جمهوری اسلامی ایران
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

دستورالعمل آزمایش پرسیومتری

(در مطالعات ژئوتکنیک)

نشریه شماره ۲۲۳

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر امور فنی و تدوین معیارها

وزارت نیرو
سازمان مدیریت منابع آب ایران
دفتر استاندارد مهندسی آب

جمهوری اسلامی ایران

دستورالعمل آزمایش پرسیومتری
(در مطالعات ژئوتکنیک)

نشریه شماره ۲۲۳

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر امور فنی و تدوین معیارها

وزارت نیرو
سازمان مدیریت منابع آب ایران
دفتر استاندارد مهندسی آب

انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور ۸۰/۰۰/۹۴

۱۳۸۰

فهرستبرگه

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی و تدوین معیارها

دستورالعمل آزمایشهای پرسیومتری (در مطالعات ژئوتکنیک)/ معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها؛ وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب ایران، دفتر استاندارد مهندسی آب.- تهران: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات، ۱۳۸۰.

۵۱ ص.: مصور.- (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر فنی و تدوین معیارها؛ نشریه شماره ۲۲۳)(انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور؛ ۸۰/۰۰/۹۴)

ISBN 964-425-321-3

مربوط به دستورالعمل شماره ۱۰۵/۱۲۲۴۱-۵۴/۴۶۳۱ مورخ ۱۳۸۰/۸/۱۶

کتابنامه: ص. ۵۱

۱.خاک - آزمایش نفوذ - دستنامه‌ها. ۲. سنگها - مکانیک - دستنامه‌ها. الف.سازمان مدیریت منابع آب ایران، دفتر استاندارد مهندسی آب. ب. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. مرکز مدارک علمی و انتشارات. ج. عنوان. د. فروست.

TA ۳۶۸/س۲۴ ۱۳۸۰ ش.۲۲۳

شابک ۳-۳۲۱-۴۲۵-۹۶۴ ISBN 964-425-321-3

دستورالعمل آزمایش پرسیومتری (در مطالعات ژئوتکنیک)
تهیه کننده: دفتر امور فنی و تدوین معیارها

ناشر:سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. معاونت امور پشتیبانی. مرکز مدارک علمی و انتشارات

چاپ اول: ۱۰۰۰ نسخه، ۱۳۸۰

قیمت: ۵۰۰۰ ریال

لیتوگرافی: قاسملو

چاپ و صحافی: موسسه زحل چاپ

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

بسمه‌تعالی

ریاست جمهوری
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
دفتر رئیس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مشاوران و پیمانکاران	شماره : ۱۰۵/۱۲۲۴۱ـ۵۴/۴۶۳۱
	تاریخ : ۸۰/۸/۱۶

موضوع : دستورالعمل آزمایش پرسیومتری (در مطالعات ژئوتکنیک)

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی موضوع ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چهارچوب نظام فنی‌واجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه شماره ۲۴۵۲۵/ت۱۴۸۹۸ هـ، مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیات وزیران) به پیوست، نشریه شماره **۲۲۳** دفتر امور فنی و تدوین معیارهای این سازمان، با عنوان "**دستورالعمل آزمایش پرسیومتری (در مطالعات ژئوتکنیک)**" از نوع گروه سوم، ابلاغ می‌گردد.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده نمایند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنماهای بهتر دراختیار داشته باشند، رعایت مفاد این نشریه الزامی نیست.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را برای دفتر امور فنی و تدوین معیارهای این سازمان، ارسال دارند.

محمد ستاری‌فر
معاون رئیس جمهور و رئیس سازمان

بسمه تعالی

پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان سنجی) مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرحهای عمرانی بلحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرحها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیتی ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیأت محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام‌شده طرحها را مورد تأکید جدی قرار داده است.

با توجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (دفتر امور فنی و تدوین معیارها) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحبنظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه‌کننده استاندارد

ضمن تشکر از کارشناسان محترم برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحبنظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

معاون امور فنی

پاییز ۱۳۸۰

ترکیب اعضای کمیته

اعضای کمیته ژئوتکنیک که بررسی این استاندارد را برعهده داشته‌اند عبارتند از :

آقای حسین جلالی	**از شرکت مهندسین مشاور آب نیرو**	**دکترای سازه و دکترای مکانیک ساختمان**
آقای فرزان رفیعا	**از شرکت مهندسین مشاور کاوشگران**	**فوق‌لیسانس مهندسی معدن (مکانیک سنگ)**
آقای بهروز گتمیری	**از دانشگاه تهران – دانشکده فنی**	**دکترای ژئوتکنیک**
آقای سیاوش لیتکوهی	**ازشرکت‌خدمات‌مهندسی‌مکانیک‌خاک**	**دکترای مکانیک خاک**
خانم‌مهیارنوربخش پیربازاری	**از طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور**	**فوق‌لیسانس ژئوتکنیک**
آقای علی یوسفی	**از شرکت مهندسی مشاور مشانیر**	**فوق‌لیسانس مهندسی معدن (زمین‌شناسی مهندسی)**

در ضمن متن اولیه پیش‌نویس این استاندارد طی انجام قراردادی توسط آقای مهندس مهدی میرمعزی زیر نظر آقای دکتر بهروز گتمیری تهیه شده است.

فهرست مطالب

ردیف	موضوع	صفحه
۱-	کلیات	۱
۲-	انواع پرسیومتر	۴
۲-۱	پرسیومترهای پیش حفاری شده (P.D.P)	۴
۲-۲	پرسیومترهای خودحفار (S.B.P)	۵
۲-۳	پرسیومترهای رانشی (P.I.P)	۵
۳-	دستور کار	۹
۳-۱	دامنه کار	۹
۳-۲	روش آزمایش	۹
۳-۳	کاربرد	۱۰
۳-۴	هم‌سنجی	۱۱
۳-۵	حفاری	۱۴
۳-۶	روش آزمایش	۱۹
۳-۷	گزارش کار	۲۲
۳-۸	تذکر	۲۲
۴-	تفسیر نتایج	۲۳
۴-۱	تصحیح نتایج	۲۳
۴-۲	ترسیم نتایج	۲۴
۴-۳	تحلیل نتایج	۲۵
۴-۳-۱	معادلات	۲۵
۴-۳-۲	روابط تجربی	۳۵
۴-۴	کاربرد نتایج پرسیومتر منارد (M.P.M) در طراحی پی‌ها	۳۷
۴-۴-۱	ظرفیت باربری	۳۷
۴-۴-۲	نشست	۴۶
۵-	منابع و مآخذ	۵۱

۱- کلیات

دستگاه پرسیومتر را در سال ۱۹۳۰کوگلر و شیدیگ به‌کار گرفتند. در سال ۱۹۵۷ منارد با تکمیل این دستگاه کاربرد آن را توسعه بخشید[۵-۱][۱]، به‌گونه‌ای که اکنون یکی از وسایل مهم در آزمایشهای درجا به شمار می‌رود[۵-۵]. یکی از نکته‌های جالب توجه در آزمایش پرسیومتری، اندازه‌گیری توأم پارامترهای تغییرشکل و مقاومت است[۵-۵]. اساس کار بر انبساط یک استوانه بلند غشایی که در داخل گمانه قرار گرفته و می‌توان تغییرات فشار وارده و بنابرآن تغییر حجم (شعاع) غشا را در حین پیشرفت آزمایش اندازه‌گیری کرد، استوار است.

اختلاف اساسی بین انواع پرسیومترها بر نحوه قرارگرفتن آنها در گمانه می‌باشد. پرسیومترهای متداول سه‌گونه هستند:

- در داخل گمانه‌های آماده مستقر می‌شوند (P.D.P)[۲]،
- خود حفار هستند (S.B.P)[۳]،
- با فشار در زمین فرو می‌روند، (P.I.P)[۴].

شکل (۱-۱) شمای دستگاه پرسیومتر را نشان می‌دهد که شامل سه قسمت کلی است:

- واحد کنترل، که انبساط و فشار غشا را اندازه‌گیری می‌کند،
- محفظه استوانه‌ای انعطاف‌پذیر که با فشار سیال درون آن، باد می‌کند،
- لوله‌های رابط بین واحد کنترل و محفظه.

پارامترهای دست یافتنی از این آزمایش به قرار زیر است :

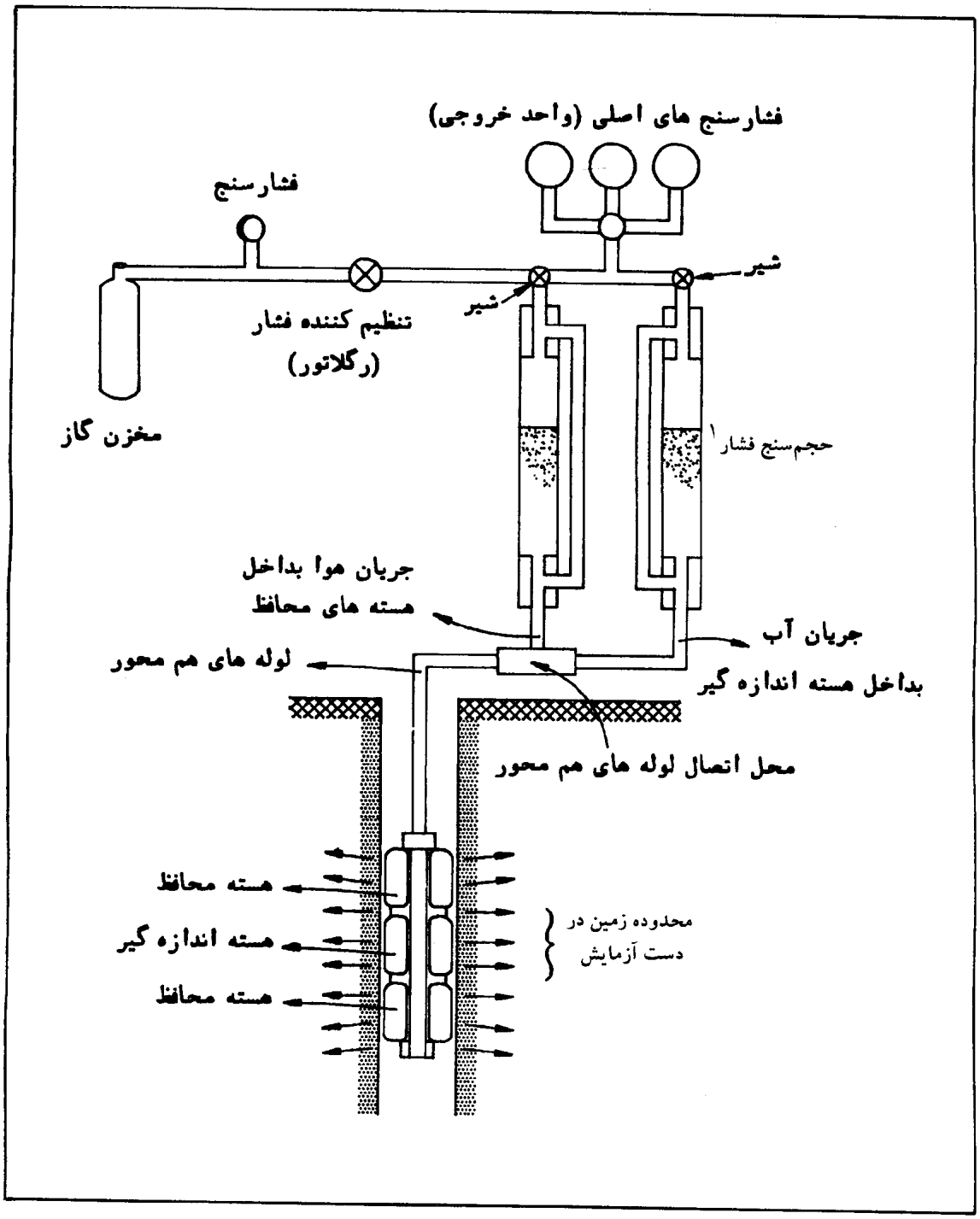
- مدول تغییر شکل
- مقاومت : الف) مقاومت زهکشی نشده برای رسها (C_u) و سنگهای ضعیف
  ب) زاویه مقاومت برشی مؤثر در ماسه و رس، ϕ'
  پ) زاویه انبساط در ماسه‌ها، ψ
- تنش کل افقی درجا، σ_{ho}
- ضریب تحکیم افقی، C_h

۱- منظور از عدد داخل کروشه شماره مرجع مورد استفاده می‌باشد.

2- Predrilled pressuremeter (P.D.P)

3- Self-boring pressuremeter (S.B.P)

4- Push-in pressuremeter (P.I.P)



۱

شکل شماره (۱-۱) - شمای دستگاه پرسیومتر

1- Pressure Volumeter

نوع خاصی از پرسیومترها که با فشار زیاد کار می‌کنند و برای زمینهای بسیار سخت و یا سنگها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دیلاتومتر[1] معروف بوده که اساس عملکرد آنها بر پایه همین پرسیومترهای معمولی است.

عوامل مؤثر در یک آزمایش پرسیومتری عبارتند از :

- روش حفاری،
- روش قراردادن محفظه (سوند) اندازه‌گیری (روشهای استقرار)،
- روش انجام آزمایش،
- روش تحلیل نتایج.

سه مورد اول به کمک راهنما یا دستورالعمل قابل دسترسی است، مورد سوم علاوه بر این به تجربه کافی نیز نیاز دارد و مورد آخر ضمن دربرداشتن خصوصیات یاد شده، همراه با قضاوت مهندسی و استفاده از نتایج آزمایشهای دیگر، مانند آزمایش نفوذ استاندارد (S.P.T[2]) است که کمک شایان توجهی به این مورد می‌نماید.

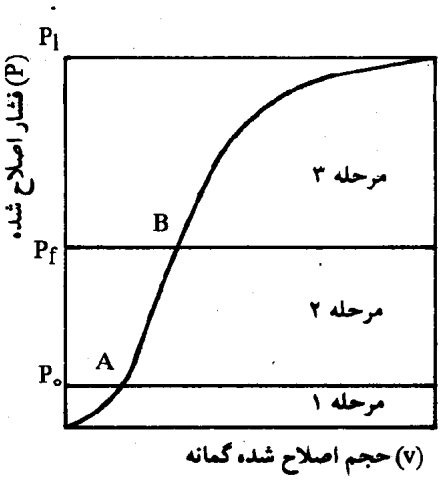
پیش از به‌کارگیری دستگاه پرسیومتر برای آزمایش درجا، به منظور حذف بعضی خطاها دستگاه احتیاج به هم‌سنجی[3] دارد. هم‌سنجی در واقع یک مشابه‌سازی آزمایش واقعی است که با دقت شناخته شده و با شرایط مرزی مشخص صورت می‌گیرد. به‌طوری که پس از آن ، سیستم دستگاه ثبت، قابل کنترل می‌گردد. در صورتی که دستگاه هم‌سنجی نگردد، فشار و حجم یا شعاع قرائت شده فاقد دقت لازم بوده، تفسیر نتایج همراه با خطا خواهد بود و سرانجام بدون ارزش تلقی می‌گردد. عوامل مؤثر در پدیدآمدن این خطاها عبارتند از:[۱-۵]

- تغییر شکل پس‌ماند[4] غشاءها و محفظه
- وضعیت نسبی دستگاه اندازه‌گیری نسبت به محفظه
- شرایط محیطی و موقعیت سفره آبدار
- انبساط لوله‌های لاستیکی دستگاه و ...

از مهمترین مواردی که بر نتایج آزمایش پرسیومتری تأثیر می‌گذارد، روش حفر گمانه و نحوه قراردادن محفظه اندازه‌گیر در آن است. از نظر کلی به حداقل رساندن دستخوردگی دیواره‌های گمانه بسیار با اهمیت است.

پس از انجام آزمایش، در یک گمانه آماده، فشارها و متناظراً حجم‌ها یا شعاعهای متناظر آنها اندازه‌گیری و ثبت می‌گردند. در گذشته فشارها در روی محور افقی و حجم‌ها در روی محور قائم رسم می‌شدند، ولی امروزه چون با نگرش رفتاری به مسأله برخورد می‌شود بهتر است این محورها جابه‌جا شوند[۵-۵]. در شکل (۱-۲) یک نمونه از این منحنی‌ها نشان داده شده است. در این شکل سه مرحله مشخص دیده می‌شود:

1- Dilatometer
2- Standard Penetration Test
3- Calibration
4- Residual



شکل شماره (۱-۲) - شکل جدید ارائه منحنی حجم برحسب فشار (اصلاح شده)

در مرحله ۱ (تا نقطه A) تعادل بین مجموعه دستگاه، محفظه و زمین برقرار می‌شود، به‌طوری‌که غشای محفظه به‌طور کامل به دیواره گمانه چسبیده و مقدار فشار به حالت قبل از حفاری (P_o) در زمین طبیعی می‌رسد. در مرحله ۲ (تا نقطه B) رفتار کشسان و تقریباً خطی بوده و می‌توان «ضریب تغییرشکل» یا «ضریب پرسیومتری» را تعریف کرد. مقدار فشار در نقطه B، «فشار خزش» (P_f) خوانده می‌شود. مرحله ۳ شروع رفتار خمیری بوده و در این مرحله تغییرشکلها افزایش یافته و به مقدار قابل توجهی می‌رسند که سرانجام مرحله «تعادل حدی» حاصل می‌شود. مقدار مجانب در این نقطه «فشار حدی» (P_l) نامیده می‌شود. در شرایطی که منحنی رسم شده دارای یک خط مجانب قابل پذیرش نباشد، به‌طور قراردادی مقدار فشار حدی، معادل فشاری که منجر به دو برابر شدن حجم حفره گردد، انتخاب می‌شود[۱-۵].

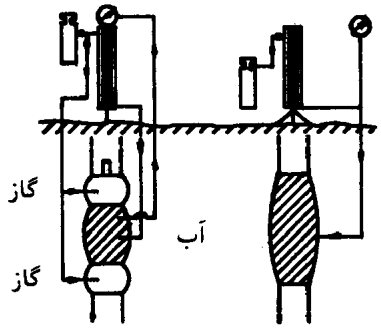
۲- انواع پرسیومتر

۲-۱ پرسیومترهای پیش حفاری شده (P.D.P)

پرسیومترهای پیش حفاری شده آنهایی هستند که در گمانه‌های آماده شده قرار می‌گیرند. متداول‌ترین نوع این پرسیومتر، پرسیومترهای منارد (M.P.M)[1] است. این پرسیومترها در تمام خاکها و سنگهای ضعیف قابل استفاده می‌باشند. با قراردادن محفظه (سوند) آن در درون یک غلاف شیاردار، می‌توان از آنها در درون سازندها[2] استفاده نمود. شکل (۲-۱) دو نوع پرسیومتر پیش حفاری شده با محفظه تک هسته‌ای و سه‌هسته‌ای را نشان می‌دهد.

1- Menard pressuremeter

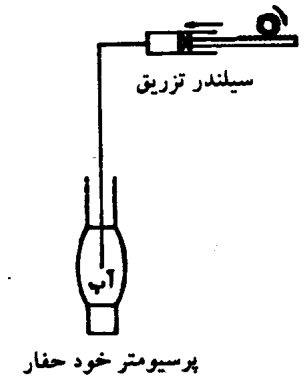
2- Formation



شکل شماره (۲-۱) - پرسیومترهای پیش حفاری شده (P.D.P) برای آزمایش با کنترل تنش

۲-۲ پرسیومترهای خودحفار (S.B.P)

پرسیومترهای خود حفار آنهایی هستند که خود دستگاه، گمانه را نیز حفر می‌کند. نوعی از این دستگاه که برای سنگهای ضعیف کاربرد دارد به R.S.B.P[1]، معروف است (شکل ۲-۲).



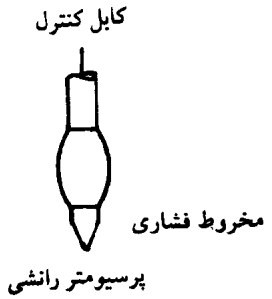
شکل شماره (۲-۲) - پرسیومتر خود حفار (S.B.P) برای آزمایش با کنترل کرنش

۲-۳ پرسیومترهای رانشی (P.I.P)

پرسیومترهای رانشی به پرسیومترهایی گفته می‌شود که با فشار به داخل زمین رانده می‌شوند. در بعضی موارد

1- Rock Slef Boring Pressuremeter

پرسیومتر منارد با فشار به داخل زمین رانده می‌شود، ولی در این گروه قرار نمی‌گیرد. این دستگاهها دارای انـواع : قیفی، جابجایی[1] کامل و محفظه تنشی[2] هستند. به‌طورکلی از این دستگاهها در زمینهای نرم و سست استفاده می‌شود [(شکل شماره (۲-۳)].



شکل شماره (۲-۳) - پرسیومتر رانشی (P.I.P) برای آزمایش با کنترل کرنش

1- Full displacement

2- Stress probe

جدول شماره (۲-۱) انواع پرسیومترها را از نظر نصب و سیستم اندازه‌گیری نشان می‌دهد:

جدول شماره (۲-۱) [۶-۵] انواع پرسیومترها از دیدگاه نصب و سیستم اندازه‌گیری

نوع				
P.D.P	پرسیومتر پیش حفاری شده : - محفظه سه هسته‌ای به نام M.P.M - محفظه تک هسته‌ای			
S.B.P	پرسیومتر خود حفار : - محفظه تک هسته‌ای			
P.I.P	پرسیومتر رانشی : - محفظه تک هسته‌ای			
سیستم اندازه‌گیری	فشاری		تغییر مکانی	
	وارد شده به‌وسیله	اندازه‌گیری شده	امتداد داده شده	اندازه‌گیری شده
	مایع (L) گاز (G)	از سطح (S) از پایین حفره (D)	تغییرات حجم (V) تماس مکانیکی (A یا CB) [۲] در جهت یک قطر (۱D) در جهت n شعاع (nR)	از سطح (S´) سراسری [۱] اندازه‌گیرهای کرنش (S.G) ترانسدیوسر خطی (L.V.D.T) پتانسیل سنج (POT) [۳] ونیم اثر (H)

بعضی از انواع P.D.P و S.B.P در شکل شماره (۲-۴) نشان داده شده است. در این شکل :

الف) پرسیومترهای منارد نوع G (GA, GC, GB) : در پرسیومتر GB، چرخش گاز تنها برای منبسط کردن آب داخل هسته‌ها صورت می‌گیرد.

ب) M.P.M با تیوپ شیاردار

پ) اویوالاستیمتر [۴] ۱۰۰ با سیستم کولیس

ت) سیستم اندازه‌گیری (H.P.D) [۵] انستیتو کمبریج

ث) پرسیومتر خود حفار فرانسوی که با غشای هیدرولیکی محافظت می‌شود

ج) اساس کامکومتر [۶] (S.B.P)

چ) جزییات بازوی [۷] حساس در پرسیومتر خود حفار کمبریج

ح) پرسیومتر خود حفار برای سنگهای ضعیف

۱- هنگامی که جابجایی به‌صورت الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود، یک واحد خروجی داده‌ها (معمولاً به شکل عددی) وجود دارد و جزو واحد نمایشگر به حساب می‌آید.

۲- تماس مکانیکی برای یافتن جابجایی می‌تواند به‌وسیله بازوهای حساس (نوع A) و یا به‌وسیله میله‌های لغزشی (معروف به CB) انجام گیرد.

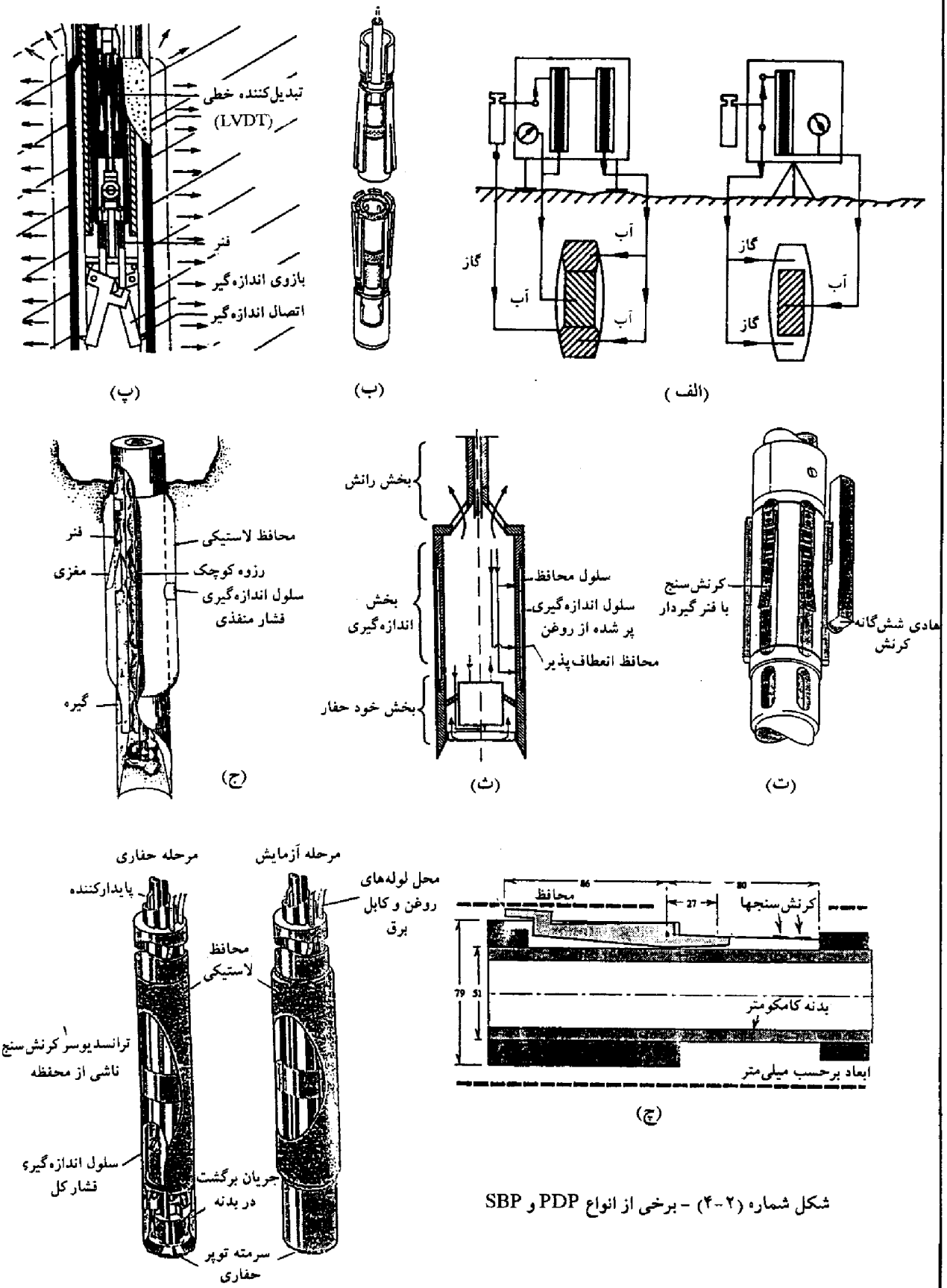
3- Potentiomètre (فرانسوی)

4- Oyo (Elastimeter)

5- High Pressure Dilatometer

6- Camkometer

7- Palpeur (فرانسوی)



شکل شماره (۲-۴) - برخی از انواع PDP و SBP

1- Transeducer

۳- دستور کار

۳-۱ دامنه کار

۳-۱-۱ این دستور کار، روش آزمایش پرسیومتری در خاکها را تشریح می‌کند. آزمایش پرسیومتری، یک آزمایش تنش - کرنش درجا است که درون گمانه صورت می‌گیرد و مبتنی بر اندازه‌گیری افزایش حجم شعاعی حفره آزمایش می‌باشد. برای به‌دست‌آوردن نتایج قابل اعتماد، دستخوردگی حداقل دیواره گمانه یکی از شاخصهای کلیدی این آزمایش است.

۳-۱-۲ این دستور کار، روش حفر گمانه، نحوه قراردادن ویا حرکت پرسیومتر در گمانه‌های حفر شده را در خاکهای دانه‌ای و چسبنده شامل می‌شود. این دستور کار مربوط به آزمایش در سنگها [۱] نیست. دانستن نوع خاک در آزمایش پرسیومتری به دو منظور ضرورت دارد :

۱- تعیین روش حفر گمانه و محل استقرار محفظه فشار پرسیومتر (سوند) [۲]

۲- به‌دست آوردن نتایج منطقی و تفسیر نتایج آزمایش

۳-۱-۳ این دستور کار برای پرسیومترهای خودحفار (S.B.P) نبوده و به کاربرد پرسیومترهای مستقر در گمانه‌های آماده محدود می‌شود. این پرسیومترها عمدتاً از نوع منارد (M.P.M) هستند. این دستور کار همچنین پرسیومترهایی راکه با رعایت دستورالعملهای سازنده آن به داخل زمین کوبیده شده‌اند، در برمی‌گیرد.

۳-۱-۴ در این دستور کار دو روش زیر توصیه می‌شود :

- روش (الف) - روش افزایش گام فشار یکسان (آزمایش با کنترل تنش)
- روش (ب) - روش افزایش گام حجم یکسان (آزمایش با کنترل تغییرشکل)

۳-۱-۵ تمام واحدها در دستگاه متریک در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۱-۶ این دستور کار، انواع خاک، روشهای گوناگون اجرا و انواع مختلف دستگاه را در برمی‌گیرد. نظر به این‌که وجود بخش درشت دانه در کاربرد این آزمایش ایجاد محدودیت می‌نماید، لذا باید به بافت خاک و میزان بخش درشت دانه و اندازه آن در خاک مورد آزمایش توجه کرد. بهرحال در هر آزمایش، اطمینان از همگنی بارگذاری بر روی اسکلت خاک لازم است تا بتوان نتایج بدست آمده را به مجموعه توده خاکی موردنظر تعمیم داد.

یادآور می‌شود که با این دستور کار نمی‌توان هر مشکلی را با اطمینان حل نمود. این مسئولیت به عهده مهندس ژئوتکنیک است که با انتخاب یک روش مناسب و مطمئن، آزمایش را انجام داده و نتایج را به‌طور منطقی تحلیل و تفسیر نماید.

۱- آزمایش مربوط به سنگ، دیلاتومتری است که به‌طور جداگانه به آن پرداخته می‌شود.

2- Probe

۳-۲ روش آزمایش

۳-۲-۱ گمانه آزمایش را می‌توان هم از طریق حفاری و هم به وسیله برخی از نمونه‌گیرها ایجاد کرد. در شرایط خاصی، محفظه پرسیومتر در داخل یک لوله جدار به درون زمین کوبیده می‌شود. ابزار مختلف و روشهای گوناگون که برای ایجاد حفره آزمایش به‌کار می‌رود، سبب دستخوردگی‌های متفاوت می‌شود. روشهای توصیه شده در یک محل، بستگی به نوع خاک و شرایط محلی دارد. انتخاب مناسب وسایل و روش، در ادامه این دستور کار ذکر خواهد شد.

توضیح شماره ۱ : توصیه می‌شود که چندین تکنیک حفاری در محل به‌کار گرفته شود تا مناسبترین روش حفر محفظه آزمایش به‌دست آید.

۳-۲-۲ آزمایش پرسیومتری براساس قراردادن یک محفظه استوانه‌ای شکل درون یک گمانه آماده استوار است که حین افزایش حجم آن (منبسط شدن)، تغییرات حجم و فشار اندازه‌گیری می‌شود. محفظه (سوند) در روش (الف) با افزایش گامهای یکسان فشار و در روش (ب) با افزایش گامهای یکسان حجم، قرار گرفته و آزمایش با رسیدن خاک به حد تسلیم وتغییرشکلهای بزرگ، پایان می‌پذیرد. حد نهایی فشار از روی آخرین قرائت‌ها تخمین زده می‌شود و ضریب پرسیومتری از قرائت تغییرات فشار - حجم در حین آزمایش محاسبه خواهد شد. یکی از مهمترین مسایلی که باید به آن توجه شود این است که قطر حفره ایجاد شده باید بسیار نزدیک به قطر محفظه باشد، زیرا در این صورت می‌توان مطمئن شد که تغییرات حجم گمانه به‌طور مناسبی صورت می‌گیرد. سیستم اندازه‌گیری دستگاه یا از نوعی است که تغییرات حجمی راکه به‌وسیله یک مایع تراکم‌ناپذیر ایجاد شده اندازه‌گیری می‌کند و یا از نوعی است که تغییرات قطر استوانه را ابزار حساسی اندازه می‌گیرد. سیستم اندازه‌گیری حجم باید به خوبی محافظت شده و هم‌سنجی گردد تا از عدم دقت در اندازه‌گیری حجم جلوگیری به‌عمل آید. همین‌طور در سیستم اندازه‌گیری قطر، اجزای حساس درون محفظه، باید به اندازهٔ کافی به کوچکترین تغییرمکانها حساس باشند.

توضیح شماره ۲ : این دستور کار برای دستگاههایی است که تغییرات حجم در آزمایش را ثبت می‌نمایند. برای سیستم اندازه‌گیری قطر محفظه، روشهای ارزیابی دیگری در توضیحات شماره ۱۲ و شماره ۱۳ ذکر شده‌اند.

۳-۳ کاربرد

۳-۳-۱ این آزمایش پاسخ تنش - تغییرشکل نسبی یک خاک را در محل، روشن می‌سازد. ضرایب پرسیومتری و فشار حدی، برای استفاده در تحلیلهای ژئوتکنیک و طراحی پی‌ها نیز به دست می‌آید.

۳-۳-۲ نتایج این آزمایش به درجهٔ دستخوردگی خاک که در حین حفاری گمانه و در خلال استقرار محفظهٔ پرسیومتر درون آن ایجاد می‌شود، بستگی دارد. چون دستخوردگی به‌طور کامل نمی‌تواند حذف شود، تفسیر و تحلیل نتایج باید باتوجه به شرایط حفاری صورت پذیرد، این دستخوردگی به‌ویژه در رسهای خیلی نرم و ماسه‌های سست از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۳-۴ هم‌سنجی

دستگاه قبل از هر کاربردی باید تنظیم گردد. این تنظیم برای جبران اتلاف فشار (P_c) و اتلاف حجم (V_c) صورت می‌گیرد.

۳-۴-۱ اتلاف فشار: اتلاف فشار براثر سختی غشای محفظه رخ می‌دهد، زیرا این غشا در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند. برای به‌دست‌آوردن فشار واقعی وارد شده به خاک، تصحیح فشار ضرورت دارد. هم‌سنجی مقاومت غشا به‌وسیله بادکردن محفظه در فضای کاملاً آزاد و در تراز ابزار اندازه‌گیری صورت می‌گیرد.

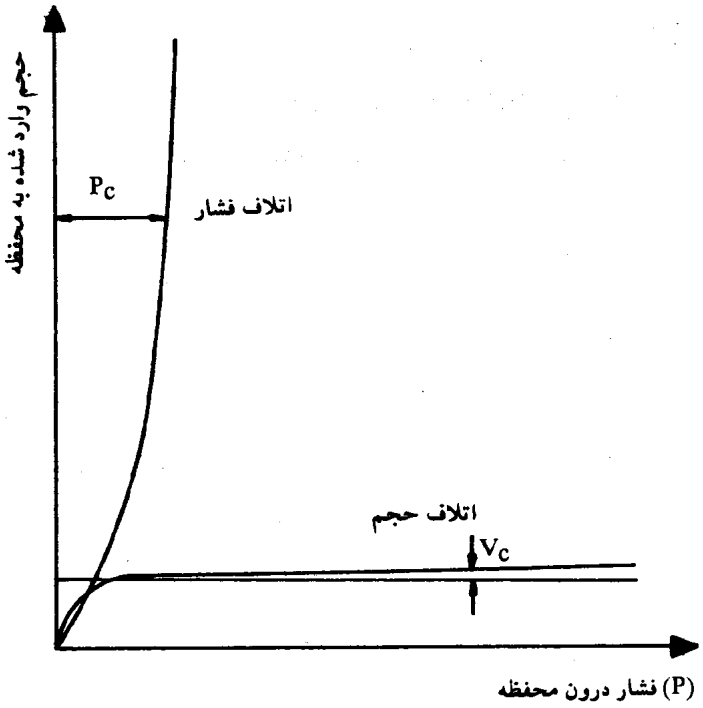
توضیح شماره ۳ : انجام دادن آزمایش پرسیومتری و به‌ویژه هم‌سنجی دستگاه، می‌تواند برای آزمایش‌کننده و دستیاران وی مخاطره‌آمیز باشد. ترکیدن محفظه در روی سطح زمین و یا هنگامی که محفظه در عمق کمی درون گمانه قرار دارد، باعث آسیب می‌شود. این آسیب براثر پرتاب‌شدن نخاله‌ها و تکه‌سنگها می‌تواند به‌وجود آید. برای جلوگیری از آسیب باید پوشش محافظی را روی چشمها و صورت خود قرار داد. توصیه می‌شود هنگام هم‌سنجی، محفظه درون یک سیلندر محافظ قرار گیرد.

مراحل انجام هم‌سنجی غشا به شرح زیر است :

۳-۴-۱-۱ در روش (الف) فشار را در گامهای ۱۰ کیلوپاسکال بالا برده و به مدت ۱ دقیقه ثابت نگهداشته شود و پس از آن حجم ایجاد شده قرائت می‌شود. در صورتی که از روش (ب) استفاده شود، حجم محفظه در افزایشهایی برابر ۵٪ حجم اسمی هسته میانی محفظه باد نشده (V_o) بالا برده می‌شود. افزایش حجم در مدت ۱۰ ثانیه اعمال شده و به مدت یک دقیقه ثابت نگهداشته می‌شود. این گامها را در هر دو روش ادامه داده تا این که به بیشینه اندازه خود برسد. نتایج در مختصات فشار - حجم ترسیم می‌گردد. این منحنی، نمودار هم‌سنجی فشار خواهد بود. فشار تصحیحی، برابر با اتلاف فشار به‌دست آمده از این نمودار برای هر قرائت در حین آزمایش می‌باشد [شکل شماره (۳-۱)].

۳-۴-۱-۲ هر فشار تصحیحی (P_c) از قرائت فشار متناظر در خلال آزمایش باید کسر گردد. بیشینه مقدار P_c باید از ۵۰٪ «فشار حدی» (P_l) کمتر باشد.

۳-۴-۲ اتلاف حجم : اتلاف حجم (V_c) براثر انبساط لوله‌ها و تراکم‌پذیری اجزای دستگاه (شامل سوند و سیال درون آن) ایجاد می‌گردد. برای هم‌سنجی حجم، محفظه را درون یک لوله ضخیم فولادی مستحکم قرار داده و به آن فشار وارد می‌شود. نتایج در مختصات حجم - فشار رسم می‌گردد، این منحنی، نمودار هم‌سنجی حجم می‌باشد. حجم ابتدایی با یک خط مستقیم افقی که از فشار صفر در شکل شماره (۳-۱) شروع می‌شود، به‌دست آمده و حجم اتلافی (V_c) دستگاه برای هر فشار ویژه‌ای با استفاده از منحنی هم‌سنجی قابل دستیابی است [شکل شماره (۳-۱)].



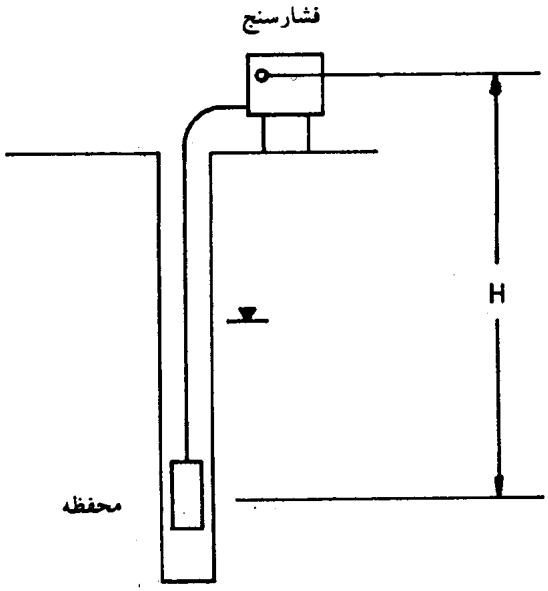
شکل شماره (۳-۱) - منحنی‌های هم‌سنجی اتلاف حجم و فشار

حجم تصحیحی برابر اتلاف حجم (V_c) به‌دست آمده از این نمودار برای هر قرائت در خلال آزمایش است. هر حجم اتلافی باید از قرائت متناظر حین آزمایش کسر گردد. این تصحیح در خاکها نسبتاً کم بوده و در صورتی که کمتر از ۰/۱٪ حجم اسمی هسته میانی محفظه باد نشده (V_o) به ازای هر ۱۰۰ کیلو پاسکال باشد، قابل چشم‌پوشی است ($\frac{V_c}{V_o} \leq$ ۰/۱ ٪). در خاکهای خیلی سخت یا سنگهای سست، این تصحیح با اهمیت بوده و باید در نظر گرفته شود. در هیچ حالتی نباید این تصحیح از V_o ۰/۵٪ به ازای هر ۱۰۰ کیلوپاسکال بیشتر شود. ($\frac{V_c}{V_o} \leq$ ۰/۵٪)

۳-۴-۳ تصحیح تغییرات دما و افت سربار (ارتفاع) به سبب جریان سیال فشار در خاکها همیشه کوچک بوده

و برای آزمایشهای معمولی قابل چشم‌پوشی است. اگر آزمایشها در ژرفای بیش از ۴۵ متر (۱۵۰فوت) انجام شود، روشهای ویژه‌ای برای تصحیح افت سربار لازم است.

۳-۴-۴ فشار هیدرواستاتیک (P_δ) که روی محفظه وارد می‌شود، ناشی از ارتفاع ستون سیال درون دستگاه در هنگام آزمایش است. این فشار با اندازه‌گیری ارتفاع آزمایش (H) و ضرب آن در وزن واحد مایع سیال آزمایش (γ_l) به‌دست می‌آید ($P_\delta = H \times \gamma_l$). این ارتفاع در شکل شماره (۳-۲) نشان داده شده است و فاصله مرکز اندازه‌گیر فشار تا مرکز محفظه را شامل می‌شود. این فشار روی محفظه وجود دارد، ولی با اندازه‌گیرهای فشار ثبت نمی‌گردد. این فشار به فشار قرائت شده از روی وسیله ثبت کننده، افزوده می‌شود.



شکل شماره (۳-۲) - ارتفاع H برای تعیین فشار هیدرواستاتیک درون محفظه

۳-۴-۵ در پرسیومترهای سه هسته‌ای، فشار هسته‌های محافظ (P_G) باید کمتر از فشار واقعی در هسته میانی باشد تا بتوان از اثر محدودیت دو انتها پیشگیری نمود. این فشار از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$P_G = P_R + P_\delta - P_d \qquad (۱-۳)$$

در این معادله :

P_R = فشار قرائت شده روی واحد کنترل، بر حسب کیلوپاسکال

P_δ = فشار هیدرواستاتیک بین محفظه و واحد کنترل، بر حسب کیلوپاسکال

P_d = اختلاف فشار بین هسته‌های محافظ و هسته اندازه‌گیر، برحسب کیلوپاسکال (معمولاً دو برابر فشار حدی غشا)

در زیر فهرستی از فشارهای گاز ومایع برای یک اختلاف فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال = P_d در هر عمق مورد آزمایش، نشان داده شده است [جدول شماره (۳-۱)].

جدول شماره (۳-۱)- فشار جبرانی برای هسته‌های محافظ براساس عمق آزمایش[۳-۵]

عمق آزمایش (H)		فشار مایع حاصل از ارتفاع مایع روی محفظه	کاهش فشار گاز* روی اندازه‌گیر
متر	فوت	P_δ (کیلوپاسکال)	P_d = ۱۰۰ (کیلوپاسکال)
۰	۰	۰	-۱۰۰
۵	۱۷	۵۰	-۵۰
۱۰	۳۳	۱۰۰	۰
۱۵	۵۰	۱۵۰	+۵۰
۲۰	۶۷	۲۰۰	+۱۰۰

* برای حفظ فشار هسته محافظ به اندازه ۱۰۰کیلوپاسکال زیر هسته میانی، این فشارها را به هسته‌های محافظ افزوده (+) یا از آنها کاسته (-) می‌شود.

۳-۵ حفاری

۳-۵-۱ دو شرط برای حفاری صحیح باید مدنظر باشد، اول قطر حفره دارای رواداری مشخص باشد و دوم این‌که استقرار دستگاه و روش حفاری کمترین دستخوردگی را در دیواره گمانه ایجاد کند.

۳-۵-۲ آماده‌سازی گمانه مناسب مهمترین اقدام برای به‌دست‌آوردن یک نتیجه خوب است. شناخت عوامل مؤثر در بروز دستخوردگی کمک شایانی به کاستن این اثر خواهد نمود. این اثرات به صورتهای زیر نمایان می‌گردند:

- ریزش دیواره گمانه
- فرسایش دیواره گمانه
- نرم‌شدگی دیواره گمانه

متناسب با نوع زمین و نحوه حفاری هرکدام از موارد فوق می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.

۳-۵-۲-۱ ریزش دیواره گمانه : در مورد اول استفاده از ابزاری که به حفر درست گمانه کمک کند (مثل مغزه حفاری یا لوله‌هایی که با فشار داخل زمین می‌شوند و ...) مفید می‌باشد. چون این مورد بیشتر در

زمینهای ریزشی اتفاق می‌افتد، توصیه می‌گردد که بلافاصله پس از حفر گمانه آزمایش انجام شود. در خاکهای بسیار ریزشی استفاده از نگهدارنده‌هایی مثل گل حفاری توصیه می‌شود.

۳-۵-۲-۲ فرسایش دیواره گمانه : مورد دوم، فرسایش دیواره گمانه است، که در پاره‌ای از خاکها بیشتر اتفاق می‌افتد و به دلیل تخلیه و بیرون آوردن ذرات حفاری شده ضمن حفاری می‌باشد. استفاده از اوگرهای دستی شاید مناسبترین روش برای به حداقل رساندن دستخوردگی گمانه‌ها باشد، ولی این وسیله فقط امکان کاوشهای کم عمق را مهیا می‌سازد. استفاده از سیالهای شستشویی[1] مقدار فرسایش را خواهد کاست، زیرا با کنترل سرعت و لزجت سیال می‌توان مواد زاید حفاری شده را طوری خارج نمود که آسیب چندانی به دیواره چاه وارد نگردد. هرقدر لزجت سیال بیشتر باشد، سرعت جریان کمتر شده و برعکس. سرعتهای متعارف هوا، آب، گل حفاری و کف[2] که به عنوان سیال حفاری استفاده می‌شوند به ترتیب عبارتند از ۱۰۰۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ متر بر دقیقه.

۳-۵-۲-۳ نرم‌شدگی دیواره گمانه : مورد سوم، نرم‌شدگی دیواره گمانه است که به علت آزادشدن تنش در دیواره گمانه و اعمال آن به سیال داخل چاه و نتیجتاً ایجاد یک مکش در دیواره آن اتفاق می‌افتد. همچنین کاهش تنش مؤثر باعث بادکردگی خاک شده و این مورد را تشدید می‌کند. استفاده از هوا که دارای سرعت زیاد می‌باشد، سبب افزایش این مکش شده و توصیه نمی‌گردد و گل حفاری برتری دارد. یادآوری این نکته لازم است که باقی‌ماندن گل حفاری درون چاه برای مدت زیاد می‌تواند آثار نامطلوبی روی آزمایش پرسیومتری بگذارد. این زمان باید تا آن‌جایی که ممکن است کوتاه باشد.

توضیح شماره ۴ : خاکهای درشت دانه به دلیل ریزشی بودن باید با لوله‌های شیاردار حفاری و یا محفظه با فشاردادن یا لرزاندن به داخل زمین رانده شود. در هر دو صورت خاک دستخورده خواهد شد و به‌دلیل درجه بالای این دستخوردگی، نتایج پرسیومتری اعتبار لازم را نخواهد داشت. بنابراین آزمایش پرسیومتری در خاکهای شنی از دقت کمتری برخوردار بوده و توصیه می‌شود در این موارد از نتایج آزمایش به عنوان شاخص مقایسه‌ای و یا در کنار نتایج دیگر آزمایشها استفاده گردد[۵-۵].

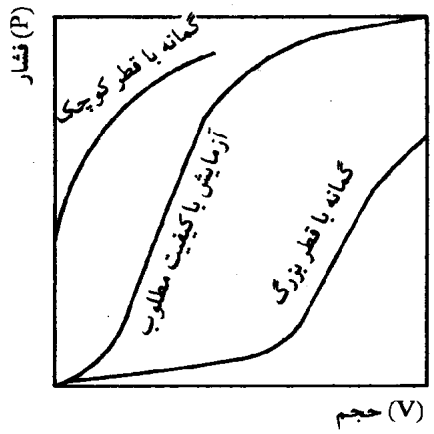
۳-۵-۳ شرایط حفره آزمایش

۳-۵-۳-۱ پس از حفر صحیح گمانه که اولین هدف آن به حداقل رسانیدن درجه دستخوردگی است، اطمینان از دایره‌ای بودن مقطع گمانه و نهایتاً کنترل قطر آن است. توصیه می‌شود که نسبت قطر حفره، D_H، به قطر محفظه، D_{PM}، از نابرابری زیر پیروی کند[۵-۵]:

$$۱/۰۳ < \frac{D_H}{D_{PM}} < ۱/۲ \quad [۵-۳]$$

1- Flushing fluids 2- Foam

لازم به یادآوری است که اگر بتوان $\frac{D_H}{D_{PM}} < ۱/۱$ را تأمین نمود، نتیجه مطلوبتری به‌دست می‌آید. در غیر این صورت کیفیت آزمایش نامطلوب خواهد شد. شکل شماره (۳-۳) نتایج سه آزمایش با کیفیت مناسب، با قطر حفره کوچکتر و بزرگتر از حد لازم را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۳-۳)- مقایسه آزمایش با قطر کوچکتر یا بزرگتر از حد لازم

۳-۵-۳-۲ قطر مته حفاری

۳-۵-۳-۲-۱ برای تعیین قطر مته حفاری گمانه، لازم است موارد زیر مورد توجه قرار گیرند :

الف) قطر حفره با توجه به قطر محفظه پرسیومتر،

ب) بیش حفاری گمانه براثر لرزش ابزار حفاری و شسته شدن دیواره در اثر جریان گل حفاری در خاکهای دانه‌ای متوسط تا درشت،

پ) کاهش عوامل دستخوردگی (ریزش، فرسایش و نرم‌شدن) دیواره گمانه به ویژه کاهش مقطع گمانه پس از خروج ابزار حفاری و جاگذاری محفظه. این تغییر شکل با استفاده از گل حفاری کاهش می‌یابد.

۳-۵-۳-۲-۲ پس از انتخاب دستگاه (پرسیومتر)، مته‌ها یا سرمته‌های با اندازه‌های مختلف باید در دسترس باشد تا حفره مناسب محفظه حفر گردد.

۳-۵-۳-۲-۳ در انتخاب ابزار حفاری باید توجه نمود دستگاهی انتخاب گردد که دیواره حفره تا حد امکان صاف و در سراسر طول گمانه با قطر یکنواخت (D_H) حفاری گردد.

توضیح شماره ۵ : اگر تغییرات D_H در سراسر طول گمانه قابل ملاحظه باشد، یا گمانه غیر استوانه‌ای حفر شده باشد، کیفیت آزمایش کاهش خواهد یافت.

۳-۵-۴ ابزار و روشهای مورد استفاده در آماده‌سازی حفره آزمایش :

۳-۵-۴-۱ به‌طورکلی هر روش و ابزاری که بتواند شرایط بندهای (۳-۵-۱) تا (۳-۵-۳) را تأمین کند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۵-۴-۲ روشهای آماده‌سازی حفره آزمایش :

۳-۵-۴-۲-۱ حفاری دورانی[1] : در حفاری دورانی معمولاً در رسها از سرمته‌های نوع انگشتی و در ماسه‌ها و شنها از نوع غلتکی[2] استفاده می‌گردد.

حفاری بدین طریق صورت می‌گیرد که فشار قائم کم معادل ۲۰۰ کیلوپاسکال (۳۰ پوند بر اینچ مربع) روی ابزار حفاری وارد می‌آید. مته با دور آهسته (کمتر از ۶۰ دور در دقیقه) شروع به دوران نموده و یک سیال حفاری با سرعت پایین [کمتر از ۱۵ لیتر بر دقیقه (۴ گالن در دقیقه)]، به درون گمانه با تخلیه محوری تحتانی جریان می‌یابد. به نحوی که باعث بروز حداقل دستخوردگی جدار گمانه شود. سیال حفاری باید دارای لزجت کافی برای خارج‌نمودن ذرات حفاری باشد.

۳-۵-۴-۲-۲ لوله نمونه‌گیر[3] : نمونه‌گیر جدار نازک باید استاندارد بوده و طول آن به اندازه‌ای باشد که حفره تحت فشار رانش یکباره به‌وجود آید. اگر لوله مسدود شود و یا عمل موفقیت‌آمیز نباشد، روشهای دیگری باید در نظر گرفته شود. از این رو لوله به آهستگی عقب کشیده می‌شود، زیرا در غیر این صورت به‌دلیل مکشی که ایجاد می‌گردد، احتمال دستخوردگی جداره افزایش می‌یابد. اگر از نمونه‌گیر جدار ضخیم استفاده می‌شود، لبه برنده نمونه‌گیر باید به سمت جداره گمانه باشد، زیرا در غیر این صورت در حین حفاری، بر جداره گمانه تنش وارد شده و جداره دستخورده تلقی می‌شود.

۳-۵-۴-۲-۳ اوگر ماشینی[4] : یک اوگر به طول ۱/۵۲ متر (۵ فوت) به تنهایی به‌کار می‌رود. قطر سر برنده مته باید کمی بزرگتر از قطر بدنه مارپیچ باشد زیرا این امر موجب جلوگیری از تماس با دیواره گمانه می‌شود. پس از رسیدن به تراز موردنظر، اوگر به هنگام بیرون‌کشیدن برخلاف جهت چرخانده می‌شود. چرخش و فشار یکنواخت، عواملی هستند که مانند بند (۳-۵-۴-۲-۱) در عمل حفاری اعمال می‌شوند.

۳-۵-۴-۲-۴ اوگر دستی[5] : اوگر نوع ایوان[6] با کمک یک پمپ دستی و یا بدون آن برای تزریق گل حفاری از نوک اوگر در محیطهای نرم و کم عمق به‌کار برده می‌شود.

1- Rotary Drilling
2- Roller bit
3- Tube Sampling
4- Continuous Flight Augering
5- Hand Augering
6- Iwan

توضیح شماره ۶ : کاربرد اوگر دستی برای اعماق پایینتر از ۶ متر (۲۰ فوت) دشوار بوده و از آن برای کاوشهای کم‌عمق استفاده می‌گردد.

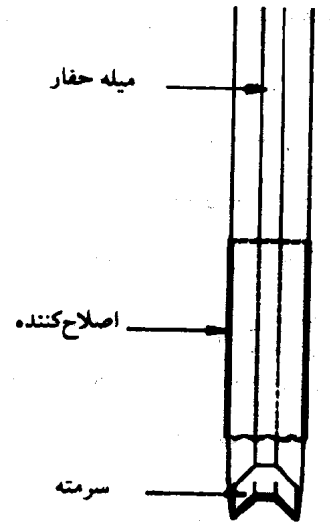
۳-۵-۴-۲-۵ راندن یا لرزاندن نمونه‌گیر [1] : نمونه‌گیر دوکفه‌ای را می‌توان با لرزاندن درون خاک راند.

۳-۵-۴-۲-۶ حفاری مغزه‌گیری [2] : این حفاری به کمک یک نمونه‌گیر استوانه‌ای توخالی (کوربارل [3]) صورت می‌گیرد. این روش در زمینهای سخت و متراکم کاربرد دارد.

۳-۵-۴-۲-۷ حفاری ضربه‌ای - دورانی [4] : حفاری ضربه‌ای - دورانی به کمک فشار باد یا فشار هیدرولیک با مته‌های تخلیه تحتانی انجام می‌شود. خارج‌کردن زواید حفاری در سازندهای خشک به کمک هوای فشرده و در سازندهای مرطوب توسط گل حفاری امکان‌پذیر است. به کمک این روش می‌توان در مصالح سخت نیز حفاری نمود.

۳-۵-۴-۲-۸ حفاری با گمانه پیشتاز [5] : یک گمانه پیشتاز با قطر کوچکتر از محفظه پرسیومتر حفر می‌شود. سپس از طریق فشاردادن یا راندن یک نمونه‌گیر با قطر مناسب به درون حفره، قطر آن با توجه به بند شماره (۳-۵-۴-۲-۲) اصلاح می‌شود.

۳-۵-۴-۲-۹ حفاری با گمانه پیشتاز و اصلاح همزمان : یک گمانه پیشتاز با قطر کوچکتر از محفظه پرسیومتر حفر می‌شود. همزمان با حرکت مته، یک استوانه نازک توخالی که روی میله حفاری بالاتر از مته قرار دارد، کار اصلاح قطر حفره را انجام می‌دهد [شکل شماره (۳-۴)].



شکل شماره (۳-۴)- آماده‌سازی یک گمانه آزمایش با روش حفاری با گمانه پیشتاز و اصلاح همزمان

1- Driving or Vibrodriving a Sampler

2- Core Drilling

3- Core barrel

4- Rotary percussion

5- Pilot Hole Drilling

۳-۵-۴-۲-۱۰ راندن، لرزاندن یا فشاردادن یک لوله شیاردار : لوله شیاردار معمولاً برای محافظت از محفظه پرسیومتر هنگام عمل راندن، لرزاندن و یا فشاردادن آن به درون خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. لوله شیاردار [شکل شماره (۲-۴- ب)] یک لوله فولادی است که، یک سری شیار طولی (معمولاً ۶ عدد) امکان انبساط جانبی آن را فراهم می‌کند. پس از این‌که محفظه درون آن قرار گرفت می‌توان مجموعه را با راندن، لرزاندن یا با فشار در عمق آزمایش قرار داد. این روش یک روش جابجایی کامل بوده و تنها هنگامی باید استفاده شود که روشهای غیر جابجایی قابل استفاده نیستند. با این لوله قبل از شروع آزمایش، می‌توان محفظه (سوند) را هم‌سنجی نمود.

۳-۵-۵ انتخاب روشهای آماده‌سازی گمانه :

۳-۵-۵-۱ انتخاب مناسب یکی از روشهای یاد شده در بالا بستگی به نوع خاک مورد آزمایش دارد. عوامل مؤثر خاک عبارتند از :

۳-۵-۵-۱-۱ دانه‌بندی

۳-۵-۵-۱-۲ خاصیت خمیری (پلاستیسیته)

۳-۵-۵-۱-۳ مقاومت

۳-۵-۵-۱-۴ درجه اشباع

۳-۵-۵-۲ جدول شماره (۲-۲) راهنمای مقدماتی برای انتخاب روش آماده‌سازی گمانه در انواع خاکهای طبقه‌بندی شده طبق بندهای (۳-۵-۵-۱-۱) تا (۳-۵-۵-۱-۴)، می‌باشد لیکن این جدول تمام روشهای ممکن آماده‌سازی یا استقرار محفظه را پوشش نمی‌دهد، و تنها یک راهنما برای انتخاب روشهای حفاری می‌باشد.

۳-۶ روش آزمایش

۳-۶-۱ حفاری گمانه طبق بند (۳-۵) انجام می‌شود.

۳-۶-۲ حفاری تا رسیدن به تراز موردنظر ادامه یافته و از مواد حفاری زدوده می‌شود.

۳-۶-۳ قبل از این‌که محفظه درون حفره قرار گیرد، حجم V_o با دقت تعیین می‌شود. V_o حجمی است که قسمت اندازه‌گیر محفظه (هسته میانی) در حالت باد نشده در فشار جو دارد. سپس در حالتی که دستگاه در فشار جو قرار دارد، مدارها از هوا خالی شده و کلیه اندازه‌گیرها روی صفر تنظیم می‌شود. ضمن جلوگیری از هر تغییر اضافی در حجم مدار اندازه‌گیری، مدار حجم بسته می‌شود. آنگاه محفظه تا عمق لازم پایین برده می‌شود. عمق آزمایش تا وسط محفظه پرسیومتر انتخاب می‌شود.

جدول شماره (۳-۲)- راهنمای مقدماتی انتخاب روشهای آماده‌سازی گمانه و گزینش ابزار برای آزمایش پرسیومتری [۶-۵]

نوع خاک	روش حفاری	اوگر دستی	اوگر دستی[۱] همراه باگل حفاری	نمونه‌گیر[۲] حفاری	حفاری مغزه‌گیری	حفاری ضربه‌ای -دورانی	نمونه‌گیر[۳] فشاری با لوله شیاردار	حفاری[۴] با آب	نمونه‌گیر[۵] فشاری	گمانه پیشتاز[۶] همـــراه با نمونه‌گیری‌فشاری	گمانه پیشتاز[۷] همراه با اصلاح جدار	اوگر (بغل‌بری)
	نرم	C	A	C	C	C	C	BE	BE	B	B	C
خاکهای رسی	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 لای‌دار	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 شن‌دار و شن ماسه‌دار در زیر تراز آب	سست	D	D	C	D	B	B	B	D	D	D	D
	متراکم	D	D	C	D	B	AF	C	D	D	D	C
سنگ هوازده		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.

۱- Hand auger with mud
۲- Driven Sampler
۳- Driven slotted tube
۴- Drilling fishtail
۵- Pushing Sampler
۶- Pilot hole + Pushing Sampler
۷- Pilot hole + Shaving

۳-۶-۴ هنگامی که از روش "افزایش فشار با گام یکسان" استفاده می‌شود، پس از استقرار محفظه، فشار در واحد کنترل در گامهای یکسان افزایش داده می‌شود. هر افزایش فشار معادل فشاری است که حجم محفظه تا حدود V_0 $\frac{1}{4}$ افزایش می‌یابد. به‌طور معمول گامهای افزایش برای آزمایش در خاکها معمولاً برابر ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ یا ۲۰۰ کیلوپاسکال انتخاب می‌گردند. گامهای خیلی کوچک، مدت آزمایش را بسیار بلند می‌کند و گامهای خیلی بزرگ موجب کاهش دقت نتایج می‌شود. گامهای فشار باید طوری تعیین شوند که حدود ۷ تا ۱۰ گام افزایش بار به‌دست آید.

۳-۶-۵ هنگامی که از روش "افزایش حجم با گام یکسان" استفاده می‌شود، پس از استقرار محفظه، حجم در گامهای مساوی افزایش داده می‌شود. هر افزایش حجم معادل ۰/۰۵ تا ۰/۱ حجم V_0 می‌باشد. این افزایشها تا رسیدن به ظرفیت حدی دستگاه ادامه می‌یابد.

۳-۶-۶ برای هر دو روش، قرائتها ۳۰ ثانیه و ۱ دقیقه پس از گامهای افزایش فشار و حجم انجام می‌گیرد. قرائت حجم با دقت ۰/۲ V_0٪ و قرائت فشار با دقت ۵٪ فشار حدی باید ثبت گردد.

۳-۶-۷ همین که آزمایش به آخرین گام خود رسید [موارد (۳-۶-۴) و (۳-۶-۵)]، فشار درون محفظه کاهش داده شده و به حجم اولیه (V_0) رسانده می‌شود و سرانجام سوند از گمانه خارج می‌گردد.

۳-۶-۸ این آزمایش را می‌توان در یک یا چند چرخه بارگذاری - باربرداری در محدوده کشسان اجرا کرد. اگر از پرسیومتر با محفظه سه هسته‌ای استفاده می‌شود، لازم است فشار درون هسته‌های محافظ دقیقاً کنترل گردد تا قرائتهای بیانگر حجم کاسته شده مشخص شود.

توضیح شماره ۷ : آزمایش با کنترل تغییرشکل نسبی نیز می‌تواند اجرا شود. به این ترتیب که حجم محفظه را در یک نرخ ثابت، افزایش داده و فشار متناظر آن را اندازه‌گیری نمود. این روش در شرایط خاصی کاربرد دارد و این دستور کار در مورد آن قابل اجرا نیست. نتایج آزمایش با کنترل تغییرشکل نسبی، نسبت به روشهای شرح داده شده در این دستور کار ممکن است متفاوت باشد.

۳-۶-۹ فاصله و توالی آزمایش :

۳-۶-۹-۱ فاصله میان آزمایشهای مجاور (مرکز به مرکز محفظه) از ۱/۵ برابر طول قسمت قابل بادشدن محفظه نباید کمتر باشد. معمولاً این فاصله از ۰/۹ تا ۳ متر (۳ تا ۱۰ فوت) تغییر می‌کند.

۳-۶-۹-۲ در خاکهای نرم، سست و حساس[1] عمق حفاری باید کمی بیشتر از عمق موردنظر برای آزمایش باشد. این اختلاف باید به اندازه‌ای باشد که ذرات حفاری ته‌نشین شده در کف گمانه مزاحمتی برای انجام آزمایش ایجاد نکند.

۳-۶-۹-۳ در خاکهای سخت و سنگهای هوازده‌ای که هوازدگی آنها به سبب قرارگرفتن در معرض عوامل طبیعی بی‌اهمیت است، کل عمق گمانه می‌تواند برای چند آزمایش از پیش حفاری گردد.

1- Sensitive

۳-۶-۹-۴ با قرارگرفتن محفظه در درون خاک، آزمایشها می‌توانند با درنظر گرفتن مورد (۳-۶-۹-۱) به‌طور پیوسته انجام گیرند و هیچ وقفه‌ای بین آنها لازم نیست.

۳-۷ گزارش کار

۳-۷-۱ ثبت اطلاعات زیر برای هرگمانه لازم است :

۳-۷-۱-۱ شماره گمانه
۳-۷-۱-۲ پیمایش (لوگ) گمانه
۳-۷-۱-۳ ارتفاع مبنا
۳-۷-۱-۴ عمق آب در گمانه در زمان انجام دادن آزمایش
۳-۷-۱-۵ روش حفر و آماده‌سازی گمانه
۳-۷-۱-۶ نکاتی از قبیل مقاومت خاک درهنگام حفاری یا نتایج دیگر آزمایشها مثل شمار N در آزمایش S.P.T
۳-۷-۱-۷ وضعیت آب و هوا و درجه حرارت
۳-۷-۱-۸ نام حفار

۳-۷-۲ موارد زیر در هر آزمایش باید ثبت گردد:

۳-۷-۲-۱ نوع دستگاه مورد استفاده
۳-۷-۲-۲ روش آزمایش (الف یا ب) و تاریخ آن
۳-۷-۲-۳ شماره گمانه
۳-۷-۲-۴ اندازه محفظه
۳-۷-۲-۵ توضیح راجع به غشا و غلاف محفظه و همچنین هم‌سنجی
۳-۷-۲-۶ عمق نقطه مرکزی محفظه
۳-۷-۲-۷ گامهای افزایش فشار یا حجم
۳-۷-۲-۸ قرائت حجم در زمانهای ۳۰ و ۶۰ ثانیه پس از هر گام افزایش بار در روش (الف) یا قرائت فشار در زمانهای ۳۰ و ۶۰ ثانیه در روش (ب)

۳-۸ تذکر :

مهمترین عامل در اجرای موفقیت‌آمیز یک آزمایش پرسیومتری، آماده‌سازی یک حفره مناسب است. این حفره در رسهای خیلی نرم و ماسه‌های خیلی سست به سختی آماده می‌شود. فشار حدی با کیفیت حفره ارتباط چندانی ندارد، ولی ضریب پرسیومتری به میزان بسیار زیادی به آن حساس است.

۴- تفسیر نتایج :

۴-۱ تصحیح نتایج :

۴-۱-۱ فشاری که از محفظه به خاک وارد می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P = P_R + P_\delta - P_c \qquad (۱-۴)$$

که در آن :

P = فشار وارده از محفظه به خاک برحسب کیلوپاسکال

P_R = فشار قرائت شده در واحد کنترل برحسب کیلوپاسکال

P_δ = فشار هیدرواستاتیک مابین واحد کنترل و محفظه برحسب کیلوپاسکال

P_c = فشار اصلاحی مطابق بخش (۳-۴-۱)

فشار P_δ فشار هیدرواستاتیک بوده واز رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$P_\delta = H \times \gamma_l \qquad (۲-۴)$$

که در آن :

H = عمق قرارگیری محفظه نسبت به واحد کنترل برحسب متر

γ_l = وزن واحد حجم سیال اندازه‌گیری دستگاه برحسب کیلونیوتن بر متر مکعب

۴-۱-۲ افزایش حجم اصلاحی به صورت زیر محاسبه می‌گردد :

$$V = V_R - V_c \qquad (۳-۴)$$

که در آن :

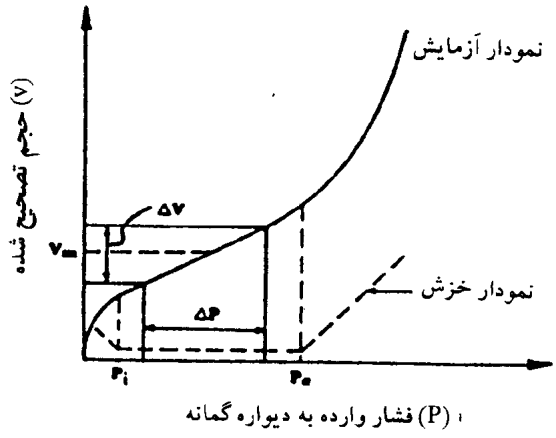
V = افزایش حجم اصلاحی قسمت اندازه‌گیری محفظه برحسب سانتیمتر مکعب

V_R = حجم قرائت شده برحسب سانتیمتر مکعب

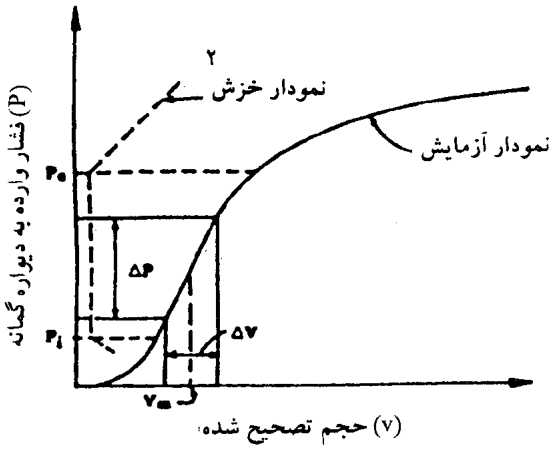
V_c = حجم اصلاحی مطابق بخش (۳-۴-۲)

۴-۲ ترسیم نتایج

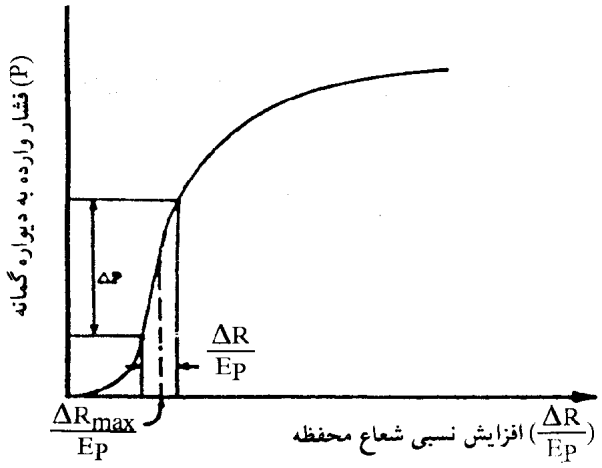
مقادیر حجم تصحیح شده $V_{(60)}$ و فشار تصحیح شده (P) حاصل از بند ۴-۱ را که یک دقیقه پس از بارگذاری اندازه‌گیری شده‌اند، در یک دستگاه مختصات پیاده نموده و سپس این نقاط با یک منحنی هموار[1] به یکدیگر اتصال داده می‌شود. نمودار حاصل، منحنی اصلاح شده پرسیومتری بوده و می‌تواند برای محاسبات مورد استفاده قرار گیرد [شکلهای شماره (۴-۱-الف) و (۴-۱-ب)]. نمودارهای دیگری نیز قابل رسم هستند که، برای مثال نمودار «فشار - افزایش نسبی شعاع» محفظه یکی از آنها می‌باشد [شکل شماره (۴-۲)].



شکل شماره (۴-۱-الف) - نمودار پرسیومتری به روش(الف)P-V



شکل شماره (۴-۱-ب) - نمودار پرسیومتری به روش (ب) V-P



۲

شکل شماره (۴-۲) - نمودار تغییرات فشار برحسب نسبت افزایش نسبی شعاع محفظه به شعاع اولیه

1- Smooth

2- Creep curve

۴-۳ تحلیل نتایج

۴-۳-۱ معادلات

۴-۳-۱-۱ با مشاهده نمودار پرسیومتری می‌توان یک محدوده خطی را مشخص نمود [شکلهای (۴-۱- الف). (۴-۱- ب)]. در این محدوده یک ضریب پرسیومتری ثابتی برای خاک قابل محاسبه است. این ضریب از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$E_p = ۲(۱+\upsilon)(V_\circ + V_m)\frac{\Delta P}{\Delta V} \qquad (۴-۴)$$

که در آن :

E_P = ضریب پرسیومتری بر حسب کیلوپاسکال

υ = نسبت پواسون

$V_\circ$ = حجم قسمت اندازه‌گیر محفظه هنگامی که هنوز افزایش حجم پیدا نکرده (قبل از آزمایش در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود)،

ΔV = اختلاف حجم اصلاحی در قسمت خطی نمودار V:P متناظر با ΔP [شکلهای (۴-۱-الف) و (۴-۱- ب)]،

ΔP = اختلاف فشار اصلاحی در قسمت خطی نمودار V:P متناظر با ΔV [شکلهای (۴-۱-الف) و (۴-۱- ب)]،

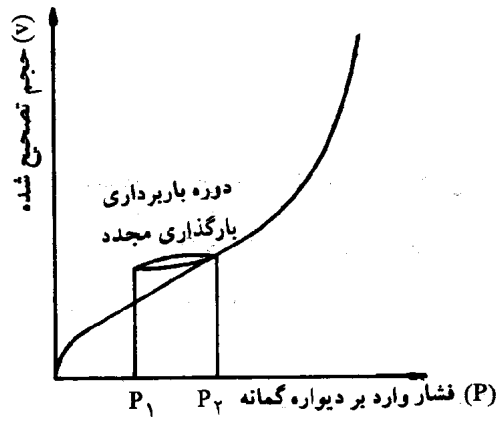
V_m = حجم اصلاحی در وسط محدوده افزایش حجم ΔV [شکلهای (۴-۱-الف) و (۴-۱- ب)].

توضیح شماره ۸ - در هر لحظه از آزمایش حجم اصلاحی برابر V بوده و $V_\circ + V$ حجم کل محفظه در آن لحظه است.

توضیح شماره ۹ - در صورت عدم اندازه‌گیری υ می‌توان مقدار آن را معادل ۰/۳۳ فرض کرد؛ در صورتی که مقدار υ معلوم بود مقدار آن در گزارش ذکر شود.

توضیح شماره ۱۰ - اگر در محدوده خطی نمودار پرسیومتری، شکستگی مشاهده گردید، محاسبات برای هر خط جداگانه انجام شود.

توضیح شماره ۱۱ - ضریب پرسیومتری همچنین می‌تواند با استفاده از یک چرخه باربرداری - بارگذاری مجدد محاسبه گردد.این ضریب‌به «ضریب‌بارگذاری‌مجددپرسیومتر» معروف است شکل‌شماره(۴-۳).



شکل شماره (۴-۳) - نمودار دوره‌ای آزمایش پرسیومتری

۴-۳-۱-۲ برای آزمایشهایی که در آنها قطر یا شعاع محفظه اندازه‌گیری می‌شود، ضریب پرسیومتری با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_p = (1 + \upsilon)(R_p + \Delta R_m)\ \Delta P/d\Delta R \qquad (۵-۴)$$

که در آن :

R_p = شعاع محفظه در حالت آزاد (بادنکرده) بر حسب میلی‌متر

ΔR_m = افزایش شعاع متوسط محفظه در محدوده خطی [شکل شماره (۴-۲)] بر حسب میلی‌متر

$d\Delta R$ = افزایش شعاع محفظه متناظر به افزایش فشار ΔP در محدوده خطی [شکل شماره (۴-۲)] بر حسب میلی‌متر

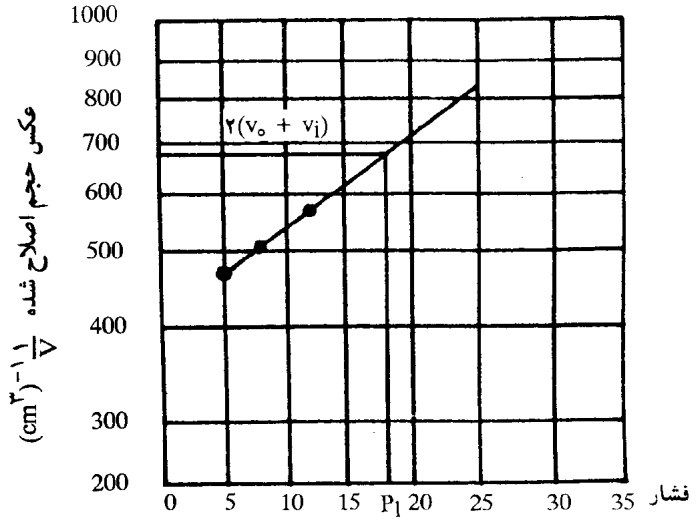
توضیح شماره ۱۲ - در هر لحظه از آزمایش افزایش شعاع اندازه‌گیری شده برابر ΔR بوده و شعاع کل محفظه دراین لحظه برابر $\Delta R + R_P$ است.

توضیح شماره ۱۳ - بدیهی است این شعاعها باید تصحیح شوند. این تصحیح می‌تواند به این ترتیب باشد که هر شعاع تبدیل به حجم شده و حجم اصلاح شده دوباره به شعاع تبدیل گردد.

۴-۳-۱-۳ نحوه تعیین فشار حدی : اگر نمودار پرسیومتری [شکلهای شماره (۴-۲)، (۴-۱- الف) و (۴-۱- ب)] امکان رسم یک مجانب را بدهد، فشار متناظر با این مجانب فشار حدی نامیده می‌شود.

در غیر این صورت فشار حدی (P_1) فشاری است که حجم محفظه را به دو برابر حجم اولیه حفره که به‌صورت $V_o + V_1$ تعریف می‌گردد برساند، V_i اضافه حجمی است (نسبت به V_o) که بر اثر آن، تماس کاملی بین محفظه و دیواره گمانه بوجود آید. بنابراین فشار حدی، فشار متناظر با حجم $۲(V_o + V_1)$ است. این فشار معمولاً با اندازه‌گیری مستقیم در هنگام آزمایش به‌دست نمی‌آید، زیرا هم انبساط محفظه پرسیومتر محدود است و هم ممکن است این حد بسیار بالا باشد.

برای محاسبه P_1 نمودار $\frac{۱}{V}$ برحسب P ترسیم می‌شود، مانند شکل (۴-۴). فشار متناظر با حجم $۲(V_o + V_1)$ برابر فشار حدی (P_1) خواهد بود.



شکل شماره (۴-۴)- محاسبه فشار حدی با استفاده از نمودار $\frac{۱}{V}$ برحسب P

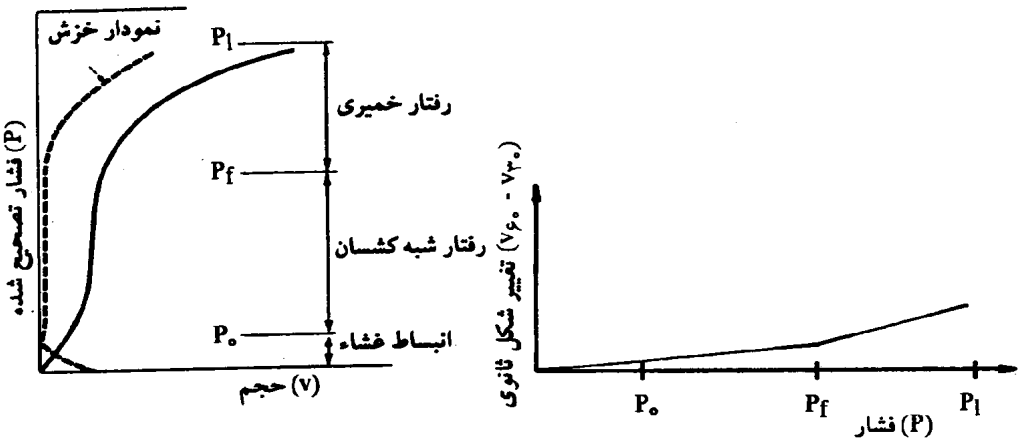
توضیح شماره ۱۴ - روشهای دیگری نیز برای تعیین P_1 وجود دارند که ذکر نشده است. در صورتی که از روشهای دیگر استفاده شود، محاسبات مربوط باید گزارش گردد.

توضیح شماره ۱۵ - اگر نتوان بند ۴-۳-۱-۳ را رعایت نمود، در نتیجه فقط بخشی از نمودار پرسیومتری برای تفسیر و بررسی مناسب است، فشار حدی به اندازه قطر حفره نسبتاً حساس نیست.

توضیح شماره ۱۶ - «فشار حدی» P_1 که در ارتباط با گسیختگی زمین است در محاسبات پایداری پی‌ها استفاده شده و «ضریب پرسیومتری» E_P در محاسبات نشست پی‌ها به‌کار برده می‌شود.

۴-۳-۱-۴ نمودار خزش

نمودار دیگری در رابطه با تغییر شکلهای ثانوی قابل رسم است. این نمودار در مختصات ($V_{۶۰}$ - $V_{۳۰}$) و P ترسیم می‌شود. اصطلاح «خزش» به اختلاف حجم $V_{۳۰}$ - $V_{۶۰}$ و یا اگر $V_{۱۲۰}$ نیز اندازه‌گیری شده باشد $V_{۳۰}$ - $V_{۱۲۰}$، اطلاق می‌گردد. $V_{۳۰}$ و $V_{۶۰}$ و $V_{۱۲۰}$ حجم‌های متناظر با زمانهای ۳۰ و ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه می‌باشد. مقدار خزش در روند اجرای آزمایش دارای مقادیر متفاوتی است. در خلال مرحله ۱ [شکل شماره (۱-۲)]، بدون این‌که از طرف خاک فشاری به محفظه وارد آید، غشای لاستیکی محفظه میل به خزش دارد. در خلال مدت مرحله ۲ (مرحله کشسان) مقدار خزش ناچیز به نظر می‌رسد. در ابتدای مرحله ۳که شروع مرحله خمیری است، تغییر شکلها افزایش یافته و از آستانه خمیری می‌گذرند. در این مرحله، افزایش محسوس خزش مشاهده می‌گردد. فشار مربوط به شروع این تغییرات، فشار خزش (P_f) نامیده می‌شود[۱-۵]. شکل شماره (۴-۵) نمودار خزش - فشار و شکل شماره (۴-۶) یک آزمایش پرسیومتری را همراه با نمودار خزش آن نشان می‌دهند.



شکل شماره (۴-۵) - نمودار خزش [۱-۵]

شکل شماره (۴-۶) - نمودار پرسیومتری به همراه فشار خزش مربوط [۵-۵]

اگرچه P_f به‌طور مستقیم به عنوان یک پارامتر طراحی کاربرد ندارد، ولی برای اطمینان از کیفیت آزمایش یا برای تخمین فشار حدی (هنگامی که فشار حدی به‌طور مستقیم معلوم نیست) می‌تواند مفید باشد[۶-۵]. توصیه می‌شود از اجرای چرخه‌های باربرداری - بارگذاری مجدد در حول و حوش P_f خودداری گردد، زیرا تفسیر نتایج را دشوار خواهد کرد[۵-۵].

توضیح شماره ۱۷ : باداشتن ضریب پرسیومتری (E_p) و فشار حدی (P_l) می‌توان به‌طور نسبی درباره شرایط کلی خاک اظهارنظر نمود. برای مثال در خاکهای بیش تحکیم یافته نسبت $\frac{E_p}{P_l}$ یک مشخصه از خاک بوده و از ۱۲ تا ۲۰ تغییر می‌کند. در خاکهای رسوبی این نسبت به مقداری زیادی کاهش پیدا کرده (۵ تا ۸) و در خاکهای دستخورده به کمتر از ۵ می‌رسد. این نسبت در خاکهای معمولی بین ۸ تا ۱۲ تغییر می‌کند[۱-۵]. جدولهای شماره (۴-۱) و (۴-۱۳) بر اساس نتایج آزمایشهای زیادی که در این زمینه انجام شده تنظیم گردیده است :

جدول شماره (۴-۱)- نسبت $\frac{E_p}{P_l}$ در خاکهای گوناگون[۱-۵]

نوع خاک / شرایط تراکم	رس	لای[1]	ماسه	ماسه و شن
بیش تحکیم یافته	> ۱۵	> ۱۴	> ۱۲	> ۱۰
تحکیم عادی یافته	۸ تا ۱۵	۸ تا ۱۴	۷ تا ۱۲	۶ تا ۱۰
کم تحکیم‌یافته	۵ تا ۸	۵ تا ۸	۴ تا ۷	۳ تا ۶
دگرگون شده (دستخورده)	< ۵	< ۵	< ۴	< ۳

بدین ترتیب می‌توان میزان دستخوردگی یا طبیعی‌بودن محل مورد آزمایش را سنجید. مقادیر کوچکتر از ۴ تا ۶ معمولاً معرف خاکهای دستخورده هستند.

۴-۱-۳-۵ با استفاده از تئوری کشسانی، بین ضریب پرسیومتری (E_p) و ضریب کشسانی برشی (G)، رابطه زیر برقرار است [۲-۵]:

$$E_p = ۲(۱ + \upsilon)G \qquad (۴-۶)$$

با ترکیب این رابطه و رابطه (۴-۴) رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$G = (V_o + V_m)\frac{\Delta P}{\Delta V} \qquad (۴-۷)$$

۴-۱-۳-۶ از نتایج آزمایش پرسیومتری می‌توان ضریب فشار جانبی در حال سکون خاک (K_o) را محاسبه نمود. طبق تعریف، این ضریب نسبت مقدار تنش مؤثر افقی به مقدار تنش مؤثر قائم در یک نقطه می‌باشد.

1- Silt

در آزمایش پرسیومتری تنش افقی درجا (P_o) از روی نمودارهای شماره (۴-۱-الف) و (۴-۱-ب) به‌دست می‌آید. بنابراین :

$$K_o = \frac{P_o}{\sigma'} \qquad (۴-۸)$$

که در آن :

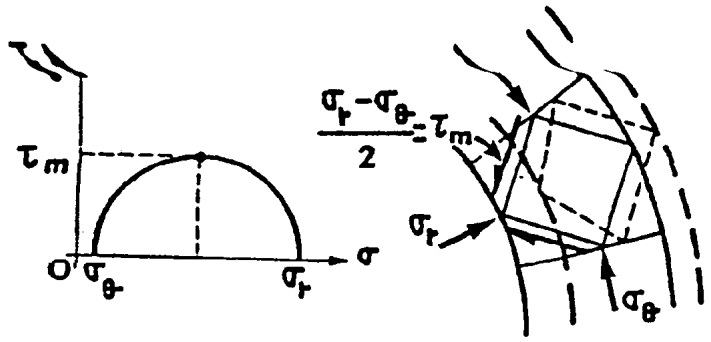
K_o = ضریب فشار جانبی خاک در حال سکون

P_o = فشار جانبی خاک در حال سکون برحسب کیلوپاسکال

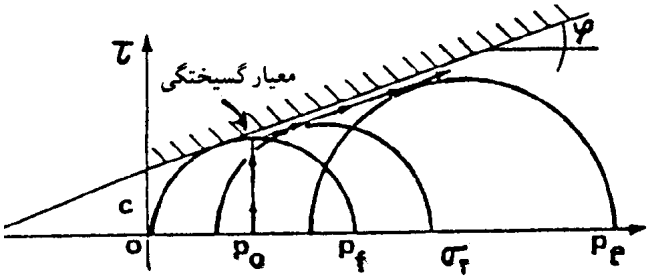
σ' = تنش مؤثر قائم برحسب کیلوپاسکال

۷-۱-۳-۵ تحلیل مرحله خمیری آزمایش پرسیومتری : در آزمایش پرسیومتری، بارگذاری تا حد گسیختگی خاک ادامه می‌یابد، بنابراین می‌توان یک تحلیل خمیری نیز از رفتار خاک به‌عمل آورد. تغییرشکلها در یک جزء از خاک هنگام آزمایش پرسیومتری که در شکل (۴-۷) نشان داده شده است، پس از مرحله کشسانی وارد مرحله خمیری می‌شوند.

۱



شکل شماره (۴-۷) - جزیی از خاک در خلال انجام دادن آزمایش پرسیومتری



شکل شماره (۴-۸) - معیار گسیختگی موهر - کولمب [1]

1- Mohr - Coulomb

این مرحله با استفاده از معیار گسیختگی موهر -کولمب در شکل (۴-۸) نشان داده شده است. با استفاده از این معیار، فشار درون خاک در آستانه تسلیم که بنا به تعریف، فشار خزش (P_f) نامیده می‌شود، قابل محاسبه است[۴-۵]. بر این اساس :

$$P_f = P_o (1 + \sin\phi) + C\cos\phi \qquad (۹-۴)$$

که در این رابطه :

ϕ = زاویه اصطکاک داخلی خاک و

C = چسبندگی خاک می‌باشد

در صورتی که خاک کاملاً چسبنده باشد :

$$P_f = P_o + C_u \qquad (۱۰-۴)$$

که در آن :

C_u = چسبندگی زهکشی نشده است.

به کمک معادلات تعادل و معیار گسیختگی موهر -کولمب، مقدار «فشار حدی» (P_l) به ترتیب در خاکهای با چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک (ϕ) و خاکهای کاملاً چسبنده به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند[۲-۵]:

$$P_l = (P_f + C\cot g\ \phi)\left(\frac{G}{P_o \sin\phi + C\cos\phi}\right)^{\sin\phi/(1+\sin\phi)} - C\cot g\,\phi \qquad (۱۱-۴)$$

و

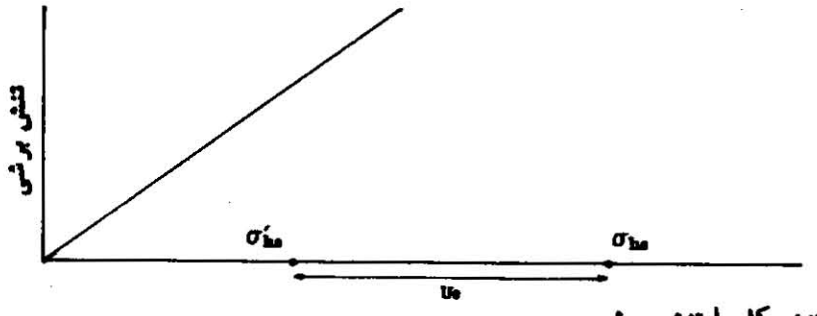
$$P_l = P_f + C_u \ln\left(\frac{G}{C_u}\right) \qquad (۱۲-۴)$$

$$= P_o + C_u \left(1+\ln\frac{G}{C_u}\right)$$

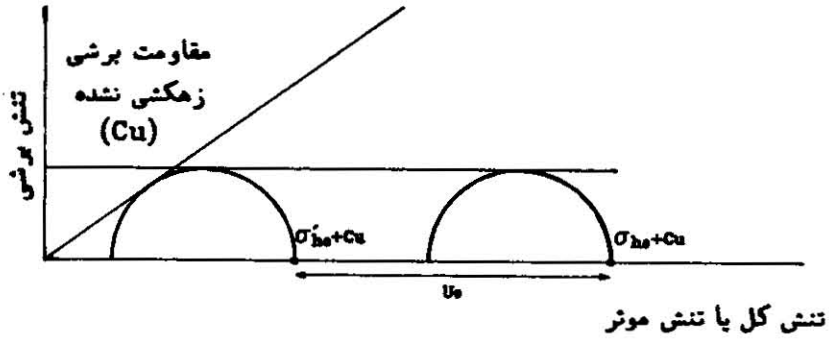
عوامل روابط فوق قبلاً معرفی شده‌اند.

۴-۳-۱-۸ ضریب تحکیم افقی [۵-۵]

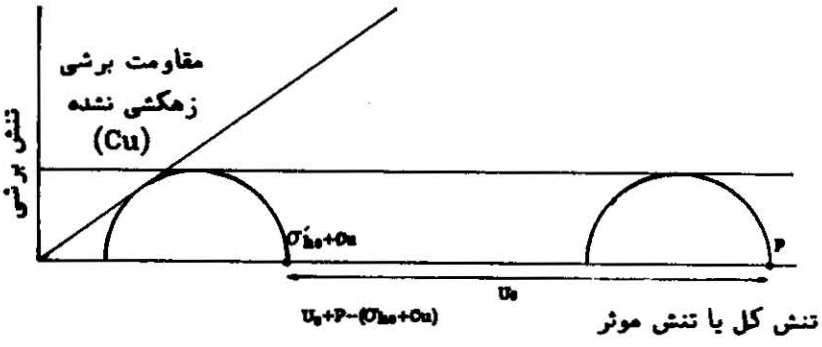
با استفاده از پرسیومتری می‌توان ضریب تحکیم افقی خاک را در زمینهای رسی تخمین زد. هنگامی که حفره شروع به انبساط می‌کند، در ابتدا هیچ تمایلی برای تغییر حجم و یا گسترش فشار حفره‌ای در خاک (در رفتار کشسان) وجود ندارد. تنها تنشهای شعاعی و محیطی با مقادیر مساوی و مخالف هم



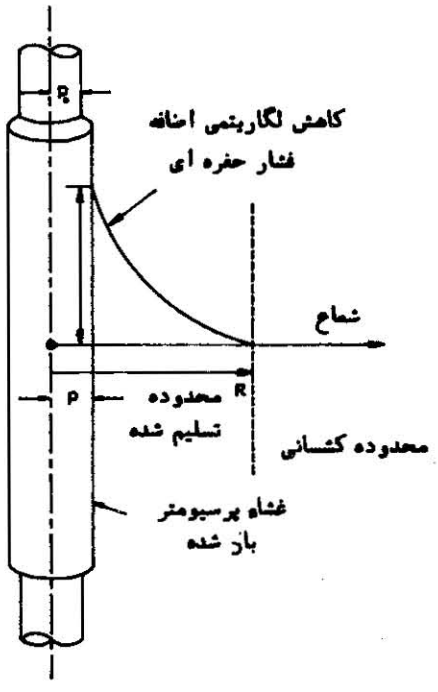
شکل شماره (۴-۹-الف) - حالت اولیه



شکل شماره (۴-۹-ب) - شروع تغییرشکل خمیری



شکل شماره (۴-۹-ج) - پس از افزایش فشار درون گمانه



شکل شماره (۴-۱۰) - تغییر فشار حفره‌ای در امتداد شعاعی
در ناحیه خمیری اطراف گمانه

تغییر کرده و تنش قائم ثابت باقی می‌ماند. فشار حفره‌ای در ابتدا برابر u_0 است [شکل شماره (۴-۹-الف)]. در شروع تغییرشکلهای خمیری در دیواره گمانه، هنوز فشار حفره‌ای برابر u_0 است، ولی فشار درون گمانه به مقدار $P_f = P_0 + C_u$ رسیده است [شکل شماره (۴-۹- ب)]. با افزایش فشار تنشهای مؤثر تغییر نمی‌کنند [شکل شماره (۴-۹-ج)]، این افزایش فشار باعث بالارفتن فشار حفره‌ای در دیواره گمانه می‌شود. یعنی :

$$\Delta u = P - (P_0 + C_u) \qquad (۱۳-۴)$$

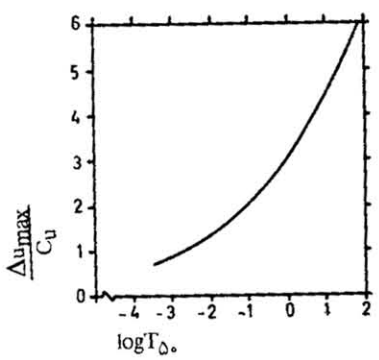
در ناحیه خمیری اطراف گمانه، فشار حفره‌ای در امتداد شعاعی به‌صورت لگاریتمی تغییر می‌کند :

$$R/\rho = \exp\left(\frac{\Delta u}{2C_u}\right) \qquad (۱۴-۴)$$

در این رابطه R شعاع محدوده خمیری و ρ شعاع گمانه می‌باشد [شکل شماره (۴-۱۰)].
اگر تغییر شکل گمانه متوقف گردد، فشار حفره‌ای نیز مستهلک می‌شود. ضریب تحکیم افقی، C_h، از رابطه بدون بعد زیر قابل محاسبه است:

$$T_{50} = \frac{C_h t_{50}}{\rho^2} \qquad (۱۵-۴)$$

در این رابطه t_{50}، زمانی است که اضافه فشار حفره‌ای به نصف بیشترین مقدار خودش می‌رسد. مقدار t_{50} به گسترش ناحیه خمیری (برای مثال R/ρ) بستگی داشته، و از این‌رو به فشار حفره‌ای تولید شده در دیواره گمانه بستگی دارد. ارتباط t_{50} , $\frac{\Delta u_{max}}{C_u}$ در شکل شماره (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل شماره (۴-۱۱) - نمودار ارتباط عامل زمان ۵۰٪ تحکیم با فشار حفره‌ای حداکثر تولید شده در هنگام پرسیومتری

اعتبار رابطه فوق به دقت اندازه‌گیری تغییرات فشار حفره‌ای بستگی دارد. بعضی پرسیومترها دارای اجزای حساسی روی غشای محفظه خود هستند که این اجزاء قادر به اندازه‌گیری مستقیم فشار حفره‌ای در خلال آزمایش می‌باشند.

۴-۳-۱-۹ زوایای مقاومت برشی و انبساطی[1] در ماسه‌ها[۵-۱۰]

این تحلیل را ابتدا گیبسون و اندرسون[2] (۱۹۶۱) برای زمینهای ماسه‌ای به‌کار بردند. اساس حل آنها بر پایه فرض رفتار کشسانی و تغییرشکلهای با حجم ثابت، قرار داشت. اعتبار فرض دوم در شرایط واقعی بسیار بعید به نظر می‌رسد، زیرا معمولاً افزایش حجم (انبساط) در هنگام اعمال برش اتفاق می‌افتد. هیوز، ورث و ویندل[3] (۱۹۷۷) با استفاده از یک پرسیومتر خودحفار سعی در اندازه‌گیری عوامل خاک به طریق زیر نمودند:

الف - براساس نتایج آزمایش پرسیومتری در حالت زهکشی شده ابتدا نمودار $\log\varepsilon_c$ برحسب $\log(P - U_o)$ رسم می‌شود. ε_c، کرنش گمانه نامیده شده و از رابطه $\varepsilon_c = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o}$ محاسبه می‌گردد.

که در آن :

U_o = فشار حفره‌ای در محل

P = فشار اعمال شده

ρ_o و ρ = شعاع گمانه در حالت اولیه و پس از بارگذاری است.

این نمودار به شکل تقریباً یک خط راست بوده که شیب آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$S = \frac{(1 + \sin\psi)\sin\phi'}{1 + \sin\phi'} \qquad (۱۶-۳)$$

که در آن :

ψ = زاویه انبساط

ϕ' = زاویه اصطکاک داخلی مؤثر

S = شیب خط $\log\varepsilon_c$ برحسب $\log (P - U_o)$

ب - معادله فوق با درنظرگرفتن رابطه بین φ' ، ψ و ϕ_{cv}' یعنی زاویه اصطکاک داخلی گمانه، در انتهای آزمایش هنگامی که کل افزایش حجم اتفاق افتاده است (نسبت پوکی (e) به مقدار بحرانی خودش رسیده است)، نیز حل می‌گردد. در این صورت رابطه زیر برقرار است :

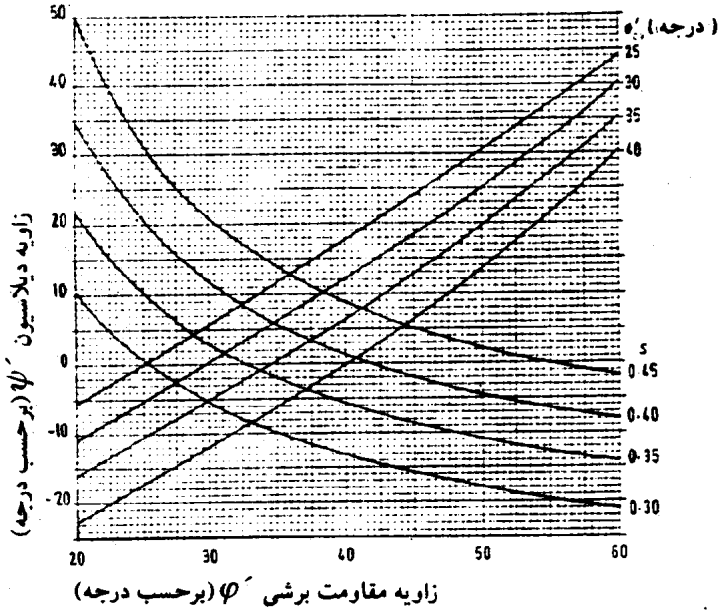
$$\frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} = \frac{1 + \sin\phi_{cv}'}{1 - \sin\phi_{cv}'} \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \qquad (۱۷-۴)$$

1- Dilation

2- Gibson & Anderson

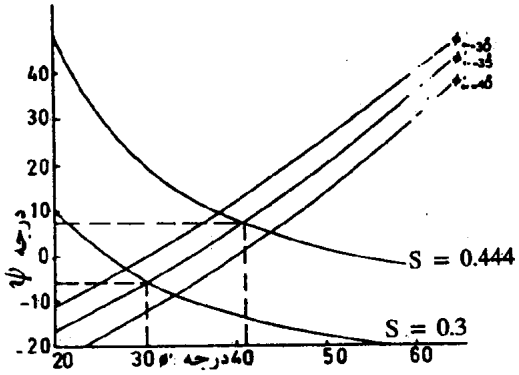
3- Hughes, Worth & Windle

این رابطه به شکل بهتری در شکل شماره (۴-۱۲) نشان داده شده است. در تحلیل‌ها، مقدار ϕ'_{cv} به‌طور مستقیم در دسترس نیست، هیوز و همکاران پیشنهاد می‌کنند که برای ماسه‌های کوارتزی در کارهای معمول مهندسی می‌توان $\phi'_{cv} = ۳۵^\circ$ در نظر گرفت.



شکل شماره (۴-۱۲-الف) حل نموداری ϕ' و ψ [۵-۵]

Mair & Wood - 1987



شکل شماره (۴-۱۲-ب) حل نموداری ϕ' و ψ [۵-۱۰]

Ervin - 1983

۴-۳-۲ روابط تجربی

۴-۳-۲-۱ ضریب پرسیومتری (E_p) با مدول کشسانی (E_{oed}) که از آزمایش تحکیم (ادئومتر) به‌دست می‌آید متناسب است. این تناسب به‌صورت زیر است [۵-۶]:

$$E_{oed} = E_P/\alpha \qquad (۱۸-۴)$$

$$E_{oed} = \frac{1+e}{C_c} \frac{\Delta\sigma'}{\log\,(1+\Delta\sigma'/\sigma'_v)} \qquad (۱۹-۴)$$

در این روابط C_c شاخص تراکم، e نسبت پوکی و α یک ضریب است که مقدار آن وابسته به نوع خاک بوده و در محدوده $۰/۲۵ \leq \alpha \leq ۱/۰۰$ قرار دارد. جدول شماره (۴-۲) این مقادیر را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۴-۲- مقدار α در خاکهای مختلف (Menard & Rousseau, 1962)[۵-۶]

نوع خاک	رس	لای	ماسه	قلوه سنگ (شن)
α	$\frac{۲}{۳}$	$\frac{۱}{۲}$	$\frac{۱}{۳}$	$\frac{۱}{۴}$

در خاکریزهای بسیار فشرده شده مقدار α ممکن است از یک بیشتر باشد.

۴-۲-۳-۲ ارتباط بین فشار حدی (P_l) و مقاومت نوک نفوذسنج (مخروط هلندی) (q_c) می‌تواند برای محاسبات ظرفیت باربری شمعهای تکی مورد استفاده قرار گیرد[۵-۶] [جدول شماره (۴-۳)].

جدول شماره (۴-۳)- ارتباط بین نسبت $\frac{q_c}{P_l}$ و نوع خاک

نوع خاک	رس	لای	ماسه	ماسه فشرده و شن
$\frac{q_c}{P_l}$ [۵-۶]	۳	۶	۹	۱۲
$\frac{q_c}{P_l}$ [۵-۱]	۴ - ۲/۵	۶ - ۵	۹ - ۷	-

۴-۲-۳-۳ بین مقاومت زهکشی نشده در رسها (C_u) و فشار حدی (P_l) نیز ارتباط وجود دارد[۵-۶]. این ارتباط در جدول شماره (۴-۴) آورده شده است :

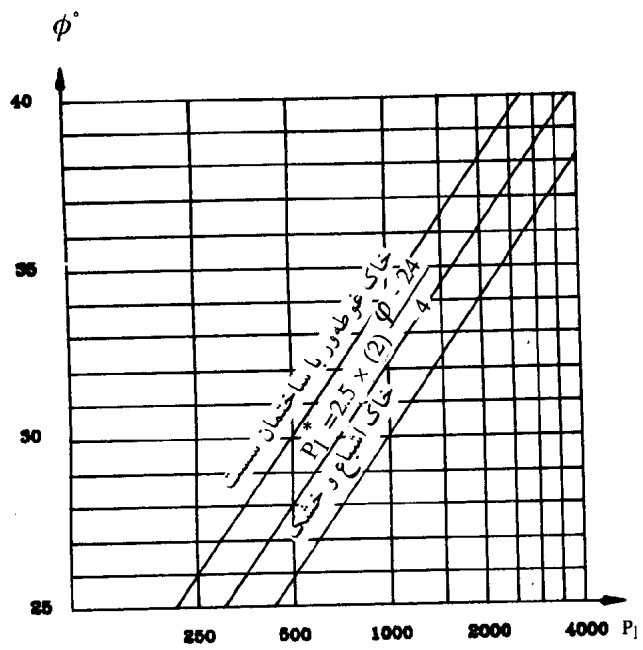
جدول شماره ۴-۴- ارتباط بین P_l و C_u
(Amar & Jezequel, 1972)[۵-۶]

$P_l - \sigma_{h_0}$ (کیلوپاسکال)	Cu (کیلوپاسکال)
< ۳۰۰	$\frac{P_l - \sigma_{h_0}}{۵/۵}$
> ۳۰۰	$\frac{P_l - \sigma_{h_0}}{۱۰} + ۲۵$

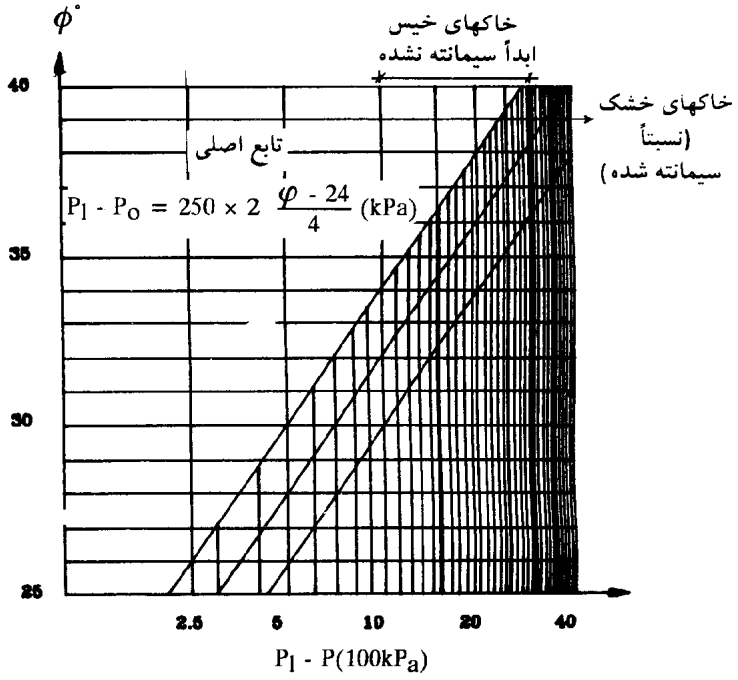
۴-۲-۳-۴ ارتباط نظری بین فشار حدی (P_l) و زاویه اصطکاک (ϕ) در رابطه (۴-۱۱) مشهود است. مانارد در سال ۱۹۶۳ به طور تجربی نشان داد که از رابطه ساده زیر نیز می‌توان استفاده نمود[۵-۴] (به‌شرط این‌که از C صرف‌نظر کنیم) :

$$P_l - P_{\circ} = ۲۵۰ \times (۲)^{[\frac{Q - ۲۴}{۴}]} \quad \text{کیلوپاسکال} \qquad (۲۰-۴)$$

از این ϕ در تخمین فشار رانش محرک در دیوارهای نگهبان و سپرها می‌توان استفاده نمود [۶-۵].
شکل شماره (۴-۱۳) این ارتباط را بهتر نشان می‌دهد.



شکل شماره (۴-۱۳- ب) [۶-۵]
رابطه بین فشار حدی خالص و ϕ
Amar & et al, 1991



شکل شماره (۴-۱۳- الف) [۵-۴]
رابطه بین فشار حدی خالص و ϕ
Gambin & Frank, 1995

۴-۴ کاربرد نتایج پرسیومتر منارد (M.P.M) در طراحی پی‌ها

پرسیومتر منارد در بسیاری از کشورها در شناسایی درجا برای طراحی انواع پی‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. نتایج طراحی نیمه‌تجربی براساس استفاده از تئوریها و مشاهده رفتار پی‌ها گسترش یافته است. کتابها و مقاله‌های چندی در این زمینه منتشر شده است، ولی به اختصار چند قاعده مهم و عمومی در زیر بیان می‌شود:

۴-۴-۱ ظرفیت باربری

منارد در سال ۱۹۶۳ مقاومت نوک شمعها را با «فشار حدی» که از انبساط حفره کره‌ای شکل و مقایسه آن با «فشار حدی» حفره استوانه‌ای شکل به‌دست آمده بود، ارتباط داد.

تئوری کشسانی - خمیری که منارد از آن استفاده کرد، مفهوم «عمق بحرانی» را برمبنای فرضیه‌های زیر بیان می‌دارد:
- در زیر عمق بحرانی، نسبت بین «فشار حدی» کروی و «فشار حدی» استوانه‌ای، به‌شرط این‌که خواص خاک تغییر نکند، ثابت می‌ماند.
- در بالای عمق بحرانی، نسبت فوق کاهش یافته تا این‌که در سطح زمین به کوچکترین مقدار خود می‌رسد. این روش را همچنین وزیک[1] (۱۹۷۵) و سپس یک تیم تحقیقاتی در تورینو[2]، شامل بیلوتی و همکاران[3] (۱۹۸۵) نیز به‌کار برده‌اند. عمق بحرانی با استفاده از جدول شماره (۴-۹) به‌دست می‌آید.

ظرفیت باربری، (q_u)، برای هر نوع بارگذاری قائم طبق معادله ۴-۲۱ به‌دست می‌آید :

$$q_u - \sigma_v = k_p (P_l - \sigma_{h_o}) \qquad (۴-۲۱)$$

که در آن :

q_u = ظرفیت باربری نهایی شالوده

σ_v = تنش روبار[4] در تراز کف شالوده قبل از خاکبرداری

k_p = ضریب باربری پرسیومتر منارد M.P.M داده شده در جدول شماره (۴-۹)

σ_{h_o} = تنش افقی زمین در تراز آزمایش (P_o)

$(P_l)^*$ = فشار حدی خالص = $P_l - \sigma_{h_o}$

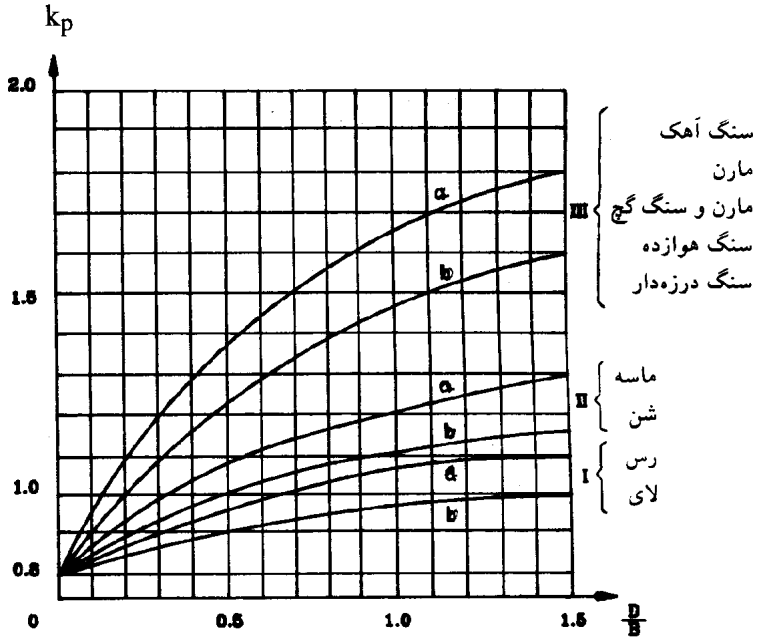
در معادله (۴-۲۱)، ($q_u - \sigma_v$) مربوط به سرباری می‌شود که موجب گسیختگی گردد. به این سربار باید ضریب اطمینان اعمال شود. معمولاً این ضریب برابر ۳ اختیار می‌گردد[۱-۵].

۴-۴-۱-۱- پی‌های سطحی : ظرفیت باربری پی‌های سطحی با استفاده از معادله ۴-۲۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه مقادیر k_p از شکل شماره (۴-۱۴) به‌دست می‌آید. این مقادیر به شکل شالوده، نوع خاک و عمق شالوده (D) وابسته هستند.

هنگامی که زمین به صورت لایه‌ای است از فشار حدی هم‌ارز خالص $(P_{le})^*$ و عمق هم‌ارز پی (D_e) باید استفاده شود[۱-۵و۶] که از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$(P_{le})^* = (P_{l۱} \times P_{l۲} \times P_{l۳}) \qquad (۴-۲۲)$$

1- Vesic
2- Torino
3- Bellotti et al
4- Overburden



a : شالوده مربعی　　b : شالوده نواری

شکل شماره (۴-۱۴) - مقادیر k_p برای انواع شالوده‌ها

در معادله (۴-۲۲) فشار حدی P_{l2} در تراز کف پی اندازه‌گیری می‌شود. فشار P_{l1} مربوط به لایه‌ای به فاصله B (عرض پی) در بالای شالوده و فشار P_{l3} در لایه‌ای به فاصله B زیر سطح شالوده اندازه‌گیری می‌شود.

عمق هم‌ارز پی از معادله (۴-۲۳) قابل محاسبه است. این انتگرال بین سطح آزاد زمین و تراز پی در نظر گرفته می‌شود[۱-۵]:

$$D_e = \frac{1}{(P_{le})^*} \int P_l \times Z \times dz \qquad (۴-۲۳)$$

P_l فشار حدی می‌باشد.

جدولهای دیگری نیز موجود است که می‌توان مقدار k_p را از آنها به‌دست آورد [جدولهای شماره (۴-۵) و (۴-۶)]. این مقادیر باید با مقادیر P_l حاصل از آزمایش پرسیومتری منارد به کار گرفته شوند[۱-۵].

جدول شماره (۴-۵)[۵-۱] - مقدار فشار حدی برحسب نوع خاک

گروه خاک	نوع خاک	فشار حدی (مگاپاسکال)
I	رس	صفر تا ۱/۲
	لای	صفر تا ۰/۷
II	رس سخت و مارن	۱/۸ تا ۴
	لای متراکم	۱/۲ تا ۳
	ماسه غیرمتراکم	۰/۴ تا ۰/۸
	سنگ نرم	۱ تا ۳
III	ماسه و شن	۱ تا ۲
	سنگ	۴ تا ۱۰
III´	ماسه و شن بسیار متراکم	۳ تا ۶

جدول شماره (۴-۶)[۵-۱] - مقادیر ضریب باربری بیشینه k_p برحسب شکل پی و عمق پی

D/B	k_p پی مربعی				k_p پی نواری			
	I	II	III	III´	I	II	III	III´
۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	
۰/۱	۱/۲	۱/۵	۱/۹	۲/۱	۱	۱/۱	۱/۲	۱/۳
۱	۱/۶	۱/۸	۲/۵	۲/۸	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۶
۱/۱	۱/۸	۲/۱	۳	۳/۳	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸

همچنین جدول شماره (۴-۷) به همراه جدول شماره (۴-۸) برای به‌دست‌آوردن مقادیر k_p قابل استفاده است[۵-۱۲].

جدول شماره (۴-۷) - فشار حدی بر حسب نوع خاک [۵-۱۱]

طبقه‌بندی خاک		نوع خاک	فشار حدی P_l مگاپاسکال
رس و لای	A	رس نرم یا لای	< ۰/۷
	B	رس نسبتاً سخت یا لای	۱/۲ - ۲/۰
	C	رس سخت یا لای	> ۲/۵
شن و ماسه	A	ماسه شل یا شن	< ۰/۵
	B	ماسه نسبتاً متراکم یا شن	۱/۰ - ۲/۰
	C	ماسه متراکم یا شن	> ۲/۵
زمین آهکی [1]	A	زمین آهکی نرم	< ۰/۷
	B	زمین آهکی هوازده	۱/۰ - ۲/۵
	C	زمین آهکی سخت	> ۳
مارن و مارن آهکی	A	مارن شکننده	۱/۵ - ۴/۰
	B	مارن سخت	> ۴/۵
سنگ ضعیف	A	سنگ هوازده	۲/۴ - ۴/۰
	B	سنگ درزه‌دار	> ۴/۵

جدول شماره (۴-۸)- مقادیر ضریب باربری بیشینه k_p بر حسب نوع خاک[۵-۱۱] (Gambin & Frank, 1995)

نوع خاک	مقدار k_p
رس ولای A وزمین آهکی A	۰/۸ [۱+۰/۲۵ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
رس و لای B	۰/۸ [۱+۰/۳۵ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
رس C	۰/۸ [۱+۰/۵۰ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
ماسه A	[۱+۰/۳۵ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
ماسه و شن B	[۱+۰/۵۰ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
ماسه و شن C	[۱+۰/۸۰ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
زمین آهکی B و C	۱/۳ [۱+۰/۲۷ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]
مارنها، مارنهای آهکی و سنگهای هوازده	[۱+۰/۲۷ (۰/۶+۰/۴ B/L) D_e/B]

1- Chalk

۴-۴-۱-۲ شمع با بار محوری : ظرفیت باربری شمع با بارمحوری با دانستن بار حدی نوک (Q_{pl}) و اصطکاک واحد جداره شمع (q_s) محاسبه خواهد شد :

$$Q_l = Q_{pl} + Q_{sl} \qquad (۲۴-۴)$$

در این معادله Q_l بار حدی شمع، Q_{pl} بار حدی نوک شمع و Q_{sl} بار حدی اصطکاکی شمع می‌باشند.

۴-۴-۱-۲-۱ بار حدی نوک شمع با استفاده از معادله (۴-۲۱) به شکل زیر بازنویسی می‌گردد[۵-۷] :

$$Q_{pl} = A_p[k_p(P_l - \sigma_{h_o}) + \sigma_v] \qquad (۲۵-۴)$$

در این معادله A_p سطح مقطع نوک شمع است. مقادیر متداول k_p براساس روشهای ساخت شمع در جدول (۴-۹) آمده است. مقادیر k_p مربوط به بالای عمق بحرانی، کاهش یافته و در نهایت بر مقادیر مربوط به شالوده‌های سطحی منطبق می‌شود. آیین‌نامه جدید فرانسه توصیه می‌کند که به جای استفاده از P_{le}^* (معادله (۴-۲۲)) که منارد پیشنهاد کرده است، از مقدار P_{le}^* وزن‌دار استفاده شود [۵-۶] :

$$\text{وزن‌دار } P_{le}^* = \frac{۱}{۳a + b} \int P_{le}^*(Z)dz \qquad (۲۶-۴)$$

که در آن :

a = ۰/۵ متر یا اگر عرض شمع بزرگتر از ۱ متر باشد، برابر نصف عرض شمع،

b = کوچکترین دو مقدار a , h،

h = میزان عمق نفوذ در لایه باربر،

P_{le}^* = مقدار فشار حدی خالص اصلاح شده که حداکثر به ۱/۵ برابر کوچکترین مقدار اندازه‌گیری شده در بازه عمق $(Z_p - ۳a , Z_p + b)$ محدود شده،

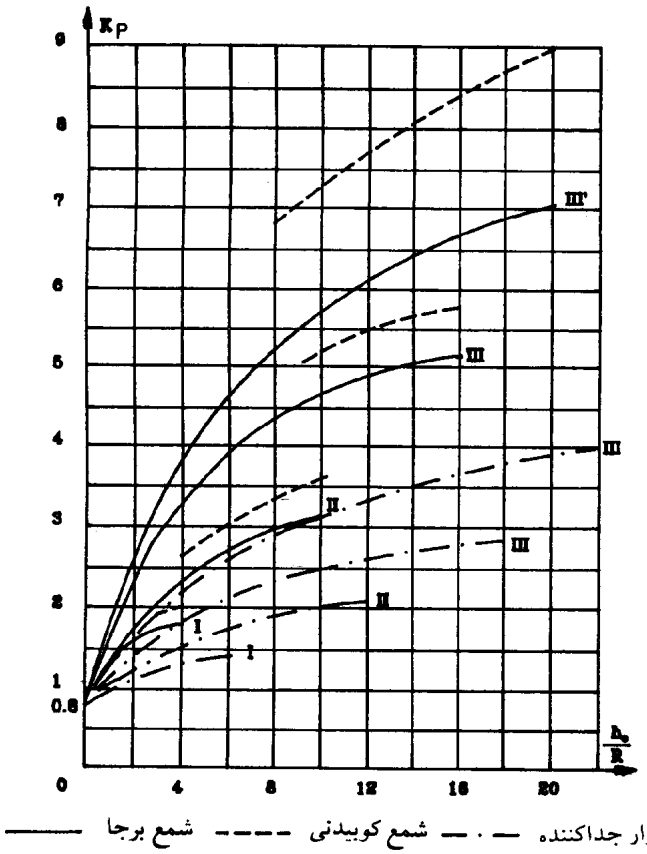
Z_p = رقوم نوک شمع است.

جدول شماره (۴-۹) - ضریب باربری پرسیومتر مانرد (k_p) برای طراحی پی‌ها در پایین عمق بحرانی [۵-۶]

گروه	خاک	عمق بحرانی		بیشینه ضریب باربری (k_p)	
		پی‌های تکی	پی‌های نواری	شمع برجا	شمع کوبیدنی
I	رس و لای	$۲B_e$	$۳B_e$	۱/۲	۱/۸
II	شن و ماسه	$۵B_e$	$۶B_e$	۱/۱	۳/۲ - ۴/۲
III	زمین آهکی	$۸B_e$	$۹B_e$	۱/۸	۲/۶
IV	سنگ ضعیف	$۸B_e$	$۹B_e$	۱/۱ - ۱/۸	۱/۸ - ۳/۲

در این جدول B_e، عرض معادل می‌باشد که برابر است با $B_e = \frac{۴A}{P}$ که در آن A سطح مقطع شالوده و P پیرامون آن است. B_e برابر وجه یک پی مربع تکی یا قطر یک پی دایره‌ای تکی و یا دوبرابر عرض یک شالوده نواری است.

همچنین ضریب باربری شمعهای برجا در حال حاضر برای دیوارهای جداکننده[1] به کار می‌رود. در دیوارهای جداکننده، شمعهای کوبیدنی و برجا می‌توان از شکل شماره (۴-۱۵) نیز k_p را به‌دست آورد. در این صورت ضریب اطمینان معادل ۳ باید در نظر گرفته شود[۵-۱].



رده I: رس و لای

رده II: رس سخت و مارن
لای متراکم
ماسه غیرمتراکم
سنگ نرم

رده III: ماسه و شن
سنگ

رده III: ماسه و شن بسیار متراکم

شکل شماره (۴-۱۵) - ضریب باربری پرسیومتر مانرد M.P.M نوک شمع برای پی‌های عمیق (k_p)[۵-۱]

1- Diaphragm Walls

ضریب باربری نوک شمعها (k_p) از جدول شماره (۴-۱۰) نیز قابل استخراج است. دراین جدول دو گروه کلی از هم جدا شده‌اند. گروه I شامل هفت روش نصب شمع معروف به شمعهای «غیر تغییر مکانی[1]» (یا شمعهای برجا) و گروه II شامل دوازده روش نصب شمع معروف به شمعهای «تغییرمکانی[2]» (یا شمعهای کوبیدنی) هستند[۵-۷].

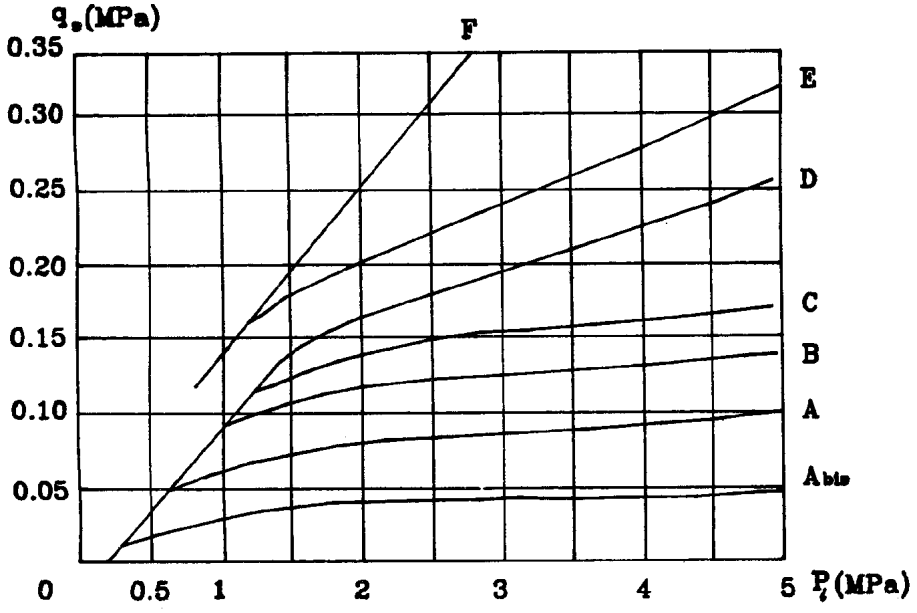
جدول شماره (۴-۱۰) - حدود مقادیر ضریب باربری نوک (k_p)[۵-۷]

نوع خاک	نوع شمع	
	گروه I	گروه II
رس یا لای	۱/۲ - ۱/۴	۱/۸ - ۲/۲
ماسه یا شن	۱/۰ - ۱/۲	۳/۲ - ۴/۲
آهکی، مارن یا مارن آهکی	۱/۸	۲/۴ - ۲/۸
سنگ هوازده	۱/۰ - ۱/۸	۱/۸ - ۲/۸

۴-۴-۱-۲-۲ بار حدی اصطکاکی شمعها از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۵-۷]:

$$Q_{sl} = \Sigma A_{si} \cdot q_{si} \qquad (۴-۲۷)$$

در این معادله A_{si} سطح جداره شمع در لایه i ام و q_{si}، اصطکاک واحد سطح شمع در لایه i ام هستند. مقدار q_s برای هر لایه با استفاده از شکل (۴-۱۶) به‌دست می‌آید. در این شکل هفت منحنی ترسیم شده است. این منحنی‌ها به نوع خاک، «فشار حدی» مربوطه (P_l) و نوع شمع (همان نوزده روش مشخص شده در جدول (۴-۱۰)) بستگی دارد. طبقه‌بندی این منحنی‌ها در جدول (۴-۱۱) آمده است [۵-۶].



شکل شماره (۴-۱۶) - منحنی‌های P_l برحسب q_s برای انواع شمعها

1- Nondisplacement 2- Displacement

جدول شماره (۴-۱۱) - طبقه‌بندی اصطکاک جداره برای پرسیومتر منارد (همراه با شکل (۴-۱۶) استفاده شود) [۶-۵]

نوع خاک	فشار حدی P_l مگاپاسکال	نوع شمع					
		بتنی برجا	شمع برجا با غلاف		کوبیدنی		تزریق شده
			بتنی	فلزی	بتنی	فلزی	فشار کم	فشار زیاد
رس نرم یا لای، ماسه سست، آهکی نرم	۰/۷ - ۰	A_{bis}	A_{bis}	A_{bis}	A_{bis}	A_{bis}	A	--
رس نسبتاً سخت و لای	۲/۰ - ۱/۲	(A) A_{bis}	(A) A_{bis}	A_{bis}	(A)* A_{bis}	A_{bis}	A	D**
رس سخت تا خیلی سخت	> ۲/۰	(A) A_{bis}	(A)* A_{bis}	A_{bis}	(A)* A_{bis}	A A_{bis}	D**	
ماسه نسبتاً متراکم	۲-۱	(B)	(A)*		(B)*			
ماسه متراکم تا خیلی متراکم	> ۲/۵	A (C)	A_{bis} (B)*	A_{bis}	A (C)*	A	B	>D
سنگ آهکی هوازده یا درزه‌دار	> ۱	B (C) B	A (B)* A	A	B (C)* B	B	C	> D
مارن	۴ - ۱/۵	(E)* C	(C)* B	B	E***	E***	E	F
مارن خیلی سخت	> ۴/۵	E	-	-	-	-	F	-
سنگ هوازده	۴ - ۲/۵	F	F	-	F***	F***	> F	> F
سنگ درزه‌دار	> ۴/۵	F	-	-	-	-	> F	>F

* حروف داخل پرانتز فقط برای شمعهایی که بسیار خوب ساخته و اجرا شده‌اند به‌کار می‌رود (برای مثال خاکهای دستی در این جدول قرار نمی‌گیرد).

** تنها برای خاکهای با مگاپاسکال P_l > ۱/۵

*** هنگامی که امکان اجرای شمع کوبیدنی باشد.

۴-۴-۲ نشست

در آزمایش پرسیومتری مدول مقاومتی به‌طور مستقیم به‌دست می‌آید، بنابراین می‌توان اندازه نشست در شالوده‌ها و شمعها را با دقت محاسبه و پیش‌بینی نمود.

۴-۴-۲-۱ نشست شالوده‌ها : بررسیهای مانارد و روسو[1] در سال ۱۹۶۲ منجر به ارائه رابطه‌ای برای نشست پی صلب شد. این رابطه شامل نشست مربوط به تغییرشکل زاویه‌ای و نشست مربوط به تغییرشکل حجمی است [۵-۱]. نشست کلی عبارت است از [۵-۶] و [۵-۱۱]:

$$S = (q - \sigma_v)\frac{2B_o}{9E_d}(\lambda_d \frac{B}{B_o})^{\alpha} + \frac{\lambda_c . B}{qE_c}\alpha \qquad (۴-۲۸)$$

این عوامل در یک خاک همگن عبارتند از :

E_c = مدول اندازه‌گیری شده M.P.M در رابطه با تنش حجمی $(E_c = \frac{1}{2}E_M)$ [۵-۱]

E_d = مدول اندازه‌گیری شده M.P.M در رابطه با تنش انحرافی $(\frac{1}{E_d} = 1/5\ \frac{1+\upsilon}{E_M})$ [۵-۱]

λ_d و λ_c = ضرایب شکل شالوده که از جدول شماره (۴-۱۲) به‌دست می‌آیند.

α = ضریب سازه‌ای که تابع نوع خاک و نسبت $\frac{E_M}{P_l}$ است و از جدول (۴-۱۳) به‌دست می‌آید.

q = فشار متوسط وارد از پی صلب

σ_v = فشار روبار

B_o = عرض مبنا که معمولاً ۶۰ سانتیمتر است

B = عرض یا قطر شالوده، که باید بزرگتر از B_o باشد

E_M = مدول پرسیومتریک

جدول شماره (۴-۱۲) - ضرایب λ_c و λ_d برای محاسبه نشست پی‌ها [۵-۶]

L/B	۱		۲	۳	۵	۲۰
ضرایب شکل	دایره	مربع				
λ_d	۱	۱/۱۲	۱/۵۳	۱/۷۸	۲/۱۴	۲/۶۵
λ_c	۱	۱/۱۰	۱/۲۰	۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۵۰

1- Rousseau

جدول شماره (۴-۱۳) - ضریب α برای محاسبه نشست در خاکهای مختلف [۶-۵]

نوع خاک	نباتی		رس		لای		ماسه		ماسه و شن	
شرایط خاک	E_M/P_1	α	E_M/P_1	α	E_M/P_1	α	E_M/P_1	α	E_M/P_1	α
بیش تحکیم یافته	-	-	> ۱۶	۱	> ۱۴	۲/۳	> ۱۲	۱/۲	> ۱۰	۱/۳
عادی تحکیم یافته	-	۱	۹-۱۶	۲/۳	۸-۱۴	۱/۲	۷-۱۲	۱/۳	۶-۱۰	۱/۴
سنگ هوازده	-	-	۷-۹	۱/۲	-	۱/۲	-	۱/۳	-	۱/۴

در خاکهای غیرهمگن و در خاکهایی که E_M در هر ترازی متفاوت است، اگر تفاوت بیش از ۳۰٪ باشد توصیه می‌شود که نشست فوق با استفاده از یک مدول معادل تعیین شود. این مدول معادل از روش زیر تعیین می‌شود :

خاک زیر تراز پی به شانزده قسمت که ضخامت هر قسمت $R = \frac{B}{۲}$ است، تقسیم می‌شود. لایه i ام بین عمقهای $(i-۱)R$ و iR قرار داشته و مدول پرسیومتری اندازه‌گیری شده در آن عمق E_i است (اگر چند مدول در یک لایه اندازه‌گیری شده باشد E_i میانگین این چند مدول است). مدولهای E_c و E_d به‌شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$E_c = E_۱ \qquad (۲۹-۴)$$

که E_c برابر مقدار E_M در لایه شماره ۱ متصل به کف پی بوده و در نتیجه :

$$\frac{۱}{E_d} = \frac{۱}{۴}\left[\frac{۱}{E_۱} + \frac{۱}{۰/۸۵\ E_۲} + \frac{۱}{E_{(۳,۴,۵)}} + \frac{۱}{۲/۵\ E_{(۶,۷,۸)}} + \frac{۱}{۲/۵\ E_{(۹,۱۶)}}\right] \qquad (۳۰-۴)$$

در معادله $E_{(i,j)}$ مدول متوسط لایه‌های i تا j است.

اگر یک لایه نرم $(E_M < ۳M_{Pa})$ بین دو لایه سخت قرار داشته باشد، توصیه می‌شود پیش از محاسبه نشست آن، فرض شود کل خاک همگن بوده و سختی آن مساوی سختی لایه سخت است؛ این نشست با نشست زیر باید جمع شود[۶-۵]:

$$W = \Sigma h_i \frac{\alpha_i \Delta q_i}{E_i} \qquad (۳۱-۴)$$

در این معادله :

W = نشست شالوده انعطاف‌پذیر واقع بر خاک نرم

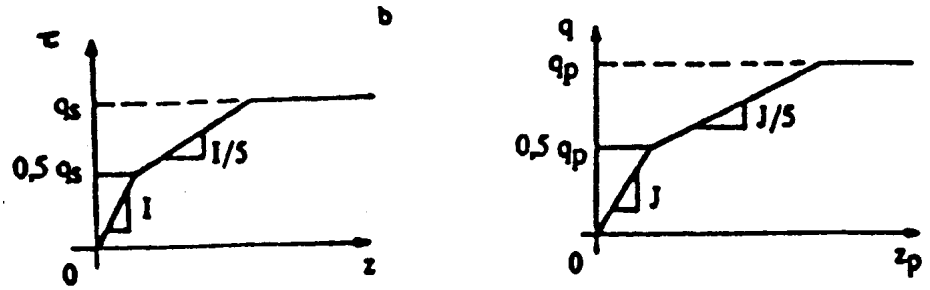
Δq_i = تنش پخش شده در لایه نرم

h_i = ضخامت لایه نرم

E_i = ضریب پرسیومتری لایه نرم

α_i = پارامتر منارد در لایه نرم که از جدول (۴-۱۳) به‌دست می‌آید.

۴-۲-۴-۲ نشست شمعها: گامبن[1] (۱۹۶۳) نشان داد که برای تخمین نشست یک شمع تکی لزوماً باید ارتباط تنش - تغییرمکان در زیر نوک شمع و در هر مقطع از محور شمع معلوم باشد. نمودارهای تنش - تغییرمکان براساس نوع و قطر شمع تغییر می‌کند. برای انواع شمعها، به قطر یا عرض ۲R، نمودارهای تنش - تغییرمکانهای کاربردی در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است.
شیب این نمودارها براساس کار فرانک و ژائو[2] (۱۹۸۲) به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [۶-۵]:



تغییر مکان نوک شمع

تغییر مکان محور شمع

شکل شماره (۴-۱۷) - نمودارهای واکنش خاک - شمع برای شمع با بار قائم

برای شمعهای اصطکاکی (شناور) یا خاکهای ریزدانه $J = ۱۱\, E_M/R$ و $I = ۲E_M/R$

برای شمعهای متکی بر نوک یا خاکهای دانه‌ای $J = ۴/۲\, E_M/R$ و $I = ۰/۸\, E_M/R$

در این نمودارها q_s ظرفیت باربری اصطکاکی (بسیج شده) و q_p ظرفیت باربری انتهایی شمع است.

۴-۲-۴-۳ شمع با بار جانبی: با استفاده از مفهوم "مدول واکنش بستر[3]" می‌توان شمعهای تحت بار جانبی را بررسی کرد. بدین منظور با توجه به داده‌های آزمایش پرسیومتری، (P_l, P_f, E_M) نمودار عکس‌العمل $(P - y)$ یک شمع تکی در یک عمق معین براساس شکل (۴-۱۸) قابل ترسیم است (y تغییر مکان جانبی است). مدول واکنش بستر (k_s) در این شکل از روابط زیر به‌دست می‌آید [۶-۵]:

$$k_s = \left[\frac{۴R}{۹E_M}\left(۲/۶۵\ \frac{R}{R_o}\right)^{\alpha} + \frac{\alpha}{۳E_M}R\right]^{-1} \qquad R > ۰/۳ \text{ متر} \qquad (۳۲-۴)$$

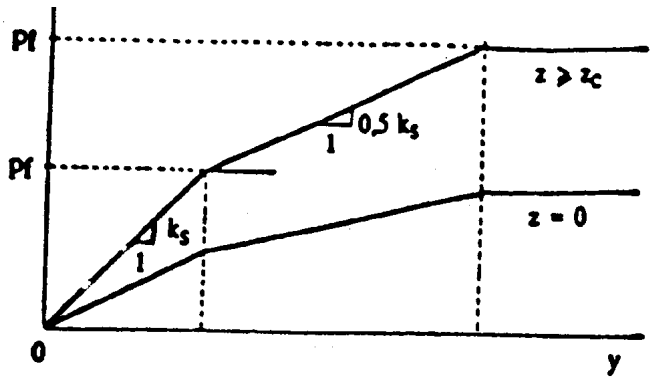
1- Gambin

2- Frank and Zhao

3- Subgrade reaction modulus

$$k_s = [\frac{۴R}{۹E_M}(۲/۶۵)^{\alpha} + \frac{\alpha}{۳E_M}R]^{-1} \qquad R \leq ۰/۳ \text{ متر} \qquad (۳۳-۴)_i$$

در این روابط R شعاع شمع، متر $R_o = \frac{B_o}{۲} = ۰/۳$ و α از جدول (۴-۱۳) به‌دست می‌آید.



شکل شماره (۴-۱۸)- نمودار (P - Y) برای شمع با بار جانبی

شمع در این روش به مثابه یک تیر فرض می‌شود که بر تعدادی فنر مستقل از هم تکیه دارد (شکل۴-۱۹). معمولاً در این روش معادله دیفرانسیل زیر با روش تفاضل محدود حل‌می‌شود:

$$EI\frac{d^۴y}{dx^۴} = q(x,y) = k_s.y \qquad (۳۴-۴)$$

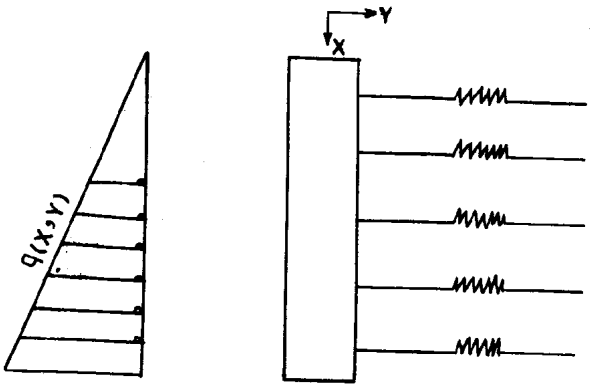
در این معادله :

EI = صلبیت خمشی شمع

y = تغییر مکان شمع در یک مقطع از محور طولی

q(x,y) = فشار جانبی خاک در واحد طول شمع در همان مقطع

k_s = ضریب واکنش افقی خاک در مقطع مذکور



شکل (۴-۱۹) - شمع مدل شده با فنر

i از این روش می‌توان سازه‌های نگهبان (مثل سپرها و دیوارهای جداکننده) را نیز طراحی نمود. بدین منظور ضریب واکنش k_s با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$k_s = E_M \left[\alpha \frac{a}{۲} + ۱۳(۹a \times 10^{-۴})^{\alpha}\right]^{-۱} \qquad (۳۵-۴)$$

در این رابطه $a = \frac{۲}{۳} h$ و h عمق گیرداری شمع است.

۵- منابع و مآخذ:

5-1 J.Costet & G.Sanglerat "Cours Pratique de mécanique des sols 1981, Dunod, Paris.

5-2 Fundamental Geotechnical Engineering B.M.DAS

5-3 "Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils" ASTM : D 4719 - 87

5-4 M.Gambin, R.Frank, "Menard, Pressuremeter test", Foundation Engineering, Vol.1

5-5 R.J.Mair, D.M.Wood, "Pressuremeter Testing Method and Interpretation", CIRIA Ground Engineering Report: In - situ Testing (1987)

5-6 S.Amar, B.G.F.Clarke, M.P.Gambin, T.L.L.Orr, "The application of Pressuremeter Test results to Foundation Design in Europe", Part 1, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering : European Regional Technical Committee (1991).

5-7 J.Baguelin, G.Bustamants, A.Frank, "The Pressuremeter for Foundation: French Experience"

5-8 M.P.Gambin, "The history of Pressuremeter Practice in France"

5-9 R.Frank, "Recent Developments in the prediction of pile behaviour from pressuremeter results", Symposium : FROM THEORY TO PRACTICE ON DEEP FOUNDATION, 1985 October 1-4, Porto Alegre RS Brazil

5-10 M.C.Ervin, "The Pressuremeter in Geotechnical Investigations", Proceedings of an Extention Course on In-situ testing for Geo. Investigations, Sydney May - June 1983

5-11 M.P.Gambin & R.A.Frank "the Present design rules for foundation based on Ménard PMT results" the Pressuremeter and its New Avenues Conference Proceeding, 1995.

Islamic Republic of Iran

"Pressumeter Test"
Instruction for Test and Application for Foundation Design

No: 223

Management and Planning Organization
Office of the Deputy for Technical Affairs
Bureau of Technical Affairs and Standards

Ministry of Energy
Water Engineering Standards Plan
Iran Water Resourses Management Organizat

2001/2002

این نشریه
با عنوان: «دستورالعمل آزمایش پرسیومتری» توسط کمیته «ژئوتکنیک» طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور تهیه شده است. تهیه این دستورالعمل با استفاده از آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی و تجربه‌های کارشناسی و در انطباق با شرایط ملی صورت پذیرفته است.

معاونت امور پشتیبانی
مرکز مدارک علمی و انتشارات

ISBN 964-425-321-3
9789644253218