴-۲-۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون ساخت و ساز و انجام پروژه های عمرانی مختلف، شناخت ویژگی های ژئوتکنیکی آبرفتهای درشت دانه در بسیاری از مناطق مثل شهر تهران لازم است. انجام برخی آزمایشهای برجای متداول نظیر SPT و CPT در این مصالح 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. خاکهای با طبقه بندی G و S (شن و ماسه) دارای بافت درشت و اکثرا دارای سیمانتاسیون می باشند. در آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی با ریمولد کردن نمونه ها، شرایط تراکم طبیعی زمین و خاک (سیمانتاسیون) دچار تغییرات عمده ای میگردند. این تغییرات، اثر منفی بر نتایج آزمایشات برش مستقیم خاکهای دانه ای دارد که نتیجه آن استخراج پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح غیر واقعی در این آزمایش می باشد ، به منظور بر طرف کردن مشکل اصلی آزمایش برش مستقیم در مصالح دانه ای و انجام آزمایش بر روی نمونه های بکر و دارای سیمانتاسیون، دستگاه برش مستقیم برجا طراحی گردیده است که این دستگاه در اصل برای اندازه گیری مقاومت برشی نمونه های سنگی با شرایط طبیعی محل طبق استاندارد ASTM D 4552 طراحی گردیده است در همین راستا در استاندارد BS5930 علاوه بر انجام این آزمایش بر روی مصالح سنگی بر انجام آزمایش بر روی مصالح خاکی نیز اشاره شده است.

با توجه به اینکه مصالح شن و ماسه همراه با ذرات متفاوت ریزدانه در اکثر استانها موجود می باشد بر لزوم انجام این آزمایش بر روی مصالح دانه ای در سطح کلیه استانها و جایگزین نمودن این آزمایش بر آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی تاکید می گردد.

۴-۲-۲-محل و تعداد انجام آزمایش:

با توجه به حساسیت و ابعاد سطح اشغال و زمین ساختگاه مورد مطالعه و همچنین قرار گرفتن سازه های اطراف ساختگاه از جمله سازه های حساس ، بسیار حساس و همچنین بلند مرتبه توصیه می شود انجام آزمایش حدالامکان در بحرانی ترین ضلع ممکن صورت پذیرد و تعداد انجام آزمایشات با توجه به حساسیت پروژه و عمق گودبرداری و با توصیه مهندس ژئوتکنیک تعیین گردد.(توصیه می شود در صورتی که سطح اشغال تا ۳۰۰ متر مربع و عمق گودبرداری بیش از ۷ متر باشد حداقل یک مورد آزمایش برش برجا و اگر سطح اشغال بیشتر از ۳۰۰ متر مربع و عمق گودبرداری بیش از ۷ متر باشد حداقل ۲ مورد آزمایش برش برجا در ضلع های مختلف و اگر عمق گودبرداری تا عمق ۷ متر باشد با هر سطح اشغال تعداد آزمایشات با صلاحدید مهندس ژئوتکنیک و مهندس محاسب محترم تعیین گردد.)

۴-۲-۳- عمق انجام آزمایش:

جهت انجام آزمایشات برش مستقیم برجا توصیه می شود اگر عمق دیواره گود برداری از ۰ تا ۷ متر باشد آزمایشات برجا در کف گود صورت پذیرد و اگر عمق دیواره گود تا ۱۰ متر باشد در ۲/۳ ارتفاع گود از بیشترین تراز دیواره گود انجام پذیرد.همچنین در صورت گودبرداری بیش از ۱۰ متر به ازای ۰ تا ۵ متر افزایش عمق گودبرداری یک مورد آزمایش برجا به تعداد آزمایشات فوق افزوده شود.(در صورت داشتن تغییر لایه تعداد آزمایشات به صلاحدید مهندس ژئوتکنیک و مهندس محاسب افزایش یابد.)

۴-۲-۴- ابعاد گالری :

جهت انجام آزمایش برش برجا در چاهک دستی به یک گالری به ابعاد ۵ متر طول ۲ متر عرض و ۲ متر ارتفاع مورد نیاز می باشد و توصیه می شود گالری مورد نظر جهت پایداری و عدم ریزش به صورت اصطلاحا کله قندی حفر گردد.

۴-۲-۵- ابعاد جعبه آزمایش:

با توجه به ماهیت آزمایشات استفاده از یک جعبه فلزی با ابعاد ۵۰*۵۰*۲۵ و بیشتر مورد لزوم می باشد.در ضمن توصیه می شود قطر صفحات جعبه کمتر از ۲۵ میلیمتر نباشد.

۴-۲-۶- تعداد جعبه آزمایش:

جهت انجام آزمایش برش مستقیم برجا و استخراج پارامتر ها حداقل سه مورد آزمایش برروی سه جعبه آزمایش صورت پذیرد.

۴-۲-۷- تعداد جک ها :

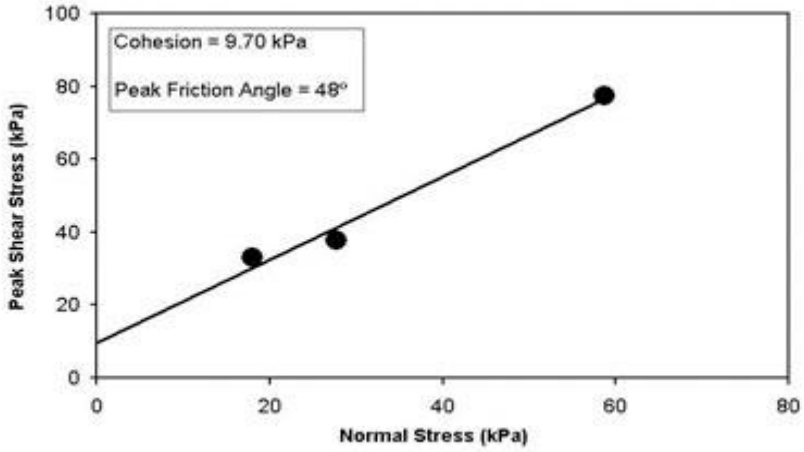
برای انجام آزمایش برش مستفیم برجا به تعداد ۲ پمپ جهت اعمال نیرو به جک ها و به ۲ جک یکی ۳۰ تن برای اعمال نیروی قائم و دیگری ۵۰ تن برای اعمال نیرو افقی (برشی) مورد نیاز می باشد.

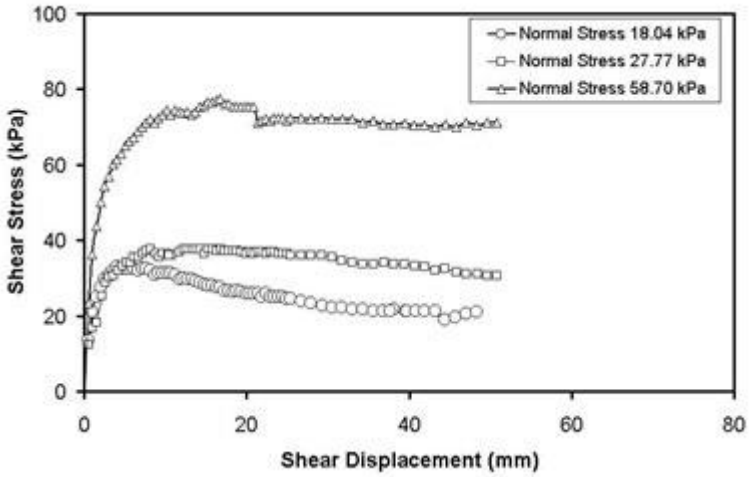
۴-۲-۸- تعداد گیج ها :

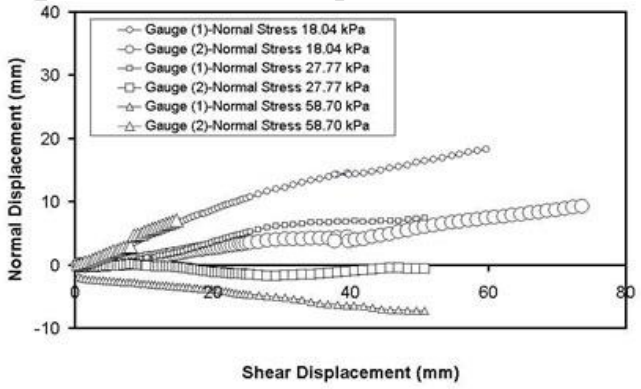
برای انجام آزمایش برش مستقیم برجا نیازمند ۴ گیج با کولس ۵ سانتی متری و با دقت ۰/۰۱ می باشیم.

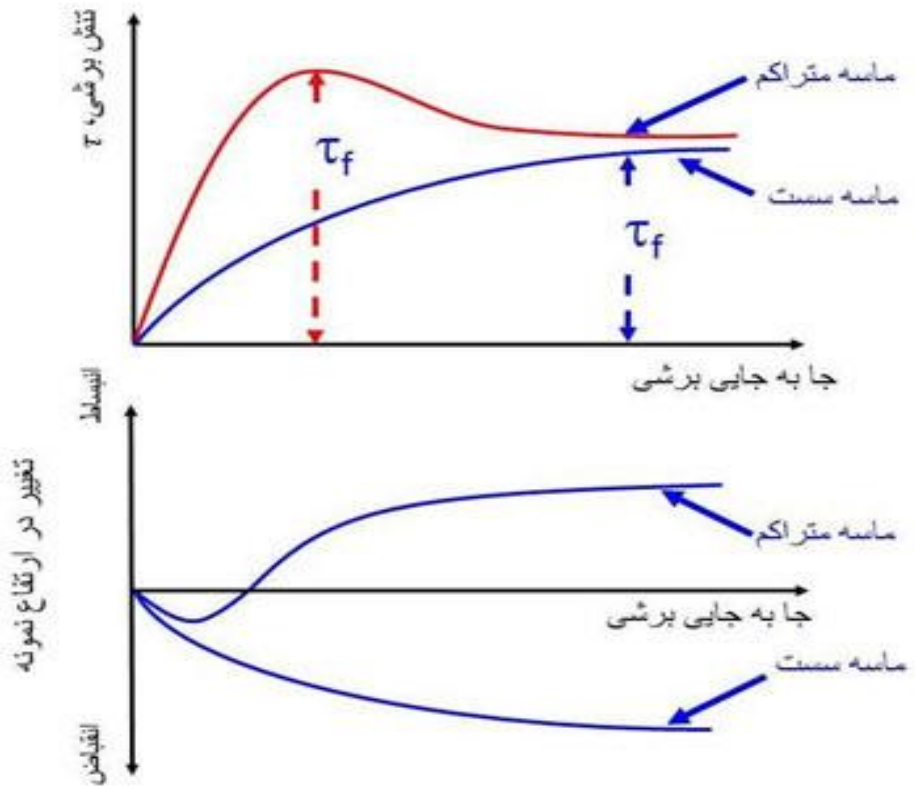
۴-۲-۹- نحوه انجام آزمایش:

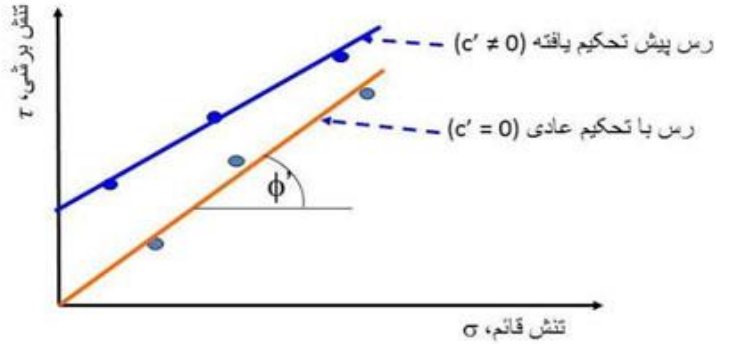
تایج بدست آمده از آزمایش شامل نمودار تنش برشی نسبت به تنش قائم در نقطه پیک، تنش برشی به تغییر مکان برشی و تغییر مکان قائم نسبت به تغییر مکان برشی می باشد. زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در این آزمایش بدون اعمال ضریب اطمینان بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع ارائه می گردد.

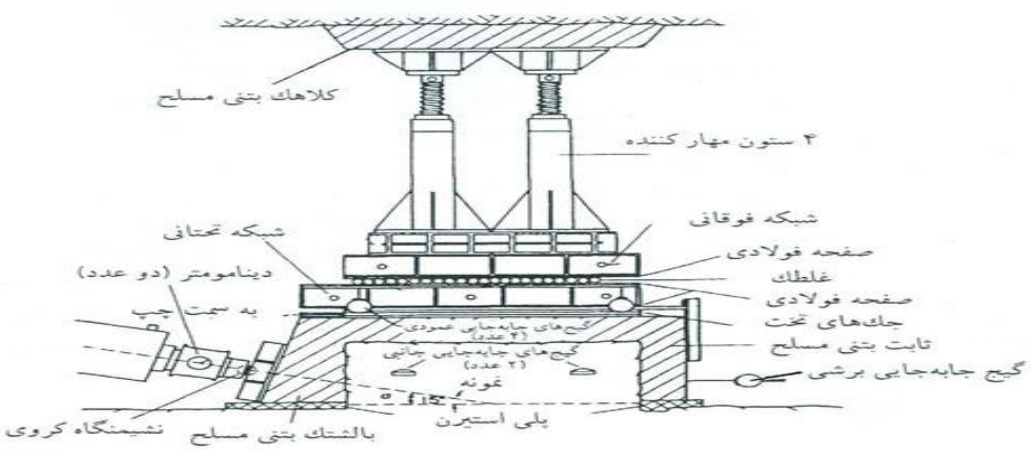

Cohesion = 9.70 kPa
Peak Friction Angle = 48°
Peak Shear Stress (kPa)
Normal Stress (kPa)
0
20
40
60
80
100

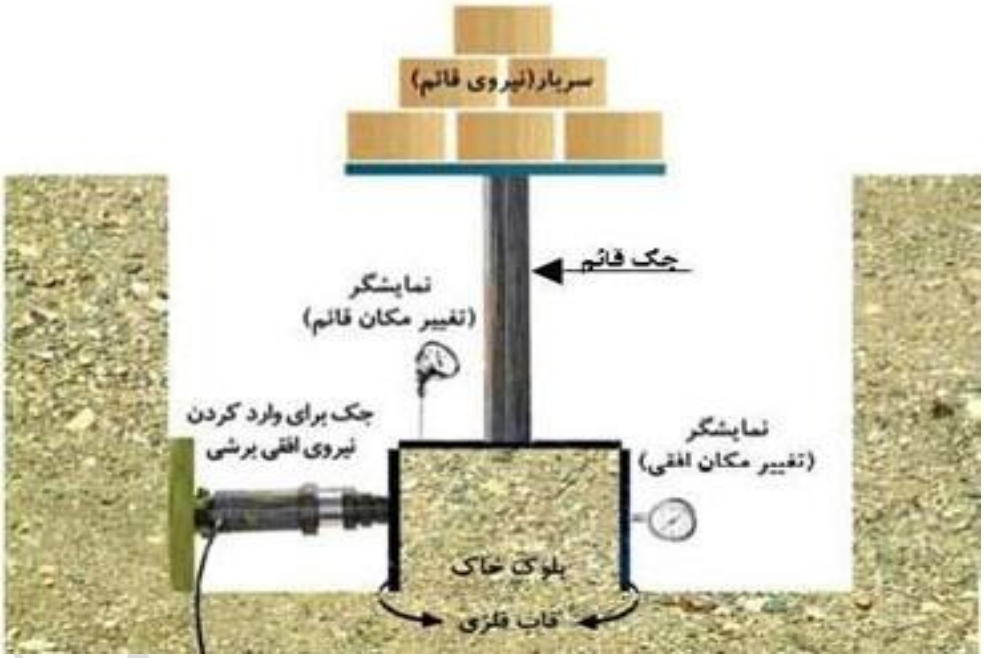

Normal Stress 18.04 kPa
Normal Stress 27.77 kPa
Normal Stress 58.70 kPa
Shear Stress (kPa)
Shear Displacement (mm)
0
20
40
60
80
100


Gauge (1)-Nornal Stress 18.04 kPa
Gauge (2)-Nornal Stress 18.04 kPa
Gauge (1)-Nornal Stress 27.77 kPa
Gauge (2)-Nornal Stress 27.77 kPa
Gauge (1)-Nornal Stress 58.70 kPa
Gauge (2)-Nornal Stress 58.70 kPa
Normal Displacement (mm)
Shear Displacement (mm)
-10
0
10
20
30
40
0
20
40
60
80


تنش برشی، τ
ماسه متراکم
ماسه سست
τ_f
τ_f
جا به جایی برشی
انبساط
انقباض
تغییر در ارتفاع نمونه
ماسه متراکم
جا به جایی برشی
ماسه سست


رس پیش تحکیم یافته ($c' \neq 0$)
رس با تحکیم عادی ($c' = 0$)
ϕ'
تنش برشی، τ
تنش قائم، σ


کلاهک بتنی مسلح
۴ ستون مهار کننده
شبکه فوقانی
صفحه فولادی
غلطک
صفحه فولادی
جک‌های تخت
تابت بتنی مسلح
گیج جابه‌جایی برشی
شبکه تحتانی
دینامومتر (دو عدد)
به سمت چپ
گیج‌های جابه‌جایی عمودی (۴ عدد)
گیج‌های جابه‌جایی جانبی (۲ عدد)
غوطه
پلی استیرن
بالشتک بتنی مسلح
نشیمنگاه کروی


سربار(نیروی قائم)
جک قائم
نمایشگر
(تغییر مکان قائم)
جک برای وارد کردن
نیروی افقی برشی
نمایشگر
(تغییر مکان افقی)
بلوک خاک
قاب فلزی

۴-۳- بارگذاری صفحه ای

۴-۳-۱- مقدمه

آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) طبق استاندارد ASTM D1194 با هدف اصلی اندازه‌گیری نشست خاک به ازای بارهای مختلف و تعیین ظرفیت باربری بستر ساختگاه پروژه‌های با اهمیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش به دو روش کنترل تنش و کنترل تغییر شکل قابل اجرا است. در روش کنترل تنش بار نهایی به صورت تدریجی (Incremental) به صفحه آزمایش وارد می‌شود و در روش کنترل تغییر شکل صفحه آزمایش با سرعت ثابت در زمین فرو رانده می‌شود. مقادیر نشست صفحه در هر مرحله از بارگذاری توسط گیج‌های تعبیه شده در نقاط مناسب واقع بر صفحه ثبت می‌شود. با استفاده از نتایج نشست و ظرفیت باربری حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه و روابط تجربی ارائه شده می‌توان به میزان نشست و ظرفیت باربری پی با ابعاد واقعی دست یافت.

❖ مزایا:

آزمایش PLT تقریبا برای همه انواع خاک‌ها درسطح یا در تراز پی قابل استفاده است. در خاک‌های سخت، سنگ نرم و شن‌های درشت که امکان نمونه‌گیری و استفاده از آزمایش‌های SPT، CPT، وجود ندارد بسیار مفید و کارگشا است.

❖ معایب:

در اغلب موارد ظرفیت سیستم بارگذاری برای رساندن خاک به حد گسیختگی و تعیین ظرفیت باربری کفایت نمی‌کند.

انجام آزمایش PLT در اعماق زیاد و زیر سطح آب مقدور نیست.

هزینه اجرای آزمایش PLT بالا بوده و از این جهت صرفا برای پروژه‌های مهم صرفه اقتصادی دارد.

امکان نمونه‌گیری از خاک در این روش وجود ندارد.

عمقی از بستر که تحت تاثیر بارگذاری صفحه PLT قرار می‌گیرد بسیار کمتر از عمق تحت تاثیر بستر تحت سازه‌ی واقعی است که این مساله می‌تواند باعث خطا در نتایج آزمایش شود.

عدم امکان رعایت بندهای اجرایی آیین‌نامه در صورت اجرای آزمایش در داخل چاه و گالری‌ها.

به دلیل استفاده از بار مرده و یا ماشین‌آلات سنگین به عنوان تامین کننده نیروی عکس العمل نیاز به زمین مسطح برای انجام آزمایش است.

محدودیت استفاده از آزمایش PLT در خاک‌های دارای نشست تحکیمی.

۴-۳-۲-تجهیزات و نحوه انجام آزمایش:

صفحات فولادی ، معمولا دایره ای با قطر ۱۵ تا ۱۰۰ سانتیمتر و یا مربعی به ابعاد ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر برای اطمینان از صلبیت صفحه ، اغلب از ۳ صفحه هم مرکز با قطر های مختلف استفاده می شود.قطر صفحه آزمایش ، نباید کمتر از ۶ برابر حداکثر اندازه دانه های خاک باشد. همچنین در صورت نیاز برای افزایش سختی صفحه از سخت کننده (Stiffener) استفاده می شود.

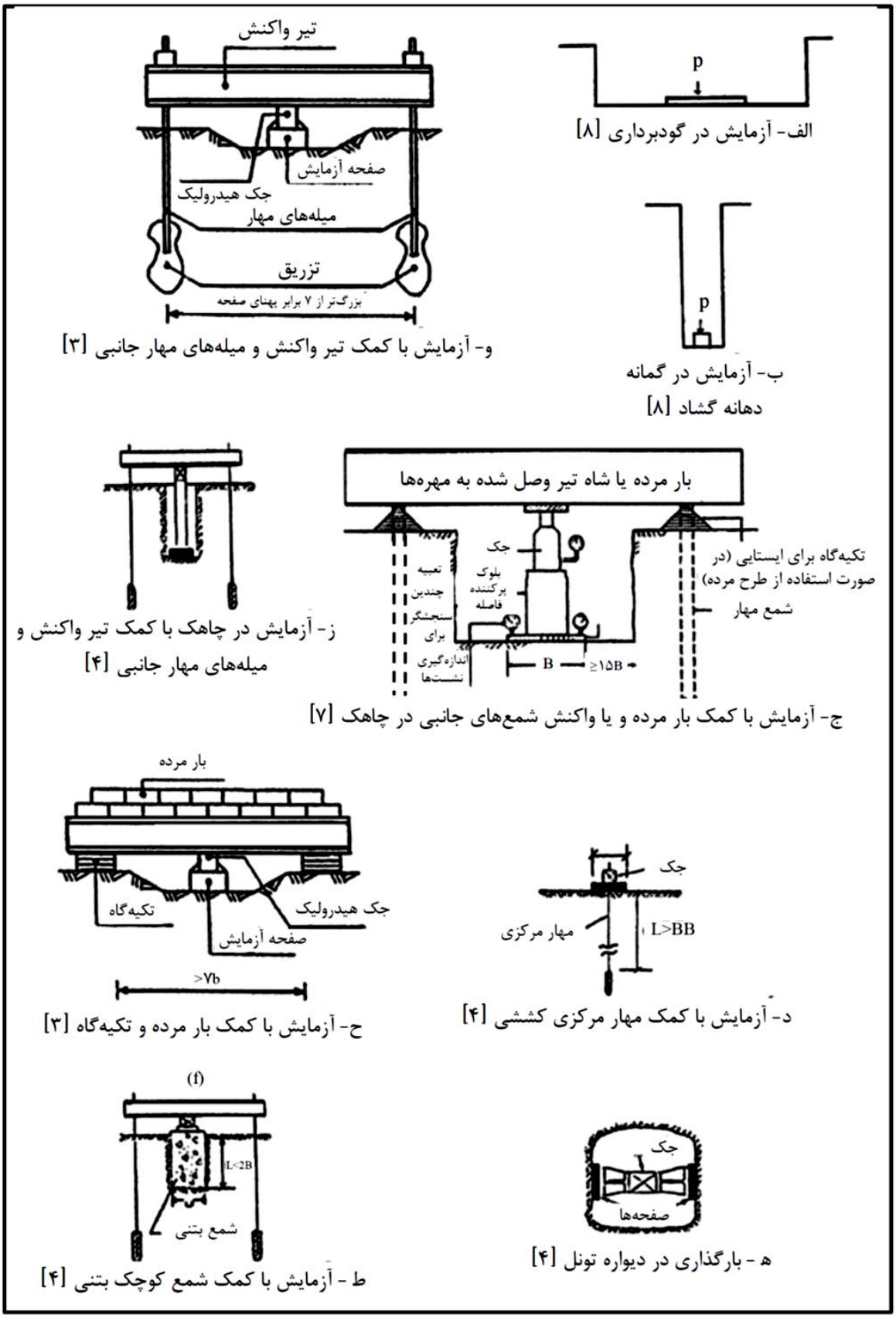
- جک هیدورلیکی به همراه گیج اندازه گیری فشار قائم و ۳ عدد گیج اندازه گیری نشست.
- برای اعمال فشار جک ، لازم است که جک به یک تکیه گاه تغییر شکل ناپذیر بسته شود.می توان از تیر فولادی که وزنه های سنگین روی آن باشد استفاده کرد.همچنین می توان از محور ماشین آلات سنگین استفاده نمود.
- اگر قرار باشد آزمایش در یک گالری افقی انجام شود ، مانند آزمایش جکینگ توده های سنگی ، از سقف گالری به عنوان تکیه گاه جک های هیدرو لیکی استفاده می شودو شایسته است نتایج را با توجه به عمق آزمایش و سختی خاک محیط تصیح نمود.
- برای انجام آزمایش گودالی به قطر حداقل ۴ برابر قطر صفحه آزمایش و تا عمق پی (df) حفر شده و صفحه در مرکز سوراخ قرار داده می شود.
- گام های بارگذاری ، حداکثر مساوی ۱/۴ تا ۱/۵ بار نهایی تخمین زده شده می باشد.
- در هر گام بارگذاری ، نشست شالوده توسط گیج با دقت ۰/۲۵ میلیمتر اندازه گیری شود.
- بار هر گام بارگذاری حداقل به اندازه ۱/۰ یک ساعت حفظ شود.
- خاتمه آزمایش ، وقوع لحظه گسیختگی ، وقوع نشست به میزان ۲۵ میلیمتر یا زمانی که تنش صفحه به ۲ یا ۳ برابر بار طراحی پیشنهادی برای پی اصلی برسد.
- همچنین پس از برداشتن بار ، باید برجهندگی (بازگشت) الاستیک خاک را برای مدت زمانی حداقل یا طول زمان یک نمو بار ثبت کرد.ثبت نشست ها برای یک ساعت اول هر ۵ تا ۱۰ دقیقه انجام می گیرد.
- گزارش به صورت منحنی های زمان – نشست و بار – نشست ارائه می گردد.بنحویکه استخراج بار نهایی به آسانی مقدور می باشد.
- برای محاسبه مدول الاستیسیته از روی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه ، استاندارد BS5930 رابطه زیر را پیشنهاد کرده است:

$$E= \pi.Q.B\ (1-\mu 2)/4e$$

- E= مدول الاستیسیته
- V=نسبت پوآسون خاک
- B= عرض صفحه

- Q= فشار اعمال شده بین صفحه و خاک
- e= نشست صفحه
- اگر هدف آزمایش بارگذاری صفحه ، بدست آوردن مقادیر مقاومت برشی یا ظرفیت باربری در خاک های چسبنده باشد، بارگذاری نباید در چند مرحله انجام گیرد.صفحه طوری به پایین فشار داده میشود که نرخ نفوذ ثابتی داشته باشیم و داریم:
- $CU=q-\gamma h/NC$
- CU= مقاومت برشی زهکشی نشده H= عمق انجام آزمایش
- Q=ظرفیت باربری نهایی γ= وزن مخصوص متوسط توده ای خاک بالای تراز آزمایش
- NC=فاکتور ظرفیت باربری که برای ناحیه بارگذاری دایره ای در سطح برابر ۶/۱۵ و برای وقتی که آزمایش با یک صفحه در کف گمانه انجام می شود و صفحه قطرب برابر قطر گمانه دارد مقدار ۹/۲۵ می باشد.وقتی ظرفیت باربری نهایی در منحنی بار – نشست مشخص نباشد، این مقدار باید معادل مقداری که در نشست برابر ۰/۱۵قطر صفحه رخ می دهد ، فرض شود.
- مدول عکس العمل در واقع مقدار تنش است که اگر بصورت عمود بر صفحه پی وارد گرددبه میزان یک واحد در پی نشست ایجاد می کند.به عبارت دیگر مدول عکس العمل بستر ، شیب منحنی تنش – نشست می باشد.

  تنش وارد بر پی/ نشست حاصله $K=Q/\Delta$
- بهتر است به جای یک عدد در گزارش مدول عکس العمل بستر ، منحنی تغییرات K بر حسب سطح تنش ارائه می گردد.



الف- آزمایش در گودبرداری [۸]

ب- آزمایش در گمانه دهانه گشاد [۸]

و- آزمایش با کمک تیر واکنش و میله‌های مهار جانبی [۳]

ز- آزمایش در چاهک با کمک تیر واکنش و میله‌های مهار جانبی [۴]

ج- آزمایش با کمک بار مرده و یا واکنش شمع‌های جانبی در چاهک [۷]

ح- آزمایش با کمک بار مرده و تکیه‌گاه [۳]

د- آزمایش با کمک مهار مرکزی کششی [۴]

ط - آزمایش با کمک شمع کوچک بتنی [۴]

ه - بارگذاری در دیواره تونل [۴]

❖ کاربرد:

محاسبه میزان نشست و ظرفیت باربری بستر.

محاسبه مدول الاستیسیته (E) و ضریب عکس‌العمل بستر (Ks)

مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده (Cu)؛ در صورت اجرای آزمایش به روش کنترل تغییر شکل که صفحه بارگذاری با سرعت ثابت در زمین فرو رانده می‌شود.

۴-۳-۳-روش معمول انجام آزمایش(در ایران):

الف: انجام آزمایش در گالری حفر شده در چاه دستی.

ب: انجام آزمایش در گالری حفر شده در ترانشه خاکی.

ج: انجام آزمایش در سطح زمین.

د:انجام آزمایش در کف چاه حفر شده تا تراز پیشنهادی پی طبق استاندارد ASTM-D1194

۱- در موارد الف و ب تراز قرارگیری صفحه بارگذاری ، همان تراز کف گالری می باشد.

۲- ابعاد گالری معمولا ۱*۲*۰/۸ متر می باشد.

۴-۳-۴-خطاهای معمول شده در انجام آزمایش :

الف-عدم رعایت فاصله از دیوار ترانشه(حداکثر آزمایشات داخل گالری و چاه رعایت نمی گردد)

ب-استفاده از محیط های انعطاف پذیر برای تکیه گاه جک (بویژه محیط انعطاف پذیر سقف گالری)

ج- اگر آزمایش در چاه یا گالری انجام شود ، عمق انجام آزمایش در نتایج حاصله تاثیر خواهد داشت.(وقتی فاصله صفحه بار از جدار ترانشه کافی نیست، گوه های گسیختگی توده خاک زیر صفحه ، از عمق انجام آزمایش تاثیر می پذیرد و این بر خلاف استاندارد است.فلذا مدول الاستیسیته و یا مدول عکس العمل بستر با خطا مواجه می شود)

د- با توجه به اینکه ابعاد صفحه آزمایش بارگذاری ، اغلب نسبت به ابعاد پی اصلی کوچک بوده و عمق نفوذ تنش نسبت به شرایط پی اصلی کوچکتر است ، در صورت وجود لایه بندی یا تفاوت مشخصات ژئوتکنیکی در محدوده تاثیر پی ، باید از تعمیم نتایج آزمایش برای پی خوداری شود.

ه- بدیهی است که نتایج بدست آمده از آزمایش در راستای بار وارده ، دارای اعتبار است و بویژه در خاک های ناهمگن و ناهمسان ، در تعمیم نتایج باید به این نکته توجه کرد.

فصل پنجم

آزمایش های آزمایشگاهی

نسخه پیش نویس

نسخه پیش نویس

فصل پنجم

۵- آزمایش های آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

مکانیک خاک شاخه‌ای از علم مهندسی است که از اصول مهندسی مکانیک، هیدرولیک و زمین‌شناسی در جهت حل مشکلات مهندسی در خاک استفاده می‌کند. علم مکانیک خاک در علوم زمین بیشتر با عنوان ژئوتکنیک شناخته می‌شود که دربرگیرنده مکانیک سنگ، ژئوفیزیک، هیدرولوژی و مهندسی زمین شناسی است. مطالعه مکانیک خاک، آزمایشها، توصیفات، طبقه‌بندی و آنالیز خاک را تحت پوشش قرار می‌دهد تا بتواند رفتار خاک و همچنین رفتار اندرکنشی بین خاک و سازه‌های ساخته شده بر روی آن را مورد ارزیابی قرار دهد.

در این میان آزمایشهای آزمایشگاهی نقش تعیین‌کننده‌ای در تحلیل و طراحی سازه‌های خاکی و همچنین سازه‌های مستقر بر روی بستر خاک ایفا می‌نمایند و حصول نتایج صحیح از این آزمایشها برای مهندسین طراح بسیار حائز اهمیت است.

۵-۱-۱- اهداف

خواص فیزیکی خاکها با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه تعیین می‌شوند. این آزمایشها معمولا بـه دو بخش "طبقه‌بندی فیزیکی" و "خواص مهندسی نظیر مقاومت برشی، تراکم پذیری و نفوذپذیری" تقسیم می‌شـوند. پارامترهـای تعیـین شده در این بخش همراه با اطلاعات مشاهداتی و آزمایشهای برجا از اهمیت ویژه‌ای برای مهندسین ژئوتکنیک برخوردار است.

تعیین صحیح پارامترهای مذکور در تحلیلها و طراحی‌های ژئوتکنیکی بسیار مهم است از این رو در شیوه‌نامه حاضر، سعی بر ارتقاء دانش فنی و رفع نیازمندیهای متخصصین در این حوزه شده است. اهداف مرتبط با خدمات آزمایشگاهی در این شیوه‌نامه عبارتند از:

- معرفی اجمالی پارامترهای ژئوتکنیکی
- معرفی دستگاهها و ابزار موردنیاز جهت انجام آزمایشها
- بیان اشکالات رایج در آزمایشها
- بیان خطاهای دستگاهی
- معرفی استانداردها

۵-۱-۲- مزایا و معایب

در ارزیابی سایت مربوط به یک پروژه، مطالعه تاریخچه سایت، زمین شناسی و آزمایشهای برجا از نیازهای اولیه یک پروژه است. ارزیـابی مشخصه‌های زمین توسط آزمایشهای برجا می‌تواند اثرات بسیاری از مولفه‌ها مانند بافت خاک، ساختار و ناپیوستگی لایه‌ها را در مقیـاس واقعی مورد ملاحظه قرار دهد در صورتیکه نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی در برخی از شرایط نمی‌توانند نماینگر کلیـه شـرایط خـاک در طبیعت باشند. با این وجود اندازه‌گیری خواص خاک توسط دستگاههای آزمایشگاهی که در این بخـش بـه آن پرداختـه مـی‌شـود دارای مزایایی است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است:

- کنترل کامل بر شرایط آزمایش نظیر کنترل شرایط مرزی
- کنترل بر اندازه‌گیری تغییرات فشار آب حفره‌ای در حین آزمایش
- دقت بالاتر اندازه‌گیری‌ها نسبت به آزمایشهای برجا
- کنترل بر انتخاب مصالح مورد آزمایش
- انجام آزمایش با شرایط اولیه کاملا مشابه با سایت
- امکان انجام آزمایش بر روی نمونه‌های دستخورده

۵-۱-۳- جمع بندی

همانگونه که انتخاب دقیق پارامترها تاثیر بسزایی در تحلیلهای ژئوتکنیکی دارند، به همان اندازه صحت پارامترهای تعیین شده نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. نحوه صحیح آزمایش، دقت در تعیین پارامترهای آزمایشها، کاهش خطاهای انسانی، کالیبراسیون و ارتقاء تجهیزات آزمایشگاهی همگی نقش ویژه‌ای در فرآیند مطالعات ژئوتکنیک ایفا می‌نمایند و در نهایت می‌توانند منجر به دقت بیشتر و یا خطا در تحلیلهای ژئوتکنیکی و به تبع آن طراحی‌های مهندسی شوند.

۵-۲- انتخاب پارامترهای مورد نیاز در طراحی‌های ژئوتکنیکی

در طراحی کلیه سازه‌ها اعم از سازه‌های خاکی و یا سازه‌های ساختمانی شامل ساختمانهای بلند مرتبه و یا ساختمانهای با تعداد طبقات کم، انتخاب صحیح پارامترهای طراحی نقش بسیار مهمی در دوام، ایمنی و اقتصاد پروژه ایفا می‌نماید. از این رو در این بخش سعی شده با توجه به نیاز هر پروژه، توصیه‌هایی در خصوص انتخاب پارامترها انجام پذیرد.

در جدول ذیل پارامترهای مورد نیاز در طراحی‌های ژئوتکنیکی بر اساس گروه‌بندی ساختمانها مطابق با آیین نامه اجرایی نظام مهندسی مشخص شده‌اند.

نسخه پیش نویس

جدول انتخاب پارامترهای لازم در طراحی‌های ژئوتکنیکی بر اساس گروه‌بندی ساختمانها

نام پارامتر	شرایط انجام آزمایش	طبقه‌بندی پارامترها	گروه‌بندی ساختمانها مطابق با آیین نامه اجرایی نظام مهندسی			
			الف *	ب **	ج ***	د ****
درصد رطوبت (w)	کلیه خاکها	پارامترهای طبقه‌بندی خاک و شاخص‌های وزنی-حجمی	✓	✓	✓	✓
وزن مخصوص خاک (γ)	خاک دستنخورده		✓	✓	✓	✓
حد روانی (LL) حدخمیری (PL) حد انقباض (SL) شاخص خمیری (PI)	مصالح خاکی مشتمل بر خاکهای عبوری از الک نمره ۴۰		✓	✓	✓	✓
شاخص یکنواختی (C_U) شاخص خمیدگی(C_C) اندازه میانگین دانه‌ها(D_{50}) اندازه موثر دانه‌ها (D_{10})	کلیه مصالح خاکی		✓	✓	✓	✓
توده ویژه (G_s)	خاکهای درشت دانه		✓	✓	✓	✓
ضریب نفوذپذیری (K)	کلیه مصالح خاکی	پارامترهای نفوذپذیری و فرسایش خاک	✓	✓	✓	✓
نشان فشردگی (C_C) نشان تورم (C_S) ضریب تحکیم (C_V) نسبت بیش تحکیمی (OCR) تنش پیش تحکیمی (P_C)	خاکهای ریزدانه چسبنده (رسی) اشباع	پارامترهای نشست تحکیمی خاک	✓	✓	✓	✓
مقاومت برشی محدود نشده (S_u)	خاکهای چسبنده	پارامترهای مکانیکی و مقاومتی خاک	✓	✓	✓	✓
مقاومت برشی زهکشی نشده (C_u)	خاکهای چسبنده و یا سیمانته		✓	✓	✓	✓
چسبندگی کل (C) زاویه اصطکاک داخلی کل (Φ)	کلیه مصالح خاکی		✓	✓	✓	✓

جدول انتخاب پارامترهای لازم در طراحی‌های ژئوتکنیکی بر اساس گروه‌بندی ساختمانها						
نام پارامتر	شرایط انجام آزمایش	طبقه‌بندی پارامترها	گروه‌بندی ساختمانها مطابق با آیین نامه اجرایی نظام مهندسی			
			الف *	ب **	ج ***	د ****
چسبندگی موثر (C') زاویه اصطکاک داخلی موثر (Φ')	کلیه مصالح خاکی		✓	✓	✓	✓
مدول الاستیک (E_s)	کلیه مصالح خاکی		✓	✓	✓	✓
مقاومت روانگرایی (CRR) مدول برشی خاک (G) میرایی (D)	کلیه مصالح خاکی					✓
سولفات	کلیه مصالح خاکی	پارامترهای شیمیایی	✓	✓	✓	✓
کلر	کلیه مصالح خاکی		✓	✓	✓	✓

* گروه **الف** با مقیاس کاربری محله ۱ تا ۲ طبقه ارتفاع از روی زمین با حداکثر زیربنای ۶۰۰ متر مربع

** گروه **ب** با مقیاس کاربری محله ۳ تا ۵ طبقه ارتفاع از روی زمین با حداکثر زیربنای ۲۰۰۰ متر مربع

*** گروه **ج** با مقیاس کاربری منطقه ۶ تا ۱۰ طبقه ارتفاع از روی زمین با حداکثر زیربنای ۵۰۰۰ متر مربع

**** گروه **د** با مقیاس کاربری شهر بیش از ۱۰ طبقه ارتفاع از روی زمین با زیربنای بیش از ۵۰۰۰ متر مربع

توضیحات:

- در صورتی که امکان تهیه نمونه دستنخورده وجود نداشته باشد می‌توان از روابط همبستگی با ضربات SPT استفاده کرد.
- آزمایش تحکیم در خاکهای ریزدانه اشباع و در محدوده حباب تنش زیر فونداسیون انجام می‌گردد.
- در ساختمانهای گروه "ج" و "د" توصیه می‌گردد در تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از آزمایشهای دقیق‌تر نظیر آزمایش سه‌محوری استاتیکی استفاده گردد.
- در مناطق ساحلی که مصالح خاکی اغلب ماسه ریزدانه یکنواخت بوده و سطح تراز آب زیر زمینی نزدیک به تراز سطح زمین است توصیه می‌گردد در طراحی ساختمانهای گروه "د" از آزمایشهای دینامیکی نظیر سه‌محوری دینامیکی جهت تعیین مقاومت خاک در برابر روانگرایی و تعیین پارامترهای دینامیکی مانند مدول برشی خاک (G) استفاده گردد.

- در صورت وجود سطح آب در زیر سطح فونداسیون و یا شرایطی که نیاز به زهکشی وجود داشته باشد پارامتر نفوذپذیری تعیین می‌گردد. همچنین در طراحی چاههای جذبی و سپتیک باید نفوذپذیری مصالح جداره تعیین گردد.
- آزمایشهای شیمیایی در تراز سطح قرارگیری فونداسیون باید انجام شوند.

۵-۳- آزمایشها و تجهیزات لازم برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی

در مطالعات ژئوتکنیک، آزمایشهای آزمایشگاهی نقش بسزایی ایفا می‌کنند. تعیین صحیح پارامترهای فیزیکی، تحکیمی و مقاومتی خاک در تحلیل‌ها و طراحی‌های ژئوتکنیکی بسیار تاثیرگذار هستند. از این‌رو انجام آزمایشها مطابق با استانداردهای مربوطه و همچنین دوری از خطاهای رایج در انجام آزمایشها کمک شایانی در تخمین و تعیین درست پرارمترهای مذکور می‌نماید.

در این فصل آزمایشهای مرسوم ژئوتکنیک و استانداردهای مربوطه همراه با ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی مرتبط معرفی گردند. شایان ذکر است در این بخش به روشهای انجام آزمایش پرداخته نمی‌گردد و برای این منظور پیشنهاد می‌شود به استانداردها و کتب معتبر مربوط به آزمایشهای آزمایشگاهی رجوع گردد.

پیش نویس

۵-۳-۱- آزمایش تعیین درصد رطوبت

شماره استاندارد: ASTM D 2216, AASHTO T73، استاندارد ملی ایران ۷۸۸۳

هدف از انجام آزمایش درصد رطوبت، تعیین مقدار آب داخل خاک، سنگ و مصالح مشابه است و در محاسبه پارامترهای وزنی و حجمی خاکها به کار می‌رود. درصد رطوبت درون خاک بر رفتار خاکها، بخصوص خاکهای چسبنده تاثیرگذار است و یکی از خواص مهم فیزیکی خاک به شمار می‌رود. با تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک و مقایسه با درصد رطوبت حدود اتربرگ، حالت روانی و سفتی خاک مشخص می‌شود. در این آزمایش پارامتر درصد رطوبت (W) مطابق با استانداردهای مربوطه تعیین می‌گردد.

۵-۳-۲- آزمایش توده ویژه

شماره استاندارد: ASTM C127, D 854, AASHTO T85

هدف از انجام آزمایش توده ویژه، تعیین وزن مخصوص نسبی مصالح درشت دانه (G_S) جهت استفاده در روابط وزنی و حجمی خاک است. در این آزمایش خروج هوای محبوس در نمونه مطابق با استاندارد به سه روش جوشاندن آب، اعمال وکیوم و یا ترکیب اعمال وکیوم و جوشاندن آب قابل انجام است.

۵-۳-۳- آزمایش دانه‌بندی

شماره استاندارد: ASTM D 442, AASHTO T88، استاندارد ملی ایران ۴۹۷۷

هدف از انجام آزمایش دانه‌بندی، تعیین اندازه دانه‌های خاک بزرگتر از ۷۵ میکرون به منظور استفاده در لایه‌بندی خاکها است. در این آزمایش پارامترهای مربوط به ابعاد و شکل دانه‌ها نظیر شاخص یکنواختی (C_U)، شاخص خمیدگی(C_C)، اندازه میانگین دانه‌ها(D_{50})، اندازه موثر دانه‌ها (D_{10}) و دیگر پارامترهای مربوطه تعیین می‌گردد.جهت افزایش دقت نتایج توصیه می‌گردد در خاکهای درشت‌دانه و آبرفتی علاوه بر گمانه‌های ماشینی حداقل یک چاه دستی جهت مقایسه و حصول اطمینان از عدم خردشدگی دانه‌ها حفر گردد.

۵-۳-۴- آزمایش هیدرومتری

شماره استاندارد: ASTM D 7928, AASHTO T88، استاندارد ملی ایران ۴۴۶

هدف از انجام آزمایش هیدرومتری، تعیین اندازه دانه‌های خاک کوچکتر از ۷۵ میکرون به منظور استفاده در لایه‌بندی خاکها است. با این آزمایش امکان تشخیص رس و لای بر اساس اندازه دانه‌ها امکان‌پذیر است. در این آزمایش منحنی مربوط به دانه‌بندی مصالح

ریزدانه تعیین شده و در ادامه نمودار دانه‌بندی مصالح درشت دانه قرار می‌گیرد. این آزمایش برای مصالحی که ریزدانـه آنهـا کمتـر از ۵ درصد است به کار نمی‌رود.

۵-۳-۵- آزمایش حدود اتربرگ

شماره استاندارد: ASTM D 4318, ASTM D 4943, AASHTO T90، استاندارد ملی ایران

هدف از انجام آزمایش حدود اتربرگ، تعیین چسبنده بودن و غیرچسبنده بودن خاکها با استفاده از پارامترهای حاصل از آزمـایش اسـت. در این آزمایش درصد رطوبت خاک (رس و سیلت) در سه وضعیت مرز بین حالت روانی و خمیری خاک (حد روانـی)، مـرز بـین حالـت خمیری و نیمه جامد (حد خمیری) و مرز بین نیمه جامد و جامد تعیین می‌گردد و از این مقادیر در طبقه‌بندی خاکها بر اساس سیستم متحد استفاده می‌گردد. پارامترهای حاصل از آزمایش حدود اتربرگ عبارتند از حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، حد انقبـاض (SL) و شاخص خمیری (PI).

۵-۳-۶- آزمایش تحکیم

شماره استاندارد: ASTM D 2435, AASHTO T216، استاندارد ملی ایران ۶۹۳۲

هدف از انجام آزمایش تحکیم، تعیین پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه مقدار و زمان نشست تحکیمی در خاکهای با نفوذپـذیری کـم است. از آزمایشهای تحکیم پارامترهای نشانه فشردگی (C_C)، نشان تورم (C_S)، ضریب تحکیم (C_V)، ضریب تراکم‌پذیری (a_V)، ضریب فشردگی حجمی (m_V)، ضریب نفوذپذیری (K)، درجه اشباع (S)، نسبت پیش تحکیمی (OCR)، تنش پیش تحکیمی (Pc) و دیگـر پارمترهای مندرج در استانداردهای مربوطه قابل استخراج هستند. این آزمایش معمولاً در خاکهای ریزدانه انجام می‌گردد.

نتایج آزمایشهای تحکیم به شدت به دستخوردگی نمونه حساس هستند. از آنجاکه دستگاههای سنتی تحکیم شرایط ارتقاء بـه سیسـتم اشباع سازی را ندارند، اغلب نمونه‌ها از ترازهای زیر سطح آب انتخاب می‌شوند.

۵-۳-۷- آزمایش برش مستقیم

شماره استاندارد: ASTM D 3080, AASHTO T236، استاندارد ملی ایران ۱۸۶۵۲

هدف از انجام آزمایش برش مستقیم، تعیین مقاومت برشی و همچنین تعیین پارامترهای مکانیکی خاک است با انجام این آزمایش که از قدیمیترین و مرسوم‌ترین آزمایشهای آزمایشگاهی است می‌توان پارامتر چسبندگی (C') و زاویه اصطکاک داخلی بین دانه‌ها (ϕ') را محاسبه نمود. در این روش سه آزمایش و یا بیشتر در فشارهای تحکیمی مختلف جهت تعیین پارامترهای مذکور مورد نیاز است

آزمایش برش مستقیم آزمایش مناسبی در تعیین نسبتا سریع مقاومت زهکشی شده و تحکیم یافته خاک است. نتایج آزمایشها برای شرایطی از سایت کاربرد دارد که تحکیم خاک تحت بار عمودی به صورت کامل صورت گرفته و گسیختگی به آرامی و در شرایط زهکشی کامل رخ می دهد. آزمایش برش مستقیم بر روی مصالح ریزدانه و درشت دانه قابل انجام است و پارامترهای چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک در شرایط تنش موثر قابل اندازه‌گیری هستند.

۵-۳-۸- آزمایش تک‌محوری

شماره استاندارد: ASTM D 2166, AASHTO T208، استاندارد ملی

هدف اولیه از انجام آزمایش تک‌محوری، بدست آوردن سریع مقاومت فشاری تقریبی نمونه‌ایست که چسبندگی لازم را برای حفظ پایداری بدون ایجاد فشار دورگیر نمونه را دارا است. در این آزمایش مقاومت برشی محدود نشده خاک (S_u) تعیین می‌گردد. نحوه بارگذاری به صورت سریع بوده، از این رو پارامترهای حاصل در شرایط تنش کل قابل استخراج می‌باشند. از این آزمایش می‌توان سفتی تقریبی رسها را بر اساس مقاومت برشی محدود نشده آنها تعیین نمود. همچنین حساسیت رسها با مقایسه نتیجه آزمایش بر روی نمونه‌های دستنخورده و ریمولد شده قابل اندازه‌گیری است. این آزمایش بر روی نمونه‌های رسی دستنخورده و یا ریمولد شده قابل انجام است که در طول آزمایش آب نتواند از داخل نمونه خارج گردد. مصالح ترد و خشک، نهشته‌ای و درز و ترک‌دار و مصالح سیلتی و ماسه‌ای مصالح مناسبی برای این آزمایش نیستند.

۵-۳-۹- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم نیافته زهکشی نشده UU

شماره استاندارد: ASTM D 2850, AASHTO T234، استاندارد ملی ایران ۱۸۶۵۰

هدف از انجام آزمایش سه‌محوری UU، تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (C_u) در شرایط تنش کل است و برابر است با نصف مقاومت فشاری (q_u) حاصل از این آزمایش. آزمایش سه‌محوری UU باید بر روی خاک کاملا اشباع انجام گردد. مقاومت سه‌محوری

تحکیم نیافته زهکشی نشده برای شرایطی قابل انجام است که بارگذاری سریع اتفاق افتاده و زمان کافی برای تحکیم خاک و کاهش فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در اثر بارگذاری فراهم نباشد.

۵-۳-۱۰- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم یافته زهکشی نشده CU

شماره استاندارد: ASTM D 4767, AASHTO T297، استاندارد ملی ایران ۸۴۴۸

هدف از انجام آزمایش سه‌محوری CU، تعیین مقاومت برشی خاکها و همچنین تعیین پارامترهای مکانیکی خاک در شرایط تنش موثر (با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای) و شرایط تنش کل است. با انجام این آزمایش می‌توان پارامتر چسبندگی (C'-C)، زاویه اصطکاک داخلی بین دانه‌ها (ϕ'-ϕ) و همچنین مدول الاستیسیته خاک (E) را در شرایط زهکشی نشده محاسبه نمود.

آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی نشده برای شرایطی از ساختگاه به کار می‌رود که خاک در معرض یک بارگذاری اولیه کاملا تحکیم شده و سپس تحت شرایط بارگذاری ثانویه‌ای قرار می‌گیرد که زمان کافی برای خروج آب از خاک و کاهش اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده ندارد. مقاومت برشی حاصل از این آزمایش در تحلیل پایداری خاکریزها، فشار جانبی زمین و طراحی فونداسیون به کار می‌رود.

۵-۳-۱۱- آزمایش سه‌محوری استاتیکی تحکیم یافته زهکشی شده CD

شماره استاندارد: ASTM D 7181

هدف از انجام آزمایش سه‌محوری CD، تعیین مقاومت برشی خاکها در شرایط تنش موثر و همچنین تعیین پارامترهای مکانیکی خاک است. با انجام آزمایش سه‌محوری می‌توان پارامتر چسبندگی (C')، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ') بین دانه‌ها و همچنین مدول الاستیسیته خاک (E) را در شرایط زهکشی محاسبه نمود. آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده برای شرایطی از ساختگاه به کار می‌رود که خاک در معرض یک بارگذاری عمودی اولیه کاملا تحکیم شده و سپس تغییرات در بارگذاری عمودی در طول مدت زمان کافی جهت کاهش اضافه فشار آب ایجاد شده رخ می‌دهد. مقاومت برشی حاصل از این آزمایش در تحلیل پایداری خاکریزها، فشار جانبی زمین و طراحی فونداسیون به کار می‌رود.

۵-۳-۱۲- آزمایش سه‌محوری سیکلیک (دینامیک)

شماره استاندارد: ASTM D 5311-D 3999

یکی از اهداف انجام آزمایش سه‌محوری سیکلیک، تعیین مقاومت برشی خاک تحت بارگذاری سیکلیک در شرایط زهکشی نشده است. همچنین با انجام آزمایش سه‌محوری دینامیکی می‌توان پارامترهای دینامیکی خاک مانند مدول برشی (G) و میرایی (D) را تحت بارگذاریهای مختلف نظیر بار زلزله و یا بارگذاریهای هارمونیک تعیین نمود. در تعیین پتانسیل روانگرایی لایه‌های مشتمل بر مصالح دانه‌ای ریز و اشباع از این آزمایش جهت تعیین مقاومت روانگرایی لایه استفاده می‌گردد.

آزمایش سه‌محوری سیکلیک باید در شرایط بسیار مشابه با شرایط واقعی نمونه در طبیعت انجام گردد. فاکتورهایی نظیر دانسیته، فشار دورگیر، تاریخچه تنش، روش آماده‌سازی نمونه، تنش برشی سیکلیک اعمالی، شکل موج بارگذاری و ... بر نتایج آزمایشها کاملا تاثیر گذار هستند.

۵-۳-۱۳- آزمایش نفوذپذیری

شماره استاندارد: ASTM D 2434, AASHTO T215، استاندارد ملی ایران

هدف از انجام آزمایش نفوذپذیری، تعیین پارامتر نفوذپذیری خاک (K) در خاکهای ریزدانه و درشت دانه است. این آزمایش به دو روش هد ثابت و هد افتان قابل انجام است. آزمایش هد ثابت بر روی خاکهای درشت دانه و آزمایش نفوذپذیری به روش هد افتان بر روی خاکهای ریزدانه انجام می‌گردد.

در شرایطی که جریان آب در محل قرارگیری فونداسیون و یا در حین گودبرداری مشاهده گردد، باید پارامتر مربوط نفوذپذیری خاک محاسبه گردد. همچنین در طراحی چاههای جذبی و سپتیک باید نفوذپذیری مصالح جداره تعیین شود.

جدول آزمایشها، پارامترهای طراحی و تجهیزات وابسته			
نام آزمایش	پارامتر مربوطه	شماره استاندارد	نام دستگاه و ملزومات وابسته
آزمایش تعیین درصد رطوبت	w	ASTM D 2216 AASHTO T73 استاندارد ملی ایران ۷۸۸۳	آون، ترازو، ظرف نگهداری نمونه
آزمایش پیکنومتری (اندازه‌گیری توده ویژه)	G_s	ASTM C 127 ASTM D 854 AASHTO T85 استاندارد ملی ایران ۴۹۸۲	پیکنومتر، پمپ خلا، آون، ترازو با دقت ۰,۰۱ گرم، دما سنج با دقت ۰,۱ درجه سلسیوس
آزمایش دانه‌بندی	C_U	ASTM D 442	ترازو با دقت ۰,۱ گرم، الک به نمره‌های ۲۰۰- ۱۴۰- ۶۰- ۴۰- ۲۰-

جدول آزمایشها، پارامترهای طراحی و تجهیزات وابسته			
نام آزمایش	پارامتر مربوطه	شماره استاندارد	نام دستگاه و ملزومات وابسته
	C_C D_{10} D_{50}	AASHTO T88 استاندارد ملی ایران ۴۹۷۷	۱۰- ۴ و ۳/۸- ۳/۴- ۱- ۱/۲ ۱- ۲- ۳ اینچ، ظرف، آون.
آزمایش هیدرومتری	منحنی هیدرومتری	ASTM D 7928 AASHTO T88 استاندارد ملی ایران ۴۴۶	ترازو با دقت ۰,۰۱ گرم، الک با شماره‌های ۱۶ و ۲۰۰، ظرف نمونه، آون ۱۱۰ درجه، هگزا متافسفات سدیم، استوانه ته نشینی به ارتفاع ۴۶۰ میلیمتر، قطر داخلی ۶۳,۵ میلیمتر و حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر، همزن برقی با سرعت ۱۰۰۰۰ RPM، هیدرومتر 151H یا 152H، دماسنج با دقت ۰,۵ درجه سلسیوس.
آزمایش حدود اتربرگ	LL PL SL PI	ASTM D 4318 ASTM D 4943 AASHTO T90	دستگاه کاساگرانده، شیارزن، قوطی نگهداری نمونه مرطوب (ترجیحا با قطر ۵۰ و ارتفاع ۲۰ میلیمتر)، ظرف اختلاط و نمونه سازی، صفحه شیشه‌ای تخت با ضخامت ۱۰ میلیمتر، کاردک، الک نمره ۴۰ (در صورت نیاز، الک نمره ۱۰)، بطری آب پاش، آون.
آزمایش تحکیم	C_C C_S C_V OCR P_c	ASTM D 2435 AASHTO T216 استاندارد ملی ایران ۶۹۳۲	دستگاه تحکیم، محفظه نگهداری نمونه (سلول)، رینگ نمونه، سنگ متخلخل، کاغذ صافی نمره ۵۴ واتمن، گیج اندازه‌گیری تغییرشکل (ساعت اندیکاتور) با دقت ۰,۰۰۲۵ میلیمتر، ترازو، آون، ظروف تعیین درصد رطوبت، وزنه‌های ۰,۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ کیلوگرمی، لوازم تراشیدن جدار نمونه (Trimmer).
آزمایش برش مستقیم	C’ Φ’	ASTM D 3080 AASHTO T236 استاندارد ملی ایران ۱۸۶۵۲	دستگاه برش مستقیم، جعبه برش، صفحات متخلخل فلزی جهت اعمال زه‌کشی، وزنه‌های بارگذاری، گیج اندازه‌گیری جابجایی، سیستم اندازه‌گیری نیرو (رینگ نیرو یا لودسل)، کوبه جهت تراکم خاک، ظرف آب پاش (جهت مرطوب کردن نمونه، ظرف نمونه.
آزمایش تک‌محوری	S_u	ASTM D 2166 AASHTO T208	دستگاه تک محوری، گیج اندازه‌گیری تغییر مکان با دقت ۰,۰۰۲۵ میلیمتر، رینگ نیروسنج یا لودسل، نمونه‌گیر، وسیله تراشیدن نمونه (trimmer)، وسیله اندازه‌گیری ابعاد نمونه با دقت ۰,۱٪ بعد نمونه، ترازو با دقت ۰,۱ درصد وزن نمونه.
آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده UU	C_u	ASTM D 2850 AASHTO T234 استاندارد ملی ایران ۱۸۶۵۰	دستگاه سه‌محوری شامل سیستم بارگذاری مونوتونیک، پنل اشباع‌سازی (رگلاتورهای فشار، رگلاتور خلا، گیج اندازه‌گیری فشار، گیج اندازه‌گیری خلا)، ابزار اندازه‌گیری نیرو، ابزار انازه‌گیری تغییر مکان، ابزار اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای، ابزار اندازه‌گیری تغییر حجم، سلول سه‌محوری، قالب نمونه‌سازی، پمپ خلا، کوبه، غشاء، سنگ متخلخل، کاغذ صافی.
آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی نشده CU	C Φ C’ Φ’	ASTM D 4767, AASHTO T297 استاندارد ملی ایران 8448	دستگاه سه‌محوری شامل سیستم بارگذاری مونوتونیک، پنل اشباع‌سازی (رگلاتورهای فشار، رگلاتور خلا، گیج اندازه‌گیری فشار، گیج اندازه‌گیری خلا)، ابزار اندازه‌گیری نیرو، ابزار انازه‌گیری تغییر مکان، ابزار اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای، ابزار اندازه‌گیری تغییر حجم، سلول سه‌محوری، قالب نمونه‌سازی، پمپ خلا، کوبه، غشاء، سنگ متخلخل، کاغذ صافی.
آزمایش سه‌محوری CD	C’ Φ’	ASTM D 7181	دستگاه سه‌محوری شامل سیستم بارگذاری مونوتونیک، پنل اشباع‌سازی (رگلاتورهای فشار، رگلاتور خلا، گیج اندازه‌گیری فشار، گیج اندازه‌گیری خلا)، ابزار اندازه‌گیری نیرو، ابزار انازه‌گیری تغییر مکان، ابزار اندازه‌گیری تغییر حجم، سلول سه‌محوری، قالب نمونه‌سازی، پمپ خلا، کوبه، غشاء،

جدول آزمایشها، پارامترهای طراحی و تجهیزات وابسته			
نام آزمایش	پارامتر مربوطه	شماره استاندارد	نام دستگاه و ملزومات وابسته
			سنگ متخلخل، کاغذ صافی.
آزمایش سه‌محوری سیکلیک	G D	ASTM D 5311-D 3999	دستگاه سه‌محوری شامل سیستم بارگذاری سیکلیک، پنل اشباع‌سازی (رگلاتورهای فشار، رگلاتور خلا، گیج اندازه‌گیری فشار، گیج اندازه‌گیری خلا)، ابزار اندازه‌گیری نیرو، ابزار انازه‌گیری تغییر مکان، ابزار اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای، ابزار اندازه‌گیری تغییر حجم، سلول سه‌محوری، قالب نمونه‌سازی، پمپ خلا، کوبه، غشاء، سنگ متخلخل، کاغذ صافی.
آزمایش نفوذپذیری	K	ASTM D 2434 AASHTO T215 Manual of laboratory testing, Head & Epps	دستگاه نفوذپذیری هد ثابت و هد افتان شامل مخزن آب، پنل اندازه‌گیری هد آب، محفظه نمونه، سنگ متخلخل، کاغذ صافی و دیگر ملحقات مطابق با استانداردهای مربوطه.
آزمایش هیدرومتری مضاعف	درجه واگرایی	ASTM D 4221 استاندارد ملی ایران ۱۹۸۹۸	الک نمره ۲، قوطی درب دار، ترازو، پمپ خلا با مکش حداقل ۵۰۸ الی ۶۳۸ میلیمتر جیوه، استوانه ته نشینی به ارتفاع ۴۶۰ میلیمتر و حجم ۱۰۰۰ میلی لیتر، هیدرومتر 151H و یا 152H، دماسنج با دقت ۰٫۵ درجه سلسیوس، زمان سنج با دقت حداقل یک ثانیه، آب مقطر با PH ۵٫۵ تا ۷

۵-۴- آماده سازی نمونه‌ها

۵-۴-۱- ملاحظات حمل، نگهداری، انتخاب و آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های دستخورده و دستنخورده خاک که از حفاری‌های صحرایی به دست می‌آیند می‌توانند اطلاعات بسیار مهمی را برای مهندسین ژئوتکنیک فراهم کنند. تهیه این نمونه‌ها شامل صرف وقت و هزینه فراوان بوده و عدم دقت کافی در جایجایی، حفظ و نگهداری آنها می‌تواند منجر به از بین رفتن نمونه و یا خطا در نتایج آزمایشها گردد.

در این بخش توصیه‌هایی در نحوه حمل نمونه به آزمایشگاه، نگهداری نمونه‌ها، انتخاب نمونه و نحوه آماده‌سازی به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۵-۴-۲- ملاحظات حمل نمونه‌ها از محل به آزمایشگاه

حمل نمونه‌های دستنخورده آزمایشگاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرگونه آسیب فیزیکی به نمونه و یا اشکال در اندود نمونه‌ها و در نتیجه تغییر رطوبت نمونه می‌تواند باعث دستخوردگی و از بین رفتن نمونه گردد. از این رو همواره توصیه‌هایی در این خصوص وجود دارند که می‌توان به برخی از آنها اشاره نمود:

- اندود کامل نمونه دستنخورده (جزئیات بیشتر در فصل حفاری و مطالعات صحرایی)
- قرار دادن نمونه‌ها در داخل باکس‌های حمل نمونه (نمونه‌های ماسه‌ای و سیلتی اشباع بهتر است به صورت عمودی داخل باکس قرارداده شوند)
- پر کردن اطراف نمونه‌ها با مواد پرکننده نظیر خاک اره (جهت جلوگیری از برخورد نمونه‌ها به یکدیگر)
- دقت در حمل و جابجایی نمونه‌ها به منظور کاهش آسیب به نمونه

۵-۴-۳- ملاحظات مربوط به نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه

نحوه نگهداری نمونه‌های دستنخورده در آزمایشگاه نیز به اندازه نمونه‌گیری و حمل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در آزمایشگاه این امکان وجود دارد که بخشی از یک نمونه جهت انجام یک آزمایش خاص مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین باید دقت شود باقیمانده آن مجددا موم اندود شود. شایان ذکر است نمونه دستنخورده را به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی نمی‌توان برای یک مدت طولانی نگهداری نمود. در بخش نگهداری نمونه‌ها توصیه‌هایی وجود دارند که عبارتند از:

- نمونه‌ها ترجیحا در یک فضای دربسته خنک و به دور از گرما و یا سرما نگهداری شوند.
- به صورت ایده‌ال بهتر است نمونه‌ها در فضای مرطوب نگهداری شوند تا رطوبت نمونه از بین نرود.
- در زمان ورود به آزمایشگاه کنترل شود که آسیبی به بخش موم‌اندود نمونه وارد نشده باشد.
- پس از هر بار استفاده از نمونه، سر و ته نمونه باید سریعاً موم‌اندود و یا به هر طریق دیگری مجددا آب‌بند گردد.
- قفسه‌های نگهداری نمونه‌ها حتما باید دارای شماره و مشخصات شناسایی باشند.
- مشخصات کامل هر نمونه شامل اسم پروژه، شماره گمانه، عمق، تاریخ نمونه‌گیری و ... باید روی نمونه ثبت گردد.

۵-۴-۴- نحوه انتخاب نمونه جهت انجام آزمایش

نحوه انتخاب نمونه و تواتر نمونه‌برداری از یک گمانه باید به گونه‌ای باشد که نمونه‌ها معرف تمام لایه‌های زیرین خاک باشند. بدین منظور توصیه می‌گردد:

- جهت انجام آزمایشهای مربوط به طبقه‌بندی خاک به ازای هر ۲ الی ۳ متر، یک سری آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری، اتربرگ و همچنین دانسیته و درصد رطوبت انجام پذیرد.
- در صورت تغییر لایه‌بندی در هر ترازی از گمانه، آزمایشهای فوق باید در لایه جدید انجام شوند.
- آزمایشهای مربوط به تعیین پارامترهای مکانیکی و تحکیمی بسته به اهمیت پروژه و طبقه‌بندی لایه‌ها تعیین می‌شوند.

- آزمایشهای شیمیایی خاک معمولا در تراز قرارگیری فونداسیون انجام می‌شوند. همچنین در صورت وجود مصالح آهکی و نمکی و یا مشاهده کریستال در خاک در ترازهای نزدیک به فونداسیون، انجام این آزمایشهای شیمیایی پیشنهاد می‌گردد.

در خصوص مقدار نمونه لازم برای هر آزمایش نیز در استانداردها و کتابهای آزمایشگاهی توصیه‌هایی صورت گرفته است که با مراجعه به مراجع مذکور می‌توان از آن پیشنهادات بهره برد.

۵-۴-۵- نحوه آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش

به منظور آماده سازی نمونه‌های مورد نیاز هر آزمایش، دستورالعملهایی در استانداردها و کتابهای آزمایشگاهی وجود دارند. در این بخش به اختصار به برخی از نکات اشاره شده است:

- در اولین گام آماده‌سازی نمونه‌های دست‌خورده باید نمونه منتخب در گرمخانه قرار داده شده تا کاملا خشک گردد.
- پس از خشک شدن، نمونه باید خرد شده و اجزای ریزدانه و درشت‌دانه خاک کاملا از یکدیگر جدا شوند.
- مطابق با استانداردهای موجود، مقدار مصالح مورد نیاز جدا شده و جهت انجام آزمایش استفاده گردد.
- در نمونه‌های دستنخورده رسی و مارنی، در صورتیکه قطر نمونه حاصل از حفاری بیش از قطر استاندار نمونه مورد نیاز آن آزمایش باشد باید به روش تراشیدن جداره نمونه (Trimming)، قطر نمونه اولیه را به قطر مورد نظر کاهش داد.
- در روش تراشیدن جدار نمونه باید بسیار با احتیاط عمل کرد تا کمترین دستخوردگی ممکن به نمونه اعمال گردد.
- در نمونه‌های سیلتی و ترکیب رس و سیلت با قوام پایین و نسبتا شل از رینگ و یا نمونه‌گیر جهت تهیه نمونه استفاده می‌شود.
- سر و ته نمونه تهیه شده باید کاملا صاف بوده تا از ایجاد تمرکز تنش در لحظه بارگذاری جلوگیری گردد.

پیش نویس

۵-۵- کالیبراسیون دستگاهها

۵-۵-۱- نکات فنی، خطاهای رایج، خطاهای دستگاهی و کالیبراسیون دستگاهها

در این بخش سعی شده است به منظور کاهش خطای نتایج آزمایشگاهی (ناشی از خطاهای انسانی و ایرادات دستگاهی)، به اختصار به نکات فنی و تجربی مربوط به هر آزمایش اشاره گردد. همچنین خطاهای رایج در انجام آزمایشها و خطاهای دستگاهی معرفی شده و در نهایت تواتر کالیبراسیون دستگاهها ذکر گردد.

❖ آزمایش تعیین درصد رطوبت

- انتخاب مقدار کافی نمونه برای آزمایش (توصیه: طبق جدول شماره ۱ استاندارد ملی ایران بر اساس بزرگترین سایز دانه)

-

حداقل ماده مرطوب توصیه شده (گرم)	الک
۱۰۰-۲۰۰	(الک شماره ۱۰) میلیمتر ۲
۳۰۰-۵۰۰	(الک شماره ۴) میلیمتر ۴/۷۵
۵۰۰-۱۰۰۰	میلیمتر ۱۹
۱۵۰۰-۳۰۰۰	میلیمتر ۳۸
۵۰۰۰-۱۰۰۰۰	میلیمتر ۷۶

- دمای آون برای خاکهای معمول در شرایط استاندارد ۵±۱۱۰ تنظیم گردد

- عدم کاربرد برای مواد حاوی مقادیر قابل توجهی از مینرالهای هالوزیت و مونتموریلونیت و گچ

- برای خاکهای دربرگیرنده مواد آلی دمای اون ۶۰ درجه سلسیوس تنظیم شود

- برای خاکهای مخلوط با گچ حداکثر دمای آون ۸۰ درجه سلسیوس تنظیم شود

- جهت تعیین درصد رطوبت خاک، حتما باید از مصالح دستنخورده استفاده شود

- زمان مورد نیاز برای خشک شدن نمونه حداقل ۱۶ ساعت می‌باشد و در صورت عدم خشک شدن باید مطابق با استاندارد عمل شود.

- ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم برای آزمونه‌های با وزن کمتر از ۲۰۰ گرم ، ۰/۱ گرم برای آزمونه‌های تا وزن ۱۰۰۰ گرم و نیز ۱ گرم برای آزمونه‌های با وزن بیشتر از ۱۰۰۰ گرم .

- ترازو مورد استفاده هر ۱۲ (دوازده) ماه کالیبره گردد.

❖ آزمایش توده ویژه

- انتخاب مقدار کافی نمونه برای آزمایش طبق جداول استاندارد

- حداقل حجم پیکنومتر باید ۲۵۰ ml برای نمونه‌های با قطر کوچکتر و ۵۰۰ ml برای نمونه‌های با قطر بزرگتر باشد.

- سیستم وکیوم باید ظرفیت اعمال مکش معادل ۱۰۰ میلیمتر جیوه داشته یاشد.

- حجم ظرف پیکنومتر باید ۲ الی ۳ برابر حجم میکس نمونه و آب داخل آن باشد.

- اعمال مکش و حرارت در تخلیه حبابهای هوا بسیار اهمیت دارد.

- در روش جوشاندن حداقل باید نمونه به مدت ۲ ساعت کامل جوشانده شود

- در روش اعمال وکیوم باید حداقل به مدت ۲ ساعت به صورت پیوسته وکیوم اعمال شود.

- استفاده از جدول استاندارد جهت انتخاب وزن نمونه بر اساس نوع خاک (جدول ۱ استاندارد ASTM D854)

- استفاده از جدول استاندارد جهت انتخاب دانسیته آب بر اساس دمای آب (جدول ۲ استاندارد ASTM D854)

- در صورت وجود ناخالصی‌هایی همچون آهک، سیمان و انواع نمکها، ابتدا باید نمونه خاک از آن مواد تصفیه گردد.

- در محاسبات مربوط به وزن آب و پیکنومتر حتما باید دمای لوازم لحاظ گردد.

- استفاده از روش آزمایش سطل ارشمیدوس برای مصالح شنی (ASTM C 127)

پیش نویس

❖ آزمایش دانه‌بندی

- استفاده از جدول استاندارد جهت تهیه وزن مناسب بر اساس اندازه دانه‌ها (سنگدانه ریز حداقل ۵۰۰ گرم و سنگدانه درشت طبق جدول پیشنهادی استاندارد ملی)

جدول ۱- حداقل جرم آزمونه سنگدانه درشت

بزرگ‌ترین اندازه اسمی، اندازه الک با چشمه‌های مربعی-میلی‌متر (اینچ)	حداقل جرم آزمونه (کیلوگرم)
۹٫۵ (۳/۸ اینچ)	۱
۱۲٫۵ (۱/۲ اینچ)	۲
۱۹٫۰ (۳/۴ اینچ)	۵
۲۵٫۰ (۱ اینچ)	۱۰
۳۷٫۵ (۱ ۱/۲ اینچ)	۱۵
۵۰ (۲ اینچ)	۲۰
۶۳ (۲ ۱/۲ اینچ)	۳۵
۷۵ (۳ اینچ)	۶۰
۹۰ (۳ ۱/۲ اینچ)	۱۰۰
۱۰۰ (۴ اینچ)	۱۵۰
۱۲۵ (۵ اینچ)	۳۰۰

- انتخاب صحیح نمونه به روش چهارقسمتی
- استفاده از شیکر مناسب (حرکت شیکر باید هم به صورت افقی و هم عمودی باشد)
- انجام دانه‌بندی به مدت حداقل ۱۰ دقیقه (حداکثر ۱۵ الی ۲۰ دقیقه)
- استفاده از روش تر جهت دانه‌بندی مصالحی که ریزدانه رسی دارند (به دلیل خطایی که چسبیدن دانه‌های رسی حتی بعد از کوبیده شدن با چکش پلاستیکی به طور کامل خرد نمی‌شوند)
- اطمینان از عبور کلیه دانه‌های کوچکتر از چشمه الک که ممکن است به دلیل لرزش نامناسب از الک عبور نکرده باشند (در صورت دانه‌بندی به صورت دستی)
- دقت در توزین نمونه‌ها
- اطمینان از عدم وجود رطوبت در نمونه
- کنترل معیوب نبودن توری الکها بخصوص الک نمره ۲۰۰

❖ آزمایش هیدرومتری

- در استانداردهای مختلف، آزمایش هیدرومتری برای مصالح عبوری از الک ۱۰ یا ۴۰ یا ۱۰۰ و یا ۲۰۰ توصیه شده است. اما معمولاً پیشنهاد می‌شود این آزمایش برای ریزدانه‌های عبوری از الک ۲۰۰ انجام گردد.

- معمولاً از چگالی‌سنج ۱۵۲ برای آزمایش هیدرومتری استفاده می‌گردد.

- کالیبراسیون چگالی سنج در استوانه حاوی آب مقطر و محلول استوک پیش از شروع هر آزمایش

- انجام اصلاح قرائت چگالی سنج و دیگر اصلاحات مورد نیاز (C_m, C_t, C_d).

- قرار دادن چگالی سنج در داخل استوانه در حدود ۲۰ الی ۲۵ ثانیه پیش از زمان مقرر و قرائت آن در زمان مشخص و با دقت کامل.

- فرو بردن چگالی سنج در استوانه آب مقطر بلافاصله بعد از قرائت.

- وجود ذرات محلول در آب مانند نمک و کلسیت که با گذشت زمان در آب حل می‌شوند، باعث خطا در آزمایش می‌گردند.

- خاک عبوری از الک باید به مدت ۱۲ الی ۱۶ ساعت (بسته به پیشنهاد استاندارد مورد استفاده) در ۱۲۵ میلی‌لیتر محلول ۴ درصد (محلول جداساز) خیسانده شود.

- تاریخ انقضاء محلول جداساز کنترل گردد.

- محاسبه و کنترل ابعاد استوانه ته‌نشینی (مزور هیدرومتری)

نسخه پیش نویس

❖ آزمایش حدود اتربرگ

موارد فنی و تجربی جهت کاهش خطاهای احتمالی آزمایش حد روانی

- تهیه ۱۵۰ الی ۲۰۰ گرم مصالح عبوری از الک ۴۰
- استفاده از خاک با رطوبت طبیعی در صورتیکه خاک ریزدانه باشد (عبوری از الک ۴۰)
- در صورت خشک کردن نمونه در اون، دمای گرمخانه نباید از ۵۰ درجه سلسیوس تجاوز کند
- میکس کردن خاک (خشک یا با رطوبت طبیعی) با آب مقطر و خیساندن آن به مدت ۲۴ ساعت (برای خاکهای کاملا سیلتی می‌توان بلافاصله آزمایش را انجام داد)
- سعی شود رطوبتها به گونه‌ای انتخاب شوند که شیار بین دو بخش از نمونه در بازه‌های "۱۵ الی ۲۵" ضربه، "۲۰ الی ۳۰" ضربه و "۲۵ الی ۳۵" ضربه به هم برسد.
- در آزمایش تعیین حد روانی از روش تک نقطه‌ای نیز استفاده می‌گردد.
- میزان نمونه ریخته شده در جام (سطح نمونه داخل جام باید تقریبا افقی و عمق خاک در بیشترین حالت ۱۰ میلیمتر باشد)
- ایجاد شیار نامناسب (بیشتر از ۲ میلیمتر) باعث خطا می‌گردد
- ارتفاع نامناسب سقوط باعث خطا می‌گردد (کالیبره کردن دستگاه مطابق با استانداردا یا منابع موجود)
- چشمی بودن میزان رسیدن خاک دو طرف شیار (۱۳ میلیمتر) از عوامل ایجاد خطا در نتیجه آزمایش است
- فواصل زمانی ضربه‌ها باید تقریبا ۲ ضربه در ثانیه باشد.
- کامل جام و دستگاه پس از هر مرحله آزمایش تمیز شوند.
- ارتفاع سقوط جام ۱۰ میلیمتر است و باید با پیچهای تنظیم کنترل گردد.
- آسیب دیدن محل ضربه در زیر جام باعث ایجاد خطا می‌شود.
- صفحه زیر جام باید صاف و بدون گود افتادگی باشد.
- زبری کف جام (بخصوص در محل استفاده شیارکش) و تمیز نبودن آن باعث خطا می‌گردد.

موارد فنی و تجربی جهت کاهش خطاهای احتمالی آزمایش حد خمیری

- تهیه حدود ۲۰ گرم نمونه
- جدا کردن حدود ۲ گرم نمونه برای فیتیله کردن در هر بار آزمایش
- از یک میله معیار (با قطر ۳,۲ میلیمتر) جهت کنترل قطر نمونه‌های آزمایش حد خمیری استفاده شود.
- بهتر است حداقل ۶ گرم و یا بیشتر برای تعیین مقدار درصد رطوبت یک آزمایش تعیین حد خمیری تهیه شود.

- حتما در طول انجام یک آزمایش از ظرف درب دار جهت حفظ رطوبت نمونه‌های آزمایش شده، استفاده گردد (بلافاصله بعد از قراردادن نمونه داخل ظرف، درب آن بسته شود).
- تشخیص صحیح ترک در سرتاسر نمونه در قطر ۳,۲ میلیمتر بسیار مهم است.
- قبل از آغاز آزمایش حتما شیشه آزمایش حد خمیری کاملا تمیز گردد.

❖ آزمایش تحکیم

- قطر نمونه دستنخورده به روش تراشیدن جداره آن (Trimming) تا نزدیک به قطر داخلی رینگ کوچک شود و سپس با فشار دادن رینگ روی نمونه، نمونه به داخل رینگ هدایت شود.
- سر و ته نمونه کاملا صاف و صیقلی گردد.
- گیج اندازه‌گیری جابجایی (ساعت اندیکاتور) به گونه‌ای نصب شود که نیمی از کورس آن درگیر شود.
- قطر نمونه دست نخورده‌ای که قرار است نمونه تحکیم از آن استخراج گردد باید حداقل ۵ میلیمتر بزرگتر قطر رینگ نمونه‌گیر باشد.
- حداقل قطر نمونه آزمایش تحکیم نباید کمتر از ۵۰ میلیمتر باشد
- حداقل ارتفاع نمونه باید بیشتر از ۱۲ میلیمتر و نباید کمتر از ۱۰ برابر بزرگترین قطر دانه داخل رینگ باشد.
- حداقل ضریب قطر نمونه به ارتفاع آن نباید کمتر از ۲,۵ باشد.
- سنگ متخلخل پس از هر آزمایش با جوشاندن در آب (حدود ۱۰ دقیقه) تمیز گردد.
- پیشنهاد می‌شود در زمان عدم استفاده از سنگ متخلخلها در آب بدون حباب هوا نگهداری شوند.
- پس از قرارگیری نمونه داخل دستگاه و اشباع نمودن آن برای جلوگیری از تورم در حدود ۵ kPa سربار بر روی قرار داده شود. این مقدار بسته به نمونه می‌تواند کم یا زیاد شود.
- بارگذاری روی نمونه (قراردادن وزنه‌ها) با احتیاط و بدون ضربه انجام شود.
- در هر استپ بار اعمالی معمولاً ۲ برابر بار قبلی و در باربرداری یک چهارم بار قبلی خواهد بود.
- حتماً دستگاههای تحکیم به صورت دوره‌ای (یکساله) کالیبره شوند.
- یک عدد لودسل کالیبراسیون در محل سلول برنجی تحکیم (به جای سلول) قرار داده و با قراردادن وزنه‌های بارگذاری و قرائت همزمان لودسل، دقت دستگاه کنترل گردد. در صورت وجود اختلاف بین لودسل کالیبراسیون و وزنه‌های دستگاه، باید ضریب اصلاح در تنش عمودی اعمال گردد.
- رینگ تحکیم نباید دچار اعوجاج و آسیب دیدگی باشد.
- گیج‌های اندازه‌گیری جابجایی باید به صورت دوره‌ای کالیبره شوند.

❖ آزمایش برش مستقیم

- توصیه می‌گردد نمونه در دو لایه ساخته نشود(ترجیحا سه لایه). در غیر اینصورت محل برش و تراز بین دولایه در یک راستا قرار گرفته و ممکن است باعث خطا در نتیجه آزمایش گردد.

- مصالح مورد نیاز برای آزمایش باید به اندازه‌ای باشد که بتوان سه نمونه آزمونه مشابه از آن تهیه کرد.

- حداقل قطر و یا ابعاد نمونه باید بیشتر از ۵۰ میلیمتر و یا بزرگتر از ۱۰ برابر بزرگترین قطر دانه باشد.

- حداقل ارتفاع نمونه باید باید ۱۲ میلیمتر بوده و نباید کمتر از ۶ برابر قطر بزرگترین دانه باشد.

- سطح بالای هر لایه قبل از پرکردن لایه بعدی تراش داده شود.

- به منظور امکان زهکشی نمونه، حتما در زمان نمونه‌سازی، صفحات فلزی مشبک (سوراخ‌دار) در زیر و بالای نمونه قرار داده شود.

- پس از از قرار دادن جعبه برش حاوی نمونه در محل خود و اتصال به سیستم بارگذاری افقی و تحکیم نمونه، **پیچ‌های اتصال بین دو نیم جعبه** حتما باز شوند.

- به منظور اعمال بارگذاری قائم و پیش از قراردادن وزنه‌ها، ابتدا بازوی افقی متحرک به صورت افقی تراز شده و فیکس گردد.

- پس از قراردادن نمونه در داخل دستگاه و پیش از شروع آزمایش، گیج نیرو صفر گردد.

- سطح کوبه نمونه‌سازی باید کمتر از نصف سطح نمونه باشد.

- فاصله بین دو نیم جعبه برشی با استفاده از پیچهای فاصله‌ای حدود ۰,۶۵ میلیمتر تنظیم شوند.

- اصطکاک دو نیم جعبه برش از عوامل ایجاد خطا در آزمایش است.

- در هنگام تحکیم مقدار نشست در مقابل زمان ثبت و نمودار آن ترسیم گردد.

- برای تعیین سرعت آزمایش روشهای مختلفی در استانداردها وجود دارند که با مراجعه با آنها بر اساس زمان تحکیم نمونه تحت بار قائم، زمان انجام آزمایش تعیین می‌گردد (به عنوان مثال می‌توان از معادله $t_f=50t_{50}$ و یا $t_f=t_{90}/4.28$ استفاده کرد که t_f برابر زمان آزمایش تا رسیدن به گسیختگی و t_{50} و t_{90} به ترتیب برابر زمان معادل ۵۰ و ۹۰ درصد تحکیم نمونه تحت بار قائم و بر حسب دقیقه است).

- سعی شود نمونه با سرعت نسبتا پایینی آزمایش شود تا فشار آب حفره‌ای در حین آزمایش ایجاد نگردد.

- در آماده‌سازی نمونه دستنخورده باید کاملا با احتیاط عمل شود. از نمونه آزمونه باید مقداری بابت انجام آزمایش دانسیته و درصد رطوبت جدا گردد.

- قرائت گیج‌ها و سنسورهای نیرو و تغییر مکان در فواصل زمانی معادل جابجایی برابر با ۲ درصد قطر و یا طول (عرض) نمونه انجام گردد.

- گیج اندازه‌گیری جابجایی عمودی (ساعت اندیکاتور) به گونه‌ای نصب شود که نیمی از کورس آن درگیر شود.

- پیشنهاد می‌گردد به صورت سالانه به منظور اطمینان از صحت بارگذاری‌ها در هر دو محور، از یک لودسل کالیبراسیون جهت کنترل دقت دستگاه استفاده گردد. همچنین گیج‌های تغییر مکان نیز باید به صورت دوره‌ای کالیبره شوند.

❖ آزمایش تک‌محوری

- دقت گردد که از دستخورده شدن و تغییر قطر نمونه دستنخورده جلوگیری گردد.
- از تغییر رطوبت نمونه دستنخورده پرهیز گردد.
- نمونه باید دارای قطر دایروی یکنواخت در سرتاسر طول نمونه داشته باشد.
- سر و ته نمونه باید کاملا صاف و عمود بر محور طول نمونه باشد.
- در صورتیکه که در حین Trimming (برش اطراف نمونه) به سنگریزه‌ای در سطح نمونه برخورد شد باید آنرا برداشته و حفره حاصله را با خاکهای حاصله پر کرد.
- پس از قراردادن نمونه در داخل دستگاه و پیش از شروع آزمایش، گیج نیرو صفر گردد.
- زمان آزمایش باید به گونه‌ای باشد که زمان رسیدن به گسیختگی از ۱۵ دقیقه تجاوز نکند.
- معیار توقف آزمایش رسیدن به ۱۵٪ درصد کرنش و یا کاهش مقاومت نمونه در شرایط افزایش کرنش است.
- توصیه می‌گردد پس از انجام آزمایش از محل گسیختگی نمونه (در صورت وجود) جهت مشاهده شیب گسیختگی عکس گرفته شود.
- سنسور (گیج) نیرو و جابجایی باید به صورت سالیانه کالیبره شوند.
- در صورت اعمال فشار بیش از حد به رینگ نیرو، رینگ تغییر شکل داده و از وضعیت کالیبره خارج خواهد شد.

❖ آزمایش سه‌محوری استاتیکی

- دقت گردد که از دستخورده شدن و تغییر قطر نمونه دستنخورده جلوگیری گردد.
- از تغییر رطوبت نمونه دستنخورده پرهیز گردد.
- زمان برش سطح نمونه و آماده‌سازی(Trimming) نباید به اندازه‌ای طولانی شود که نمونه رطوت طبیعی خود را از دست بدهد.
- نمونه باید دارای قطر دایروی یکنواخت در سرتاسر طول نمونه داشته باشد.
- سر و ته نمونه باید کاملا صاف و عمود بر محور طول نمونه باشد.
- در صورت نیاز به نمونه‌سازی روشهای مختلفی (موجود در مقالات و استانداره) از جمله کوبش مرطوب، بارش خشک و بارش زیر آب وجود دارند که بسته به شرایط قابل استفاده می‌باشد.
- زمان عبوری CO_2 بسته به نوع مصالح مختلف متغیر است. که به طور میانگین یک ساعت پیشنهاد می‌گردد.

- مقدار آب عبوری از نمونه در حدود ۲ برابر حجم نمونه پیشنهاد می‌گردد.

- یکی از خطاهای رایج در آزمایش سه‌محوری، نحوه اشباع نمودن نمونه است. چنانچه مقدار B اسکمپتون کمتر از ۰,۹۵ باشد، نتایج دچار خطا می‌شوند.

- هنگام تحکیم نمونه، آب خارج شده به معنی کاهش حجم نمونه و در نتیجه تغییر در دانسیته است. در این آزمایش، حتماً باید دانسیته و تخلخل بعد از تحکیم گزارش شود.

- طولانی بودن شلنگها منجر به خطادر آزمایش می‌شود.

- سنگهای متخلخل باید جهت صحت آزمایش کاملاً اشباع و عاری از گرفتگی باشند. بدین منظور باید همیشه در ظرف حاوی آب بدون حباب هوا قرار گیرند.

- اورینگهای روی غشاء باید سالم باشند تا عملکرد آب بندی خود را به خوبی انجام دهند.

- سوراخ شدن غشاء یکی از اشکالات رایج در آزمایش سه محوری است و منجر به خطا در نتایج می شود. توصیه میشود غشاء لاتکس هربار تست شود و از سلامت آن اطمینان حاصل گردد.

- در نمونه های دست خورده، فرآیند نمونه سازی کاملاً بر نتیجه آزمایش تأثیرگذار است.

- در سر و ته نمونه علاوه بر سنگ متخلخل باید از کاغذ صافی مناسب استفاده گردد.

- سنسورهای نیرو، جابجایی، فشار و تغییر حجم باید به صورت سالیانه کالیبره شوند.

- دقت سنسورهای اندازه‌گیری نیرو، تغییر مکان و فشار در نتایج حاصل از آزمایش بسیار تاثیرگذار هستند.

❖ آزمایش نفوذپذیری

- انجام آزمایش به روش بار ثابت برای نمونه‌های درشت دانه

- انجام آزمایش به روش بار متغیر برای نمونه‌های ریزدانه و رسی

- نمونه‌سازی به روش کوبه لرزان و یا کوبش مرطوب و یا استفاده از قیف پایه بلند و دیگر روشهای پیشنهادی در استانداردها

- اشباع‌سازی نمونه با استفاده از دستگاه وکیوم

- اعمال وکیوم به مدت حداقل ۱۵ دقیقه با فشار ۵۰ سانتیمتر جیوه جهت خارج کردن هوای داخل نمونه

- اشباع نمونه با استفاده از آب مقطر و اعمال وکیوم از پایین به سمت بالای نمونه

- اطمینان به اشباع بودن نمونه پیش از انجام آزمایش (با ثابت شدن مقدار آب خروجی در واحد زمان)

- اطمینان از پر بودن شیلنگها و خروج حباب هوای محبوس

- در آزمایش نفوذپذیری با بار افتان توصیه می‌گردد آزمایش حداقل سه مرتبه بر روی نمونه انجام گردد.

فصل ششم

مطالعات ژئوفیزیک

نسخه پیش نویس

فصل ششم

۶- مطالعات ژئوفیزیک

۶-۱- مطالعات ژئوفیزیک کم عمق در پروژه های شهری

متن پیش رو راهنمایی است بر روش‌های ژئوفیزیک کم عمق که در مطالعات شهری (شناسایی و بررسی زیر پی ساختمان‌ها) می‌تواند کاربرد داشته باشد. این روش ها شامل برداشت های ژئوالکتریک (تعیین مقاومت الکتریکی) و برداشت های لرزه نگاری می‌باشد. در ادامه به توضیح این موارد پرداخته شده است.

۶-۱-۱- مطالعات ژئوالکتریک برای تعیین مقاومت الکتریکی به منظور طراحی سیستم اتصال به زمین (برق گیر)

تعیین مقاومت الکتریکی ظاهری خاک در پروژه های مختلف به منظور طراحی سیستم اتصال به زمین (برقگیر) یا بررسی شرایط خورندگی صورت می‌پذیرد.

۶-۱-۲- روش مطالعات ژئوالکتریک برای تعیین مقاومت الکتریکی به روش ونر

سونداژ قائم الکتریکی (VES) که در واقع نوعی حفاری به روش الکتریکی است، بمنظور دست یابی به تغییرات مقاومت ویژه ظاهری خاک متناسب با عمق در زیر نقطهٔ اندازه گیری می‌باشد.

اساس این برداشت‌ها که با روش چهار الکترودی ونر انجام می‌شود، بر این پایه است که جریان الکتریکی به طور پیوسته با افزایش فاصلهٔ الکترودها، به اعماق بیشتری نفوذ کرده و اختلاف پتانسیل از این جریان ثبت و مقادیر مقاومت های الکتریک خاک بدست می‌آید. این روش برای تعیین مقاومت الکتریکی ظاهری زمین پروژه های مختلفی همچون پست های برق ، پایه برج‌های انتقال برق ، مسیر خطوط لوله ، طراحی برق گیر برای ساختمان‌ها و... انجام می‌شود.

این آرایش چهار الکترودی، ساده ترین نوع آرایه، برای بدست آوردن میزان مقاومت ویژه ظاهری (و عکس آن، هدایت الکتریکی) است .

در این آرایش چهار الکترود در فواصل مساوی از یکدیگر روی یک خط مستقیم و در یک راستا چیده می‌شوند (شکل ۱-۱).

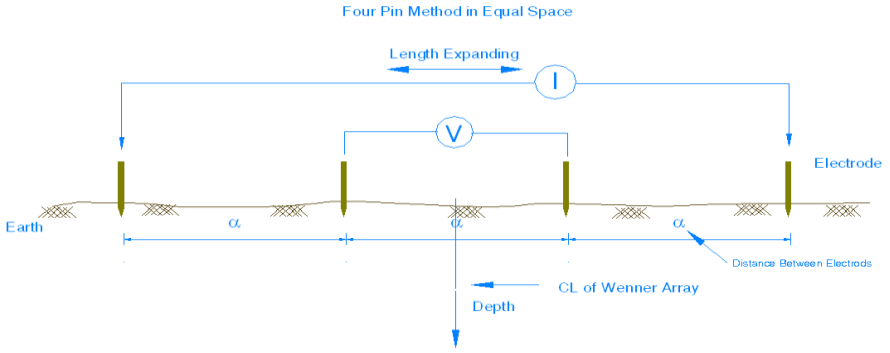
فاصلهٔ بین دو الکترود مجاور در آرایه (a) نامیده می‌شود (این فاصله را می‌توان به عمق معادل نسبت داد، عمق معادل به عواملی می-تواند وابسته باشد ، در این قسمت به دلیل طول گسترش کوتاه و عمق کم، طول بین الکترودها به همان حدود عمق معادل نسبت داده می‌شود) . در این آرایش دو الکترود بیرونی، الکترود های جریان (C1 و C2) و دو الکترود داخل ، الکترودهای پتانسیل (P1 و P2) می‌باشند.

۶-۱-۳- برداشت‌های صحرایی روش ژئوالکتریک

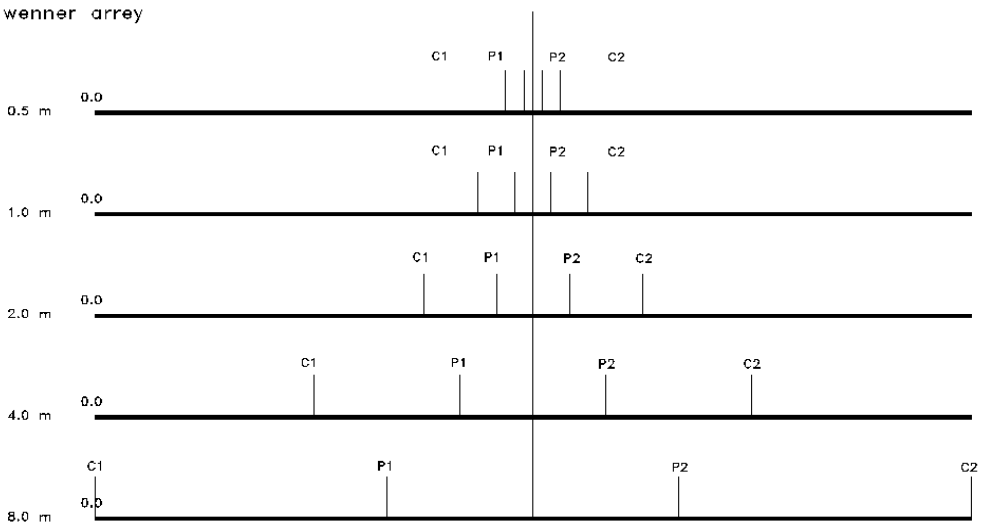
این برداشت ها بسته به وسعت زمین مورد مطالعه و عمق بررسی تعیین می‌گردند . وسعت زمین مورد مطالعه تعداد سونداژ های ژئوالکتریک را تعیین نموده و میزان خاکبرداری عمق بررسی را تعیین می‌نماید. تعداد سونداژ ها در محل هایی که وسعت کمی داشته نباید کمتر از ۳ سونداژ باشد (فرضا ۲۰۰ متر مربع) این امر در محل پروژه هایی با اهمیت بالا گذشته از مقدار وسعت ناحیه با تعداد سونداژ بالاتری باید اجرا گردد (به منظور بررسی تغییرات میزان مقاومت الکتریکی برای طراحی بهینه برقگیر) . عمق بررسی در این مطالعات می‌تواند از سطح تا ۸ الی ۱۰ متر حداکثر تعیین گردد (۱۰ متر برای زمین های با وسعت زیاد)، در صورتی که از زمین ناحیه خاکبرداری شود، عمق برداشت باید از زیر خاکبرداری تا ۸ متر زیر آن انجام شود (این امر مستلزم گسترش فاصله بین الکترودهای برداشت مطابق عمق می‌باشد)، در صورتی که عمق خاکبرداری نسبتا زیاد باشد (فرضا بیش از ۱۰ متر) با توجه به وسعت زمین ناحیه، ممکن است لازم باشد این برداشت ها پس از عملیات خاکبرداری صورت گیرد. در نقاطی که مساحت پروژه کوچک بوده و همچنین امکان گسترش الکترود جریان تا ۲۴ متر در هیچ نقطه از پروژه وجود نداشته باشد، پس از کسر خاکبرداری از طول گسترش، حداقل امکان گسترش الکترودهای جریان می‌تواند قابل قبول باشد اما این طول نباید کمتر از ۱۵ متر باشد.

فواصل گسترش الکترودها[1] میتواند از ۰/۵ یا ۱ متر شروع و با فاصله الکترودی ۲، ۴ و۸ متر یا ۳ ، ۵، ۷ و ۱۰ متر یا حتی با فواصل مساوی گسترش یابد (عمق معادل ۱۰ متر=گسترش الکترود جریان تا ۳۰ متر). (شکل ۲). در ادامه نمونه‌ایی از جدول برداشت صحرایی برای این روش آورده شده است. (جدول ۱-۱).

[1] در روش ونر فاصله بین الکترودها یکسان و دو الکترود بیرونی الکترود های جریان می‌باشد



شکل ۶-۱- آرایش ژئوالکتریکی ونر، در این آرایه فاصلهٔ بین الکترودهای جریان پتانسیل یکسان می‌باشد



جدول ۶-۱- نمونه جدول برداشت صحرایی

Project:		Describtion :			
Date:					
Sounding	a(m)	ΔV	I	R(Δv/I)Ω	ρ(2πRa)-Ωm

۶-۱-۴-تحلیل برداشت های تعیین مقاومت الکتریکی خاک

همانطور که در پیشتر عنوان شد برای عمق های متفاوت برای یک سونداژ الکتریکی، اعداد مقاومت های الکتریک (به صورت تقسیم اختلاف پتانسیل بر شدت جریان که در دستگاه های رایج این امر خودکار انجام میگردد- با دیمانسیون یا واحد اهم) برداشت میگردد و با اعمال فاکتور هندسی بر اعداد بدست آمده مقادیر مقاومت های الکتریکی ظاهری با واحد اهم متر نتیجه خواهد شد.

در ادامه از تمامی اعداد بدست آمده در عمق های مختلف میانگین گیری میگردد و در نهایت میانگین نهایی که از اندرکنش خاک در عمق های مختلف بدست آمده است در طراحی استفاده می‌گردد. اعداد بدست آمده، مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری است و تفسیری برای تفکیک مقاومت ها و عمق ها بر آنها اعمال نمی‌شود (به دلیل اندرکنش سیستم اتصال به زمین با خاک و متاثر شدن آن با تغییرات کلی خاک، نه تفکیک شده آن). آرایه هندسی برای این روش از ضرب دو برابر فاصله ثابت بین الکترودها در عدد پی (عدد پی= ۳/۱۴) نتیجه می‌گردد و در ادامه عدد بدست آمده در مقاومت الکتریکی خوانده شده از دستگاه ضرب شده و نتیجه عدد مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری با واحد اهم متر (یا اهم سانتی متر) خواهد بود، رابطه پیش رو ضریب هندسی ارایه ونر را نشان می‌دهد.

$$K = 2\pi a .$$

با توجه به شرایط اقلیمی هر ناحیه با در نظر گرفتن سرمای منطقه، در صورتی که احتمال یخ زدن خاک سطحی وجود داشته باشد و سیستم اتصال به زمین در اعماق کمی اجرا گردد، لازم خواهد بود بر اساس مراجع مختلف این امر با ضریبی در اعداد اعمال یا سیستم اتصال به زمین در زیر عمق یخبندان اجرا گردد.

۶-۱-۵- دستگاه و تجهیزات برداشت های مقاومت الکتریکی خاک

در این برداشت ها به طور ساده از مولتی متر های اندازه گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل با ارسال جریان به زمین استفاده می-گردد، با توجه به عمق کم بررسی این دستگاه ها دارای توان جریان چندان بالایی نیستند، اما در حدی باید باشد که در ساختگاه ها با پی سنگی قابلیت ارائه عدد صحیح را داشته باشند، الکترود های استفاده شده نیز باید از نوع فلز برنج باشند. این دستگاه ها به طور سالیانه باید مورد بررسی قرار گرفته و توان باطری، صحت کارکرد دستگاه و دیگر موارد آن بررسی شود (این امر می‌تواند با مراجعی که عهده دار کالیبراسیون این گونه دستگاه ها هستند مورد بررسی قرارگیرند). در برخی از پروژه ها به خصوص پروژه هایی که از اهمیت بالایی برخوردار هستند، کارفرما می‌تواند برای بررسی صحت کارکرد این دستگاه ها، مدارک مربوط به کالبیراسیون آنها را از کارشناس مربوط درخواست نماید.

۶-۱-۶- بررسی دادهای برداشت شده

با توجه خصوصیات فیزیکی مصالح خاکی و سنگی و تغییرات مقادیر هدایت الکتریکی در آنها بر اساس جنس و سختی آنها ، می‌توان اعداد بدست آمده را از این برداشت ها تا حدودی با مصالح ناحیه و حتی افت و خیز ان برای قرار گیری حدود سفره آب مورد مقایسه قرار داد . ناگفته نماند که این امر تقریبی بود و در صورتی که لازم باشد عمق دقیق و شرایط جنس را مورد بررسی کامل قرار داد، باید از روش دیگر و تفسیر داده ها بهره جست. جدول ۱-۲ به طور کلی تغییرات تقریبی مقاومت الکتریکی و مصالح مختلف را نشان می-دهد.

جدول ۶-۲- تغییرات تقریبی مقاومت الکتریکی و جنس مصالح

EXAMPLE OF SOIL & ROCK RESISTIVITY

Type of soil	Normal and high rainfall (I.e. greater than 500 mm a Year)		Low rainfall and desert (I.e. less than 250 mm a year)	Underground waters (saline)
	Probable Value (Ω-m)	Range of Values encountered in (Ω-m)		
Alluvium and lighter clayes	5	2 to 10 Depends on water level of locality		
Clays (excudind alluvium)	10	5 to 20	10 to 100	3 to 10
Marls (e.g. Keupermarl)	20	10 to 30	50 to 300	
Porous limestone (e.g. chalk)	50	30 to 100		
Porous limestone (e.g. keuper sand stone and clay shales)	100	30 to 300	>1000	10 to 30
Quartizites, compact and crystatline limestone(e.g. Carboniferous sediments, marble,dtc.)	300	100 to 1000		
Clay slates and slatey shales	1000	300 to 3000	>1000	30 to 100
Granite	>1000			
Fissile slates, schists, gneiss and igneous rocks	2000	>1000		

EARTHING & LIGHTNING PROTECTION STSYEM , ALSTOM 03-02-1/Rev.B

۶-۱-۷-بررسی شبکه یا جاهک برق گیر

پس از این برداشت ها و اجرای سیستم اتصال به زمین، با روش های ارائه شد در استانداردها (روش سه الکترودی)، میزان مقاومت اندرکنش شبکه یا چاهک برقگیر با خاک و قرار گیری آن در محدوده اعداد استاندارد قابل بررسی می‌باشد. این امر می‌تواند به درخواست کارفرمای پروژه پس از اجرای سیستم اتصال به زمین صورت پذیرد.

❖ خورندگی خاک بر اساس برداشت های مقاومت الکتریکی

با توجه به شرایط شیمیایی خاک و تاثیر این امر بر مقاومت های الکتریکی خاک (تغییر در هدایت الکتریکی)، می‌توان با این برداشت و دست یابی به تغییرات مقاومت الکتریکی، حدود خورندگی خاک را برآورد نمود. جدول شماره ۱-۳، تغییرات مقاومت الکتریکی را نسبت به درصد خورندگی نشان داده است . بر این اساس با توجه به پروژه های مختلف می‌توان از این عدد برای مقابله با خورندگی استفاده نمود. جدول شماره ۱-۳، ۵ مرحله تقسیم بندی درصد خورندگی را بر اساس مقادیر مقاومت الکتریکی خاک نشان می‌دهد، این تقسیم

بندی از درصد خورندگی زیاد تا کم و پیش رونده مشخص شده است که بر اساس آن در پروژه های مختلف از تجهیزات فلزی نگهداری می‌گردد (حفاظت کاتدیک).

به این امر باید توجه شود که در برخی پروژه هایی که برای نگهداری دیواره خاکی از نیل (میخ – خاک) استفاده می‌گردد، می‌بایست به شرایط خورندگی دقت شود.گذشته از آنکه میزان خاکبرداری در این گونه پروژه ها ممکن است عمیق باشد و در زمان شروع پروژه امکان بررسی مقاومت الکتریکی در اعماق میسر نباشد، لازم خواهد بود برداشت های مقاومت الکتریکی مرحله به مرحله، بسته به عمق خاکبرداری انجام شود. (میزان درصد این مقادیر را نیز می‌توان از استانداردهای مشابه نیز استخراج نمود).

جدول ۶-۳- تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به خورندگی

Potential Corrosion Activity	Resistivity Range(ohm-m)
Very corrosive	0-10
corrosive	10-20
Moderate corrosive	20-50
Mildy corrosive	50-100
Progressively less corrosive	>100
API REF.	

۶-۱-۸-خطاهای احتمالی در برداشت های تعیین مقاومت الکتریکی

در مطالعات تعیین مقاومت الکتریکی عواملی می‌تواند باعث خطا در سنجش مهندسی گردد (گذشته از خطای احتمالی کارشناسی یا کیفیت نامناسب دستگاه)، این امر در تعیین مقاومت الکتریکی برای طراحی سیستم اتصال به زمین، می‌تواند بارنگی و افزایش رطوبت موقت خاک باشد که باعث کاهش مقاومت های الکتریک شده و در ادامه آن طراحی سیستم اتصال به زمین با اعدادی که با واقعیت کلی خاک متفاوت است صورت گیرد، یا به نوعی هزینه های حفاظت کاتدیک تجهیزات فلزی را بالا ببرد، بدین جهت می‌بایست این آزمایش چند روز با فاصله از زمان بارندگی صورت پذیرد.

مورد دیگری که ممکن است در مسائل مربوط به خورندگی خطای سنجش ایجاد نماید، مصالحی از خاک هستند که دارای مقاومت الکتریکی نسبتا بالایی بوده که نشان از عدم خورندگی است و اما ترکیبات شیمایی آنها خورنده هستند (مانند ترکیبات خشک آهکی) در این مورد کارشناس مربوط باید نسبت به شناخت این ترکیبات آگاهی داشته و برای طراحی مسائل به خورندگی به آزمایش های شیمایی نیز تکیه نماید.

۶-۲- مطالعات لرزه نگاری

مطالعات لرزه نگاری کم عمق در بررسی های مهندسی کاربردهای فراوانی دارد. این کاربردها می‌تواند در بررسی های لرزه نگاری برای دست یابی به تغییرات شرایط دینامیکی زیر پی ساختمان، دست یابی به میانگین توزیع سرعت موج برشی برای شناخت تیپ خاک و .... باشد .

روش های متعدد لرزه نگاری (کم عمق) برای شناخت شرایط خاک ، توزیع سرعت امواج ، نحوه لایه بندی خاک و ... وجود دارد که می‌توان از آنها استفاده نمود ، این روش ها می‌تواند روش لرزه نگاری سطحی شکسته مرزی (Refraction) برای بررسی سرعت امواج در لایه ای مختلف و عمق آنها، روش لرزه نگاری درون چاهی (Downhole) برای دست یابی به سرعت امواج تجمعی و لایه به لایه و توزیع سرعت امواج در طول یک گمانه، روش لرزه نگاری چاه به چاه (Crosshole) برای دست یابی به توزیع سرعت امواج در هر لایه در طول گمانه، لرزه نگاری‌های موج سطحی (... , MASW-SASW) برای دست یابی به سرعت موج برشی تا اعماق مورد مطالعه در نقاطی که امکان حفر گمانه وجود ندارد و روش های مشابه دیگر می‌باشد. در ادامه اقدام به ارائه نحوه انجام این آزمایش ها گردیده است .

۶-۲-۱- مطالعات لرزه نگاری درون چاهی (Downhole)

اساس کار روشهای مختلف لرزه‌نگاری، تعیین خصوصیات درونی زمین با استفاده از زمان سیر امواج کشسانی[۲] است. از آنجا که امواج حجمی[۳] (امواج P و S) در داخل تودهٔ ماده منتشر می‌شوند، خصوصیات کشسانی ماده اثرات مستقیمی بر وضعیت انتشار آنها داشته و در نتیجه می توان از آنها جهت مطالعات مهندسی استفاده نمود. سرعت انتشار امواج لرزه ایی (در این قسمت منظور از موج لرزه ایی موج های حجمی P و S می‌باشد) به چگالی و خصوصیات کشسانی محیط انتشار بستگی دارد، این امواج (با کاربرد در پروژه های مهندسی) موج فشاری(P) و موج برشی (S) می‌باشد. در یک محیط کشسان، همواره سرعت موج فشاری از سرعت موج برشی بیشتر است (امواج اولیه و ثانویه). برای اندازه گیری سرعت این امواج روش های مختلفی وجود دارد که یکی از آنها روش لرزه نگاری درون چاهی (Downhole) می‌باشد.در این روش گمانه ایی با عمق و قطر مشخص آماده سازی شده و توسط تجهیزات مربوط به این آزمایش، برداشت های لرزه نگاری صورت می‌پذیرد. در ادامه نحوه انجام این برداشت ها پرداخته شده است.

---

[۲]- Elastic waves

[۳] - Body waves

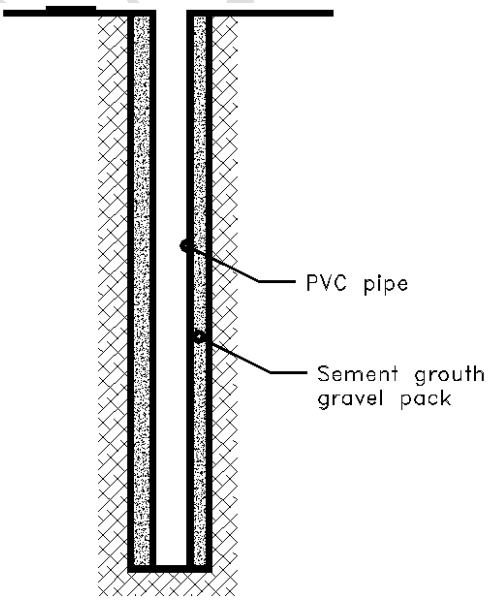
۶-۲-۱-۱-آماده سازی گمانه برای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی

در این مرحله می بایست در داخل گمانه حفر شده (ماشینی) لوله هایی از جنس p.v.c در طول گمانه (از سطح تا کف آن) با قطر مطابق با قطر حسگر لرزه ای درون چاهی (Seismometer) ، قرار داده شود و محل اتصال لوله ها به یکدیگر به طرز مناسبی (با چسب مایع داخل لوله و خارج لوله با چسب نواری پَهن) به یکدیگر متصل گردند. شکل ۱-۲.

در برخی گمانه ها که به دلیل شرایط خاک ناحیه در زمان حفاری از بنتونیت استفاده شده باشد، می بایست در چند مرحله بنتونیت مربوط شسته شود (این امر برای دریافت داده لرزه ای مناسب ضروری می باشد).

در ادامه می بایست حاشیه خارجی لوله های قرار داده شده در گمانه (جدار جارجی لوله p.v.c تا دیواره گمانه) با مصالح پر شود. این امر می تواند به صورت ایده آل با تزریق بتن (انتهای لوله مربوط در این قسمت باید مسدود گردد تا از نفوذ سیمان به داخل لوله جلوگیری شود) یا مصالح الک شده (ماسه با شن نسبتا ریز دانه) انجام گردد.

در حالت دیگر پر نمودن فاصله بین لوله p.v.c و دیواره گمانه می تواند توسط مصالحی همچون ماسه نسبتا دانه درشت یا موارد مشابه آن انجام گیرد، این امر می بایست به آرامی با پر نمودن فضای خالی مربوط در چند مرحله و با تکان های خفیف به لوله در هر مرحله، باعث گردد تا مصالح مزبور تمامی فاصله بین لوله و گمانه را به طور کامل پر نماید. (در صورتی که از مصالح با اندازه بزرگ در این قسمت استفاده شود باعث می گردد در اعماقی که قطر حفاری کوچکتر گردیده است از نفوذ مصالح مربوط به اعماق پائین تر جلوگیری نماید). در نهایت در این قسمت پیوستگی مناسبی بین جدار خارجی لوله و داخلی گمانه برای انتقال لرزه مصنوعی تولید شده ایجاد می گردد.



شکل ۶-۲- شمایی قرار گیری لوله PVC در گمانه و پر نمودن حاشیه خارجی آن

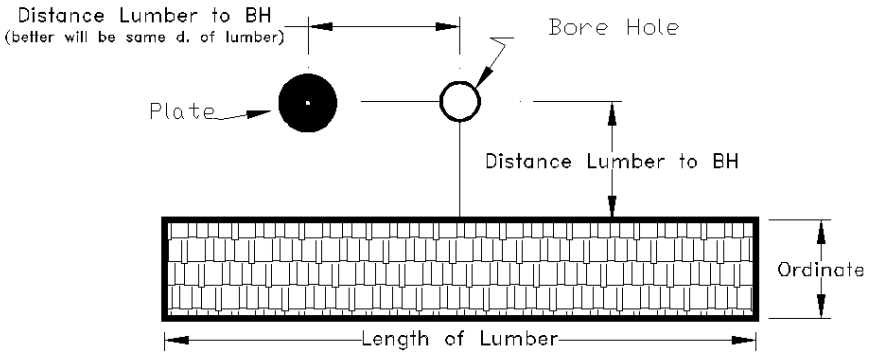
۶-۲-۱-۲-پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی

در این قسمت برای حصول نتیجه مناسب لازم است منابع تولید امواج لرزه ای به طرز متعارف و مناسبی در نزدیکی گمانه قرار داده شوند. قطعاً کارشناس زبده در امر قرائت داده های لرزه ای توانایی دست یابی به اولین زمان رسیدن امواج لرزه ای را از هرضربه برای تولید موج، دارا می باشد، با این حال به دلیل فراهم بودن شرایط تولید موج در سطح (با الوار و صفحه)، لزوما برای تولید هر موج لرزه ای، منبع آن را جداگانه استفاده نمود. برای این امر استفاده از صفحه ای (فلزی یا هر جنس دیگری که تحمل ضربه پتک را داشته باشد) برای تولید موج فشاری (p) و الوار برای تولید موج برشی (s) ضروری است.(تولید موج برشی (s)، با الوار چوبی یا هر وسیله دیگری که با ضربه توانایی تولید حرکت برشی را داشته باشد).

وسیله استفاده شده برای تولید موج برشی نباید از طول چندان بلندی برخوردار باشد. منابع تولید امواج لرزه ای نباید با فاصله زیادی از گمانه قرار داشته باشند (توجه به اینکه موج تولید شده موج مستقیم بوده و با افزایش فاصله از گمانه باعث تغییر در شرایط مسیر موج و به طبع تغییر مستقیم بودن آن گشته و زمان رسید موج بدست آمده نیز تغییر خواهد نمود. شکل ۲-۲.

در ادامه، تولید موج لرزه ای فشاری (p) با ضربه پتک به صفحه بطور قائم و همچنین برای تولید موج لرزه ای برشی دو ضربه افقی (از کناره های الوار) در جهت عکس یکدیگر صورت می پذیرد.

برای حصول نتیجه مناسب برای قرائت اولین زمان رسیدن های موج برشی لازم است بار با وزن مناسبی بر روی الوار قرار گیرد. لازم است توجه گردد که در صورت جابجایی الوار، در زمان تولید موج، قطعاً تقارن خط میانی الوار با گمانه رعایت گردد.



شکل ۶-۳- شمایی پیگربندی برای برداشت لرزه نگاری

۶-۲-۱-۳-داده برداری، ثبت امواج لرزه ای و فرمت ثبت (آزمایش لرزه نگاری درون چاهی)

در ثبت داده های لرزه ای درون چاهی در گمانه ماشینی لازم است حسگر لرزه ای در طول گمانه هر متر به متر به جدار داخلی لوله p.v.c محکم شده(با پکرهای بادی یا فنری یا هر حالتی که لرزه سنج درون گمانه ای دارا می باشد و قابلیت محکم شدن

به بدنه گمانه را داشته باشد) و برای هر متر موج لرزه ای تولید گشته و داده های رسیده به حسگر مورد ثبت قرار گیرد. حرکت حسگر لرزه ای در داخل گمانه می تواند از سطح به کف یا ازکف گمانه تا سطح صورت پذیرد.

برای ثبت درست داده ها در عمق های پایین ، لازم است پس از برقراری حسگر مربوط در عمق مورد نظر و محکم شدن آن به بدنه داخلی گمانه، تولید و ثبت امواج لرزه ای (S و P) با تکرار برای هر موج صورت پذیرد (به منظور بررسی صحیح بودن داده برداشت شده).

افزون بر آن این امر می‌تواند با بر انبارش امواج رسیده از چند ضربه برای یک موج (Enhancement ، Stack) نیز صورت پذیرد، توجه شود که در زمان برانبارش موج، خط تقارن الوار با گمانه رعایت گردد (کارشناس مربوط می‌تواند به صورت اتفاقی داده های متراژهای مختلف را در صورتی که اطلاعاتی از مصالح ناحیه در دسترس باشد صحت برداشت های خود را بررسی نماید).

برداشت های داده های لرزه ای هر متر به متر ضروری بوده و در صورتی که داده ثبت شده برای بررسی دستگاه نظارت مورد نیاز باشد باید قابل ارائه باشد. داده های لرزه ای ثبت شده می بایست بر اساس فرمت Seg 2 ثبت و در صورت نیاز بـه بررسـی قابـل ارائه باشد. (با ارائه فایل نوع ضربه و عمق مربوط p، +s ، -s). توجه شود که صحت کارکرد دستگاه و حسگر ها بایـد بـه صـورت ادواری مورد بررسی قرار گیرد و در پروژه‌ای خاص در صورت نیاز کارفرما مدارک مربوط به این امر در اختیار ایشان قرار گیرد.

با توجه به اینکه برداشت لرزه نگاری در این مطالعات در نقاط شهری صورت می پذیرد، در صورتی کـه پیرامـون محـل برداشـت دارای نوفه (Nois) باشد، کارشناس مربوط فیلتر مناسبی را از داده ها گذر دهد (برای ثبت و شناسایی مناسب داده). کارشناس باید شناخت مناسبی ار نوفه محیط و فیلتر گذر داده شده داشته باشد تا خدشه به ماهیت اصلی موج و قرائت هـای آتـی آن وارد نگردد.

۶-۲-۱-۴- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری درون چاهی

در این مرحله پس از ثبت داده ها، با هر نرم افزار سازگار با فرمت ثبت Seg 2 می توان امواج لرزه ای ثبت شده (در ۳ مولفه) را قرائت نمود.

در داخل برخی حسگرهای لرزه ای دو مجموعه ۳ مولفه ای قرار داشته و به طبع ۶ کانال برای ثبت داده هر دستگاه مورد نیاز است. به طور متداول عمده حسگرهای لرزه ای ۳ مولفه ای بوده و با ۳ کانال دستگاهی می‌توانند مورد ثبت قرار گیرند، این امر در زمان قرائت با ۳ یا ۶ خط لرزه ای ثبت شده قابل مشاهده است.

در زمان قرائت داده ها، اولین زمان رسید موج (p) و (s) با توجه به نوع منبع تولید شده قرائت گردد. همانگونه که در مراجع مربوط به برداشت های ژئوفیزیک لرزه ایی آورده شده است، برای قرائت موج برشی (s) با قرار دادن هر دو رد لرزه ای چپ و راست (+ و -) تولید شده بر روی یکدیگر، محل اولین زمان رسید موج (s) قابل شناسایی می باشد. (به این امر اشاره می‌گردد که لزوما تمامی داده‌ها برای هر عمق تک به تک باید قرائت گردد و به هیچ عنوان نباید بر اساس یک خط برازش بر کل داده ها یا هر روش دیگری اعداد زمان از نگاشت ها استخراج گردد). همانگونه که پیش تر عنوان شد، تکرار در ثبت داده و بر انبارش آنها در هر عمق می تواند باعث دستیابی به داده مناسب‌تر گردد.

۶-۲-۱-۵- دستگاه و تجهیزات

تجهیزات این برداشت ها به طور عموم، شامل یک لرزه سنج سه مولفه‌ایی (3Axial-seismometer) ، دستگاه ثبات لرزه ایی (لرزه نگار- Seismogram) و کلید چکش (Hammer Switch) می‌باشد.

دستگاه لرزه ایی باید دارای حداقل ۳ کانال ثبت داده لرزه‌ایی باشد، این دستگاه باید دارای حداقل های استاندارد این گونه دستگاه ها باشد.

توانایی ثبت رقومی (دیجیتال) داده ای لرزه ایی و نمایش بر خط آن.

دارای حداقل محدود دینامیکی (Dynamic range) مطابق با ثبت داده Seg2 باشد و این رقم نباید از 85 dB کمتر باشد.

دستگاه باید دارای فرکانس نمونه برداری (sample Interval) حداقل ۰/۱۰۰ میلی ثانیه باشد.

دستگاه باید توانایی ثبت نگاشت لرزه‌ای با طول زمانی حداقل ۱۰۰۰ میلی ثانیه را داشته باشد.

دستگاه باید توانایی برانبارش (Stack) داده های یک برداشت از چند ضربه را داشته باشد (لزوم این امر در برداشت های با عمق بیش از ۲۰ متر بخصوص در محیط های سست خود را نشان میدهد).

دستگاه باید دارای حداکثر سیگنال ورودی و امپدانس ورودی مناسبی باشد (بر اساس مراجع این گونه برداشت ها) و دارای قابلیت تغییر در دریافت دقت داده لرزه ایی (Gain) باشد.

دستگاه باید دارای قابلیت فیلتر های پایین و بالاگذر و همچنین Notch باشد.

کلید چکش برای اعلام شروع موج می‌تواند بر روی چکش یا از اتصال کوتاه چکش و صفحه فلزی باشد (دستگاه باید این قابلیت را دارا باشد)، در صورتی که از یک ژئوفون برای این امر استفاده میگردد قطعا ژئوفون مزبور باید به منابع تولید موج کمترین فاصله را داشته باشد (کمتر از ۱۰ سانی متر).

حسگر لرزه ایی (ژئوفون داخل لرزه سنج) برای این برداشت ها باید دارای فرکانس مناسبی باشد (از ۴/۵ تا ۱۴ هرتز). این امر از داده ها قابل سنجش می‌باشد.

دستگاه و حسگر های لرزه‌ایی باید به طور ادواری مورد بررسی قرار گیرند و از صحت کارکرد آنها اطمینان حاصل کرد . (این امر در برخی پروژه ها می‌تواند از جانب کارفرما درخواست گردد و کارشناس مدارک مربوط به آن را باید ارائه نماید)

۶-۲-۱-۶- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری درون چاهی

در این مرحله پس از قرائت اولین زمان رسیدها، سرعت امواج بر اساس فاصله منبع تولید موج و حسگر، مورد محاسبه قرار می گیرد.

سرعت امواج در گزارش می‌بایست بر اساس سرعت هایی میان لایه ای متر به متر ارائه گردند. در این امر لازم است سرعت ها با کسر زمان رسید عمق بالایی و پائینی و فاصله مربوط مورد محاسبه قرار گیرند.

فاصله حسگر تا منبع تولید موج (با توجه به اندازه قرارگیری منبع تولید موج تا گمانه و عمق قرار گیری حسگر لرزه ای) برای هر عمق محاسبه و از عمق بالایی خود کسر گردد، بدین نحوه با کسر زمان رسید دو عمق قرائت شده و فاصله مکانی دوقرائت، می توان به سرعت میان لایه ای مزبور دست یافت.

گزارش توزیع سرعت امواج لرزه ای می بایست حائز جدولی که شامل عمق، سرعت موج (p) و سرعت موج (s) به همراه نمودارهای آنها به طور جداگانه بوده و شرحی از این توزیع سرعت درطول گمانه نیز آورده شود.

همچنین با توجه به آئین نامه ۲۸۰۰ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، لازم است بر اساس توزیع سرعت های میان لایه ای موج (s)، میانگین وزن دار سرعت ها، برآورد و نوع تیپ خاک نیز بر اساس آن ارائه گردد. این امر نیز با ارائه جدول محاسبات مربوط درگزارش ارائه شود.

تبصره: (لزوما) در صورتی که در این مطالعات، نیاز به بررسی داده های لرزه ای توسط دستگاه نظارت و یا مراجع دیگر باشد، می بایست امکان ارائه داده های ثبت شده با توضیح های عمق و نوع ضربه و همچنین فرمت های عنوان شده، وجود داشته باشد.

۶-۲-۱-۷- خطا های احتمالی در برداشت های درون چاهی

در این مطالعات چند مورد می‌تواند از حصول نتیجه مناسب یا ثبت داده لرزه‌ایی درست جلوگیری نماید که کارشناس باید این موارد و یا موارد مشابه آن را برای ثبت داده مناسب رعایت نماید. در حالاتی کارشناس یا دستگاه در ایجاد خطای احتمالی نقشی نداشته و آماده سازی گمانه قبل از انجام آزمایش (در مراحل حفاری) می‌تواند باعث ایجاد خطا در برداشت ها گردد. این خطا می‌تواند هدم شتشوی گمانه پس از اتمام حفاری باشد، دیده شده است که بنتونیت استفاده شده در حین حفاری (یا گل حفاری

به هر نحوی) جلوی گذر داده لرزه‌ایی را گرفته و ثبت داده را با مشکل مواجه می‌نماید. دیگر اینکه عدم دقت کافی در پر نمودن حاشیه خارجی لوله PVC با جدار گمانه که این امر گذشته از ایجاد لرزش اضافه باعث عدم ثبت داده نماسب می‌نماید. موارد عنوان شده یا مشابه آن باید توسط تیم حفاری رعایت گردد تا دیگر آزمایش‌ها نتایج مناسبی را بدشت دهند .

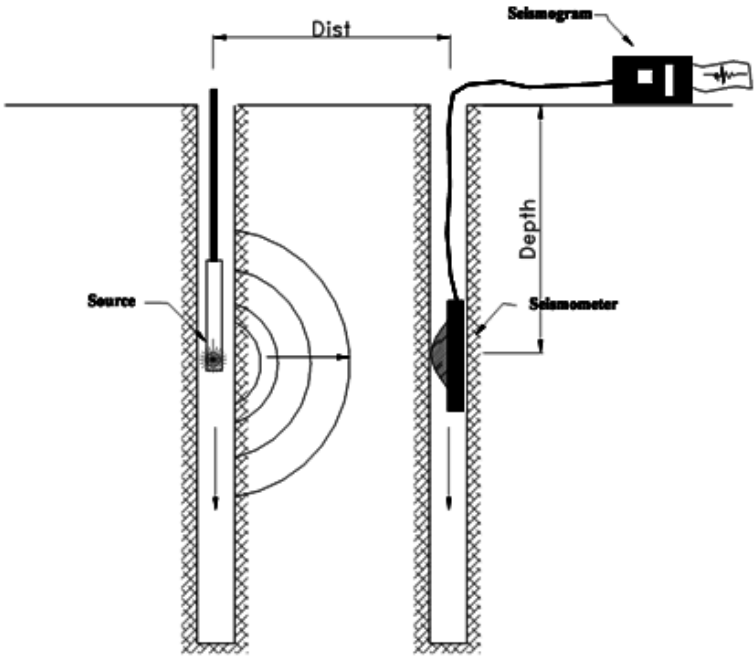
در ادامه خطاهایی که در حین برداشت‌های لرزه‌ایی می‌تواند ایجاد گردد، عدم رعایت فاصله ناسب برای منبع تولید موج و گمانه، عدم توجه به لغزش بیش از اندازه الوار در حین برداشت های منفی و مثبت موج برشی، عدم استفاده از دستگاه های معتبر، عدم شناخت موج توسط کارشناس (کارشناس این امر باید دوره مناسبی را از برداشت های داده های لرزه‌ایی دیده باشد) و دیگر مواردی که باید به آنها دقت شود.

در صورتی که در این برداشت‌ها اختلافی بین سرعت امواج نتیجه شده و شرایط مصالح ناحیه و دیگر مطالعات (همچون مطالعات ژئوتکنیک) دیده شود، لازم است کارشناس مطالعات داده‌های برداشت شده مجدد مورد بررسی و بازخوانی قرار دهد (در این امر دستگاه نظارت می‌تواند برای بررسی عدم تطابق در نتایج، کلیه داده ها را از کارشناس درخواست نموده و مورد بررسی قرار دهد).

۶-۲-۲- مطالعات لرزه نگاری چاه به چاه (Crosshole)

در این روش لرزه نگاری از دو گمانه در نزدیک هم برای تولید موج لرزهایی و ثبت آن استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه داده های ثبت شده با فرض موج مستقیم می‌باشد، بدین جهت نباید گمانه ایی که موج در آن تولید می‌گردد از گمانه‌ایی که حسگر لرزه‌ایی در آن قرار دارد فاصله زیادی داشته باشد. منبع تولید موج در این آزمایش می‌تواند چشمه جرقه‌زن درون گمانه ایی یا وسیله ایی که بتواند موج مناسبی برای ثبت تولید نماید. شکل ۶-۴.

در این نوع برداشت ها به طور ساده منبع تولید موج و حسگر لرزه‌ایی (هر یک در یک گمانه) در عمق های یکسان قرار گرفته و موج لرزه‌ایی تولید شده توسط دستگاه مورد ثبت قرار می‌گیرد. در این نوع برداشت برای شروع ثبت داده، می‌توان فرمان تولید موج و علام ثبت داده توسط دستگاه لرزه‌ایی صادر گردد تا هم زمانی تولید موج و داده رعایت گردد. آگاهی از این امر مناسب خواهد بود که، از این روش‌های لرزه نگاری در این مقوله برای بررسی های مهندسی (شهری) کم عمق بهره جویی می‌گردد، گذشته از آنکه می‌تواند با تغییر کوچکی در روش برداشت برای مطالعات توموگرافی و دیگر شناسایی‌ها نیز استفاده گردد.

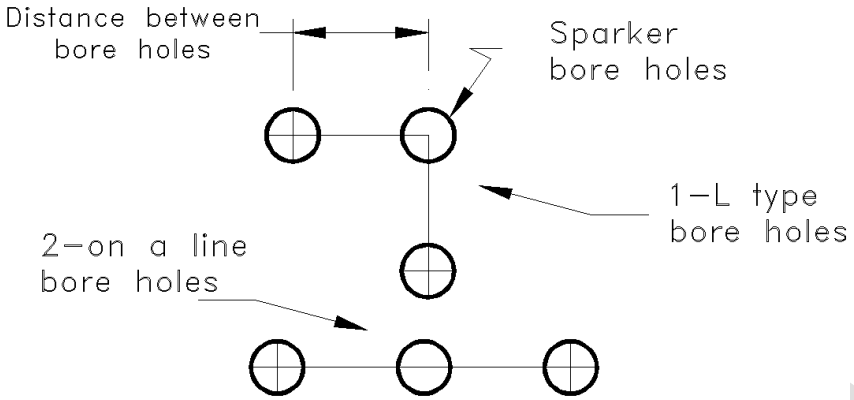


شکل ۶-۴- شمایی از پیگربندی برداشت لرزه نگاری چاه به چاه

۶-۲-۲-۱-آماده سازی گمانه برای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه

آماده نمودن گمانه در این آزمایش مانند آزمایش درون چاهی بوده و تمامی موارد مانند آن باید رعایت گردد، افزون برآنکه در فاصله حدود یک متر گمانه اول (فاصله مناسب برای دریافت موج مستقیم) گمانه دوم قرار داشته که منبع تولید موج در آن قرار می‌گیرد. در مواردی که نیاز به بررسی جانبی توزیع سرعت امواج لرزه‌ایی باشد، می‌توان سه گمانه (به شکل حرف L) استفاده نمود که یک منبع تولید موج و دو مجموعه حسگر لرزه‌ایی درون چاهای در دوگمانه عمود به آن قرار داشته باشد این امر برای دقت بالاتر حتی می‌تواند به صورت خطی اجرا گردد. شکل ۶-۴.

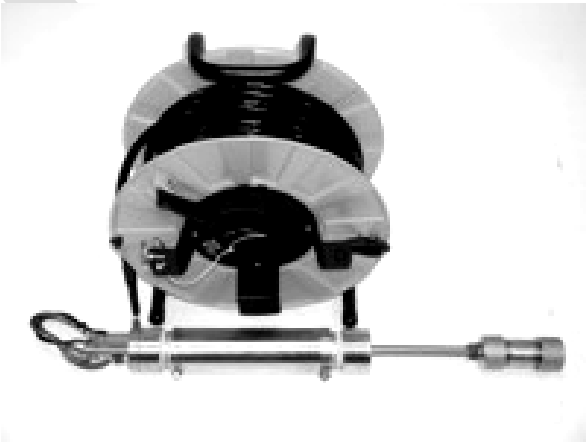
در برداشت لرزه نگاری چاه به چاه، حداقل به تعداد هر گمانه برداشت، ۳ کانال برای حسگر لرزه‌ای درون چاهی نیاز خواهد بود (یک حسگر عمود و دو حسگر افقی).



شکل ۶-۴- شمایی نحوه قرار گیری گمانه ها در برداشت لرزه نگاری چاه به چاه، چند گمانه‌ایی

۶-۲-۲-۲-پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه

در این برداشت ها همانگونه که بیان شد، دو گمانه با فاصله کم از یکدیگر قرار داشته که در یکی منبع تولید امواج و در گمانه دیگر حسگر لرزه‌ای قرار می‌گیرد. منبع تولید موج یا چشمه جرقه‌زن یا هر منبعی که موج لرزه‌ای مناسبی تولید نماید (در برخی موارد در صورت دردسترس بودن، از منبع تولید موج Ballard برای تولید موج برشی مناسب‌تر استفاده می‌شود) . شکل ۳-۳. در ادامه حسگر لرزه‌ایی و منبع تولید موج، هر یک در یک گمانه، در عمق های یکسان اقدام به تولید و ثبت موج لرزه‌ایی می‌نمایند .



شکل ۶-۵- شمایی دستگاه Ballard

۶-۲-۲-۳- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای و فرمت ثبت (آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه)

همانطور که در قسمت های قبل بیان شد، در ثبت داده های لرزه ای چاه به چاه، در گمانه لازم است حسگر لرزه ای در طول گمانه هر متر به متر به جدار داخلی لوله p.v.c محکم شده و در مقابل آن منبع تولید موج نیز در همان عمق، موج لرزه‌ایی را تولید نماید. فرمان تولید موج و ثبت داده ها هم زمان توسط دستگاه می‌تواند ایجاد گردد (شروع به ثبت داده لرزه‌ایی توسط کلید چکش نیز قابل انجام است این امر در صورتی امکان پذیر است که منبع تولید موج درون گمانه‌ایی این امکان را داشته باشد). در ادامه برای هر متر در عمق گمانه موج لرزه ای تولید و داده های رسیده به حسگر مورد ثبت قرار می‌گیرد. دیگر موارد ثبت مشابه آزمایش قبل می‌باشد.

۶-۲-۲-۴-قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه

در این مرحله پس از ثبت داده ها، به فرمت ثبت Seg 2 می‌توان امواج لرزه ای ثبت شده را قرائت نمود. با توجه به شرایط و نحوه تولید موج در داخل گمانه به طبع پدیدار نمودن رسید موج برشی در این آزمایش در محور عمود واضح‌تر می‌باشد (Sv) گذشته از آنکه دقت در پلاریته مولفه های افقی نیز در کنار مولفه عمود محل رسید موج برشی را مطمئن‌تر بدست خواهد داد. قرائت داده‌ها در برداشت های چند گمانه‌ایی و یا حسگر هایی که تعداد کانال های بیشتری دارا می‌باشند با اطمینان بیشتری امکان پذیر است،

۶-۲-۲-۵- دستگاه و تجهیزات

تجهیزات این برداشت ها مشابه برداشت درون چاهی است

۶-۲-۲-۶- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری چاه به چاه

پس از قرائت اولین زمان رسیدها از فایل های ثبت شده در اعماق مختلف، اقدام به برآورد میزان سرعت امواج با توجه به فاصله ثابت دوگمانه می‌گردد بر این اساس سرعت موج های بدست آمده از سر تا انتهای گمانه مطابق روش درون چاهی و آیین نامه مربوط میانگین گیری شده و تیپ خاک یا شرایط توزیع سرعت امواج نسبت به عمق نتیجه می‌گردد.

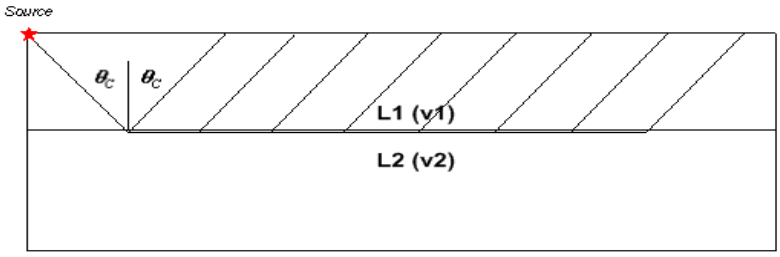
۶-۲-۲-۷- خطا های احتمالی در برداشت های چاه به چاه

در این قسمت به دلیل مشابهت کار با روش درون چاهی موارد خطای احتمالی مشابه می‌باشد

۶-۲-۳- مطالعات لرزه نگاری شکسته مرزی (Refraction)

در لرزه‌نگاری، اندازه گیری سرعت انتشار امواج لرزه‌ایی از طریق اندازه گیری زمان سیر آنها در مسیر های مشخص انجام می‌پذیرد. روش شکسته مرزی هنگامی کاربرد دارد که بتوان پرتوهای شکسته شده در مرز لایه‌ها را دریافت نمود. اساس کار در این حالت آن است که سرعت لایه‌ها با عمق افزایش یابد، یعنی سرعت موج در هر لایه از لایهٔ فوقانی بیشتر و از لایهٔ تحتانی کمتر باشد. در این شرایط پدیدهٔ شکست بحرانی[۴] در مرز لایه‌ها رخ می‌دهد، شکل ۱-۴، شمایی از این امر نشان می‌دهد.

هنگامی که موج با زاویهٔ بحرانی[۵] به سطح دو لایه برخورد نماید طبق قانون اسنل[۶] پرتو شکست نسبت به خط عمود بر مرز قائم بوده و در نتیجه به موازات مرز دو لایه حرکت می کند که این پدیده همان شکست بحرانی است. در این شرایط با حرکت پرتو به موازات مرز در هر نقطه از مسیر، شکست بحرانی به حالت معکوس رخ داده و پرتوی با زاویهٔ بحرانی از مرز به سطح زمین باز می گردد.



شکل ۶-۶- شمای انتشار موج

این پدیده در تعداد لایه‌های بیشتر نیز اتفاق می‌افتد و هر مرز زاویهٔ بحرانی خاص خود را دارد که به سرعت‌ها و چگالای دو لایهٔ هم-جواریکدیگر بستگی دارد. برای ثبت اطلاعات زمان سیر موج معمولاً آرایه ایی خطی از حسگر لرزه‌ایی (ژئوفون‌ها) در سطح زمین چیده‌شده و امواج لرزه‌ای توسط یک منبع لرزه‌ایی (پتک یا مواد انفجاری) در نقطه هایی در امتداد یا داخط خط چیدمان ژئوفون ها تولید می‌شود. در ادامه با ثبت رد لرزه ها (نگاشت داده‌های لرزه‌ایی)، زمانهای سیر موج قابل قرائت یوده و به دنیال آن منحنی‌های زمان-مسافت (Travel-Time) از اولین رسیدهای موج ترسیم و در نهایت ، سرعت و عمق لایه‌ها نتیجه خواهد شد. در این برداشت اطلاعات و محاسبات مربوطه برای امواج فشاری و برشی بطور جداگانه انجام می‌گیرد. در شکل ۲-۴، منحنی‌های زمان-مسافت موج مستقیم[۷] (که مستقیماً در لایهٔ اول از چشمه به گیرنده می‌رسد) و امواج شکسته مرزی از لایه‌های مختلف، برای یک مدل چهار لایهٔ فرضی نشان داده شده است. در این مدل سرعت هر لایه با محاسبهٔ عکس شیب منحنی مربوط به آن لایه، براحتی قابل محاسبه است. شکل ۳-۴ شمایی از منحنی زمان مسافت با برداشتهای رفت و برگشت را نشان می‌دهد.

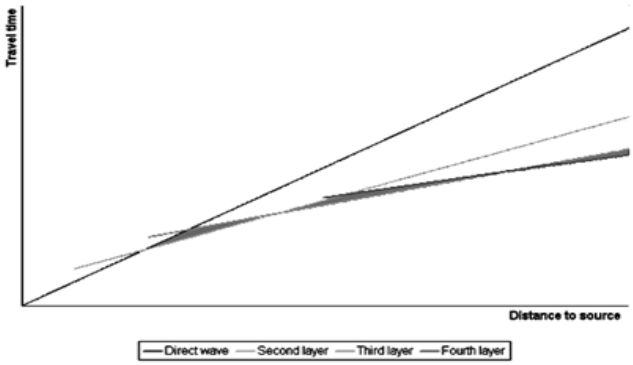
---

[۴]- Critical refraction

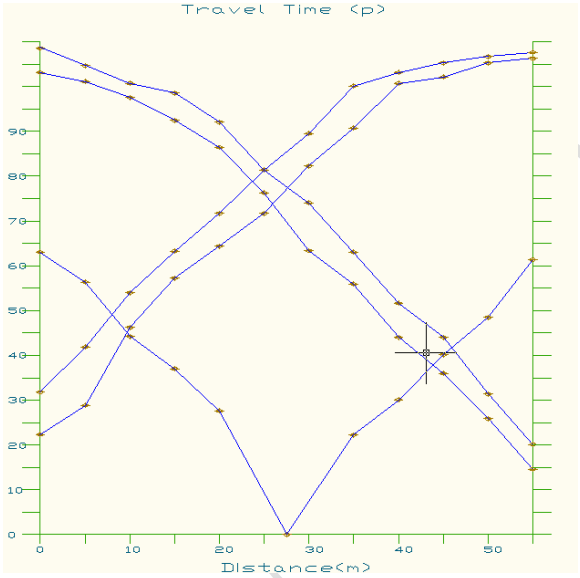
[۵]- Critical angle

[۶] - Snell's law

[۷] Direct wave



شکل ۶-۷- منحنی‌های زمان- مسافت یک مدل فرضی چهار لایه



شکل ۶-۸- منحنی‌های زمان- مسافت رفت و برگشت

در روش سادهٔ تفسیر فوق، فرض بر آن است که لایه‌ها افقی بوده و سرعت انتشار موج در آنها ثابت است که در عمل این فرض درست نیست. در نتیجه برای تفسیر داده‌ها در محیط واقعی که سطح لایه‌ها داری پستی و بلندی بوده و سرعت موج در هر لایه نیز متغیر است، می بایست از روشهای دیگری استفاده نمود. در این زمینه روشهای متعددی وجود دارد که از آن جمله می توان به روشهای زمان تأخیر[۸]، جبههٔ موج[۹]، مقطع‌نگاری[۱۰] و GRM [۱۱] اشاره نمود. روشهای جبههٔ موج و مقطع‌نگاری برای برداشتهای بسیار دقیق بکار می روند و مستلزم چگالی بسیار زیاد داده‌ها می باشند و در نتیجه هزینهٔ نسبتاً بالایی دربردارند. در مورد برداشتهای معمول شکسته مرزی

[۸] Delay time

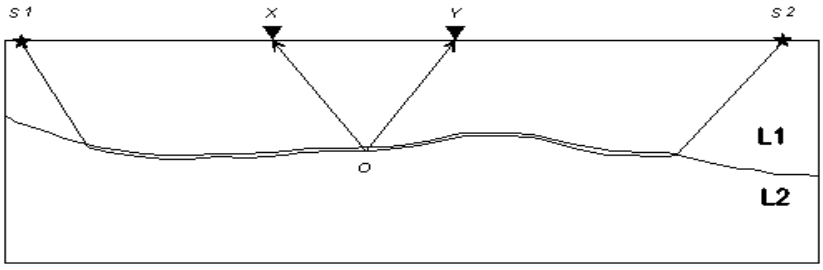
[۹]- Wave front

[۱۰]- Tomography

[۱۱]- Generalized Reciprocal Method

با دقت و هزینهٔ متوسط، بهترین روشها زمان تأخیر و GRM هستند که روش زمان تأخیر در حقیقت حالت خاصی از روش کلی GRM است.

در ادامه شرح مختصری از روش GRM آورده شده است. در روش GRM زمان سیر موج در قطعات کوچکی از سطح لایهٔ مورد نظر محاسبه می‌شود و بر این اساس می توان سرعت لایهٔ شکسته مرز[۱۲] موج را در همان قطعه از مسیر محاسبه نمود که این به مقدار واقعی سرعت در آن منطقه نزدیکتر است. بدین ترتیب تغییرات جانبی سرعت موج در هر لایه بدست می‌آید و در نهایت می‌توان با استفاده از این مدل سرعتی، عمق نسبتاً دقیق سطح لایه‌ها را در قسمتهای مختلف طوا پروفیل محاسبه نمود. اساس کار این روش استفاده از زمانها سیر متقابل[۱۳] موج است. منظور از زمانهای متقابل، زمانهای سیر موج شکسته مرزی یک لایه از دو چشمه در دو مسیر متقابل به دو نقطه در بین چشمه‌ها است، به گونه ای که محل تلاقی پرتوها در سطح لایه تنها یک نقطه باشد. این وضعیت در شکل ۴-۴، نمایش داده شده است. در چنین شرایطی اگر زمان سیر موج بین دو چشمه مشخص باشد، با کسر نمودن این زمان از مجموع دو زمان متقابل، زمان سیر موج در مسیر شکستهٔ XOY بین دو نقطهٔ میانی بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید. $T_{XOY} = T_{S1Y} + T_{S2X} - T_{S1S2}$.

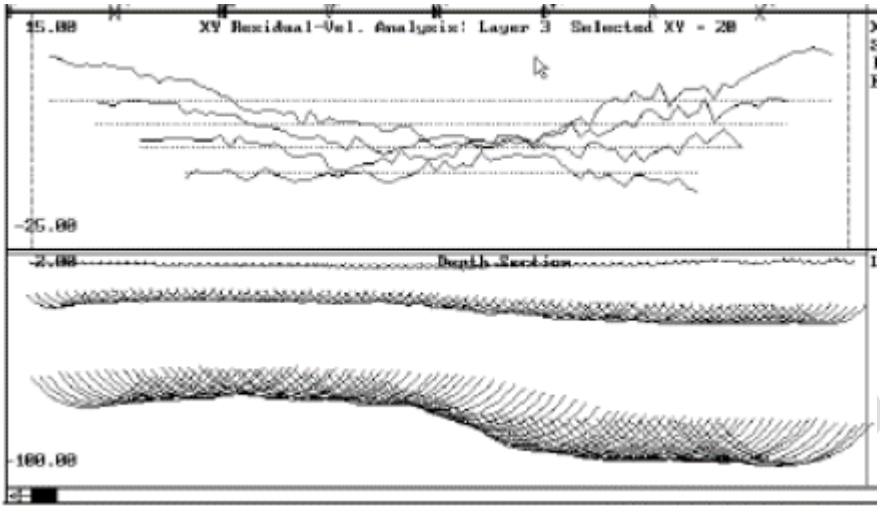


شکل ۶-۹- شمای مسیرهای متقابل امواج شکست مرزی در روش GRM

با در دست داشتن این زمان می‌توان سرعت و عمق لایهٔ دوم را در حوالی نقطهٔ O محاسبه نمود البته مشروط بر آنکه مقدار صحیحی برای فاصلهٔ XY انتخاب گردد. لذا در روش GRM با آزمایش مقادیر مختلف XY و محاسبهٔ زمان‌های مربوط، منحنی‌های تغییرات سرعت لایهٔ دوم ترسیم شده و در ادامه مقدار بهینهٔ مسافت XY انتخاب می‌شود. در این شرایط بهترین مقدار XY مربوط به منحنی تغییرات سرعتی است که کمترین نوسانات را داشته باشد. پس از انتخاب مقدار بهینهٔ XY می‌توان منحنی تغییرات سرعت لایهٔ مورد نظر و مقطع عمقی آن را محاسبه نمود. در این حالت هر نقطه از سطح لایهٔ شکسته مرز با رسم نیم دایره‌ایی که شعاع آن حاصل ضرب سرعت لایهٔ فوقانی در زمان سیر موج تا سطح آن لایه است، بدست می‌آید. این فرآیند برای لایه‌های عمیق‌تر نیز قابل اجراست و در مورد هر لایه از پارامترهای محاسبه شدهٔ لایه‌های فوقانی استفاده می‌شود. در شکل ۵-۴، نمونه‌ای از نتایج نهایی تفسیر شکسته مرزی بروش GRM و مقاطع سرعتی و عمقی حاصله دیده می‌شود.

[۱۲]- Refractor

[۱۳]- Reciprocal time



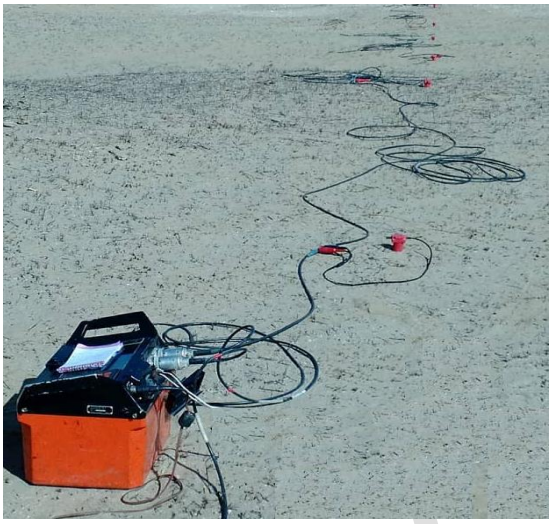
شکل ۶-۱۰- نمونهٔ نتایج نهایی تفسیر شکسته مرزی به روش GRM و مقاطع سرعتی و عمقی

۶-۲-۳-۱- پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی

در این روش از یک ردیف ژئوفون در فواصل مشخص به همراه منبع تولید موج و ثبات استفاده می‌گردد. منبع تولید موج مورد استفاده در این عملیات یک پتک فولادی به وزن تقریبی ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم بوده و در محل ضربه از یک صفحهٔ فولادی (یا مشابه آن) برای تولید موج فشاری و الوار برای تولید موج بررشی استفاده می‌شود. در محل برداشت در طول پروفیل در نقاط مختلف آن به تعداد ۵ تا ۷ ضربه به طور معمول امواج لرزه‌ایی تولید و برداشت صورت می‌گیرد .

فاصلهٔ حسگر های لرزه‌نگاری (ژئوفونها) در طول هر پروفیل می‌تواند از ۱ متر تا بیش از ۱۰ متر (برای برداشت های شهری باشد (بسته به نوع پروژه و عمق بررسی). بدین ترتیب با در نظر گرفتن فاصله منبع تولید موج ، طول هر مقطع لرزه‌نگاری با توجه به محدودیت طول در برداشت‌ها از ۲۳ متر تا ۲۳۰ متر قابل انجام است (فرض بر استفاده از دستگاه های ۱۲ تا ۲۴ کانال). همانگونه که در بالا عنوان شد برای هر مقطع پنج تا هفت نقطهٔ محل تولید موج[۱۴] در نظر گرفته شده است، یکی تا دو محل برای هر راس پروفیل (به عنوان منبع نزدیک و دور) یک منبع تولید موج در وسط آرایهٔ حسگرهای لرزه ایی و دو محل نیز در یک سوم و دوسوم طول پروفیل. (لازم به یاد آوری است که تمامی این نقاط می‌تواند به سه محل تقلیل یابد، گذشته از آنکه تعداد شوت های بیشتر دقت برآوردهارا بالاتر خواهد برو و از خطای احتمالی جلوگیری می‌نماید.شکل ۶-۱۱ .

[۱۴]- Shot point



شکل ۶-۱۱- تصویر چیدمان ژئوفون و دستگاه

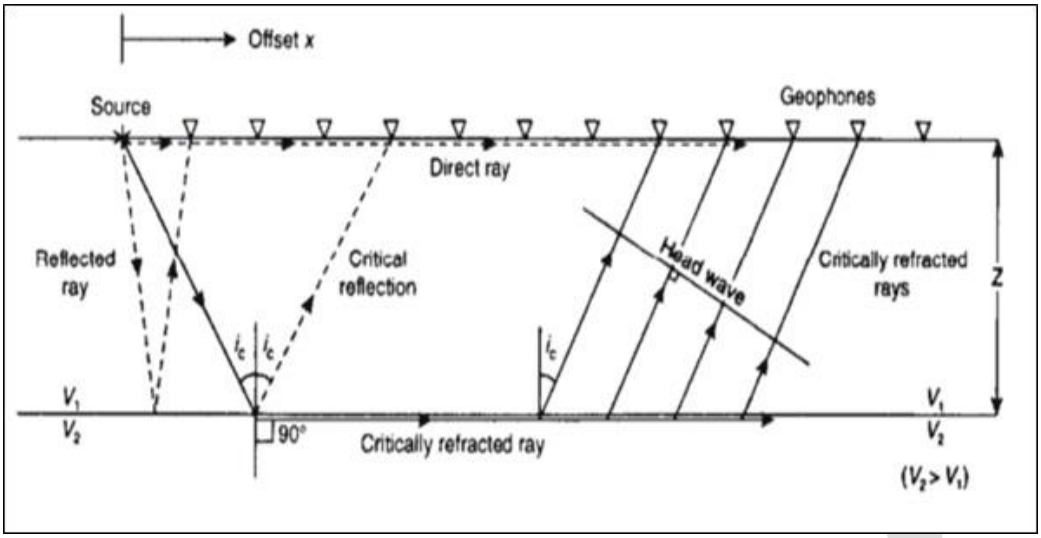
در هر مقطع لرزه‌نگاری امواج فشاری (P) و برشی (S) بطور جداگانه برداشت می‌گردد. بدین منظور (اگر فرض بر ۵ محل منبع تولید موج باشد – ۴ محل برای شوت های نزدیک و دور و یک محل میانه پروفیل) در محل هر منبع تولید موج ابتدا ۵ ضربهٔ قائم برای ثبت موج P و پس از آن ۱۰ ضربهٔ افقی عمود بر راستای پروفیل حسگرها (از این ۱۰ ضربه، ۵ ضربه در یک جهت و ۵ ضربهٔ بعدی در جهت مخالف زده شده تا بتوان با تغییر در پلاریته های موج های ثبت شده محل رسید موج S را آشکار نمود).

در این روش عمق بررسی به شدت تابع عمق لایه‌ها و ضخامت آنها می‌باشد، بدین جهت برای طراحی اولیه شناحت سطحی از زمین شناسی محل برداشت برای تعیین طول پروفیل (در صورت عدم محدودیت) و به دنبال آن برداشت عمقی، مفید خواهد بود . (به صورت تئوری، عمق برداشت برای طراحی اولیه بین یک پنجم تا یک دهم طول پروفیل می‌تواند باشد اما این امر با شرایط ضخامت لایه ها کنترل می‌گردد). پس از برداشت داده‌ها، اطلاعات ثبت شده مورد تصحیح و پردازش قرار می‌گیرد.

۶-۲-۳-۲- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای (آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی)

در ثبت داده های لرزه‌ای در این روش، فرکانس حسگر لرزه‌ای باید در محدوده برداشت‌های اکتشافی کم عمق باشد (بین ۴,۵ تا ۱۴ هرتز – به طور معمول ۱۰ هرتز) . همانطور که در بالا عنوان شد حسگر ها با فاصله مشخص در یک ردیف چیده شده (در جای خود محکم شود) و ۳، ۵ یا ۷ مرحله تولید موج گردد هر ضربه باید شامل ۱۲ تا ۲۴ کانال (بسته به طول پروفیل و محدودیت ها) باشد . پس از تولید موج و ثبت آن، کارشناس باید نسبت به بررسی نگاشت در محل اقدام نماید تا کیفیت مناسبی داشته باشد و در صورتی که احتیاج به بر انیارش داده ها (بخصوص برای ژئوفون های انتهایی از هر طرف) باشد صورت پذیرد، این امر با بررسی نوفه (نویز) محل نیز با اعمال فیلتر بر روی داده ها باید صورت گیرد.شکل ۷-۴.

کیفیت مناسب داده ها بسیار با اهمیت بوده و در صورتی که به تکرار برداشت نیاز باشد، مناسب است چند بازر این امر برای یک ضربه صورت گیرد تا داده با کیفیت مناسبی بدست آید .



شکل ۶-۱۲- تصویر کلی برداشت (ژئوفون و منبع تولید موج از یک طرف) و انواع امواج تولیدی

۶-۲-۳-۳- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی

در این مرحله پس از ثبت داده ها، به فرمت ثبت Seg 2 می‌توان امواج لرزه ای ثبت شده را قرائت نمود. در این روش تمامی رد لرزه-های ثبت شده در یک تصویر قرار گرفته و برای موج فشاری اولین زمان رسید ها اندازه گیری می‌شوند، این امر برای موج برشی با قرار دادن ضربه‌های مثبت و منفی به منبع تولید موج برشی در محل برداشت و از بر هم نهادن دو سری نگاشت ثبت (Append) محل اولین زمان رسید موج برشی اشکار می‌گردد .

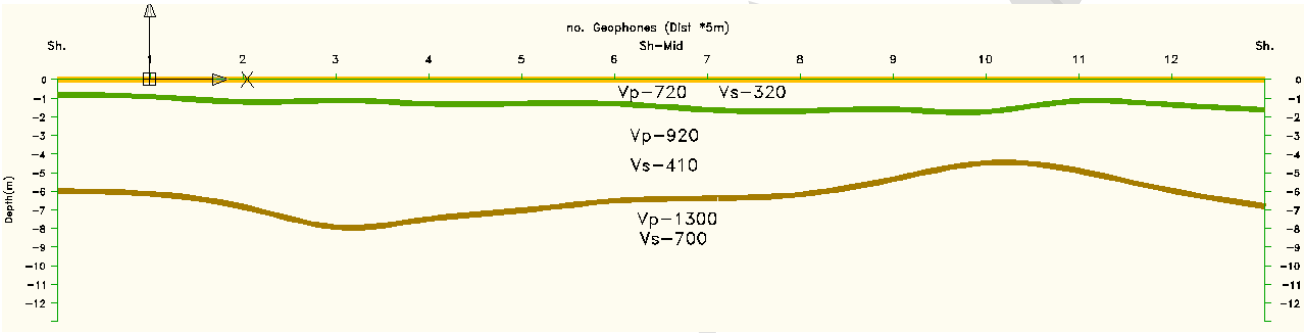
۶-۲-۳-۴- دستگاه و تجهیزات

تجهیزات این برداشت ها مشابه موارد قبل بوده با این تفاوت که تعداد کانال های آنها باید ۱۲ تا ۲۴ (یا بیش از آن باشد) همچنین به تعداد کانال هل حسگر لرزه‌ایی P و S با فرکانس متداول این برداشت ها به انضمام سیم اتصال حسگر و دستگاه (Spread wire) و سیم چکش و کلید آن .

۶-۲-۳-۵- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری شکسته مرزی

در این مرحله پس از قرائت اولین زمان رسیدها، سرعت امواج با استفاده از ترسیم منحنی های زمان-مسافت استخراج می‌گردد و با استفاده از روش های تفسیر مختلف عمق و ضخامت لایه های زیرین برآورد می‌گردد. در این برداشت ها با توجه به طول پروفیل ، عمق بررسی محدود می‌گردد (در این روش انتضار برداشت عمق چندان بالیی دیده نمی‌شود بدین جهت در شرایط شهری در موارد خاص قابل انجام می‌تواند باشد).شکل ۸-۴ نمونه مقطع ساده از نتایج این گونه مطالعات را به نمایش گذاشته

است. تعداد اعداد سرعت امواج بدست آمده وابسته به طول پروفیل و تغییرات احتمالی در سختی و سستی مصالح (حتی یک جنس) می‌تواند باشد . در صورتی که در طول پروفیل در یک لایه جنس مصالح چندان تغییر ننماید و محیطی (تا عمق قابل بررسی) دو لایه را نشان دهد، در این روش تنها دو سرعت برای دو لایه موجود خواهد بود (برای موج فشاری و برشی هر یک). بدین جهت سنجش شرایط خاک برای پاسخ به سوال های آئین نامه ۲۸۰۰ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای تیپ خاک، این روش دارای محدودیت‌هایی می‌باشد



شکل ۶-۱۳- نمایی از مقطع نهایی برداشت‌ها روش شکسته مرزی

۶-۲-۳-۶- خطا های احتمالی در برداشت های شکسته مرزی

در این قسمت گذشته از خطاهای احتمالی کارشناسی و کیفیت پایین برخی دستگاه‌ها، خطای سنجش در برآورد عمق و ضخامت لایه ها نیز می‌تواند واقع گردد. این امر زمانی اتفاق می‌افتد که فرضا لایه سومی در زیر لایه دوم از شرایط سستی برخوردار باشد (LVL)، در این حالت لایه سوم دیده نشده و به ضخامت لایه بالایی خود اضافه می‌گردد.

۶-۲-۴- روش‌های دست یابی به سرعت موج برشی از امواج سطحی (تحلیل چندکاناله یا طیفی امواج سطحی)

این گونه روش‌های لرزه نگاری در مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند که امکان حفر گمانه در محل پروژه وجود نداشته باشد و امکان برداشت داده‌های لرزه‌ایی برای دست یابی به سرعت موج برشی با روش‌های معمول محیا نباشد. به طور کلی این روش-های لرزه‌ایی بر اساس تولید و ثبت امواج لرزه‌ای در سطح زمین و در ادامه تغییر حوزۀ داده‌ها از حوزۀ زمان-فاصله به حوزۀ

فرکانس-عدد موج با استفاده از تبدیل فوریه دو بعدی و در نهایت بدست آوردن سرعت امواج ریلی در فرکانس های خاص(منحنی پراکندگی) می‌باشند (MASW، SASW و ..)، در ادامه شرحی بر یکی از این روش‌ها آورده شده است.

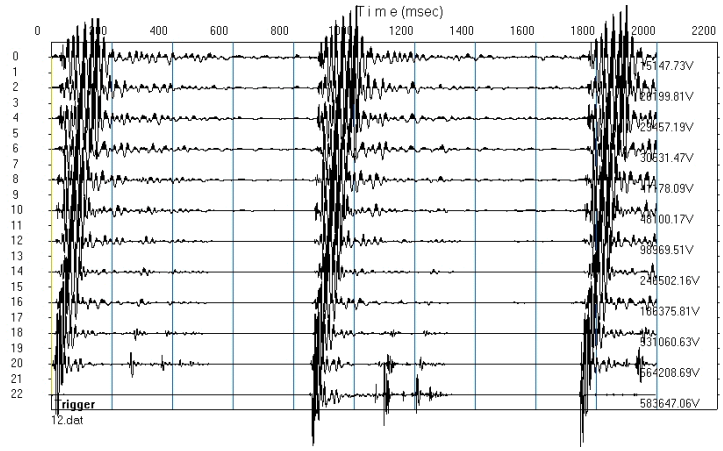
یک از این روش‌ها، روش لرزه نگاری تحلیل چند کاناله امواج سطحی است (Multi-channel Analysis of Surface Wave)، این روش در سه مرحله انجام می‌گیرد، عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها، معکوس سازی منحنی پراکندگی و بدست آوردن پروفیل سرعت موج برشی.

۶-۲-۴-۱- پیکر بندی کارگاهی برای آزمایش لرزه نگاری طیفی

در این روش چیدمان کلی تا حدودی مشابه روش لرزه‌نگاری شکسته مرزی می‌باشد. در این روش از یک ردیف ژئوفون در فواصل مشخص به همراه منبع تولید موج و ثبات استفاده می‌گردد. منبع تولید موج مورد استفاده در این عملیات یک پتک فولادی به وزن تقریبی ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم بوده و در محل ضربه از یک صفحهٔ فولادی (یا مشابه آن) برای تولید موج استفاده می‌شود. فاصلهٔ بین ژئوفونها باید یکسان در نظر گرفته شوند. این فاصله معمولاً برابر ۱ تا ۳ متر، با توجه به عمق مورد برسی انتخاب می‌شود ، همچنین منبع تولید موج و ژئوفون‌ها باید بر روی یک خط مستقیم قرارگیرند و داده ها توسط یک دستگاه لرزه نگاری ۱۲ یا ۲۴ کاناله مورد ثبت قرار گیرند.

۶-۲-۴-۲- داده برداری، ثبت امواج لرزه ای (آزمایش لرزه نگاری طیفی)

در ثبت داده‌های لرزه‌ای در این روش، فرکانس حسگر لرزه‌ای باید کمتر از ۴/۵ هرتز باشد. همانطور که در روش های قبل عنوان شد حسگر ها با فاصله مشخص در یک ردیف قرار می‌پیرند (در جای خود محکم شود) و موج لرزه‌ایی برای ثبت داده ها تولید میگردد. در این روش فاصله زمانی ثبت داده‌ها و طول برداشت با روش شکسته مرزی متفاوت است و بسته به نوع روش و پردازش می‌تواند متغیر باشد (برای مثال در روش چند کاناله به ترتیب در حدود ۰/۵ میلی ثانیه فاصله زمانی داده برداری و تا ۲ ثانیه طول داده برداری انجام گردد). شکل ۱-۵ شمایی که یک برداشت این داده ها را در طول زمان ۲ ثانیه را نشان می‌دهد. لازم است کارشناس در زمان برداشت داده‌ها برای ثبت داده مناسب، یک ضربه را چندین بار تکرار نماید .



شکل ۶-۱۴- شمایی از ثبت داده لرزه‌ایی در طول ۲ ثانیه (برای دید مناسب دامنه داده ها به حداقل کاهش داده شده است)

۶-۲-۴-۳- قرائت داده های ثبت شده لرزه ای آزمایش لرزه نگاری طیفی

در این روش بیشترین عملیات بر عهده نرم افزارهای پردازش می‌باشد و تنها در امر قرائت کارشناس (بخصوص در محل کارگاه) داده های برداشت شده را مورد بررسی قرار داده و داده های مناسب را برای پردازش مورد انتخاب قرار دهد

۶-۲-۴-۴- دستگاه و تجهیزات

تجهیزات این برداشت ها مشابه روش شکسته مرزی می‌باشد و تنها فرکانس حسگر های لرزه‌ایی کمتر از ۴/۵ هرتز می‌باشد.

۶-۲-۴-۵- تهیه گزارش آزمایش لرزه نگاری طیفی

در این روش پس از انتخاب داده مناسب برداشت شده و به دنبال آن بکارگیری مدل ورودی اولیه (از داده‌ای موجود از جمله داده‌های لرزه‌ایی کم عمق ، داده های ژئوتکنیکی پروژه و دیگر موارد مشابه) و در ادامه بررسی تغییرات طیف های بدست آمده و پردازش داده‌ها، مناسبترین مدل سرعتی موج برشی نسبت به عمق بدست می‌آید. در این روش عمق بررسی حدودی معادل طول پروفیل بوده و در صورتی که عمق بررسی کافی نباشد می‌توان از روش‌های دیگر لرزه‌ایی معکوس برای تکمیل این پردازش‌ها نیز استفاده نمود.

۶-۲-۴-۶- خطا های احتمالی در برداشت های لرزه نگاری طیفی

در این قسمت مانند مواردپیشین، گذشته از خطاهای احتمالی کارشناسی و کیفیت پایین برخی دستگاه‌ها، عدم توجه فاصله حسگرهای لرزه‌ای (برای بررسی عمق مناسب درصورتی که محدودیت مکانی وجود نداشته باشد) و همچنین عدم انتخاب مدل مناسب برای پردازش داده‌ها از اطلاعات موجود (از دیگر مطالعات) می‌تواند باعث بروز خطای احتمالی گردد.

۶-۳- مطالعات ژئوفیزک خاص در پروژه های شهری

با توجه به موارد خواص زیر سطحی در نواحی شهری و شناسایی آنها می‌توان از روش های ژئوفیزیکی بهر جست. در ادامه با اشاره به این موارد، روش هایی که می‌تواند در امر شناسایی آنها مفید واقع گردد، عنوان شده است.

در نواحی مختلف بر اساس شرایط زمین شناسی منطقه و یا شهر نشینی پیشین به مواردی همچون حضور حفره احتمالی مانند حفرات حاصل از آب شستگی یا حفرات کارستیک و یا حفره‌های ساخت دست بشر از جمله چاه‌های فاضل آب قدیمی یا مسیر قنات برخورد نمود.

روش‌هایی ژئوفیزیکی که در شناسایی این گونه مسائل می‌توانند مفید واقع گردند، روش های ریز گرانی سنجی (Microgravimetry) و نفوذ امواج رادار (GPR) نام برد. هر یک از این روش‌ها در جای خود باید بر اساس محدودیت های روش، توسط کارشناس بکار گیری شود. (این محدودیت ها می‌تواند شرایط مصالح ناحیه زیر پی، عمق و ابعاد عارضه، تاثیر مشتحدثات پیرامون و دیگر موارد باشد).

❖ مراجع

۱- ژئوفیزیک کاربردی ، تلفورد و همکاران، ترجمه دکتر ح. زمردیان و ح. حاجیه حسینه ،انتشارات دانشگاه تهران شماره ۱۹۹۸-۱۳۷۹

۲- اصول اکتشافات ژئوفیزیکی ، ع.کلاگری ، ۱۳۷۱

۳- نشریه ۵۹۴ وزارت صنعت و معدن راهنمای مطالعات ژئوفیزیک

۴- آشنایی با ژئوفیزیک ، جورج .د. گارلند

5- Personal Protective Grounding Facilities instructions, Standards, & Techniques- Volume 5-1, the Technical Considerations in Protective Grounding.

6- IEEE, Design of Earthing System.

7- IEEE Recommended Practice for Grounding, Green boon, 1992.

8- Ground Measuring Techniques, Electrode Resistance to Remote Earth & soil Resistively.

9- Electrical Resistivity Sounding and Tomography, TECHNICAL SUMMARY SHEET NO,2

10- Standard Method for Field Meassurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode Method, ASTM G57-78, 1133-1136

11- AEMC Workbook Edition 6.0

12- ASTM G57 Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method

13- API 65-2014 American Petroleum Institute

14- ASTM D5777 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation

15- ASTM D7400 Standard Test Methods for Downhole Seismic Test

16- ASTM D6429 Standard Guide for selecting Surface Geophysical Methods

فصل هفتم

ظرفیت باربری انواع پی ها

نسخه پیش نویس

فصل هفتم

۷- ظرفیت باربری انواع پی ها

۷-۱- مقدمه

تحتانی‌ترین قسمت یک سازه که وزن آن را به خاک یا زمین منتقل می‌کند، شالوده (پی) نامیده می‌شود که به دو دسته سطحی و عمیق تقسیم می‌گردد. طبق نظر ترزاقی[۱۵]، شالوده وقتی سطحی خوانده می‌شود که عمق آن کمتر یا مساوی عرض شالوده باشد. محققین بعدی پیشنهاد کردند شالوده‌هایی با عمق ۳ تا ۴ برابر عرض نیز می‌توانند به عنوان شالوده سطحی در نظر گرفته شوند. در راهنمای حاضر نیز مقصود از شالوده، همان شالوده (پی) سطحی می‌باشد.

شالوده‌ها می‌بایست قابلیت تحمل بار سازه فوقانی را در شرایطی داشته باشند که خاک زیر آن‌ها دچار گسیختگی برشی نشده و همچنین نشست‌ها در حد قابل تحمل و مجاز سازه فوقانی باشد.

در شرایطی که خاک زیر شالوده، قابلیت تحمل بار را نداشته و یا به لحاظ مقاومت کم لایه‌های سطحی‌تر، ابعاد پی‌ها بسیار بزرگ شده و منجر به غیر اقتصادی شدن سازه گردند، می‌توان از پی‌های عمیق جهت انتقال بار به لایه‌های پایین‌تر و مقاوم‌تر استفاده کرد. از انواع این پی‌ها می‌توان به شمع‌ها اشاره کرد. توجه شود که عمق مدفون شمع‌ها معمولاً بیش از ۳ تا ۴ برابر عرض آن‌هاست.

انواع شالوده‌ها عبارتند از منفرد، یکپارچه و گسترده که در ادامه ملاحظه می‌گردند:

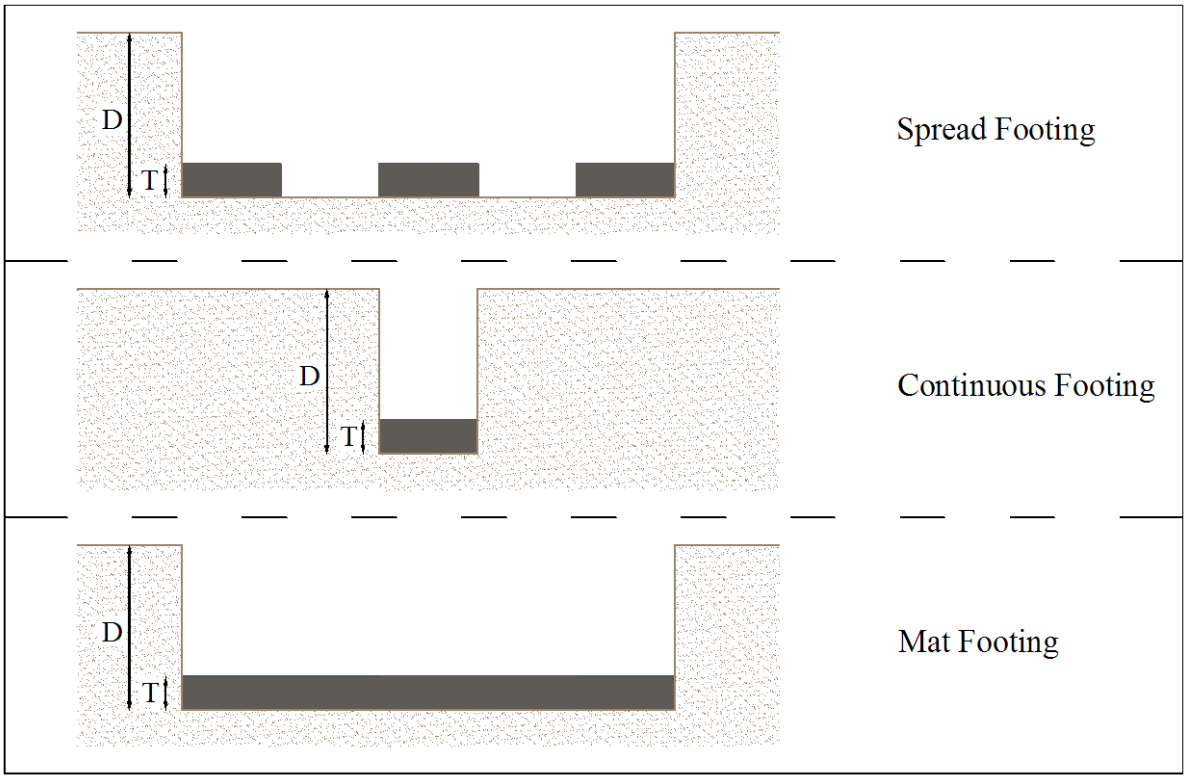
[۱۵] Terzaghi

• شالوده‌های منفرد (Spread footing) که عمدتاً به صورت شبکه‌ای متعامد بر هم احداث می‌شوند. در این پی‌ها شرایط ایده‌آل مبنی بر فاصله داشتن لبه پی از سایر پی‌ها و همچنین لبه گودبرداری (در صورت وجود) مد نظر است. در این حالت سطح گسیختگی با فرض وقوع گسیختگی برشی کلی، تا ارتفاعی معادل می‌نیمم هر یک از دو مقدار D و T بالاتر از تراز کف شالوده ادامه می‌یابد.

• شالوده‌های یکپارچه (Continuous footing) که به حالت شبکه‌ای نبوده و کل سطح زیربنا را در بر می‌گیرد. از این‌رو سطح گسیختگی برشی کلی (با فرض تشکیل)، تا سطح زمین پیشروی می‌کند. از جمله کاربردهای آن‌ها می‌توان به پی‌ریزی دیوارها و مخازن اشاره نمود.

• در صورت پی‌ریزی به صورت گسترده (Mat footing) (شرایطی که شالوده تمامی سطح زیر بنا را پوشانده و در نواحی گوناگون بارهای متعددی بر آن وارد گردند)، پیشروی سطوح گسیختگی همانند شالوده یکپارچه، تا سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که کلیه محاسبات در خصوص شالوده‌های یکپارچه و گسترده، یکسان می‌باشند و این تمایز صرفاً به لحاظ ماهیت متفاوت بارهای وارده بر این شالوده‌ها می‌باشد.

در تصویر شماتیک ذیل آرایش این شالوده‌ها در شکل ۷-۱ آورده شده است:



شکل ۷-۱ - نحوه آرایش شالوده‌های منفرد، یکپارچه و گسترده

در شکل قبل:

T: ضخامت شالوده.

D: فاصله از سطح زمین تا کف شالوده.

۷-۲- معیار گسیختگی برشی

۷-۲-۱- گوه گسیختگی و پارامترهای معادل

ابتدایی ترین مرحله در محاسبات گسیختگی برشی، عبارتست از تعیین ارتفاع گوه گسیختگی و به تبع آن پارامترهای معادل. بدین منظور ارتفاع اولیه گوه گسیختگی برابر خواهد بود با:

$$H = 0.5B \times tan\left(\pi/4 + \phi/2\right)$$

که در آن ϕ، زاویه اصطکاک اولین لایه خاک واقع در زیر شالوده و B عرض شالوده می‌باشد.

حال با میانگین‌گیری وزنی از پارامتر ϕ در ارتفاع بدست آمده H، مقدار جدیدی به آن اختصاص می‌یابد.

$$\phi = tan^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} H_i tan\phi_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i}\right)$$

با تکرار این عملیات، هر یک از پارامترهای H و ϕ به عددی میل می‌کنند که از این پس به عنوان مقادیر معادل در نظر گرفته می‌شوند.

سایر پارامترهای معادل (c,γ) نیز با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i c_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i}$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n} H_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^{n} H_i}$$

۷-۲-۲- تأثیر نوع گسیختگی برشی

همان‌گونه که در مراجع مختلف اشاره شده است، پدید آمدن سه نوع گسیختگی برشی در خاک زیر شالوده‌ها محتمل است: گسیختگی برشی کلی (General)، موضعی(Local) و سوراخ‌کننده (Punching). معادلات و روابط موجود، عمدتاً دو حالت ابتدایی را شامل می‌شوند. در ادامه، نحوه بکارگیری ضریب اطمینان کلی و ضریب کاهش مقاومت بسته به شرایط توضیح داده شده است.

❖ **ضریب اطمینان کلی:**

در شرایطی که فرض بر توسعه سطح گسیختگی تا سطح خاک و بعبارتی وقوع گسیختگی برشی کلی باشد، از ضریب اطمینان کلی استفاده می‌شود.

$$q_{all-sh} = \frac{q_{ult-sh}}{F.S.}$$

که در آن:

q_{all-sh}: ظرفیت باربری مجاز بر اساس گسیختگی برشی.

q_{ult-sh}: ظرفیت باربری نهایی بر اساس گسیختگی برشی.

$F.S.$: ضریب اطمینان کلی.

❖ **ضرایب کاهش مقاومت:**

در شرایطی که فرض بر وقوع گسیختگی برشی موضعی باشد، می‌توان از این ضرایب در کاهش پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی(ϕ)) استفاده کرد. ضمناً مقادیر کاهش یافته c و ϕ از معادلات زیر قابل استخراج‌اند.

$$\phi = tan^{-1}\left(RF_{\phi}.tan\phi_{average}\right)$$

$$c = RF_{c}.c_{average}$$

شایان ذکر است که استفاده از مقادیر گوناگون ضریب اطمینان کلی (F.S.) و ضرایب کاهش مقاومت (RF_{ϕ} & RF_{c}) در تلفیق با یکدیگر در آیین‌نامه‌های مختلف و همچنین به صلاحدید مهندسان طراح، بسته به اهمیت پروژه، میزان اطمینان از نتایج آزمایش‌ها و درصد ریسک قابل قبول متغیر است.

نکته: در صورت استفاده از ضریب اطمینان کلی، معمولاً مقدار آن بین ۲ و ۴ (اکثراً ۳) در نظر گرفته می‌شود.

۷-۲-۳- تأثیر سطح ایستابی

روابط ظرفیت باربری، بصورت پیش‌فرض در شرایطی صادق می‌باشند که سطح ایستابی در عمق قابل توجهی از سطح زیرین شالوده قرار داشته باشد، چرا که جهت محاسبه ظرفیت باربری نهایی شالوده‌ها، از وزن مخصوص موثر خاک استفاده می‌شود. به همین لحاظ در صورت نزدیکی سطح آب زیرزمینی به کف شالوده، می‌بایست اصلاحاتی بر روی روابط صورت پذیرد. در این راستا باولز[۱۶] و داس[۱۷]، هر یک عمق تأثیر معینی را برای قرارگیری سطح ایستابی از کف شالوده قائل شده‌اند. بر این اساس در صورتی که سطح ایستابی پایین‌تر از این عمق باشد، هیچ‌گونه تأثیری بر ظرفیت باربری نداشته و در غیر این صورت، اصلاح ظرفیت باربری بر طبق رابطه ارائه شده ایشان انجام می‌پذیرد.

❖ **رابطه باولز:**

بر این اساس، عمق موثر برابر با ارتفاع گوه گسیختگی در زیر شالوده بوده و معادل $H = 0.5B \times (\pi / 4 + \phi / 2)$ می‌باشد. وزن مخصوص اصلاح شده با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی برابر خواهد بود با:

$$\gamma_e = (2H - d_w)\frac{\mathrm{d}_w}{H^2}\gamma + \frac{\gamma'}{H^2}(H - d_w)^2$$

[۱۶] Bowles

[۱۷] Das

که در آن:

γ_e: وزن مخصوص اصلاح شده با در نظر گرفتن اثر سطح ایستابی.

H: ارتفاع گوه گسیختگی.

d_w: فاصله سطح ایستابی از کف شالوده.

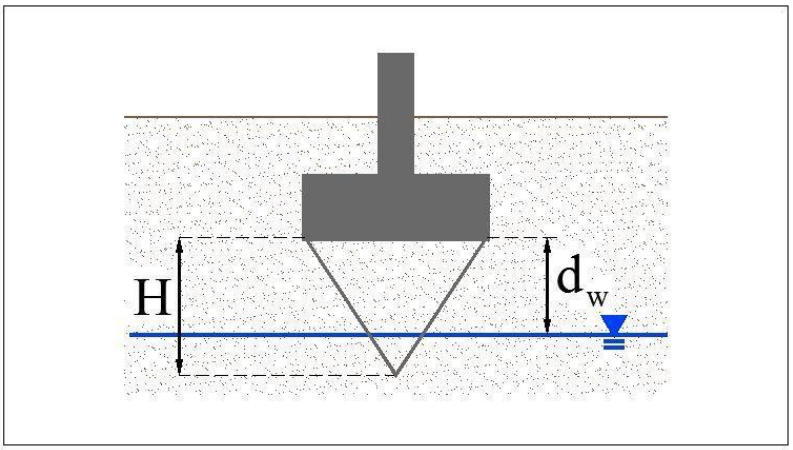
γ: وزن مخصوص مرطوب.

γ': وزن مخصوص غوطه‌ور در زیر سطح ایستابی $(\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_{water})$.

γ_{sat}: وزن مخصوص در حالت اشباع.

γ_{water}: وزن مخصوص آب.

ضمناً هر یک از پارامترهای H و d_w در شکل ۳-۲شکل نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷-۲ - پارامترهای مورد استفاده در اصلاح وزن مخصوص خاک، با در نظر گرفتن اثر سطح ایستابی

❖ **رابطه داس:**

در این رابطه عمق موثر برابر با عرض شالوده در نظر گرفته شده است. لذا در قالب زیر ارائه شده است:

$$\gamma_e = \gamma' + \frac{d_w}{B}(\gamma - \gamma')$$

در رابطه فوق B، عرض شالوده و سایر پارامترها نیز پیش‌تر معرفی شده‌اند.

نکته: از آن‌جا که در روش باولز، عمق موثر برابر با ارتفاع گوه گسیختگی در زیر شالوده در نظر گرفته می‌شود؛ این روش نسبت به روش داس همخوانی بیشتری با محاسبات گسیختگی برشی داشته و لذا استفاده از آن توصیه می‌گردد.

۷-۲-۴- معادلات ظرفیت باربری

شکل کلی معادله ظرفیت باربری شالوده‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$q_{ult-sh} = cN_c s_c d_c + \bar{q} N_q s_q d_q + 0.5\gamma_e B N_\gamma s_\gamma d_\gamma r_\gamma$$

که در آن:

q_{ult-sh}: ظرفیت باربری نهایی بر اساس گسیختگی برشی.

c: چسبندگی خاک.

$\overline{q}$: مقدار سربار در تراز کف شالوده.

γ_e: وزن مخصوص خاک (پس از اصلاح اثر سطح ایستابی).

B: عرض شالوده.

$N_c, N_q \& N_\gamma$: ضرایب ظرفیت باربری که به ترتیب مرتبط با چسبندگی خاک، فشار سربار و عرض شالوده می‌باشند.

$s_c, s_q \& s_\gamma$: ضرایب شکل شالوده.

$d_c, d_q \& d_\gamma$: ضرایب عمق شالوده.

r_γ: ضریب کاهش مرتبط با عرض شالوده.

نکته: در پی‌های منفرد $\bar{q} = min(D, T) \times \gamma_{uf}$ و در پی‌های یکپارچه و گسترده $\bar{q} = D \times \gamma_{uf}$. توجه شود که γ_{uf} میانگین وزن مخصوص لایه‌های خاک، در محدوده تحت تأثیر بالای تراز قرارگیری شالوده می‌باشد.

محققین مختلف ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی در برابر گسیختگی برشی را مشابه رابطه حاضر با اندکی تفاوت نسبت به یکدیگر ارائه داده‌اند. ۴ مورد از این روابط (به ترتیب اهمیت) در ادامه ارائه شده‌اند.

نسخه پیش نویس

جدول ۷-۱ - معادله ظرفیت باربری هنسن[۱۸]

$$q_{ult-sh} = \begin{cases} (\pi+2)c \times (1 + s'_c + d'_c) + \bar{q} & \phi = 0 \\ cN_c s_c d_c + \bar{q} N_q s_q d_q + 0.5\gamma_e B N_\gamma s_\gamma d_\gamma & \phi > 0 \end{cases}$$

Cohesion	Overburden pressure	Foundation width
$N_c = (N_q - 1)cot\phi$	$N_q = e^{\pi tan\phi} tan^2\left(\pi/4 + \phi/2\right)$	$N_\gamma = 1.5(N_q - 1)tan\phi$
$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c}.\frac{B}{L}$ $s'_c = 0.2\frac{B}{L}$	$s_q = 1 + \frac{B}{L}.sin\phi$	$s_\gamma = max\left(1 - 0.4\frac{B}{L}, 0.6\right)$
$d_c = 1 + 0.4k$ $d'_c = 0.4k$	$d_q = 1 + 2tan\phi(1 - sin\phi)^2 k$	$d_\gamma = 1$
$* k = \begin{cases} D/B & D/B \le 1 \\ tan^{-1}(D/B) & D/B > 1 \end{cases}$		

* توجه شود که k بر حسب رادیان است.

جدول ۷-۲ - معادله ظرفیت باربری مایرهوف[۱۹]

$$q_{ult-sh} = cN_c s_c d_c + \bar{q} N_q s_q d_q + 0.5\gamma_e B N_\gamma s_\gamma d_\gamma$$

Cohesion	Overburden pressure	Foundation width
$\phi = 0 \rightarrow N_c = \pi + 2$ $\phi > 0 \rightarrow N_c = (N_q - 1)cot\phi$	$N_q = e^{\pi tan\phi} tan^2\left(\pi/4 + \phi/2\right)$	$N_\gamma = (N_q - 1)tan(1.4\phi)$

[۱۸] Hansen

[۱۹] Meyerhof

$s_c = 1 + 0.2K_p\frac{B}{L}$	$\phi = 0 \rightarrow s_q = 1$ $\phi > 0 \rightarrow s_q = 1 + 0.1K_p\frac{B}{L}$	$\phi = 0 \rightarrow s_\gamma = 1$ $\phi > 0 \rightarrow s_\gamma = 1 + 0.1K_p\frac{B}{L}$
$d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p}\frac{D}{B}$	$\phi = 0 \rightarrow d_q = 1$ $\phi > 0 \rightarrow d_q = 1 + 0.1\sqrt{K_p}\frac{D}{B}$	$\phi = 0 \rightarrow d_\gamma = 1$ $\phi > 0 \rightarrow d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{K_p}\frac{D}{B}$
$* K_p = tan^2\left({}^{\pi}/_{4} + {}^{\phi}/_{2}\right)$		

جدول ۷-۳ - معادله ظرفیت باربری وسیک[۲۰]

$$q_{ult-sh} = cN_c s_c d_c + \bar{q}N_q s_q d_q + 0.5\gamma_e B N_\gamma s_\gamma d_\gamma$$

Cohesion	Overburden pressure	Foundation width
$\phi = 0 \rightarrow N_c = \pi + 2$ $\phi > 0 \rightarrow N_c = (N_q - 1)cot\phi$	$N_q = e^{\pi tan\phi}tan^2\left({}^{\pi}/_{4} + {}^{\phi}/_{2}\right)$	$N_\gamma = 2(N_q + 1)tan\phi$
$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c}.\frac{B}{L}$	$s_q = 1 + \frac{B}{L}.tan\phi$	$s_\gamma = max\left(1 - 0.4\frac{B}{L}, 0.6\right)$
$d_c = 1 + 0.4k$	$d_q = 1 + 2tan\phi\,(1 - sin\phi)^2 k$	$d_\gamma = 1$
$* k = \begin{Bmatrix} {}^{D}/_{B} & {}^{D}/_{B} \le 1 \\ tan^{-1}({}^{D}/_{B}) & {}^{D}/_{B} > 1 \end{Bmatrix}$		

* توجه شود که k بر حسب رادیان است.

[۲۰] Vesic

جدول ۷-۴ - معادله ظرفیت باربری ترزاقی

$$q_{ult-sh} = cN_c s_c + \bar{q}N_q + 0.5\gamma_e B N_\gamma s_\gamma$$

Cohesion	Overburden pressure	Foundation width
$\phi = 0 \rightarrow N_c = 1.5\pi + 1$ $\phi > 0 \rightarrow N_c = (N_q - 1)cot\phi$	$N_q = \frac{a^2}{2cos^2\left(\pi/4 + \phi/2\right)}$ $a = e^{(0.75\pi - \phi/2)tan\phi}$	$* N_\gamma = \frac{2(N_q+1)tan\phi}{1+0.4sin(4\phi)}$

Shape	Strip	Circular	Square		Shape	Strip	Circular	Square
s_c	1.0	1.3	1.3	-----	s_γ	1.0	0.6	0.8

*رابطه ارائه شده فرم ساده شده‌ای از رابطه اصلی ترزاقی است. شایان ذکر است که میزان اختلاف نتایج رابطه اخیر با رابطه ترزاقی در حدود ۱۰٪ می‌باشد.

۷-۲-۵- اثر شالوده‌های بزرگ

با استفاده از شالوده‌های کوچک به عرض تقریباً تا ۱ متر، شواهدی وجود دارد که جمله BN_γ، ظرفیت باربری را به صورت نامحدود افزایش نداده و برای مقادیر بسیار بزرگ B، وسیک و دی بیر[۲۱] معتقدند که مقدار حدی q_{ult-sh} به شالوده عمیق نزدیک می‌شود. در این راستا بکارگیری ضریب کاهش (r_γ) طبق رابطه زیر توصیه می‌گردد.

$$r_\gamma = 1 - 0.25log\left(\frac{B}{K}\right) \quad ; \quad B \geq 2m$$

که در آن:

r_γ: ضریب کاهش مرتبط با عرض شالوده.

B: عرض شالوده.

K: به صورت پیش‌فرض برابر با ۲ متر است.

[۲۱] DeBeer

۷-۳- معیار کنترل نشست

ضمن بررسی گسیختگی برشی خاک، مقدار نشست شالوده را نیز می‌بایست تحت شرایط بهره‌برداری کنترل نمود. لذا مقدار نشست لایه-های خاک (متشکل از الاستیک، تحکیمی اولیه و تحکیمی ثانویه) می‌بایست همواره از مقدار نشست مجاز تعریف شده فراتر نرود.

$$S = S_e + S_c + S_s$$

که در آن:

S: نشست کل.

S_e: نشست الاستیک.

S_c: نشست تحکیمی اولیه.

S_s: نشست تحکیمی ثانویه.

۷-۳-۱- عمق موثر در نشست

عمق موثر در محاسبات نشست، با معیارهای زیر قابل محاسبه است:

۷-۳-۱-۱- خطوط همفشار

در این روش، عمقی که در آن افزایش فشار ناشی از بارگذاری در تراز شالوده، برابر درصد مشخصی (استفاده از $I = 10\%$ در حالات معمول توصیه می‌گردد) از مقدار اولیه آن باشد، معادل با عمق موثر در نشست خواهد بود. به منظور تخمین میزان افزایش فشار، از سه روش ذیل می‌توان استفاده کرد:

❖ **روش تقریبی ۲ به ۱:**

مزیت اصلی این روش سادگی آن است. چنانچه منطقه تنش با شیب ۲ به ۱ تعریف شود، افزایش فشار (Δq) ناشی از بارگذاری در تراز شالوده (q_0) در عمق Z زیر سطح بارگذاری عبارت است از:

$$\Delta q = \frac{q_0 \times B \times L}{(B + Z) \times (L + Z)}$$

❖ **روش بوسینسک**[۲۲]:

یکی از روش‌های متداول جهت بدست آوردن تنش‌های ایجاد شده در خاک (Δq) در اثر اعمال بار، معادله بوسینسک بر مبنای نظریه الاستیسیته است. معادله بوسینسک یک بار متمرکز را بر روی سطحی از نیم‌فضای نیمه نامتناهی، همگن، همسان، بدون وزن و الاستیک در نظر می‌گیرد.

[۲۲] Boussinesq

روشی که برای شالوده‌های مربعی یا مستطیلی (و دایره‌ای تبدیل شده به مربعی معادل) وجود دارد، انتگرالگیری از معادله بوسینسک بر روی مستطیلی به ابعاد $B \times L$ است. معادله نیومارک که از آن در زیر گوشه سطح $B \times L$ استفاده می‌شود، عبارتست از:

$$\Delta q = q_0 \times {}^1\!/_{4\pi}\left[\frac{2MN\sqrt{V}}{V+V_1}.\frac{V+1}{V} + tan^{-1}\left(\frac{2MN\sqrt{V}}{V-V_1}\right)\right]$$

$$M = \frac{B}{Z} \;\; ; \;\; N = \frac{L}{Z} \;\; \left(\Delta q = q_0 \;\; for \;\; Z = 0\right)$$

$$V = M^2 + N^2 + 1$$

$$V_1 = (MN)^2$$

باید توجه شود، زمانی که $V_1 > V$ باشد، جمله tan^{-1} منفی است و باید π را به آن اضافه نمود.

❖ **روش وسترگارد**[۲۳]:

زمانی که توده خاک همانند خاک زیر روسازی جاده‌ها دارای چینه‌ای از مصالح ریز و درشت است یا لایه‌ها به طور متناوب از رس و ماسه تشکیل شده‌اند، برخی معتقدند که معادله وسترگارد تخمین بهتری از تنش Δq بدست می‌دهد. انتگرال تنش‌ها برای افزایش تنش در زیر گوشه سطح مستطیلی به ابعاد $B \times L$ معادله زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\Delta q = \frac{q_0}{2\pi} tan^{-1}\left(\frac{MN}{\sqrt{a}(M^2+N^2+a)^{1/2}}\right)$$

که در آن:

$M \;\&\; N$: طبق تعریف ارائه شده در رابطه بوسینسک.

a: $\frac{1-2\nu}{2-2\nu}$.

همچنین جمله tan^{-1} نیز می‌بایست بر حسب رادیان باشد.

۷-۳-۱-۲- مضربی از عرض شالوده

عمق موثر در نشست از حاصلضرب عرض شالوده در ضریبی بین ۳ تا ۵ بدست می‌آید.

نکته: در صورت برخورد به لایه صلب (تراکم‌ناپذیر)، می‌بایست عمق موثر در محاسبات نشست (طبق هر یک از معیارهای فوق الذکر)، با عمق قرارگیری لایه صلب مقایسه گردیده و کمینه این‌دو، به عنوان عمق موثر نهایی در نظر گرفته شود.

[۲۳] Westergaard

۷-۳-۲- نشست الاستیک

نشست الاستیک، همان نشست آنی است که همزمان با اعمال بار یا در زمانی حدود ۷ روز پس از اعمال بار رخ می‌دهد. از تحلیل نشست آنی برای تمامی خاک‌های ریزدانه شامل لای‌ها و رس‌ها با درجه اشباع کمتر از ۹۰٪ ($S<90\%$) و برای تمامی خاک‌های درشت‌دانه با ضریب نفوذپذیری بالا استفاده می‌شود. به منظور محاسبه نشست الاستیک، محققین مختلف روابط گوناگونی ارائه کرده‌اند. در این میان ۴ مورد از روابط، برگزیده و در ادامه ارائه می‌گردند:

۷-۳-۲-۱- روش تئوری الاستیسیته

نشست یک پی مستطیلی بر روی نیم‌فضای الاستیک، با بکارگیری معادله‌ای از تئوری الاستیسیته، به صورت زیر خواهد بود. توجه شود که به منظور محاسبه نشست متناظر با هر یک از نقاط سطح مقطع پی، از آن نقطه عمودهایی بر اضلاع مستطیل پی وارد کرده و بدین ترتیب حداقل ۱ و حداکثر ۴ مستطیل تشکیل می‌شود.

❖ شالوده انعطاف پذیر

نشست در شالوده انعطاف پذیر – باولز

$$S_e = \frac{qB\prime}{E_s}(1-\nu^2)I_{sf}I_F m$$

که در آن:

q: مقدار تنش وارد شده به شالوده.

E_s: مدول الاستیسیته.

ν: نسبت پواسون.

B': حداقل بعد جانبی سطح شالوده سهیم.

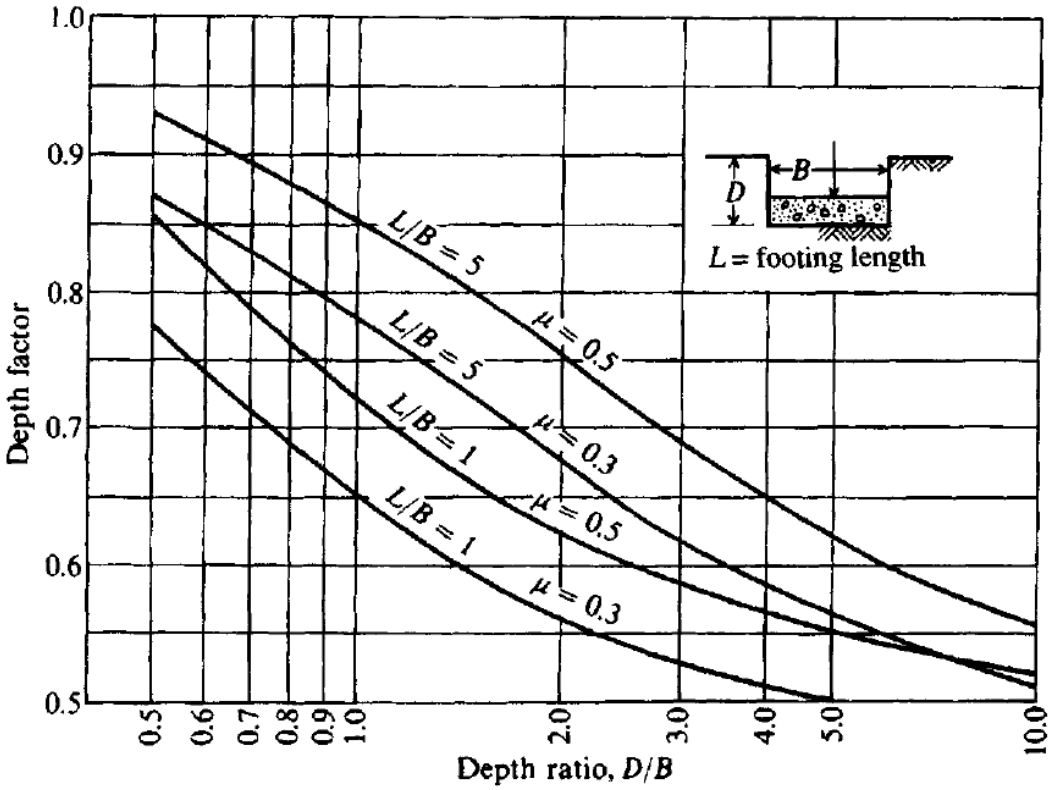
I_{sf}: ضریب تأثیر اشتاین برنر[۲۴] در شالوده‌های انعطاف‌پذیر که از رابطه $I_{sf} = I_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} I_2$ بدست می‌آید (مقادیر I_1 و I_2 در ادامه ارائه شده‌اند).

I_F: ضریب تأثیر عمق فاکس[۲۵] که از شکل بدست می‌آید. در شرایطی که این ضریب، قابل قرائت از روی شکل نباشد، می‌بایست از نرم-افزار FFACTOR ارائه شده توسط باولز (به همراه ویرایش پنجم از کتاب تحلیل و طراحی پی) استفاده شود.

m: تعداد گوشه‌های سهیم در محاسبه نشست.

[۲۴] Steinbrenner

[۲۵] Fox



شکل ۳-۳ - تغییرات ضریب I_F

❖ شالوده صلب

نشست در شالوده صلب – باولز

$$S_e = \frac{qB'}{E_s}(1-\nu^2)I_{sr}I_F m$$

تمامی پارامترها همانند حالت انعطاف‌پذیر بوده، با این تفاوت که $I_{sr} = 0.93I_{sf}$. همچنین باید توجه شود که در رابطه اخیر، I_{sf} می‌بایست در مرکز شالوده محاسبه گردد $(m = 4; B' = B\ /\ 2; L' = L\ /\ 2)$.

ضمناً پارامترهای I_1 و I_2 از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$I_1 = {}^1/_\pi \left[M\ ln\frac{\left(1+\sqrt{M^2+1}\right)\sqrt{M^2+N^2}}{M\left(1+\sqrt{M^2+N^2+1}\right)} + ln\frac{\left(M+\sqrt{M^2+1}\right)\sqrt{1+N^2}}{M+\sqrt{M^2+N^2+1}} \right]$$

$$I_2 = {}^N/_{2\pi}\, tan^{-1}\left(\frac{M}{N\sqrt{M^2+N^2+1}}\right)$$

$$M_{st} = M = \frac{L'}{B'}\ \ ;\ \ N_{st} = N = \frac{Z}{B'}$$

$$B' = \frac{B}{2}\ \ for\ center;\ \ = B\ \ for\ corner$$

$$L' = \frac{L}{2}\ \ for\ center;\ \ = L\ \ for\ corner$$

همانگونه که از روابط فوق برمی‌آید:

B': عرض موثر سطح شالوده.

B: عرض شالوده.

L': طول موثر سطح شالوده.

L: طول شالوده.

Z: ضخامت لایه موثر در نشست.

توجه به این نکته الزامی است که مقدار tan^{-1} بر حسب رادیان می‌باشد.

همچنین به لحاظ تفکیک پارامترهای مورد استفاده در راهنمای حاضر، هر یک از پارامترهای M و N به ترتیب با M_{St} و N_{St} جایگزین شده‌اند.

نکته: در پی های منفرد (با توجه به فرضیات بند ۲-۱) می‌بایست کمینه دو پارامتر D و T بعنوان عمق مدفون پی در استخراج ضریب I_F در نظر گرفته شود. به همین ترتیب، در پی‌های یکپارچه و گسترده، عمق مدفون پی در استخراج ضریب I_F، برابر با D می‌باشد.

۷-۳-۲-۲- روش اشمرتمن[۲۶]

در این روش که عمدتاً در خاک‌های دانه‌ای بکار می‌رود، نشست با استفاده از ضرایب تأثیر نیمه‌تجربی کرنش محاسبه می‌شود. در این روش ضرایب اصلاح تجربی در خصوص تأثیرات عمق مدفون پی، خرش ثانویه در خاک و شکل پی، اعمال شده و نشست از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_e = C_1 C_2 C_3 (q - q_{uf}) \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{\varepsilon i} H_i}{E_{si}}$$

$$C_1 = 1 - 0.5 \left(\frac{q_{uf}}{q - q_{uf}} \right)$$

$$C_2 = 1 + 0.2\, log \left(\frac{t}{0.1} \right) \quad ; \quad for\ t \geq 0.1\ year$$

$$C_3 = max\left[\left(1.03 - 0.03\ {}^{L}/_{B}\right), 0.73 \right]$$

که در آن:

S_e & q: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

C_1: ضریب عمق.

[۲۶] Schmertmann

C_2: ضریب خزش ثانویه.

C_3: ضریب شکل.

q_{uf}: تنش قائم موثر در تراز کف شالوده.

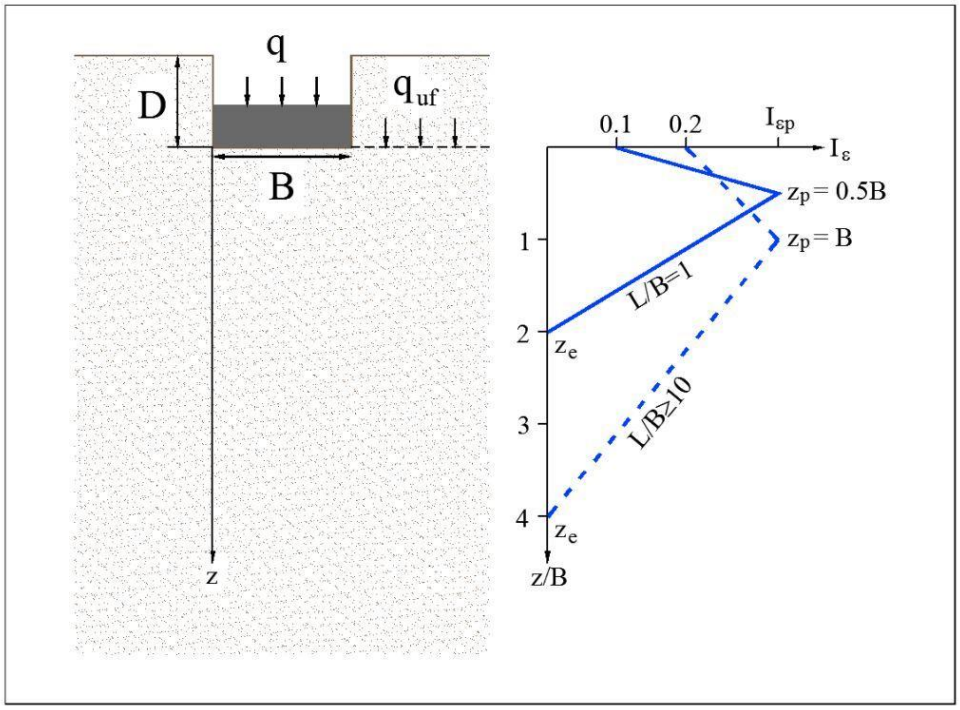
$I_{\varepsilon i}$: ضریب تأثیر کرنش در وسط هر یک از لایه‌های خاک.

H_i: ضخامت هر یک از لایه‌های خاک.

E_{si}: مدول الاستیسیته هر یک از لایه‌های خاک.

t: زمان پس از اعمال بار بر حسب سال.

ضمناً مقدار I_ε در اعماق گوناگون با توجه به شکل ۷-۴ و همچنین روابط زیر بدست می‌آید:



شکل ۷-۴ – تغییرات I_ε با عمق (D) و نسبت ابعاد پی (L/B)

جدول ۷-۵ – مقادیر عمق و ضریب تأثیر کرنش متناظر آن‌ها در روش اشمرتمن

$z = 0$	$z_p/B = 0.5 + 0.0555(L/B$	$z_e/B = 2 + 0.222(L/B - 1)$
$I_\varepsilon = 0.1 + 0.0111(L/B - 1)$ ≤ 0.2	$I_{\varepsilon p} = 0.5 + 0.1\sqrt{\frac{q - q_{uf}}{\sigma'_{zp}}}$	$I_\varepsilon = 0$

که در آن σ'_{zp} تنش موثر در عمق z_p پیش از احداث فونداسیون است. در انتها، روال حل به روش اشمرتمن به قرار زیر می‌باشد:

۱- تغییرات ضریب تأثیر کرنش (I_ε) را با عمق مشخص کنید.

۲- تغییرات مدول الاستیسیته ($\boldsymbol{E_s}$) را با عمق مشخص کنید.

۳- محدوده تغییرات ضریب تأثیر کرنش را به چند لایه تقسیم کرده و به هر لایه، یک مقدار مشخص مدول الاستیسیته اختصاص دهید. تعداد و ضخامت لایه‌ها، به نحوه تغییرات مدول الاستیسیته و ضریب تأثیر کرنش در عمق بستگی دارد.

۴- مقدار ضریب تأثیر کرنش را در وسط هر یک از لایه‌ها بدست آورید.

۵- ضرایب اصلاح $\boldsymbol{C_1}$، $\boldsymbol{C_2}$ و $\boldsymbol{C_3}$ را محاسبه کنید.

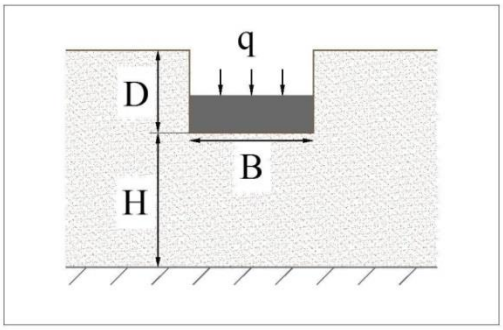
۶- جدولی تهیه کرده و بوسیله آن، مقدار $\sum_{i=1}^{n} \frac{I_{\varepsilon i} H_i}{E_{si}}$ را بدست آورید.

۷- با بکارگیری رابطه ارائه شده در ابتدای همین بند، نشست الاستیک شالوده را محاسبه کنید.

نکته: ضریب C_3 در رابطه اشمرتمن، در برخی از مراجع موجود نمی‌باشد؛ لذا بکارگیری آن در محاسبات اختیاری می‌باشد.

۷-۳-۲-۳- روش جانبو[۲۷]

با استفاده از تئوری الاستیک، جانبو و همکاران، یک روش کلی جهت محاسبه نشست الاستیک ارائه دادند که در آن، اثرات شکل پی، عمق مدفون پی و ضخامت محدود لایه تراکم‌پذیر، دیده شده است. بعدها نیز کریستین و کریر اصلاحاتی بر روی این روش اعمال کردند. با توجه به شکل ۳-۵ مقدار نشست از رابطه زیر بدست می‌آید:



شکل ۷-۵ – پارامترهای مورد استفاده در روش جانبو

$$S_e = A_1 A_2 \frac{qB}{E_s}$$

که در آن:

S_e, q, B & E_s: پیش‌تر تعریف شده‌اند

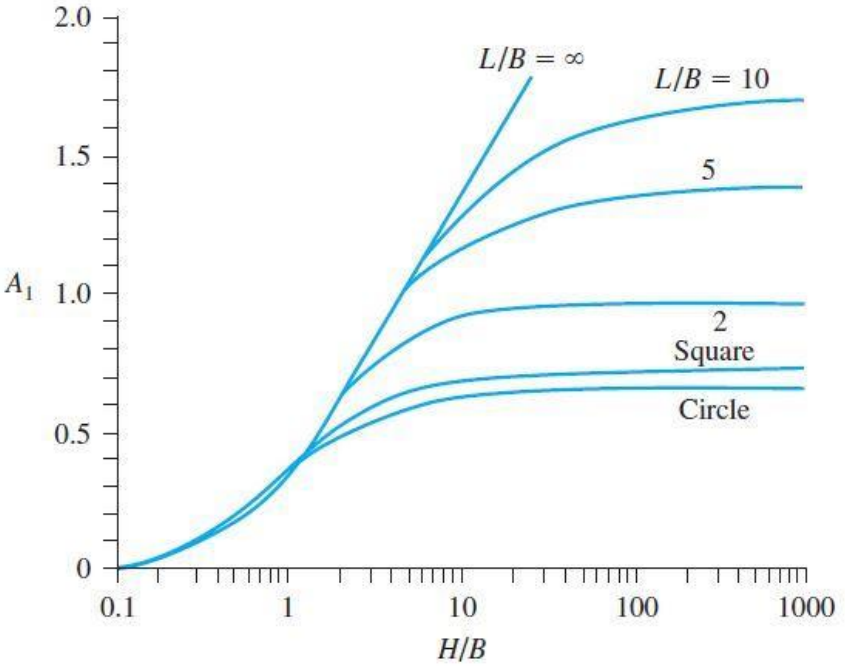
[۲۷] Janbu

A_1: ضریب تأثیر مرتبط با شکل پی و ضخامت لایه تراکم‌پذیر.

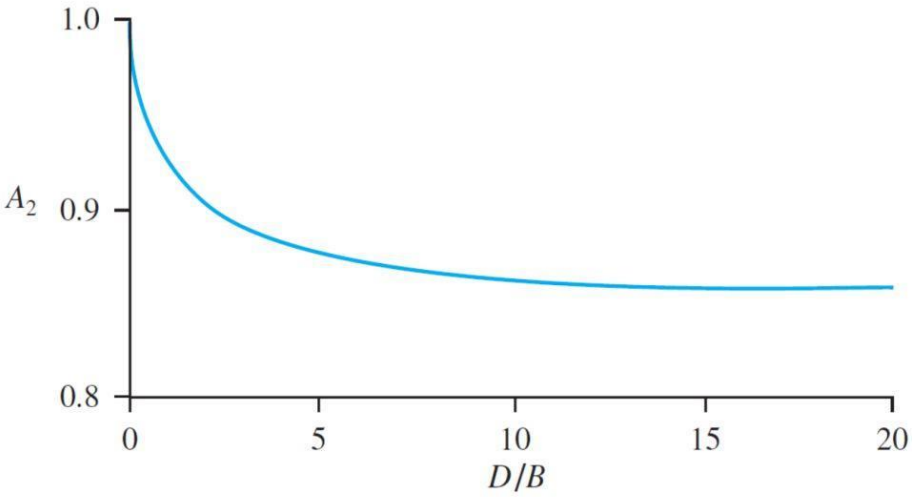
A_2: ضریب عمق.

H: ضخامت لایه تراکم‌پذیر از زیر شالوده.

ضرایب A_1 و A_2 نیز با استفاده از نمودارهای زیر بدست می‌آیند:



شکل ۷-۶ – تغییرات ضریب A_1



شکل ۷-۷ – تغییرات ضریب A_2

نکته: در پی های منفرد (با توجه به فرضیات بند ۲-۱) می‌بایست کمینه دو پارامتر D و T بعنوان عمق مدفون پی در استخراج ضریب A_2 در نظر گرفته شود. به همین ترتیب، در پی‌های یکپارچه و گسترده، عمق مدفون پی در استخراج ضریب A_2، برابر با D می‌باشد.

۷-۳-۲-۴- روش مارچتی[۲۸]

این روش با بکارگیری توزیع تنش الاستیک در زیر سطوح بارگذاری شده (با ابعاد محدود) و همچنین تخمین‌هایی از مدول محصورشده در عمق، نشست الاستیک را طبق رابطه زیر محاسبه می‌کند:

$$S_e = \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{\sigma i}(\mathrm{q} - q_{uf})}{M_i} H_i$$

S_e, q, q_{uf} & H_i: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$I_{\sigma i}$: ضریب تأثیر تنش در وسط هر یک از لایه‌های خاک.

M_i: مدول محصور شده در وسط هر یک از لایه‌های خاک.

مارچتی این روش را زمانی پیشنهاد می‌کند که مقادیر مدول محصور شده با استفاده از آزمایش دیلاتومتر، در دست باشند. به هر ترتیب، می‌توان از سایر آزمایش‌های صحرایی و یا آزمایشگاهی که تخمین مناسبی از مدول محصور شده می‌دهند نیز استفاده کرد.

نکته: می‌توان از رابطه زیر جهت محاسبه مدول محصور شده استفاده کرد:

$$M = E_s \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

مراحل انجام محاسبات در این روش به شرح زیر می‌باشد:

۱) محدوده عمق موثر در محاسبات نشست را به چندین لایه تقسیم کنید. برای دقت مناسب، ضخامت هر یک از لایه‌ها ($\boldsymbol{H_i}$) نمی‌بایست از $\boldsymbol{B/4}$ تجاوز کند.

۲) مقدار مدول محصور شده ($\boldsymbol{M_i}$) را در هر یک از لایه‌ها تعیین کنید.

۳) با استفاده از روابط و روش‌های مناسب، ضرایب تأثیر تنش را در وسط هر یک از لایه‌ها و در زیر مرکز شالوده محاسبه کنید.

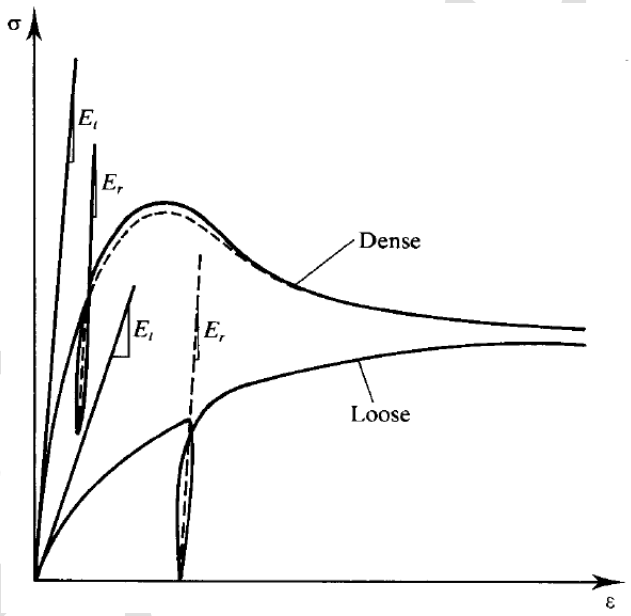
۴) با بکارگیری رابطه ارائه شده، فشردگی هر یک از لایه‌ها را محاسبه کرده و در نهایت، با هم جمع کنید.

[۲۸] Marchetti

۷-۳-۲-۵- استفاده از تاریخچه تنش خاک (Er/Es)

مهم‌ترین عامل موثر در قابلیت تراکم خاک‌های دانه‌ای، تاریخچه تنش آن‌ها و بعبارت دقیق‌تر تاریخچه کرنش آن‌هاست. اگر خاک ماسه‌ای پیش‌تر تحت بار قرار گرفته و یا کرنش داشته باشد، قابلیت تراکم و در نتیجه نشست آن به مقدار زیادی کاهش می‌یابد (مدول الاستیسیته معادل آن افزایش می‌یابد).

تراکم‌پذیری در خاک‌های عادی تحکیم یافته حداقل ۵ برابر (با محدوده نرمال ۸ الی ۱۶ برابر) و گاهی نزدیک به ۳۰ برابر بیشتر از خاک‌های پیش‌تحکیم‌یافته می‌باشد. دلیل این امر اینست که اگر ماسه تحت فشار قرار بگیرد – بعنوان مثال در آزمایش سه محوری – و جایی قبل از وقوع گسیختگی، باربرداری شده و مجدداً بارگذاری شود، مدول الاستیسیته مصالح به هنگام بارگذاری مجدد (E_r) دارای شیب بیشتری بوده و لذا بزرگ‌تر از مدول الاستیسیته خاک عادی تحکیم یافته است. این اثر در ماسه‌های سست بیشتر قابل توجه است. مدول بارگذاری مجدد (E_r) در ماسه‌های سست می‌تواند به راحتی بین ۵ تا ۳۰ برابر مدول مماسی اولیه باشد.



شکل ۷-۸ – منحنی‌های تنش-کرنش ماسه معمولی در شرایط سست و متراکم

همانگونه که در شکل ۷-۸ ملاحظه می‌گردد، مدول الاستیسیته مصالح دانه‌ای پیش‌تحکیم یافته تا رسیدن به تنش پیش‌تحکیمی (P'_c)، نسبت به مصالح عادی تحکیم یافته بیشتر بوده و لذا نمودار از شیب بیشتری برخودار است. حال نکته حائز اهمیت استفاده از مدول الاستیسیته E_r تا رسیدن به تنش پیش‌تحکیمی و استفاده از E_s در تنش‌های بالاتر می‌باشد. بعبارتی رابطه محاسبه نشست الاستیک به صورت دو ضابطه‌ای و مطابق زیر خواهد بود:

$$\text{if q} \begin{cases} \leq \mathrm{P'_c} & \rightarrow \mathrm{E = E_r} \\ > \mathrm{P'_c} & \rightarrow \mathrm{E = E_s} \end{cases}$$

با همین شیوه، **بجز روش اشمرتمن**، در سایر روش‌ها (باولز، جانبو و مارچتی) می‌توان محدوده بارگذاری را به دو بخش (پیش از تنش پیش‌تحکیمی و پس از تنش پیش‌تحکیمی) تقسیم کرده و در هر بخش از محاسبات، مدول الاستیسیته و پارامترهای مختص آن را لحاظ کرد. با این توضیحات، استفاده از روش اشمرتمن با توجه به محدودیت در لحاظ کردن اثر گودبرداری، در پی‌هایی با عمق گود بالا توصیه نمیشود.

۷-۳-۲-۶- محاسبه نشست الاستیک در محیط چند لایه

برای محاسبه نشست الاستیک زیر شالوده مستطیلی واقع بر محیط چند لایه، استفاده از روش اشتاین برنر توصیه می‌شود. توجه شود که این روش اثر عمق مدفون پی را در نظر نگرفته و لذا استفاده از آن در مواردی توصیه می‌شود که پی بر روی سطح زمین قرار داشته و یا عمق مدفون آن کم باشد. در این روش نشست هر نقطه دلخواه شالوده مستطیلی واقع بر محیط چند لایه قابل تعیین خواهد بود. به این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود. این رابطه مقدار نشست گوشه شالوده مستطیلی واقع بر محیط الاستیک همگن با ضخامت محدود (واقع بر سنگ بستر) را تعیین می‌کند.

$$S_{corner} = \frac{q(1-\nu^2)}{2\pi E_s}\left[b \times ln\frac{(c-a)(m+a)}{(c+a)(m-a)} + a \times ln\frac{(c-b)(m+b)}{(c+b)(m-b)}\right] + \frac{q(1-\nu-2\nu^2)}{2\pi E_s}\left[z \times tan^{-1}\frac{ab}{cz}\right]$$

$$m = \sqrt{a^2+b^2}$$

$$c = \sqrt{a^2+b^2+z^2}$$

در رابطه فوق:

S_{corner}: نشست الاستیک گوشه شالوده.

q: تنش اعمالی بر شالوده.

ν: نسبت پواسون لایه خاک.

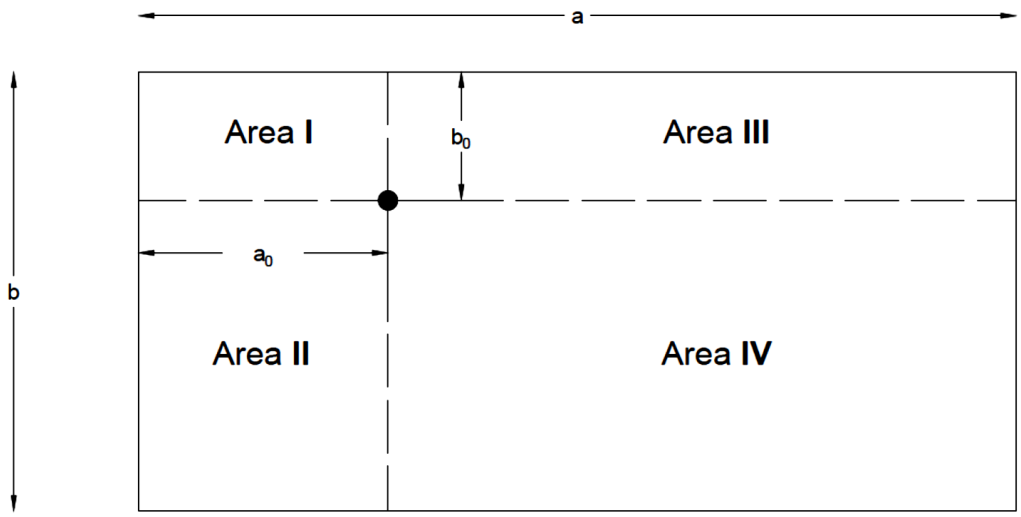
E_s: مدول الاستیسیته لایه خاک.

a & b: طول و عرض شالوده.

z: ضخامت لایه خاک.

برای تعیین نشست شالوده در نقطه دلخواه واقع بر محیط یک لایه همگن به عمق محدود، باید شالوده را از محل مورد نظر به چهار قسمت تقسیم نمود. سپس نشست گوشه هر یک از چهار شالوده کوچک را بر اساس طول و عرض متناظر از رابطه فوق بدست آورد. در نهایت نشست شالوده در نقطه مورد نظر برابر با حاصل جمع نشست گوشه هر یک از چهار شالوده کوچک خواهد بود.

شکل ۷-۹ نحوه تقسیم بندی شالوده برای نقطه مورد نظر را نشان می‌دهد. در جدول ۷-۶ نیز طول و عرض هر یک از چهار مستطیل کوچک نشان داده شده است.



شکل۷-۹- تقسیم بندی شالوده بر اساس نقطه مورد نظر

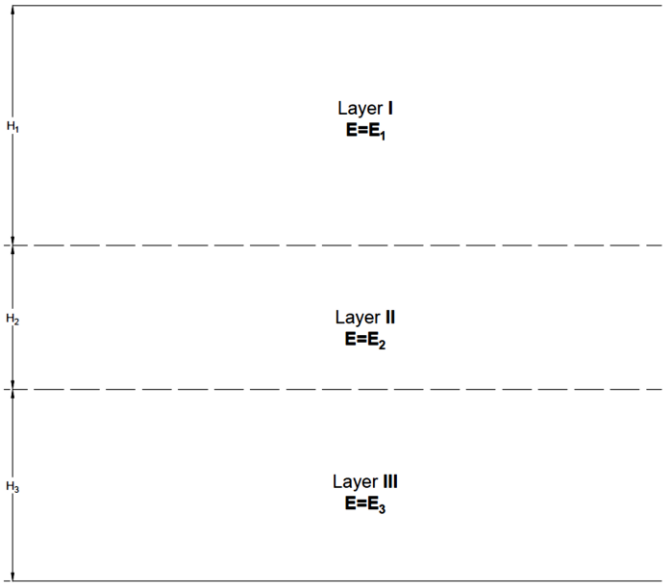
جدول۷-۶- طول و عرض هر یک از شالوده های کوچک

Footing Division	Length	Width
Area I	a_0	b_0
Area II	$b-b_0$	a_0
Area III	$a-a_0$	b_0
Area IV	$a-a_0$	$b-b_0$

برای سادگی روابط در محاسبه نشست محیط چند لایه، رابطه فوق بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$S_{tmp} = \frac{q(1-\nu^2)}{2\pi E_s}[A_n + B_n + D_n] = \frac{q(1-\nu^2)}{2\pi E_s} C_n = \frac{q}{E_s} f_n$$

به این ترتیب ضریب f_n بیانگر تاثیر لایه n ام در میزان نشست خواهد بود. به عنوان نمونه برای محاسبه نشست نقطه دلخواه واقع بر محیط سه لایه (شکل ۷-۱۰) واقع بر بستر صلب باید به روش زیر عمل نمود:



شکل۷-۱۰- محیط سه لایه بصورت شماتیک

۱- ابتدا مطابق با روش بالا شالوده به چهار ناحیه کوچکتر تقسیم شود.

۲- مقدار ضریب f_1 با فرض اینکه لایه اول عمق H_1 دارد محاسبه می‌شود. یعنی در رابطه $z = H_1$ و مدول الاستیسیته برابر با E_1 در نظر گرفته می‌شود.

۳- مقدار ضریب f_2 با فرض اینکه لایه دوم عمق H_1+H_2 دارد محاسبه می‌شود. یعنی در رابطه $z = H_1 + H_2$ و مدول الاستیسیته برابر با E_2 در نظر گرفته می‌شود. این فرض به این علت است که رابطه ارائه شده برای یک لایه همگن واقع بر بستر صلب برقرار است.

۴- مقدار ضریب f_3 با فرض اینکه لایه سوم عمق $H_1 + H_2 + H_3$ دارد محاسبه می‌شود. یعنی در رابطه $z = H_1 + H_2 +$ H_3 و مدول الاستیسیته برابر با E_3 در نظر گرفته می‌شود.

۵- مقدار نشست برای هر ناحیه کوچکتر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_{corner.divided} = \mathrm{q}\left(\frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2 - f_1}{E_2} + \frac{f_3 - f_2}{E_3}\right)$$

۶- نشست الاستیک کل از مجموع نشست چهار ناحیه کوچکتر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$S_{center} = \mathrm{s}_{corner-I} + \mathrm{s}_{corner-II} + \mathrm{s}_{corner-III} + \mathrm{s}_{corner-IV}$$

روش مذکور برای محیط با تعداد لایه های دلخواه نیز قابل تعمیم است.

مثال: نشست الاستیک مرکز شالوده مستطیلی به ابعاد $30m \times 50m$ تحت تنش $150\ [kPa]$ مستقر بر محیط چند لایه با مشخصات جدول ۷-۷ تعیین می‌شود.

جدول ۷-۷- مشخصات لایه های زیرسطحی

Layer No.	Bounds [m]	E_s [kPa]	ν
1	$0-4$	300000	0.3
2	$4-8$	40000	0.3
3	$8-24$	150000	0.3
4	$24-45$	45000	0.3

با استفاده از رابطه موجود و مراحل تعیین نشست نتایج زیر بدست می‌آید:

$$f_1 = 0.594, \quad f_2 = 1.297, \quad f_3 = 3.972, \quad f_4 = 5.995$$

به این ترتیب نشست الاستیک هر یک از ناحیه های کوچک (مستطیل های $15m \times 25m$) عبارتست از:

$$S_{center} = q\left(\frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2 - f_1}{E_2} + \frac{f_3 - f_2}{E_3} + \frac{f_4 - f_3}{E_4}\right)$$
$$= 150\left(\frac{0.594}{300000} + \frac{1.297 - 0.594}{40000} + \frac{3.972 - 1.297}{150000} + \frac{5.995 - 3.972}{45000}\right)$$

در نتیجه نشست الاستیک مرکز شالوده عبارتست از:

$$S_{center} = S_{corner-I} + S_{corner-III} + S_{corner-IIII} + S_{corner-IIV} = 4 \times 0.01235$$
$$= 0.0494\ [m]$$

$$S_{center} = 4.94\ [cm]$$

۷-۳-۳- نشست تحکیمی اولیه

نشست تحکیمی (S_c)، به زمان وابسته بوده و علت وقوع آن، خروج آب از میان حفرات خاک به علت اضافه فشار تحمیل شده می‌باشد. این نشست در خاک‌های ریزدانه اشباع رخ داده و با روابط جدول ۳-۸ محاسبه می‌گردد:

جدول ۷-۸ – روابط محاسبه نشست تحکیمی اولیه

رس عادی تحکیم یافته	$S_c = \frac{C_c H_c}{1+e_0} log \frac{P'_0 + \Delta q}{P'_0}$
رس پیش‌تحکیم‌یافته $(P'_0 + \Delta q < P'_c)$	$S_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} log \frac{P'_0 + \Delta q}{P'_0}$
رس پیش‌تحکیم‌یافته $(\boldsymbol{P'_0 < P'_c < P'_0 + \Delta q})$	$S_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} log \frac{P'_c}{P'_0} + \frac{C_c H_c}{1+e_0} log \frac{P'_0 + \Delta q}{P'_c}$

که در آن:

S_c: پیش‌تر تعریف شده است.

C_c: نشانه فشردگی.

C_s: نشانه تورم.

H_c: ضخامت لایه رسی.

e_0: نسبت تخلخل اولیه.

P'_0: تنش موثر وسط لایه قبل از اعمال بارگذاری.

Δq: متوسط افزایش فشار ناشی از بارگذاری.

P'_c: تنش پیش‌تحکیمی.

نکته:

۱- در شرایطی که ضخامت لایه‌های خاک تحکیم‌پذیر زیاد باشد، خصوصاً زمانی که نشست تحکیمی در لایه‌های سطحی‌تر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، به لحاظ تأثیر قابل توجه بارگذاری و همچنین محدوده وسیع تغییرات افزایش فشار (Δq)، می‌بایست آن لایه‌ها را به چندین "ریزلایه" تقسیم کرد، تا خطای ناشی از محاسبات به حداقل برسد. توجه شود که عدم انجام این کار، موجب **افزایش کاذب ظرفیت باربری** شده و لذا ایمن نخواهد بود.

۲- جهت محاسبه افزایش فشار (Δq) ضمن محاسبه نشست تحکیمی، در صورت استفاده از لایه‌هایی با ضخامت کم، می‌توان وسط لایه را معیاری از کل لایه در نظر گرفت؛ اما با افزایش ضخامت لایه‌ها، از دقت این روش کاسته شده و لذا استفاده از قانون سیمپسون توصیه می‌شود. بر طبق این قانون، محاسبات در بالا، مرکز و پایین لایه انجام شده و به ترتیب با ضرایب وزنی ۱، ۴ و ۱، میانگین‌گیری می‌شوند.

۷-۳-۴- نشست تحکیمی ثانویه

تحکیم ثانویه و یا بعبارتی خزش، همان تغییر چیدمان ذرات خاک به وضعیتی نزدیک‌تر (و یا متراکم‌تر)، تحت بار فشاری است که ممکن است چندین سال ادامه‌دار باشد. این پدیده در حقیقت مرتبط با هر دو نوع نشست الاستیک و تحکیمی اولیه بوده ولی معمولاً در نشست الاستیک چندان حائز اهمیت نمی‌باشد.

نشست تحکیمی ثانویه در خاک‌هایی که حاوی درصد بالایی از ذرات آلی هستند، معمولاً مشهود تر بوده و طبق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$S_s = \frac{C_\alpha H_c}{1+e_p} log \frac{t_2}{t_1}$$

که در آن:

S_s & H_c: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

C_α: نشانه فشردگی ثانویه.

e_p: نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه.

t_1: زمان پایان تحکیم اولیه.

t_2: زمانی که محاسبه نشست تحکیمی ثانویه در آن مد نظر است.

۷-۴- ظرفیت باربری مجاز

پس از تعیین ظرفیت باربری بر اساس هر یک از معیارهای گسیختگی برشی و کنترل نشست، کمینه این دو به عنوان ظرفیت باربری مجاز شالوده در نظر گرفته می‌شود.

$$q_{all} = min(q_{all-sh}, q_{set})$$

که در آن:

q_{all}: ظرفیت باربری مجاز شالوده با در نظر گرفتن همزمان هر دو معیار گسیختگی برشی و کنترل نشست.

q_{all-sh}: ظرفیت باربری مجاز شالوده بر اساس گسیختگی برشی.

q_{set}: ظرفیت باربری مجاز شالوده بر اساس معیار کنترل نشست.

۷-۵- ضریب عکس العمل بستر

ضریب عکس العمل بستر رابطه‌ای مفهومی میان فشار خاک و تغییر شکل آن است که بصورت گسترده در تحلیل سازه‌ای فونداسیون‌ها بکار می‌رود. این پارامتر بصورت $k_s = {}^{q}/_{S}$ تعریف می‌شود که در آن q و s به ترتیب فشار وارده و تغییر مکان فونداسیون می‌باشند. از جمله روش‌های موجود در محاسبه k_s عبارتند از:

۷-۵-۱- آزمایش بارگذاری صفحه ای

به منظور تعیین ضریب عکس العمل بستر (k_s)، برخی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای طبق استاندارد ASTM D1194 استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که کاربرد اصلی این آزمایش، تعیین ظرفیت باربری در حالت استاتیکی بوده و همچنین از سال ۲۰۰۳ از رده خارج شده است. جهت تعیین ضریب عکس العمل بستر، مستقیماً با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، کارهای زیر را می‌توان انجام داد:

۱- تعیین ظرفیت باربری نهایی صفحه با استفاده از نمودار بار- نشست و بکارگیری روش‌هایی از قبیل روش ابت[۲۹].

۲- محاسبه ظرفیت باربری مجاز (q) با تقسیم ظرفیت باربری نهایی بر ضریب اطمینان.

۳- قرائت نشست متناظر با ظرفیت باربری مجاز(s) .

۴- محاسبه ضریب عکس العمل بستر صفحه $(k_{sp} = {}^{q}/_{s})$.

۵- تبدیل ضریب عکس العمل بستر صفحه (k_{sp}) به ضریب عکس العمل بستر پی مد نظر (k_{sf}) با استفاده از روابط و نمودارهای موجود.

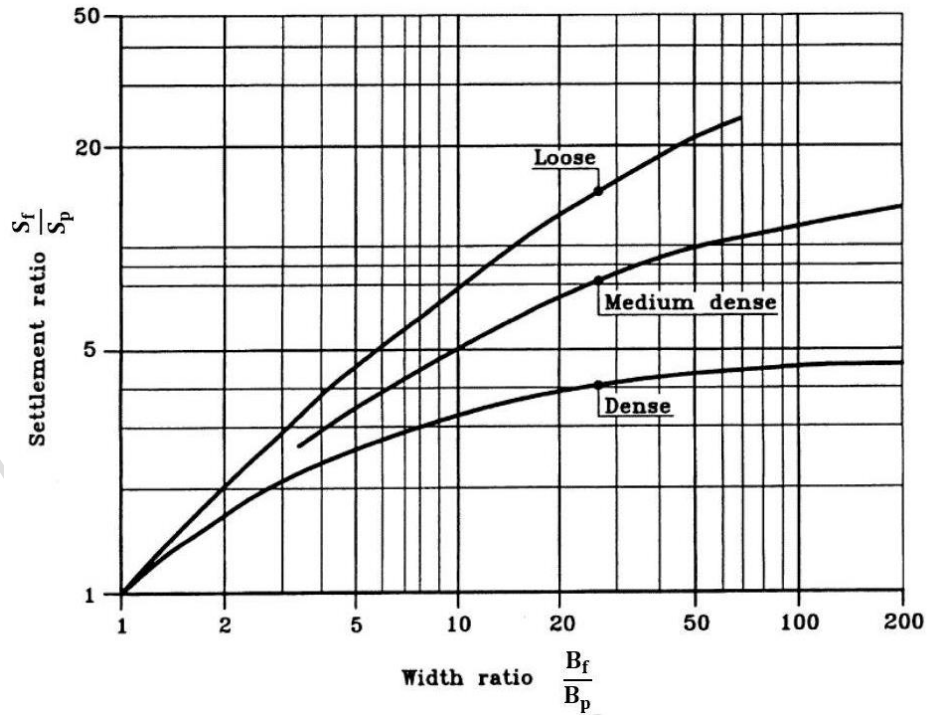
روابط ترزاقی از جمله روابط مورد استفاده جهت تبدیل ضریب عکس العمل بستر به شرح زیر می‌باشد:

$$\text{Clay:}\quad k_{sf} = k_{sp}\frac{B_P}{B_f}$$

$$\text{Sand:}\quad k_{sf} = k_{sp}\left(\frac{B_f + B_p}{2B_f}\right)^2$$

که در آن B_P و B_f به ترتیب عرض صفحه بارگذاری و عرض فونداسیون می‌باشند.

همچنین می‌توان با استفاده از نمودار زیر که در آیین‌نامه Eurocode ارائه شده است، با معکوس کردن نسبت نشست‌ها، مقدار k_s را در خاک‌های ماسه‌ای تبدیل کرد:



شکل ۷-۱۱ – نمودار مورد استفاده در محاسبه نشست فونداسیون با استفاده از نشست صفحه بارگذاری

[۲۹] Abbet

شایان ذکر است که رابطه ترزاقی در ماسه، تقریباً نتایجی نزدیک به منحنی Dense sand در نمودار فوق می‌دهد.

۷-۵-۲- استفاده از روابط

روابط گوناگونی جهت محاسبه ضریب عکس العمل بستر (k_s) در مراجع موجود است. از جمله این روابط می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

$$\text{Vesic:}\quad k_s = \frac{0.65E_s}{\mathrm{B}(1-\nu^2)}\sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_f I_f}}$$

$$\text{Bowles:}\quad k_s = \frac{E_s}{\mathrm{B}(1-\nu^2)}\quad \text{(Based on Vesic)}$$

$$\text{Bowles:}\quad k_s = \frac{E_s}{\mathrm{B}'(1-\nu^2)I_s I_F m}\quad \text{(Based on theory of elasticity)}$$

که در آن:

$k_s, \mathrm{E}_s, B, B', \nu, I_s, I_F$ & m: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

E_f: مدول الاستیسیته بتن.

I_f: ممان اینرسی سطح مقطع پی.

۷-۵-۳- روش شبه همبسته[۳۰]

این روش در خصوص پی‌های منعطف مطرح شده و مراحل تعیین k_s به شرح زیر است:

۱- مقدار متوسط ضریب عکس العمل بستر را از تقسیم بار متوسط بر نشست متوسط پی بدست می‌آوریم $\left(\mathrm{k}_s = \frac{q_{avg}}{s_{avg}}\right)$.

۲- پی را به تعداد ۳ یا بیشتر سطح هم‌مرکز تقسیم می‌کنیم؛ داخلی‌ترین سطح باید در پهنا و طول، ۳۰ الی ۵۰ درصد سهم داشته باشد.

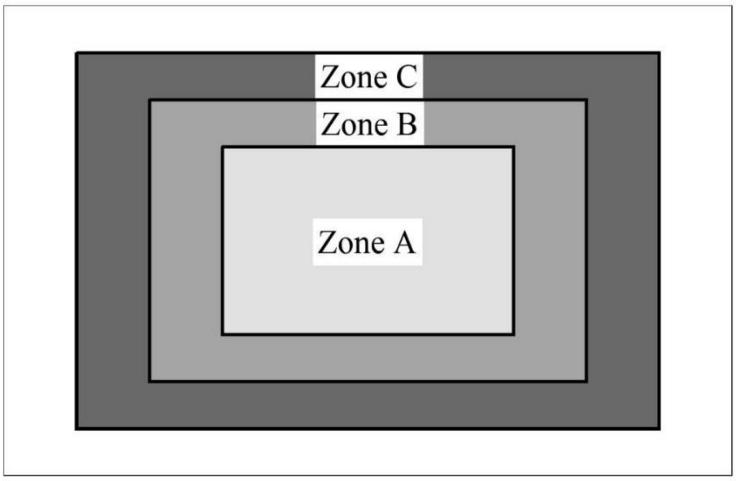
۳- به هر بخش یک k_s اختصاص می‌دهیم. خارجی‌ترین محدوده باید مقدار k_s اش ۲ برابر داخلی‌ترین محدوده باشد و مقدار k_s نیز باید از داخل به سمت محدوده خارجی، به تدریج در حال افزایش باشد. به شکل ۳-۱۰ توجه شود.

۴- مقدار k_s را با حل معادله بدست آوریم.

$$k_{sA}.A_A + k_{sB}.A_B + k_{sC}.A_C = \sum A.k_{s.avg}$$

[۳۰] Pseudo-Coupled

For example: $k_{sA} = k_{sA},\ k_{sB} = 1.5k_{sA}\ \&\ k_{sC} = 2k_{sA}$



شکل ۷-۱۲ – تقسیم‌بندی پی و تعیین k_s به روش شبه همبسته

۷-۵-۴- بررسی و مقایسه روش‌ها

تا کنون ۳ روش در خصوص تعیین k_s مطرح شده است:

۱- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

۲- استفاده از روابط

۳- روش شبه همبسته

با مقایسه در پی‌هایی که صرفاً در معرض نشست الاستیک هستند، ملاحظه می‌گردد که نتایج روش‌های دوم و سوم، تقریباً مشابه بوده و با روش اول اختلاف دارند. همچنین استفاده مستقیم از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و تبدیل k_s، از نظر برخی محققین از جمله باولز و مورتی[۳۱] مردود است. شایان ذکر است که نتایج مدلسازی عددی یک پی با بار گسترده و یکنواخت نیز همخوانی مناسبی با روش‌های دوم و سوم دارد. لذا با بررسی دقیق‌تر بر روی روابط تبدیل k_s، دلایل این اختلاف به شرح زیر می‌باشد:

- **تبدیل k_s در خاک‌های رسی:** فرض شده است که مقدار نشست، نسبت مستقیم با عمق حباب تنش دارد. لذا $\frac{k_{sf}}{k_{sp}}$ نسبت معکوس با $\frac{B_f}{B_p}$ دارد. این فرض در اکثر روابط نشست صادق نبوده و لذا اشتباه است.
- **تبدیل k_s در خاک‌های ماسه‌ای:** روابط ارائه شده در این خصوص تجربی و بر پایه آزمایش می‌باشند. با توجه به افزایش مدول الاستیسیته و کاهش چشمگیر تراکم‌پذیری ماسه با افزایش عمق، می‌توان نتیجه گرفت که این عامل افزاینده k_s در

[۳۱] Murthy

رابطه لحاظ شده و لذا مقایسه نتایج این روش با روابط تئوریک تحت شرایطی که مدول الاستیسیته در عمق ثابت در نظر گرفته شده است، اساساً اشتباه است.

علاوه بر ایرادات و فرضیات مذکور در خصوص روش اول، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای شامل محدودیت‌های زیر نیز می‌باشد:

- حوزه تأثیر آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در حدود عمق دو برابر قطر صفحه است؛ لذا اثر اعماق پایین‌تر و تغییرات لایه‌ها را در نظر نمی‌گیرد.
- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای نشست تحکیمی را در نظر نمی‌گیرد، چرا که یک آزمایش کوتاه مدت است.
- صفحات بارگذاری عمدتاً صلب هستند در حالیکه پی‌ها با افزایش ابعاد به تدریج منعطف خواهند شد.

۷-۵-۵- نتیجه‌گیری و تعیین ضریب عکس العمل بستر

با توجه به مطالب ارائه شده در بندهای پیشین، روش پیشنهادی جهت تعیین k_s عبارتست از:

۱- تعیین مدول الاستیسیته و سایر مشخصات تراکم‌پذیری خاک در محدوده عمق موثر در نشست پی.

۲- محاسبه ضریب عکس العمل بستر پی (k_s) با تقسیم کمینه q_{ult-sh} و q_{set} بر نشست کل (شامل نشست‌های الاستیک و تحکیمی) متناظر آن.

۷-۵-۶- ضریب عکس العمل بستر در پی‌های منعطف

مقدار نشست در سطح پی‌های منعطف یکسان نمی‌باشد. لذا به منظور محاسبه نشست‌های الاستیک و تحکیمی، از روش‌هایی می‌بایست استفاده شود که میان نقاط مختلف در سطح پی، تمایز قائل شوند. بعنوان مثال در محاسبه نشست الاستیک می‌توان از روش تئوری الاستیسیته و در خصوص نشست تحکیمی، می‌بایست جهت تعیین افزایش فشار در لایه‌ها (Δq)، از روش‌هایی همانند بوسینسک و وسترگارد استفاده کرد؛ روش‌هایی مثل روش تقریبی ۲ به ۱، شرایط یکسانی را برای تمامی نقاط زیر سطح پی در نظر گرفته و لذا توصیه نمی‌شوند.

در نهایت پس از انجام محاسبات در نقاط مختلف، می‌توان پی را به چند ناحیه تقسیم کرده و k_s متناسب با هر ناحیه را با استفاده از میانگین‌گیری وزنی و قضاوت مهندسی تعیین کرد. بعنوان مثال روابط محاسبه k_s در مرکز، گوشه و بصورت میانگین (طبق پیشنهاد باولز) بصورت زیر خواهد بود:

$$k_{s-center} = \frac{min(q_{ult-sh}, q_{set})}{S_{ks-center}}$$

$$k_{s-corner} = \frac{min(q_{ult-sh}, q_{set})}{S_{ks-corner}}$$

$$k_{s-average} = \frac{4 \times k_{s-center} + k_{s-corner}}{5}$$

شمای کلی توزیع k_s در سطح پی منعطف با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۷-۱۳ ارائه شده است. این شکل تطابق مناسبی با فرضیات توزیع k_s در روش شبه همبسته (شکل ۷-۱۲) دارد.

شکل ۷-۱۳ – شمای کلی توزیع k_s در سطح پی منعطف با استفاده از روش پیشنهادی

۷-۵-۷- ضریب عکس العمل بستر در پی‌های صلب

با توجه به یکسان بودن نشست در سطح پی‌های صلب، مقدار k_s نیز ثابت خواهد بود.

$$k_{s-rigid} = \frac{min(q_{ult-sh}, q_{set})}{S_{ks-rigid}}$$

نکته: در پروژه‌های حساس و با اهمیت، استفاده از مدلسازی عددی به تمامی روش‌های فوق‌الذکر ارجحیت دارد.

۷-۶- مبانی تعیین نشست و ظرفیت باربری نهایی شالوده سطحی با استفاده از تحلیل‌های عددی

در این بخش مبانی تعیین نشست و ظرفیت باربری شالوده سطحی با استفاده از تحلیل‌های عددی ارائه می‌شود. هدف از ارائه این بخش آشنایی، معرفی رئوس مطالب و مراجع جهت این تحلیل می‌باشد.

۷-۶-۱ - ضرورت استفاده از تحلیل‌های عددی

بطورکلی در اکثر مسائل واقعی مهندسی به دلیل عدم تطابق شرایط پروژه با فرضیات روابط کلاسیک و تحلیلی، استفاده از روش-های کلاسیک و تحلیلی در تعیین نشست و ظرفیت باربری خاک تقریبی بوده بطوریکه در برخی از موارد میزان تقریب روش‌های مذکور باعث بروز خطای قابل توجه و تحمیل هزینه‌های اضافی به پروژه خواهد شد. لذا در این موارد استفاده از تحلیل‌های عددی می‌تواند باعث افزایش دقت نتایج و در نتیجه طرح مناسب شالوده گردد.

برخی از موارد اصلی که می‌تواند باعث عدم تطابق فرضیات روابط تحلیلی با شرایط حقیقی پروژه شده و در نتیجه منجر به ایجاد خطا در نتایج حاصل از روش های تحلیلی و کلاسیک گردد عبارتند از:

- وجود لایه‌های زیرسطحی مختلف (محیط چند لایه)
- شکل نامنظم شالوده
- رفتار غیر الاستیسیته لایه‌های خاک

۷-۶-۲- مبانی مدل عددی

موارد اصلی که باید در مدلسازی عددی در نظر گرفته شود عبارتند از:

- نوع هندسه
- شرایط مرزی
- ابعاد مدل
- شبکه بندی
- مدل رفتاری
- مراحل تحلیل
- اعمال اثر گودبرداری

۷-۶-۳- نوع هندسه

بطورکلی مدل‌های عددی از نظر هندسی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

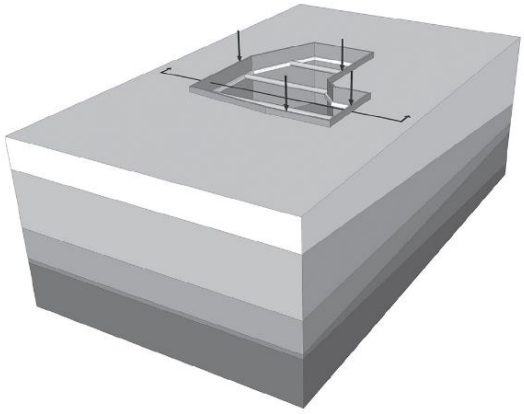
- سه بعدی: این مدل قادر به در نظر گرفتن انواع نامنظمی‌های هندسی و تغییرات شکل شالوده، شیب لایه‌ها و اختلاف تراز سطح شالوده می‌باشد. جهت مدلسازی سه بعدی استفاده از نرم افزارهای ویژه (مانند Abaqus، Ansys، Midas gts، Plaxis 3D و Flac 3D) ضروری است.
- دو بعدی (کرنش یا تنش مسطح): مدلسازی هندسی از نوع کرنش مسطح[۳۲] متداول‌ترین نوع هندسه جهت مدلسازی عددی می باشد. این نوع هندسه هنگامی که یک بعد هندسه شالوده نسبت به سایر ابعاد به مقدار قابل توجهی بزرگتر بوده و تغییرات قابل توجهی از نظر شرایط هندسی و بارگذاری در بعد بزرگتر وجود ندارد بکار می‌رود. این نوع هندسه می‌تواند در تحلیل ظرفیت باربری شالوده نواری بکار رود.
- تقارن محوری: مدلسازی تقارن محوری[۳۳] در تعیین ظرفیت باربری شالوده دایره‌ای شکل که در آن لایه بندی خاک و بارگذاری آن نسبت به محور عبوری از مرکز شالوده متقارن باشد، کاربرد دارد. باید توجه داشت که در این نوع مدلسازی مقدار بار و تنش اعمالی و تنش های خروجی بر حسب زاویه یک رادیان قطاع در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۷-۱۴ انواع هندسه در مدلسازی عددی شالوده سطحی بطور شماتیک نشان داده شده است.

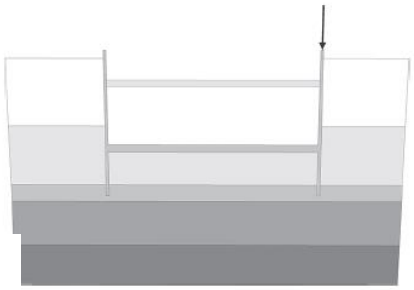
نسخه پیش نویس

[۳۲] Plane strain

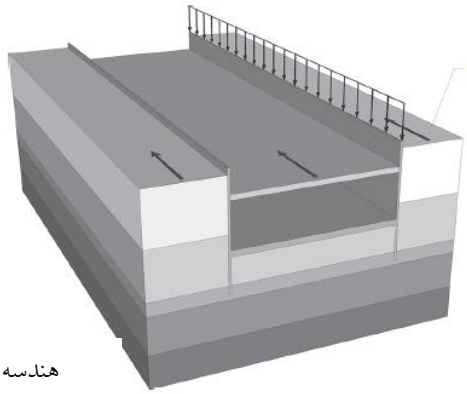
[۳۳] Axisymmetric



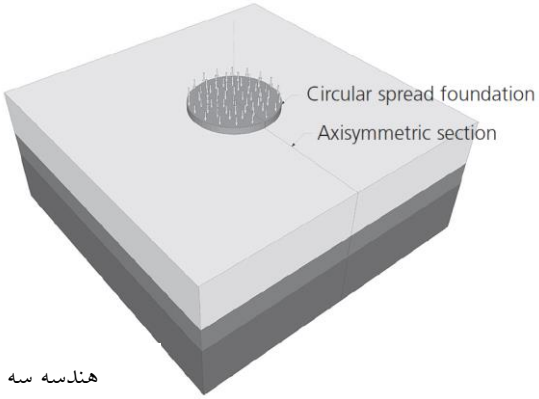
هندسه سه بعدی



هندسه دو بعدی کرنش مسطح



هندسه سه بعدی متناظر با شرایط کرنش مسطح



هندسه سه بعدی متناظر با شرایط کرنش مسطح

شکل ۷-۱۴ – انواع هندسه در مدلسازی عددی شالوده سطحی

۷-۶-۴- شرایط مرزی[۳۴]

تعیین وضعیت قیدهای تغییرمکانی یا تنش‌های اعمالی یا شرایط زهکشی یا فشار آب حفره‌ای در گره‌های مرزی مدل عددی را اعمال شرایط مرزی در مدلسازی عددی مسائل ژئوتکنیک در شرایط استاتیکی می نامند. بطورکلی در مدلسازی عددی همواره باید در کلیه گره‌های مرزی یک یا چند یک از شرایط مرزی ذکر شده اعمال گردند.

شرایط مرزی متداول در مسائل شالوده سطحی را می توان به دو دسته زیر تقسیم نمود:

- شرایط تکیه گاهی کف مدل: در کف مدل کلیه درجات آزادی تغییرمکان مقید شده به این ترتیب در مدل سه بعدی دو درجه آزادی افقی و درجه آزادی قائم مقید شده و در مدل‌های دو بعدی و تقارن محوری یک درجه آزادی افقی موجود و درجه آزادی قائم مقید می-گردند.
- شرایط تکیه گاهی سطوح جانبی مدل: در سطوح جانبی درجات آزادی تغییرمکان افقی مقید شده ولی درجه آزادی قائم مقید نمی گردد. به این ترتیب در مدل سه بعدی دو درجه آزادی افقی مقید شده و در مدل‌های دو بعدی و تقارن محوری یک درجه آزادی افقی موجود مقید می‌گردند.

۷-۶-۵- ابعاد مدل

بطورکلی در انتخاب ابعاد مدل عددی باید دو معیار زیر مد نظر قرار گیرند:

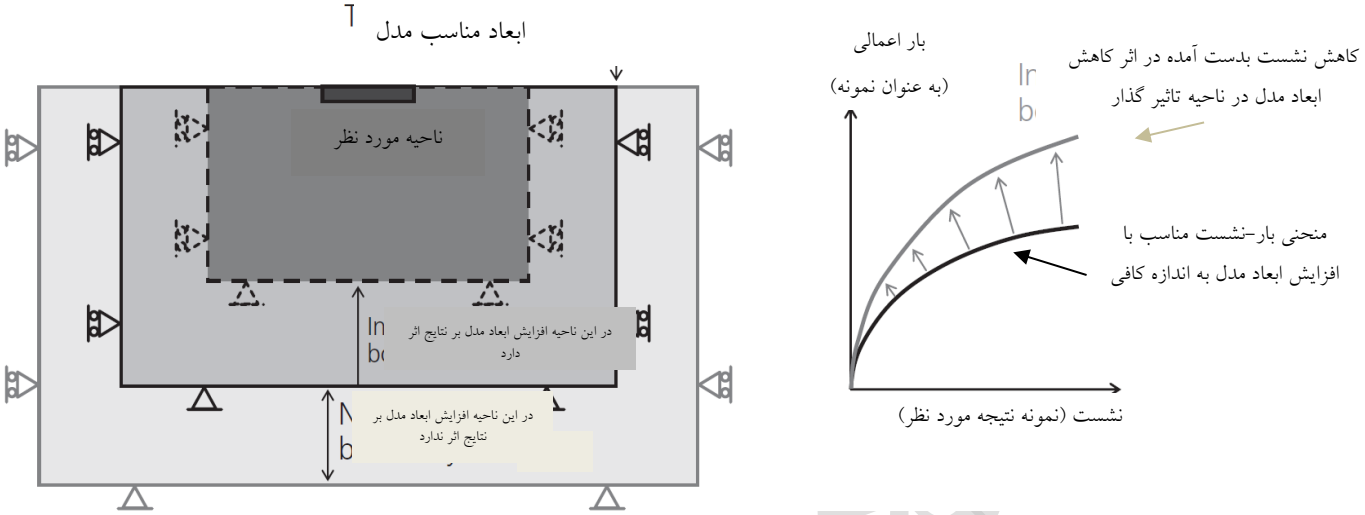
۱- ابعاد هندسه مدل باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که اعمال شرایط مرزی (مقید کردن درجات آزادی تغییرمکانی) تاثیر محسوسی بر نتایج نداشته باشد.

۲- با افزایش ابعاد مدل حجم محاسبات بالا رفته و در نتیجه زمان تحلیل افزایش خواهد یافت.

همانطور که ملاحظه می‌شود دو معیار فوق برعکس یکدیگر بوده و یکی در جهت افزایش ابعاد مدل و دیگری در جهت کاهش ابعاد مدل عمل می کند لذا ابعاد مدل باید به نحوی انتخاب شود که دو معیار فوق بطور همزمان به بهترین شکل تامین گردند.

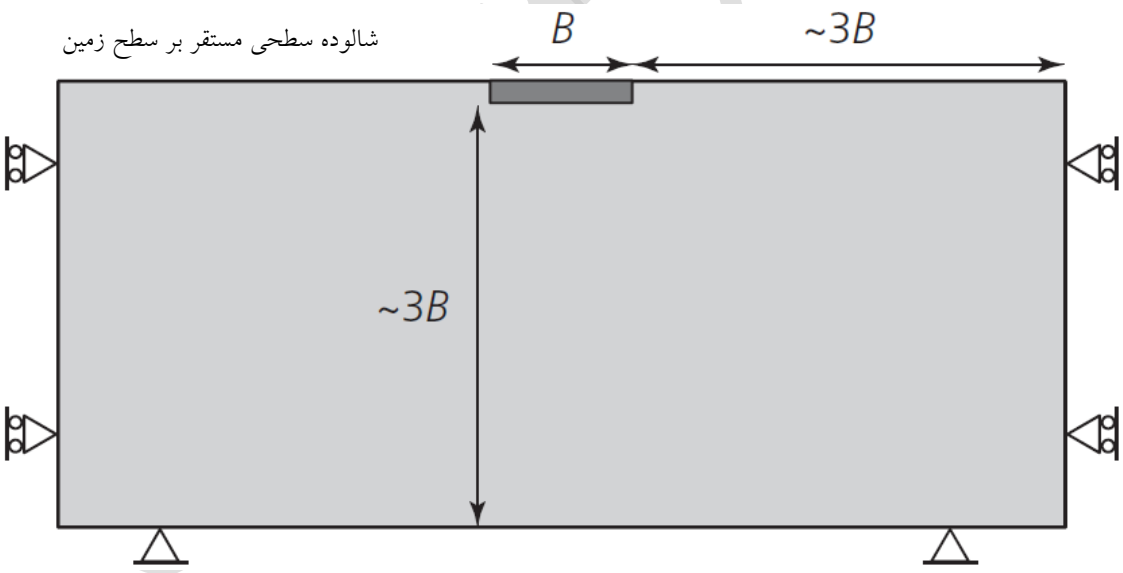
برای تعیین ابعاد مناسب مدل در شرایط ایده آل باید تحلیل‌های مختلفی با تغییر ابعاد مدل انجام شده و نتایج مورد نظر حاصل از تحلیل بر حسب ابعاد مدل رسم گردد. در این صورت حداقل ابعاد مناسب مدل به اندازه‌ای خواهد بود که با افزایش ابعاد مدل تغییر محسوسی بر نتایج مورد نظر رخ ندهد. در شکل ۷-۱۵ این روند بطور شماتیک نشان داده شده است.

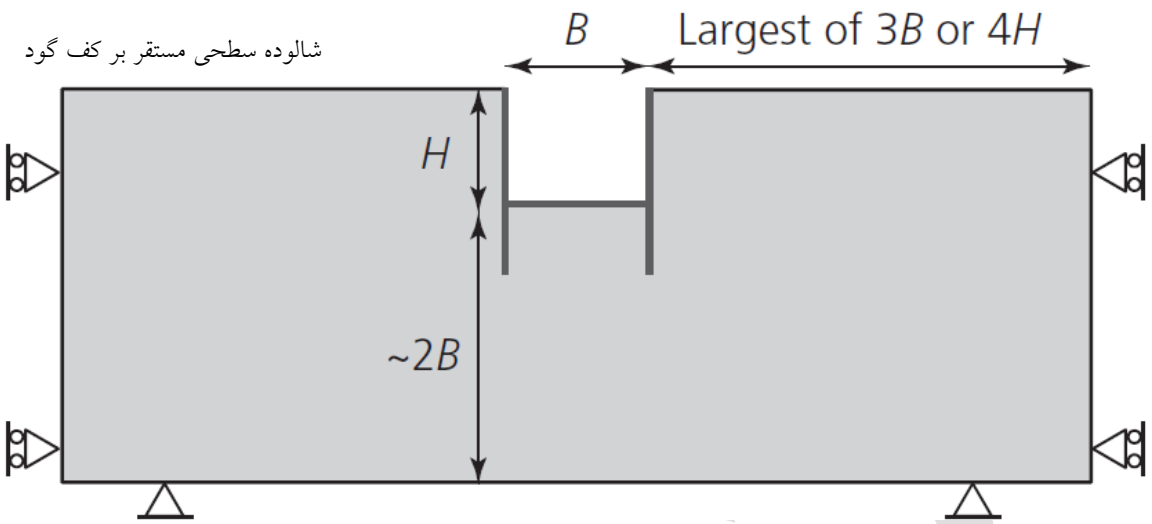
[۳۴] Boundary conditions



شکل ۷-۱۵- نحوه تعیین ابعاد مناسب در مدل عددی

به عنوان تقریب اولیه ابعاد هندسی مناسب در مسائل تحلیل شالوده سطحی می‌توان به مقادیر توصیه شده در شکل ۷-۱۶ اشاره نمود.





شکل ۷-۱۶- ابعاد مناسب توصیه شده مدل شالوده سطحی

۷-۶-۶- شبکه بندی

شبکه بندی[۳۵] شامل نوع و نحوه آرایش اجزای[۳۶] بکار رفته در مدل عددی می‌باشد. غالباً با کاهش ابعاد اجزا یا افزایش تعداد گره‌های اجزا دقت نتایج افزایش می یابد. بطورکلی توصیه می شود در محدوده‌هایی از مدل که شدت تغییرات تنش‌ها بیشتر می‌باشد یا دقت نتایج تحلیل اهمیت زیادتری دارد، از اجزای کوچتر یا اجزای با تعداد گره بیشتر استفاده شود.

نکته حائز اهمیت در شبکه بندی تامین کیفیت آن می‌باشد به این معنی که حتی الامکان از اجزای با شکل اعوجاج یافته[۳۷] یا تغییر ناگهانی اندازه اجزای مجاور خودداری شود.

۷-۶-۷- مدل رفتاری

انتخاب مدل رفتاری مناسب در تحلیل‌های عددی نیز اهمیت قابل توجهی دارد. با توجه به گستردگی موضوع در این بخش تنها به برخی از مدل‌های رفتاری متداول اشاره می‌شود.

- مدل الاستیک خطی: این مدل به عنوان ساده‌ترین مدل رفتاری تنها در مواردی که نشست شالوده اهمیت داشته و سطح تنش‌های اعمالی به اندازه‌ای باشد که رفتار غیرخطی و غیر الاستیسیته خاک اهمیت قابل توجهی ندارد می‌تواند بکار رود. همچنین از این نوع مدل رفتاری می‌توان برای مقایسه نتایج نشست حاصل از روابط کلاسیک تحلیلی نیز استفاده نمود.

---

[۳۵] Mesh generation

[۳۶] Elements

[۳۷] Distorted elements

• مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک با معیار گسیختگی موهر-کولمب[۳۸]: این مدل رفتاری متداول ترین مدل رفتاری در تحلیل مسائل ژئوتکنیک است و قابلیت تعیین نشست و ظرفیت باربری نهایی شالوده را داراست.

• مدل مدل سخت شونده[۳۹]: این مدل رفتاری در شرایطی که موارد زیر اهمیت دارد می‌تواند استفاده شود:

- اثر تنش همه جانبه محصور کننده بر سختی خاک مانند نهشته های که دارای لایه‌هایی با ضخامت زیاد هستند.

- اثر باربرداری-بارگذاری مجدد و لزوم در نظر گرفتن ضرایب سختی متفاوت در حالت باربرداری و حالت بارگذاری مانند شرایطی که عمق مدفون تراز استقرار شالوده سطحی قابل توجه باشد.

باید توجه داشت که هر چند با افزایش پیچیدگی‌های مدل‌های رفتاری قابلیت پیش بینی رفتار حقیقی خاک افزایش می‌یابد ولی این امر مستلزم برآورد مناسب پارامترهای مدل‌های رفتاری خواهد بود. لذا انجام آزمایش‌های ویژه و قضاوت مهندسی مناسب جهت تخمین پارامترهای مدل‌های رفتاری پیچیده ضروری است.

۷-۶-۸- مراحل تحلیل[۴۰]

اکثر مدلسازی‌های عددی مسائل ژئوتکنیک شامل چندین مرحله می‌باشد لذا تعریف مراحل تحلیل در نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی اهمیت زیادی دارد. بطورکلی تقریباً در تمامی مدل‌های عددی مسائل ژئوتکنیک تعریف شرایط تنش‌های درجا[۴۱] اولین مرحله از تحلیل می‌باشد. در این مرحله تنش‌های درجا ناشی از وزن و فشار جانبی خاک در اجزا اعمال می‌شود. نکته مهم در این مرحله صفر کردن تغییرمکان‌ها یا کرنش ها می‌باشد. به این معنی که پس از تحلیل تنش‌های درجا میزان تغییرمکان‌های ایجاد شده در مدل صفر گردند.

به منظور تعیین ظرفیت باربری نهایی شالوده سطحی در تحلیل عددی می‌توان تنش یکنواختی بر روی شالوده اعمال نمود و سپس در هر مرحله از تحلیل مقدار این تنش را بصورت تدریجی افزایش داد. در این صورت ظرفیت باربری نهایی متناظر با گسیختگی کلی شالوده بوده و با استفاده از دو معیار زیر تعیین می‌گردد:

۱- در صورتیکه منحنی تنش-نشست شالوده تقریباً شیب صفر پیدا کرده و مکانیزم گسیختگی تشکیل شود. در واقع ظرفیت باربری نهایی مجانب منحنی مذکور خواهد بود.

---

[۳۸] Mohr-Coulomb

[۳۹] Hardening soil model

[۴۰] Analysis stages

[۴۱] In-situ stress

۲- در صورتیکه کرنش‌های انحراف آور خمیری[۴۲] گسیختگی پیش رونده را نشان داده و گوه گسیختگی مشخصی تشکیل شود.

۷-۶-۹- اعمال اثر گودبرداری

در برخی از موارد تراز شالوده سطحی در کف گود قرار داشته و در نتیجه اعمال اثر گودبرداری در تحلیل عددی ظرفیت باربری اهمیت خواهد داشت. در این بخش کلیات نحوه در نظر گرفتن اثر گودبرداری در مدل عددی ذکر می‌گردد. باید توجه داشت در این موارد باید مدل رفتاری قابلیت در نظر گرفتن سختی متفاوت خاک در حالت باربرداری و بارگذاری را داشته باشد. به این ترتیب استفاده از مدل‌های الاستیسیته یا مدل الاستیسیته-کاملاً خمیری مجاز نخواهد بود.

برای تحلیل عددی دقیق اعمال اثر گودبرداری باید در تحلیل عددی ابتدا توده خاک در حالت طبیعی (بدون گودبرداری) مدل شود، سپس مراحل گودبرداری بصورت مرحله به مرحله در مدل اعمال گردد. باید توجه داشت در این حالت در صورت ناپایداری خاک، باید روش پایدارسازی نیز در مدلسازی لحاظ گردد. در نهایت پس از رسیدن گودبرداری به تراز استقرار شالوده، تغییرمکان‌های ایجاد شده در مدل صفر شده و مدلسازی شالوده و بارگذاری بر آن انجام خواهد شد.

روش تقریبی و ساده‌تری برای لحاظ اثر گودبرداری در تحلیل شالوده سطحی نیز وجود دارد که در آن اثر گودبرداری با اعمال و برداشتن تنش متناظر با گودبرداری لحاظ می گردد. مراحل تحلیل به روش ساده شده به شرح زیر می‌باشد (شکل ۳-۱۷):

۱- مدل مسطح بدون در نظر گرفتن لایه‌های گودبرداری ساخته شده و تنش‌های اولیه برجا در مدل اعمال می‌گردد.

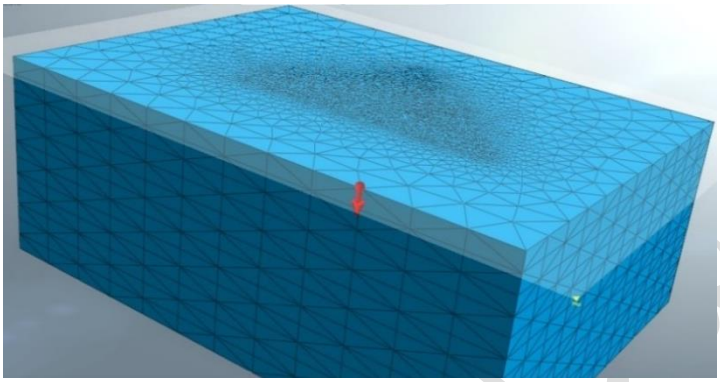
۲- اثر لایه‌های فوقانی با اعمال سربار به اندازه وزن آن‌ها بر روی کل محدوده مدل لحاظ می‌شود.

۳- اثر گودبرداری با برداشتن سربار اعمال شدن از روی ناحیه استقرار شالوده لحاظ می‌شود.

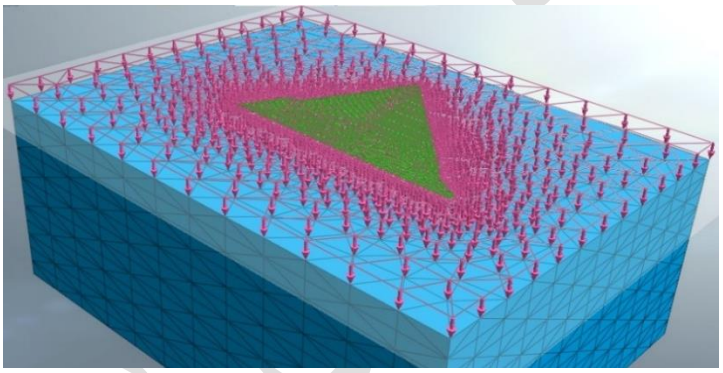
۴- مقدار تغییرمکان‌های ایجاد شده ناشی از تحلیل مراحل ۱ تا ۳ صفر شده و مدلسازی شالوده انجام می‌گردد.

[۴۲] Deviatoric plastic strain

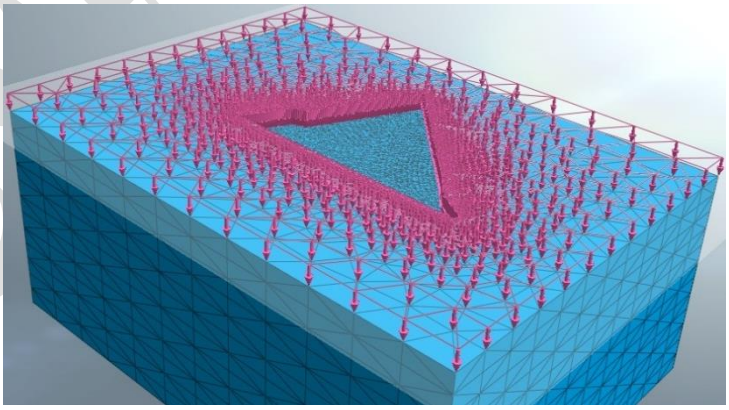
مرحله اول: اعمال تنش های برجا ناشی از وزن خاک



مرحله دوم: اعمال سربار به اندازه تنش گودبرداری بر کل محدوده مدل(سربار ناحیه روی شالوده به رنگ سبز مشخص شده)



مرحله سوم: برداشتن سربار از ناحیه روی شالوده



شکل ۷-۱۷- مراحل در نظر گرفتن اثر گودبرداری بصورت تقریبی و ساده شده

۷-۷- شمع ها

۷-۷-۱- ظرفیت باربری شمع ها

ظرفیت باربری نهایی شمع را می‌توان مجموع ظرفیت باربری نوک شمع و ظرفیت باربری اصطکاک جلدی شمع در نظر گرفت که عمدتاً طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_u = Q_p + Q_s = A_p q_p + \sum_{i=1}^{n} p \Delta L q_s$$

که در آن:

Q_u: ظرفیت باربری نهایی شمع.

Q_p: ظرفیت باربری نهایی نوک شمع.

Q_s: ظرفیت باربری نهایی اصطکاک جدار شمع.

A_p: سطح مقطع نوک شمع.

q_p: مقاومت نهایی واحد سطح نوک شمع.

p: محیط مقطع شمع.

ΔL: طول جزئی از شمع که در آن q_s و p ثابت فرض شده‌اند.

q_s: مقاومت نهایی اصطکاکی واحد سطح جدار شمع.

توجه شود هنگامی که بار وارد شده به تدریج افزایش می‌یابد، بیشینه مقاومت جدار شمع زمانی ایجاد می‌شود که (فارغ از ابعاد شمع) جابجایی بین خاک و شمع در حدود ۵ الی ۱۰ میلیمتر گردد. همچنین بیشینه مقاومت نوک شمع بسیج نمی‌شود، مگر اینکه نوک شمع در حدود ۱۰ الی ۲۵ درصد عرض (قطر) شمع جابجا گردد؛ حد پایین برای شمع‌های کوبیده شده و حد بالا برای شمع‌های حفاری شده می‌باشد.

۷-۷-۲- ظرفیت باربری نوک شمع

۷-۷-۲-۱- روش مایرهوف

ماسه: ظرفیت باربری نوک یک شمع در ماسه، عموماً با افزایش عمق مدفون در لایه باربر، افزایش یافته و در نسبت مدفون $L_b/D = \left(L_b/D\right)_{cr}$ (L_b و D به ترتیب عمق مدفون در لایه باربر و قطر شمع هستند) به یک مقدار بیشینه می‌رسد. توجه شود که در یک خاک همگن، L_b مساوی عمق مدفون شمع و زمانی که خاک در یک لایه باربر نفوذ کرده باشد، از عمق مدفون کوچکتر بوده

و برابر با عمق مدفون شمع در لایه باربر خواهد بود. بعد از نسبت مدفون بحرانی، $\left(L_b/D\right)_{cr}$، مقدار q_p ثابت باقی می‌ماند $(q_p = q_l)$. در نهایت ظرفیت باربری نهایی نوک شمع از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_p = q_p A_p = q' N_q^* A_p \leq q_l A_p$$
$$q_l = 0.5 p_a N_q^* tan\emptyset'$$

که در آن:

Q_p, q_p & A_p: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

q': تنش قائم موثر در تراز نوک شمع.

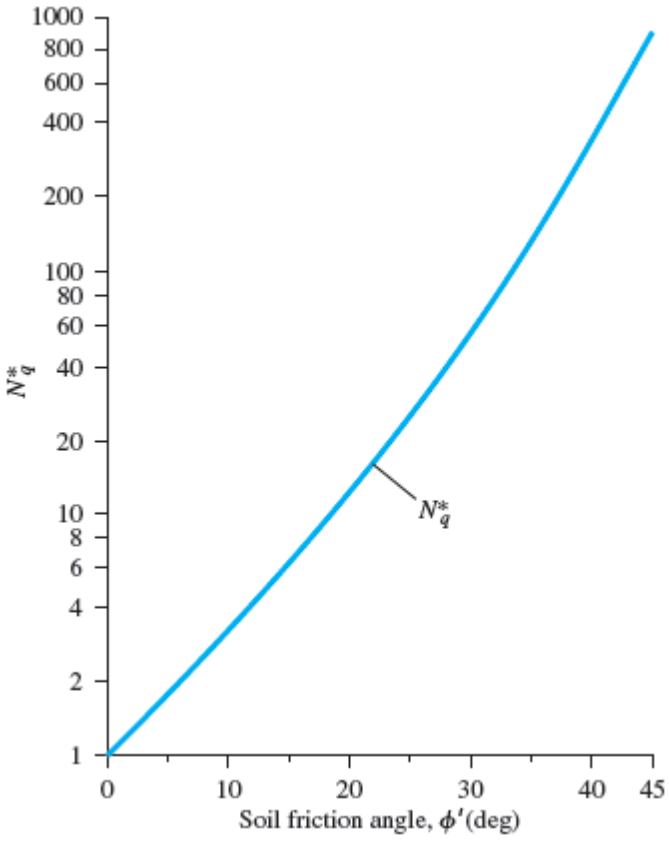
N_q^*: ضریب ظرفیت باربری شمع.

q_l: مقاومت حدی واحد سطح نوک شمع.

p_a: فشار اتمسفر (معادل $100\ kPa$).

$\emptyset'$: زاویه اصطکاک زهکشی شده لایه باربر خاک.

ضمناً N_q^* با استفاده از شکل ۷-۱۸ قابل استخراج است.



شکل ۷-۱۸ – نمودار تغییرات N_q^* با زاویه اصطکاک داخلی

رس (ϕ=0): ظرفیت باربری نهایی نوک شمع‌های مدفون در رس‌های اشباع در شرایط زهکشی نشده $(\emptyset = 0)$ طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_p = q_p A_p = N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p$$

که در آن:

Q_p, q_p & A_p: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

N_c^*: ضریب ظرفیت باربری شمع.

c_u: چسبندگی زهکشی نشده رس.

۷-۷-۲-۲- روش وسیک

این روش در چند مرجع موجود است که گاهاً تفاوت‌هایی در نحوه ارائه ملاحظه می‌گردد؛ مطالبی که در ادامه ارائه شده‌اند، برگرفته از ویرایش دوم کتاب اصول مهندسی پی، تألیف داس می‌باشند. این روش که بر اساس تئوری گسترش حفرات است، ظرفیت باربری نوک شمع را با استفاده از پارامترهای تنش موثر، طبق رابطه زیر ارائه می‌کند:

$$Q_p = q_p A_p = (c N_c^* + \bar{\sigma}_0' N_\sigma^*) A_p$$

$$\bar{\sigma}_0' = \left(\frac{1 + 2K_0}{3}\right) q'$$

$$K_0 = 1 - sin\emptyset$$

$$N_\sigma^* = f(I_{rr})$$

که در آن:

Q_p, q_p, A_p, q', c & $\emptyset$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$\bar{\sigma}_0'$: میانگین تنش موثر قائم در تراز نوک شمع.

K_0: ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون.

N_σ^* & N_c^*: ضرایب ظرفیت باربری شمع که با استفاده از پارامتر I_{rr} و جدول ارائه شده در مرجع بدست می‌آیند.

I_{rr}: نشانه صلبیت کاهش‌یافته خاک.

به منظور محاسبه I_{rr} می‌توان روابط و توصیه‌های زیر را بکار گرفت:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$$

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\nu)(c+q'tan\emptyset)} = \frac{G_s}{c+q'tan\emptyset}$$

$$\nu = 0.1 + 0.3\left(\frac{\emptyset - 25}{20}\right) \quad (\text{for } \ 25^\circ \le \emptyset \le 45^\circ)$$

$$\Delta = 0.005\left(1 - \frac{\emptyset - 25}{20}\right)\frac{q'}{p_a}$$

که در آن:

$E_s, \nu, q', c, \emptyset \ \& \ p_a$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

I_r: نشانه صلبیت خاک.

G_s: مدول برشی خاک.

Δ: متوسط کرنش حجمی در ناحیه پلاستیک زیر نوک شمع.

نکته:

۱- در شرایطی که هیچ‌گونه تغییر حجمی وجود نداشته باشد (ماسه متراکم و رس اشباع)، $\Delta = \mathbf{0}$ و لذا $\boldsymbol{I_{rr} = I_r}$.

۲- هنگامی که $\emptyset = \mathbf{0}$ (یعنی شرایط رس اشباع زهکشی نشده) باشد، مقادیر $\boldsymbol{N_c^*}$ و $\boldsymbol{I_{rr}}$ را می‌توان با استفاده از روابط زیر نیز محاسبه کرد:

$$N_c^* = \frac{4}{3}(ln\, I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

$$I_{rr} = \frac{E_s}{3c_u}$$

$$I_{rr} = 347\left(\frac{c_u}{p_a}\right) - 33 \le 300$$

❖ توجه شود که تمامی پارامترهای بکار رفته در روابط فوق، پیش‌تر تعریف شده‌اند.

۷-۷-۲-۳- روش جانبو

محاسبه ظرفیت باربری بر اساس روش جانبو بصورت زیر می‌باشد:

$$Q_p = q_p A_p = \left(cN_c^* + q'N_q^*\right)A_p$$

$$N_q^* = \left(tan\emptyset + \sqrt{1 + tan^2\emptyset}\right)^2 e^{2\eta' tan\emptyset}$$

$$N_c^* = \left(N_q^* - 1\right)cot\emptyset$$

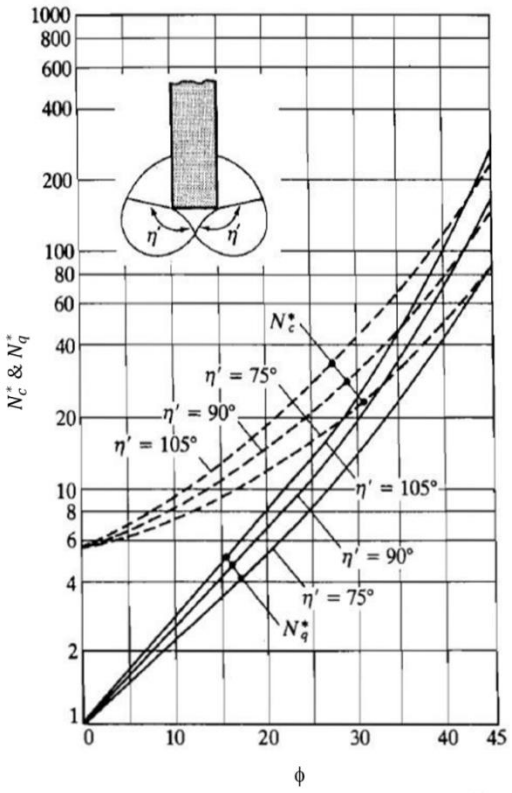
که در آن:

Q_p, q_p, A_p, q', c & $\emptyset$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

N_q^* & N_c^*: ضرایب ظرفیت باربری شمع (N_q^* در محاسبه N_c^* نیز دخیل است).

η': در شکل ۷-۱۳ معرفی شده است.

در انتها مقادیر N_q^* و N_c^*، با استفاده از شکل ۳-۱۹ نیز قابل استخراج هستند. ضمناً پارامتر η' از حدود ۶۰ درجه در خاک‌های تراکم-پذیر تا ۱۰۵ درجه در خاک‌های متراکم متغیر است.



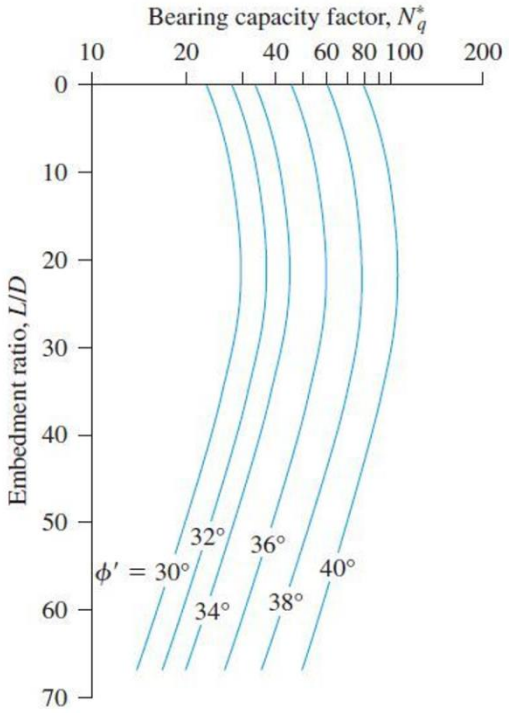
شکل ۷-۱۹ – نمودار تغییرات N_q^* و N_c^* با زاویه اصطکاک داخلی

۷-۷-۲-۴- روش کویل و کاستلو

ماسه: کویل و کاستلو تعدادی آزمایش با مقیاس کامل بر روی شمع‌های کوبیده شده در ماسه انجام داده و بر اساس نتایج حاصل، رابطه زیر را برای ظرفیت باربری نوک شمع ارائه دادند:

$$Q_p = q_p A_p = q' N_q^* A_p$$

کلیه پارامترها در رابطه اخیر، پیش‌تر ارائه شده‌اند. تغییرات N_q^* با زاویه اصطکاک داخلی نیز در شکل ۷-۲۰ ارائه شده است:



شکل ۷-۲۰ – نمودار تغییرات N_q^* با زاویه اصطکاک داخلی و نسبت مدفون

نکته: توصیه می‌شود که از روش کویل و کاستلو بصورت همزمان جهت برآورد ظرفیت باربری نوک و اصطکاک جدار شمع استفاده شود.

۷-۷-۲-۵- استفاده از روابط همبستگی

روابط همبستگی متعددی توسط محققین گوناگون در خصوص ظرفیت باربری نوک شمع ارائه شده است؛ برخی بر اساس آزمایش SPT و برخی بر اساس آزمایش CPT هستند. با توجه به کاربرد بیشتر SPT در پروژه‌های کنونی، به ذکر برخی روابط همبستگی SPT (گزارش شده توسط داس) بسنده می‌گردد.

جدول ۳-۹ – روابط همبستگی مقاومت نوک شمع بر اساس نتایج آزمایش SPT

نوع شمع	نوع خاک	رابطه همبستگی
-	خاک دانه‌ای	$0.4p_aN_{60}\ {}^{L}/_{D} \leq 4p_aN_{60}$
-	ماسه	$19.7p_a(N_{60})^{0.36}$
حفاری شده	ماسه	$0.1p_aN_{60}$
حفاری شده	ماسه شن‌دار	$0.15p_aN_{60}$
کوبیده شده	همه خاک‌ها	$0.3p_aN_{60}$

* p_a: فشار اتمسفر (معادل $100\ kPa$)

* N_{60}: میانگین نتیجه آزمایش SPT در حوالی نوک شمع (محدوده $10D$ بالا و $4D$ پایین

همانگونه که ملاحظه می‌گردد، عمده روابط موجود مرتبط با شمع‌های مدفون در خاک‌های ماسه‌ای و دانه‌ای می‌باشد.

۷-۷-۲-۶- توصیه‌های API

با توجه به نتایج آزمایش‌های بارگذاری شمع متعدد، چنین ملاحظه شده است که پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه مقاومت در عمقی مشخص، با افزایش عمق شمع، افزایشی در ظرفیت باربری نوک شمع حاصل نمی‌شود. از این رو موسسه API در سال ۲۰۱۱، بیشینه مقاومت نوک در شمع‌های مدفون در خاک‌های سیلیسی فاقد چسبندگی را به شرح جدول زیر توصیه کرد:

جدول ۷-۱۰ – مقادیر بیشینه مقاومت نوک در شمع‌های مدفون در خاک‌های سیلیسی فاقد چسبندگی

رابطه همبستگی	مقاومت بیشینه نوک شمع	
	$[kPa]$	$[lb/ft^2]$
Ver loose to loose sand (D_r Loose sand-silt ($D_r = 15 - 35\%$) Medium dense to dense silt (D_r	Use CPT-based methods	
Medium dense sand-silt (D_r	3,000	60.000
Medium dense sand ($D_r = 35 - 65\%$) Dense sand-silt ($D_r = 65 - 85\%$)	5,000	100,000
Dense sand ($D_r = 65 - 85\%$) Very dense sand-silt (D_r	10,000	200,000
Very dense sand ($D_r = 85 - 100\%$)	12,000	250,000
∗: Sand-silt is defined as a cohesionless soil with siginificant fractions		

نکته:

۱- در صورت انجام آزمایش بارگذاری شمع در محل، می‌توان مقادیری بیش از مقادیر توصیه شده در جدول فوق اختیار کرد. توجه شود که در بسیاری از موارد انجام آزمایش بارگذاری شمع، چنین می‌شود.

۲- خاک‌های آهکی در مقایسه با خاک‌های سیلیسی مقاومت کمتری دارند. در هنگام برخورد به چنین خاک‌های غیرمعمول، می‌بایست اهمیت بیشتری برای تجربیات محلی و آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی شمع قائل شد، چرا که روش‌های طراحی معمول، ممکن است گمراه‌کننده باشند.

۷-۷-۳- ظرفیت باربری اصطکاک جدار شمع

۷-۷-۳-۱- روش α

طبق روابط زیر بدست می‌آید:q_s و یا محاسبه αدر این روش، مقاومت جلدی در خاک‌های رسی، با استفاده از ضریب

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L.\, \alpha c_u$$

$$q_s = min\begin{cases} 0.5(c_u \bar{\sigma}_0')^{0.5} \\ 0.5(c_u)^{0.75}(\bar{\sigma}_0')^{0.25} \end{cases}$$

که در آن:

$Q_s, q_s, p, \Delta L \;\&\; c_u$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$\bar{\sigma}_0'$: میانگین تنش موثر قائم.

لازم به ذکر است که روابط و روش‌های گوناگونی برای حصول ضریب α وجود دارد؛ از این میان به جدول ارائه شده توسط ترزاقی و همکارانش بسنده می‌گردد:

جدول ۳-۱۱ – تغییرات α با چسبندگی زهکشی نشده

$\frac{c_u}{p_a}$	α
< 0.1	1.0
0.2	0.92
0.3	0.82
0.4	0.74
0.6	0.62
0.8	0.54
1.0	0.48
1.2	0.42
1.4	0.40
1.6	0.38
1.8	0.36
2.0	0.35
2.4	0.34
2.8	0.34

* p_a: فشار اتمسفر (معادل

۷-۷-۳-۲- روش β

در این روش، مقاومت جلدی با استفاده از ضریب β و پارامترهای تنش موثر خاک بدست می‌آید؛ لذا مرتبط با مقاومت کوتاه مدت و بلند مدت در خاک‌های دانه‌ای و مقاومت بلند مدت در خاک‌های ریزدانه است.

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L.\beta\bar{\sigma}_0'$$

$$\beta = K.tan\emptyset_r'$$

که در آن:

Q_s, q_s, p & ΔL: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$\bar{\sigma}_0'$: میانگین تنش موثر قائم.

$\emptyset_r'$: زاویه اصطکاک زهکشی شده در نمونه خاک بازسازی شده.

K: ضریب فشار جانبی خاک که با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

خاک‌های ریزدانه عادی تحکیم‌یافته و خاک‌های درشت‌دانه	$K = 1 - sin\emptyset_r'$
خاک‌های ریزدانه بیش تحکیم‌یافته	$K = (1 - sin\emptyset_r')(OCR)^{0.5}$

ضمناً OCR نسبت بیش‌تحکیمی خاک است.

۷-۷-۳-۳- روش λ

این روش توسط ویجاورجیا و فوش[۴۳] پیشنهاد شده و با استفاده از ضریب λ، ظرفیت باربری را چنین محاسبه می‌کند:

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L.\lambda(\bar{\sigma}_0' + 2c_u)$$

که در آن:

Q_s, q_s, p & ΔL: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$\bar{\sigma}_0'$: میانگین تنش قائم موثر در کل طول مدفون شمع.

c_u: میانگین وزنی چسبندگی زهکشی نشده خاک در کل طول مدفون شمع.

[۴۳] Vijayvergiya and Focht

ضمناً λ نیز با استفاده از جدول زیر بدست می‌آید:

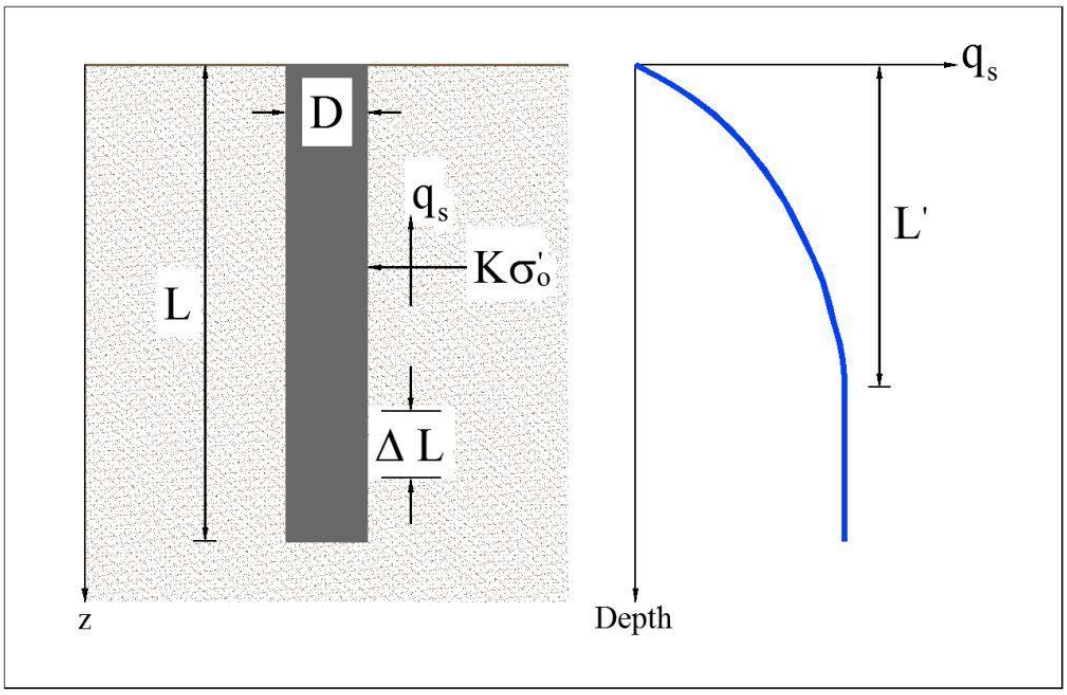
جدول ۷-۱۲ – تغییرات λ با طول مدفون شمع

طول مدفون شمع $[m]$	λ $[-]$
0	0.5
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
25	0.150
30	0.136
35	0.132
40	0.127
50	0.118
60	0.113
70	0.110
80	0.110
90	0.110

۷-۷-۳-۴- روش داس

چنین مشاهده شده است که مقدار q_s تا رسیدن به عمق L'، با روندی تقریباً خطی افزایش پیدا کرده و در اعماق پایین‌تر ثابت می‌ماند (شکل ۳-۲۱). مقدار عمق بحرانی L' بین $15D$ تا $20D$ می‌باشد که بصورت محافظه‌کارانه $15D$ در نظر گرفته می‌شود. به منظور لحاظ کردن اثر عمق بحرانی مذکور، مقدار σ'_0 در عمق معادل $15D$ بیشینه و از آن به بعد، ثابت فرض می‌شود.

نسخه پیش نویس



شکل ۷-۲۱ – مقاومت اصطکاک جدار در شمع‌های مدفون در ماسه

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} p\Delta L q_s$$

$$For\ z = 0\ to\ L' \rightarrow\ q_s = K\sigma'_0 tan\delta'$$

$$For\ z = L'\ to\ L \rightarrow\ q_s = q_{s(z=L')}$$

که در آن:

$Q_s, q_s, p\ \&\ \Delta L$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

σ'_0: تنش قائم موثر در عمق مورد نظر.

δ': زاویه اصطکاک بین خاک و شمع که معمولاً بین $0.5\emptyset'$ تا $0.8\emptyset'$ متغیر است.

K: ضریب فشار جانبی خاک که با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

شمع‌های درجا (و آنهایی که با جت آب حفاری شده‌اند)	$K_0 = 1 - sin\emptyset'$
شمع‌های کوبشی با جابجایی کم	$K_0 = 1 - sin\emptyset'\ to\ 1.4K_0 = 1.4(1 - sin\emptyset')$
شمع‌های کوبشی با جابجایی زیاد	$K_0 = 1 - sin\emptyset'\ to\ 1.8K_0 = 1.8(1 - sin\emptyset')$

۷-۷-۳-۵- روش کویل و کاستلو

در ادامه مطالب قید شده در بند ۳-۱-۱-۴، ظرفیت باربری اصطکاک جدار شمع بصورت زیر بدست می‌آید:

$$Q_s = pLq_s = pL(K\bar{\sigma}_0' tan\delta')$$

که در آن:

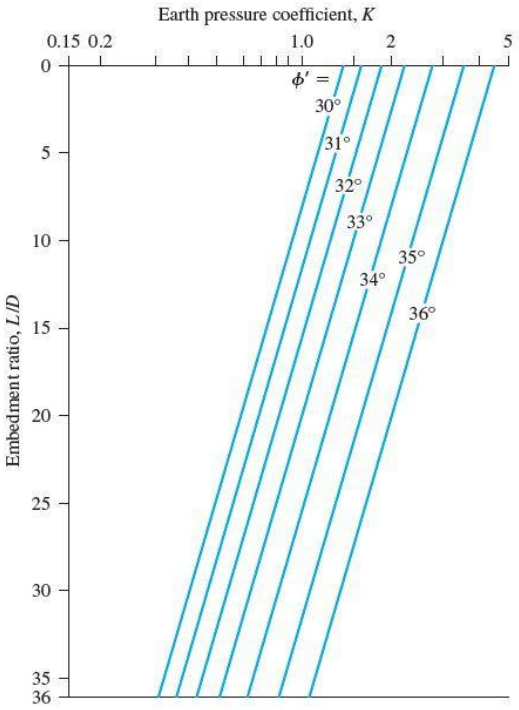
$Q_s, q_s \ \& \ p$: پیش‌تر تعریف شده‌اند.

L: طول شمع.

$\bar{\sigma}_0'$: میانگین تنش قائم موثر در کل طول مدفون شمع.

δ': زاویه اصطکاک بین خاک و شمع که معادل $0.8\emptyset'$ می‌باشد.

K: ضریب فشار جانبی خاک که با استفاده از نمودار زیر بدست می‌آید:



شکل ۷-۲۲ – نمودار تغییرات K با نسبت مدفون

نکته: توصیه می‌شود که از روش کویل و کاستلو بصورت همزمان جهت برآورد ظرفیت باربری نوک و اصطکاک جدار شمع استفاده شود.

۷-۷-۳-۶- استفاده از روابط همبستگی

روابط همبستگی متعددی توسط محققین گوناگون در خصوص ظرفیت باربری اصطکاک جدار شمع ارائه شده است؛ این روابط، توابعی از نتایج آزمایش‌های SPT، CPT و مشخصات فنی خاک (از قبیل c_u و ϕ') می‌باشند. بنا به کاربرد محدود آزمایش CPT در پروژه-های کنونی، از ذکر روابط آن نیز خودداری شده است.

جدول ۷-۱۳ – روابط همبستگی مقاومت اصطکاک جدار شمع

نوع شمع	نوع خاک	رابطه همبستگی
کوبیده شده با جابجایی زیاد	ماسه	$1.9N_{60} \leq 100$
کوبیده شده با جابجایی کم	ماسه	$0.95N_{60} \leq 50$
کوبیده شده	ماسه	$2N_{55}$
حفاری شده	ماسه	$1N_{55}$
کوبیده شده	رس	$10N_{55}$
حفاری شده	رس	$5N_{55}$
کوبیده شده	رس	$1.5c_u tan\phi'$
حفاری شده	رس	$c_u tan\phi'$

* تمامی واحدها بر حسب $[kPa]$ می‌باشند.

* N_{60} & N_{55} : میانگین نتیجه آزمایش SPT در محدوده مورد نظر از طول شمع.

۷-۷-۳-۷- توصیه‌های API

با توجه به نتایج آزمایش‌های بارگذاری شمع متعدد، چنین ملاحظه شد که مقاومت اصطکاک جدار شمع‌ها با افزایش عمق، افزایش پیدا در سال APIکرده و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه (خصوصاً در خاک‌های فاقد چسبندگی)، ثابت می‌ماند. از این رو موسسه ۲۰۱۱، بیشینه مقاومت اصطکاک جدار در شمع‌های مدفون در خاک‌های سیلیسی فاقد چسبندگی را به شرح جدول زیر توصیه کرد:

جدول ۷-۱۴ – مقادیر بیشینه مقاومت اصطکاک جدار در شمع‌های مدفون در خاک‌های سیلیسی فاقد چسبندگی

رابطه همبستگی	مقاومت بیشینه اصطکاک جدار شمع	
	$[kPa]$	$[lb/ft^2]$
Ver loose to loose sand ($D_r = 0 - 35\%$) Loose sand-silt ($D_r = 15 - 35\%$) Medium dense to dense silt (D_r	Use CPT-based methods	
Medium dense sand-silt (D_r	67	1.400
Medium dense sand ($D_r = 35 - 65\%$)	81	1,700

Dense sand-silt ($D_r = 65 - 85\%$)		
Dense sand ($D_r = 65 - 85\%$)	96	2,000
Very dense sand-silt ($D_r = 85 - 100\%$)		
Very dense sand ($D_r = 85 - 100\%$)	115	2,400

$*$: Sand-silt is defined as a cohesionless soil with siginificant fractions

۷-۸- نشست شمع

۷-۸-۱- نشست الاستیک شمع منفرد

در این بخش روابط تجربی متعارف جهت تخمین میزان نشست الاستیک شمع ارائه شده است. بطورکلی نشست شمع از سه مولفه زیر تشکیل می‌شود:

❖ **نشست الاستیک مصالح شمع:**

این مولفه در اثر اعمال نیروی فشاری بر مصالح شمع ایجاد شده و مقدار آن با استفاده از رابطه نشست الاستیک یک بعدی بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$S_{pile} = \frac{QL}{AE_{pile}}$$

که در آن:

S_{pile}: نشست الاستیک مصالح شمع.

Q: نیروی اعمالی بر شمع.

L: طول شمع.

A: سطح مقطع شمع.

E_{pile}: مدول الاستیسیته مصالح شمع.

❖ **نشست نوک:**

این مولفه در اثر اعمال تنش به نوک شمع و تاثیر آن بر خاک اطراف ایجاد می‌شود. رابطه تجربی زیر توسط وسیک برای تعیین این مولفه ارائه شده است:

$$S_p = \frac{C_p Q_p}{D q_p}$$

در این رابطه:

C_p: ضریب تجربی مطابق جدول (۳-۱۵).

Q_p: ظرفیت باربری نهایی نوک شمع.

D: قطر شمع.

q_p: مقاومت نهایی واحد سطح نوک شمع.

S_p: نشست نوک شمع.

جدول ۷-۱۵ – مقادیر توصیه شده ضریب C_P

Soil Type	Driven Piles	Bored Piles
Dense Sand	0.02	0.09
Loose Sand	0.04	0.18
Stiff Clay	0.02	0.03
Soft Clay	0.03	0.06
Dense Silt	0.03	0.09
Loose Silt	0.05	0.12

❖ **نشست جدار:**

این مولفه در اثر اعمال تنش به جدار شمع و تاثیر آن بر خاک اطراف ایجاد می‌شود. این مولفه از نشست را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$\begin{cases} S_s = \dfrac{C_s Q_s}{L q_p} \\ C_s = (0.93 + 0.16)\dfrac{L}{B} C_P \end{cases}$$

در این رابطه:

Q_s: ظرفیت باربری نهایی اصطکاک جدار شمع.

L: طول شمع.

q_p: مقاومت نهایی واحد سطح نوک شمع.

S_s: نشست جدار شمع.

۷-۸-۲- نشست الاستیک گروه شمع

یکی از روابط تجربی برای تعیین نشست گروه شمع S_{group} در خاک های ماسه ای بصورت اعمال ضریبی بر نشست شمع منفرد S_{single} توسط وسیک پیشنهاد شده است:

$$S_{group} = S_{single}\sqrt{\frac{B}{D}}$$

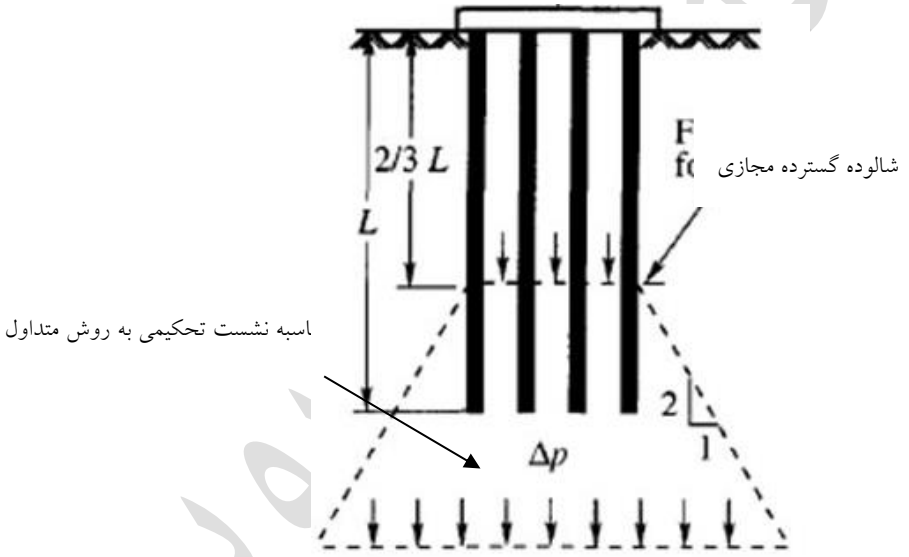
در رابطه فوق B کوچکترین بعد گروه شمع و D قطر شمع منفرد است.

۷-۸-۳- نشست تحکیمی گروه شمع

برای تخمین نشست تحکیمی گروه شمع در خاک‌های رسی استفاده از روش زیر توصیه می شود:

۱- گروه شمع بصورت شالوده یکپارچه مستقر در عمق دو سوم طول شمع‌ها در نظر گرفته شود. این موضوع بطور شماتیک در شکل (۷-۲۳) نشان داده شده است.

۲- محاسبه نشست تحکیمی دقیقاً بر اساس روابط نشست تحکیم با در نظر گرفتن لایه رسی پایین تر از تراز مجازی فرض شده.



شکل ۷-۲۳ – شکل شماتیک شالوده گسترده مجازی معادل گروه شمع

۷-۹- سختی شمع

به منظور تخمین سختی شمع با توجه به اهمیت و نوع مساله می‌توان از روش های زیر استفاده نمود:

۱- محاسبه نشست شمع از روابط تجربی و بدست آورن سختی شمع از تقسیم ظرفیت باربری شمع بر میزان نشست محاسبه شده

۲- استفاده از روابط تحلیلی یا عددی

رابطه تحلیلی ساده شده (محیط یک لایه، همگن و شمع با مقطع دایره ای یکنواخت) برای محاسبه سختی معادل شمع توسط رندولف بصورت زیر توصیه شده است:

$$\begin{cases} \mathrm{k}_{s.pile} = \mathrm{G}_s \times \mathrm{D} \dfrac{\dfrac{2}{1-\upsilon} + \dfrac{2\pi}{\xi}\dfrac{tanh(\mu L)}{\mu L}\dfrac{L}{D}}{1 + \dfrac{8}{\pi\lambda(1-\upsilon)}\dfrac{tanh(\mu L)}{\mu L}\dfrac{L}{D}} \\ \xi = ln\left(\dfrac{2r_m}{D}\right) \\ \lambda = \dfrac{E_{pile}}{G_s} \\ \mu L = 2\sqrt{\dfrac{2}{\xi}\lambda}\dfrac{L}{D} \end{cases}$$

در این رابطه:

$\mathrm{k}_{s.pile}$: سختی شمع.

G_s: مدول برشی خاک.

D: قطر شمع.

ν: نسبت پواسون.

E_{pile}: مدول الاستیسیته مصالح شمع.

در رابطه فوق r_m شعاع تاثیر شمع است. معمولاً مقدار این ضریب به اندازه‌ای است که ضریب ξ بین ۳ تا ۵ قرار گیرد. همچنین مقدار متوسط $\xi = 4$ توصیه شده است.

در رابطه با شمع های پافیلی که در آن ها قطر نوک شمع D_b و قطر جدار D باشد، رابطه ضریب سختی بصورت زیر تغییر می کند:

$$\begin{cases} \mathrm{k}_{s.pile} = \mathrm{G}_s \times \mathrm{D} \dfrac{\dfrac{2\eta}{1-\upsilon} + \dfrac{2\pi}{\xi}\dfrac{tanh(\mu L)}{\mu L}\dfrac{L}{D}}{1 + \dfrac{8\eta}{\pi\lambda(1-\upsilon)}\dfrac{tanh(\mu L)}{\mu L}\dfrac{L}{D}} \\ \eta = \dfrac{D_b}{D} \end{cases}$$

نسخه پیش نویس

❖ مراجع

مراجع انگلیسی

1- A. Lees, Geotechnical Finite Element Analysis- A Practical Giude, ICE publishing, 2016.
2- *ASTM D1194*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994.
3- B. M. Das, Principles of Foundation Engineering, 8th ed., Cengage Learning, 2016.
4- British Standards Institution, Eurocode 7: Geotechnical design Part 2: Ground investigation and testing, BS EN 1997-2:2007, BSI, 2007.
5- D. P. Coduto, W. A. Kitch, M. R. Yeung, Foundation Design: Principles and Practices, 3rd ed., Pearson Education, 2016.
6- J. E. Bowles, Foundation Analysis and Design, 5th ed., New York: McGrow-Hill, 1997.
7- K. Fleming, A. Weltman, M. Randolph, K. Elson, Piling Engineering, 2ed ed.,Taylor & Francis, 1992.
8- L. Reese, W. Isenhower, S. Wang, Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations, John Wiley & Sons, 2006.
9- M. Budhu, Soil Mechanics and Foundations, 3rd ed., John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.
10- N. S. V. Kameswara Rao, Foundation Design: Theory and Design, John Wiley & Sons (Asia), 2011.
11- R. D. Holtz, "Stress Distribution and Settlement of Shallow Foundations," in *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed., H. Fang, Ed., New York, Chapman & Hall, 1991.
12- Soil Office Sofware Group, SO-Foundation Software, Ver. 2.1.6611.1, Tehran, 2019.
13- V. N. S. Murthy, Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, New York: Marcel Dekker, 2003.

مراجع فارسی

۱۴- ب. ام. داس، اصول مهندسی ژئوتکنیک، ویرایش دوم، جلد ۲، تهران: موسسه انتشارات پارس آئین، ۱۳۸۳.

فصل هشتم

گزارش مطالعات مکانیک خاک

نسخه پیش نویس

فصل هشتم

۸– گزارش مطالعات مکانیک خاک

۸-۱- مقدمه

نتیجه کلیه آزمایش های صحرایی، آزمایشگاهی و ژئوفیزیکی در قالب یک گزارش جامع به همراه مشخصات کلی وضعیت موجود و آتی پروژه تدوین میگردد که ساختار یک گزارش می بایست به نحوی باشد که عوامل مختلف پروژه اطلاعات مورد نیاز را به راحتی برداشت نمایند. در تهیه گزارش ژئوکنیک گزارش بهتر است در ۵ فصل شامل کلیات، عملیات اکتشافی، تجزیه و تحلیل آزمایشها، پارامترهای ژئوتکنیکی و توصیه‌های فنی باشد که پیوست‌هایی نیز می‌تواند داشته باشد.

نسخه پیش نویس

۸-۲- فصل اول – کلیات

در این فصل از گزارش مکانیک می بایست اطلاعاتی نظیر مشخصات سازه، زمین شناسی عمومی منطقه طرح محل پروژه و گی های لرزه ای منطقه طرح محل پروژه ارائه گردد.

۸-۲-۱- مقدمه، اطلاعات پروژه، اطلاعات همجواری، اطلاعات پیرامونی و سایت پلان

در این قسمت از گزارش مشخصات مربوط به کارفرما و شرکت خدمات آزمایشگاهی و مهندسی ژئوتکنیک ارائه گردد که در ذیل نمونه فرم ارائه اطلاعات مورد نیاز جهت مشخصات کلی پروژه نمایش داده شده است.

نام کارفرما یا سازمان طرف قرارداد با شرکت خدمات آزمایشگاهی و مهندسی ژئوتکنیک:	
نام پروژه، تعداد کل طبقات و کاربری پروژه:	
نام استان، شهرستان یا شهری که پروژه در آن واقع است:	
پلاک یا پلاک‌های ثبتی (تجمیع):	
درصورتی‌که محل پروژه در مناطق شهری است: منطقه: ..... ناحیه: ..... محله: ..... پلاک:	
درصورتی‌که محل پروژه در مناطق غیرشهری است: توضیحات:	
شماره پرونده شهرداری یا نهاد دیگر	
نام شرکت مهندسی ژئوتکنیک:	
مختصات جغرافیایی (طول و عرض) پروژه:	
آدرس پروژه:	
شماره نظام‌مهندسی:	نام استان:
تعداد صفحات متن گزارش:	تعداد صفحات کل:
تاریخ قرارداد با کارفرما:	تاریخ شروع عملیات و مطالعه ژئوتکنیک:
تاریخ پایان عملیات ژئوتکنیک:	تاریخ تحویل گزارش ژئوتکنیک:
اطلاعات دیگر:	

همچنین میتوان اطلاعاتی از ساختمان موجود، چاه های احتمالی موجود و ... نیز در جدولی بصورت نیز در گزارش مکانیک ارائه نمود.

❖ اطلاعات ساختمان مورد تخریب

آدرس محل پروژه:		
فاصله تا خیابان یا جاده اصلی:	عرض گذر:	شمالی یا جنوبی:
مساحت زمین پروژه:	ابعاد زمین پروژه:	شکل زمین:
سطح اشغال مورد تخریب:	ابعاد سطح اشغال:	
تعداد ساختمان مورد تخریب (تعداد تجمیع) و توضیحات:		
محل قرارگیری چاه یا چاه‌های فاضلاب آیا نشانه‌گذاری شده. توضیحات:		
آیا ساختمان حوض انبار، انبار، گلخانه زیر سطح اشغال یا مجاور آن دارد. توضیحات:		
آیا در زیر سطح اشغال یا حیاط فضای خالی با خاک دستی پر شده؟ توضیحات:		
پی ساختمان مورد تخریب روی زمین روی طبیعی. بستر سنگی، شن و ماسه درشت، خاک دستی توضیحات:		
نوع پی ساختمان شفته‌آهک، بتنی و یا اصولاً پی ندارد. توضیحات:		
درصورتی‌که بسترسازی شده، نوع بسترسازی و دلیل آن توضیحات:		
استحکام بستر ساخته‌شده، ارتفاع بستر ساخته‌شده؟ توضیحات:		
آیا خطری در زمان گودبرداری سطحی، قبل از ایجاد سازه نگهبان وجود دارد:		
ساختمان مورد تخریب دیوار مشترک، دیوار فرسوده، دیوار خشتی و گلی دارد؟ توضیحات:		
توضیحات و اطلاعات دیگر:		

جهت ارائه اطلاعات کلی از مشخصات سازه مورد احداث نیز فرم ذیل قابل استفاده می باشد.

❖ اطلاعات ساختمان مورد احداث

مساحت کل پس از اصلاحات:		ابعاد زمین پس از اصلاحات:
مساحت سطح اشغال پس از اصلاحات:		ابعاد سطح اشغال پس از اصلاحات:
شکل هندسی سطح اشغال:		کم‌ترین عرض سطح اشغال:
بیشترین عرض سطح اشغال:		متوسط عرض سطح اشغال:
تعداد طبقات زیر همکف:		تعداد طبقات کل:
تراز قرارگیری پی نسبت به گذر، همسایه‌ها، حیاط؟ توضیحات:		
پیشروی (کنسول) دارد یا ندارد در جهات مختلف عرض کنسول؟ توضیحات:		
بیشترین فاصله بین ستون‌ها:		بیشترین بار قائم با احتساب بار افقی و عمودی زلزله:
شکل ساختمان در ارتفاع:		توازن بارها بر روی پی برقرار است یا خیر توضیحات:
در صورت تجمیعی بودن ساختمان، تعداد تجمیع یافته:		
اسکلت ساختمان بتنی یا فلزی:	ارتفاع ساختمان از روی پی:	ارتفاع ساختمان از روی گذر:
کاربری ساختمان:	تعداد واحدهای آپارتمانی در یک ساختمان	
کل مساحت زیربنا	کل متراژ آپارتمان‌ها:	کاربری آپارتمان‌ها:
هرگونه اطلاعات بر و کف دیگر:		
سیستم باربری قائم	سیستم باربری جانبی	
اطلاعات دیگر:		

۸-۲-۲- زمین‌شناسی

در این قسمت می بایست از طریق مراجع معتبر مختلف مانند گزارش سازمان زمین شناسی و نقشه های زمین شناسی محلی ، نوع سازند ساختگاه محل پروژه بررسی نماید و موارد ذیل را در این قسمت در خصوص پروژه شرح دهد.

۱- واحدهای زمین‌شناختی و ساختمانی (پهنه) ایران و زمین شناسی عمومی و شکل های مربوطه

۲- پهنه اصلی و پهنه های همجوار

۳- زیر پهنه و زیرپهنه های همجوار

۴- خلاصه‌ای از تاریخچه زمین‌شناسی تا کوارترنر (عصر جدید) و شرح کامل کوارترنر

۵- توضیحات مربوط به حوضه رسوبی، حوضه آبریز، نوع رسوبات، در صورت آبرفتی بودن ساختگان نوع آبرفت، جنس مواد رسوبی و یا نوع سنگ‌های آتش‌فشانی

۶- توضیحات مربوطه به رسوبات تبخیری و کویری، بیابان‌های داخلی، بیابان‌های ساحلی، رسوبات بادی لُسی، تپه‌های ماسه‌ای ساحلی یا تپه‌های صحرایی و غیره

۷- منشأ تشکیل خاک محل مطالعات صحرایی

۸-۲-۳- زلزله‌خیزی

در این بخش ضروری است وضعیت لرزه خیزی ، وضعیت گسل های ساختگاه و همچنین همجوار پروژه با ذکر فاصله های مربوطه از محل پروژه ارائه گردد که بصورت ذیل می بایست شرح داده شوند.

۱-بررسی گسل‌های بزرگ و سرتاسری در اطراف پروژه و گسل‌های کوچک منطقه‌ای، ناحیه‌ای و تأثیرگذار در به وجود آمدن خسارات براثر زلزله.

۲- معرفی این گسل‌ها به لحاظ طول گسل، نوع، محل شروع و انتهای گسل و فعالیت‌های اخیر آن در ناحیه یا منطقه قرارگیری پروژه.

۳- آخرین زمان فعال شدن گسل اطراف پروژه و زلزله‌های مرتبط با آن. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی زلزله و مشخص کردن شدت خطر زمین‌لرزه (به‌شدت پرخطر، پرخطر، متوسط، کم‌خطر، بی‌خطر)

۴- زلزله‌هایی که در چند قرن پیش در ناحیه قرارگیری پروژه بوده و یا در یک‌صد سال اخیر رخداده، شدت زلزله، خرابی‌ها و خسارت‌های جانی و مالی و غیره در گزارش بیان شود.

۵- فاصله گسل های نزدیک به پروژه نیز باید در این قسمت به صراحت مشخص گردد.

توصیه: درصورتی‌که زمین پروژه به لحاظ زمین‌شناسی و زلزله‌خیزی شرایط خوبی ندارد لازم است توصیه‌هایی فنی بیشتری مطرح شود.

۸-۳- مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

در انجام مطالعات ژئوتکنیک، از اصلی ترین مراحل مطالعات آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی می باشد که می‌بایست در گزارش مطالعات ژئوتکنیک به صراحت مشخص گردد تا گزارش مورد استفاده درک درستی از وضعیت ژئوتکنیک پروژه به عوامل پروژه ارائه نماید که در گزارش ژئوتکنیک می بایست مطالعات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی، حفاری ها و آزمایش های مربوطه با دقت شرح داده شوند.

۸-۳-۱- حفاری و مطالعات صحرایی

در هر پروژه عملیات و مطالعات ژئوتکنیک می‌تواند متفاوت و برحسب مشخصات پروژه و بر اساس مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان باشد. در گزارش مکانیک خاک می بایست اطلاعات ذیل در خصوص حفاری های و مطالعات صحرایی انجام شده ارائه گردد:

۱- فهرستی از تعداد و عمق گمانه و تعداد نمونه دست‌خورده و دست نخورده

۲- محل گمانه ها BH و چاهک ها TP در سایت پلان، تراز ها و اختلاف تراز های ابتدای آنها

۳- فاصله و مختصات مربوط به گمانه ها و چاهک ها

۴- تعداد ،عمق و نوع آزمایش های صحرایی انجام شده شامل SPT و دانسیته برجا و ...

۵- شرح عملیات حفاری شامل نوع دستگاه حفار، روش حفاری و ...

۶- روش نمونه‌برداری دستخورده و دستنخورده و مشخصات نمونه گیرها و همچنین موانع برخورد شده

۷- برخورد با سنگ‌بستر یا بولدر و مقدار نمونه گیری در سنگ

۸- برخورد با سطح آب زیرزمینی

۹- ریزشی بودن گمانه ها ماشینی و یا چاهک های دستی

۱۰- در صورتیکه کیسینگ‌گذاری در حفاری ماشینی صورت گرفته است

۱۱- چگونگی حمل نمونه‌ها

۱۲- زمان صرف شده جهت حفاری

۱۳- شرح عملیات و عمق لوله گذاری گمانه های ماشینی

۱۴- آزمایش برجای انجام شده شامل برش برجا و بارگذاری صفحه و عمق انجام آزمایش

۸-۳-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

شرح آزمایش‌ها , وسایل و تجهیزات آزمایش و خطاهای آزمایش در بخش خود در فصول قبل ارائه گردیده است لیکن در گزارش ژئوتکنیک که توسط شرکت خدمات آزمایشگاهی تهیه می گردد می بایست به تفصیل آزمایش های آزمایشگاهی صورت گرفته شرح و نتایج آن ارائه گردد. بطور کلی پیشنهاد می گردد ارائه نتایج آزمایش های آزمایشگاهی در گزارش مکانیک خاک در قالب ۳ بخش شامل، ۱- آزمایش‌فیزیکی، ۲- آزمایش های مقاومتی و شکل پذیری و ۳- آزمایش های شیمیایی صورت گیرد. لازم به ذکر است که ذکر استاندارد کلیه آزمایش های در این بخش الزامی می باشد.

۸-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها

در این فصل ضروری است نتایج بدست آمده از آزمایش ها در ۳ بخش زیر ارائه گردد. همچنین ضروری است قضاوت مهندسی و تجربیات اثر داده شده کارشناس ژئوتکنیک پروژه در تحلیل نتایج آزمایش های بطور مشخص ذکر گردد و از ارائه مطالب کلی خودداری گردد.

۱- خصوصیات فیزیکی شامل توصیف و طبقه بندی خاک و یا سنگ

۲- خصوصیات مکانیکی خاک و سنگ

۳- خصوصیات شیمیایی خاک و سنگ

۴- خصوصیات لرزه ای و نتایج آزمایش ژئوفیزیکی خاک و سنگ

همچنین ضروری است نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به‌طور خلاصه در جداول و همچنین لاگ استاندارد گمانه‌ها و چاهک ذکر شوندو به پیوست گزارش ارائه گردند. لازم به ذکر است که ذکر عدد SPT و عمق نفود آن در عمق در جدول و در لاگ استاندارد به تفکیک N1، N2 و N3 (و عمق نفوذ های متناظر) و در نهایت N نهایی الزامی می باشد.

۸-۵- جمع بندی پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی

این فصل ، مهمترین فصل یک گزارش مکانیک خاک می باشد که در آن رفتار خاک و پارامترهای طراحی پیشنهادی در خصوص سازه مورد احداث بر اساس آزمون های صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته، جمع بندی و پیشنهاد میگردد که برهمین اساس ضروری است موارد ذیل در این فصل به صورت کامل ارائه گردد.

۱- ظرفیت باربری انواع پی

۲- محاسبات نشست انواع پی

۳- تنش مجاز انواع پی

۴- فشارهای جانبی خاک

۵- نوع زمین برای محاسبات زلزله

۶- پارامترهای محاسباتی گودبرداری و عمق پایدار

۷- محاسبات مربوطه به ظرفیت باربری شمع ها

۸-۶- توصیه های فنی

در نهایت، با توجه به شرایط و مشخصات پروژه و سازه مورد احداث می بایست موارد زیر در چهارچوب توصیه های فنی منحصر به پروژه مورد بررسی در گزارش ارائه گردد:

۱- نوع سیمان مصرفی در پی

۲- نوع پی

۳- عمق یخبندان

۴- بهسازی زمین

۵- خاکهای مسئله دار

۶- پتانسیل روانگرایی

۷- نحوه گودبرداری

۸- آبهای زیرزمینی

۹- سیستم دفع فاضلاب و آبهای سطحی

۱۰- حداقل عمق تونل ها فاضلاب از زیر سطح پی

۱۱- قنات ها، چاه ها و انباره های قدیمی در محل پروژه

۸-۷-پیوست ها

در پایان گزارش مکانیک خاک ضروری است کلیه پیوست ها شامل موارد ذیل ارائه گردد.

پیوست الف – نتایج آزمایش های صحرایی و لاگ استاندارد گمانه ها و چاهک ها

پیسوت ب – نتایج آزمایش های آزمایشگاهی (دانه بندی – برش مستقیم - سه محوری – تک محوری – تحکیم – بارگذاری صحفه – برش برجا – پرسیو متری و ...)

پیوست ج – نتایج آزمایش های ژئوفیزیک

پیوست د – عکس ها و تصاویر جعبه های نمونه های بدست آمده به روش مغزه گیری

پیوست ه – نتایج آنالیزها و نمودارهای محاسباتی

پیوست و - جداول طراحی

نسخه پیش نویس

در پایان خلاصه گزارش مکانیک خاک میتواند در قالب یک چک لیست جامع ارائه گردد که در ادامه ۲ نمونه از چک لیست های قابل استفاده در گزارش های مکانیک خاک ارائه میگردد.

نسخه پیش نویس

جدول خلاصه نتایج عملیات,آزمایش ها و مطالعات

مشخصات کلی

کارفرما		پلاک ثبتی		تعداد طبقات	
مشاور ژئوتکنیک		شماره پرونده		تعداد طبقات زیرزمین	
آدرس			کاربری		

عملیات اکتشافی

حفاری	نوع	گمانه ماشینی -BH									چاهک دستی -TP							
	شماره	BH-1	BH-2							TP-1	TP-2							
	عمق																	
تعداد نمونه‌برداری و آزمایش ها	صحرایی	نمونه دست‌خورده	نمونه دست‌نخورده	نفوذ استاندارد	دانسیته در محل	بارگذاری صفحه	برش برجا	برش پره	نفوذپذیری صحرایی	پرسیومتر	دیلاتومتر	کاوشگر سبک	لرزه نگاری	ژئوالکتریک				
	آزمایشگاهی	دانه‌بندی	هیدرومتری	حدود اتربرگ	درصد رطوبت	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص ویژه	تحکیم	برش مستقیم	تک محوری	سه محوری	تراکم	نفوذ پذیری	شیمیایی				

پارامترهای ژئوتکنیکی

عمق لایه(متر)	طبقه بندی		وزن خشک مخصوص(ton/m^3)	درصد رطوبت	حدروانی	شاخص خمیری	نفوذ پذیری (Cm/sec)	عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده($N_{1,70}$)	مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	نسبت پوآسون	چسبندگی			زاویه اصطکاک		پارامترها ی تحکیم	
	BH-1	B H-2									اشباع نشده	Cu	C´	اشباع نشده	ϕ'	C_c	C_S
مدول عکس‌العمل بستر صفحه cm.. درتراز...(kg/cm^3)					سطح آب زیرزمینی(m)				سرعت موج برشی(m/sec)					ضخامت خاک دستی(m)			
					درصد سولفات				درصد کلر					PH			

پارامترهای طراحی

شرایط	ظرفیت باربری مجاز پی(kg/cm^2)				مدول عکس‌العمل بستر(kg/cm^3)			نشست مجاز پی(cm)			ظرفیت باربری مجازشمع بتنی(kg/cm^2)			ضرایب فشار جانبی		
	مربعی(عرض۱ متر)	نواری (عرض ۱متر)	نواری (عرض ۲متر)	گسترده (ابعاد طراح)	نواری(عرض ۱متر)	نواری(عرض ۲متر)	گسترده (ابعاد طراح)	منفرد	نواری	گسترده	فشاری	قطر(m)	طول(m	محرک (Ka)	مقاوم (Kp)	سکون (K_0)
											کششی	–	–			
عادی																
زلزله																

توصیه های فنی

نوع شالوده	تیپ زمین	پتانسیل روانگرایی	عمق مجاز گود برداری	شیب مجاز گود برداری	روش گود برداری	سیستم دفع فاضلاب	عمق انباری فاضلاب	نوع سیمان	بهسازی زمین

مشخصات کلی	پروژه	نام کارفرما		نوع پروژه		شماره پرونده		پلاک ثبتی		آدرس									
	ابعاد زمین	تراز استقرار کف شالوده نسبت به تراز مرجع		تعداد طبقات		ابعاد زمین (متر)		عمق گود برداری (متر)		عمق گمانه ماشینی (متر)		عمق گمانه دستی (متر)							
				زیرزمین	روی زمین	طول	عرض												
عملیات اکتشافی	گمانه ها	نوع	دستی				ماشینی												
		شماره	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4									
		عمق (m)																	
		تراز راس گمانه نسبت به تراز مرجع																	
		ضخامت خاک دستی																	
		تراز آب																	
	تعدادآزمایش های صحرایی	دانسیته در محل		CPT		SPT		بارگذاری صفحه		Down Hole		برش برجا							
	تعداد آزمایش های آزمایشگاهی	دانه بندی	وزن مخصوص	درصد رطوبت		حدود اتربرگ		برش مستقیم		تک محوری		سه محوری		تحکیم					
نتایج آزمون های آزمایشگاهی و صحرائی در تراز پی	فیزیکی	طبقه بندی خاک U.S.C.S	درصد ریزدانه PP200	وزن مخصوص طبیعی (Kgf/cm^3)	درصد رطوبت ω (%)	تراکم نسبی بر اساس نتایج SPT	حدود اتربرگ PI		L.L	P.L	نفوذ پذیری K (cm/sec)								
	مکانیکی	SPT	مدول عکس العمل بستر K_S ۳۰×۳۰ (Kgf/cm^3)		مدول تغییر شکل E_S (Kgf/cm^2)	مشخصات تحکیمی C_C	C_S	ضریب پواسون V_S	چسبندگی C (Kgf/cm^2)	زاویه اصطکاک φ (درجه)								
	شیمیایی	درصد سولفات		PH		درصد کلر		سایر مواد											
پارامترهای طراحی	تیپ زمین	زمان تناوب (ثانیه) Ts	T_0	تنش مجاز پی منفرد در تراز پی L = B = 1.5 m		تنش مجاز پی نواری در تراز پی L/B = 5		تنش مجاز پی گسترده در تراز پی		فشار جانبی فعال (Ka)		فشار جانبی مقاوم (Kp)							
توصیه های فنی	نوع سیمان	نوع شالوده توصیه شده		عمق مجاز گودبرداری قائم بدون سازه نگهبان		نحوه گود برداری		بهسازی زمین		سیستم دفع فاضلاب									