

# آزمایش پرسیمتری در مهندسی ژئوتکنیک



هوشنگ کاتبی | استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز

مهدی سلیمانی | کارشناس ارشد خاک و پی

## چکیده:

کاوشهای صحرایی و ارزیابی ویژگی های خاک یا سنگ بخش اصلی و مهم فرآیند طراحی های ژئوتکنیک راتشکیل می دهند. امروزه آزمایش های برجا در جهت تکمیل آزمون های آزمایشگاهی برای کسب پارامترهای اساسی اهمیت روز افزونی پیدا کرده اند. دلیل افزایش مداوم تقاضا برای آزمایش های برجا، ناکافی بودن آزمون های آزمایشگاهی جهت تشخیص دقیق ویژگی های خاک و نیز تاثیر دستخوردگی غیر قابل اجتناب نمونه های ناشی از عوامل انسانی و دستگاهی میباشد. از طرفی فایده مهم آزمایش های برجا این است که خاک مد نظر در سطح مناسب تنش آزمایش میشود [۲].

پرسیمتری یکی از آزمایش های صحرایی در حوزه ژئوتکنیک است که برای شناسایی و ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک کاربرد دارد. از مزایای آزمایش پرسیمتری این است که شرایط نمونه خاک در محل تقریباً مشابه شرایط بارگذاری واقعی بوده و نسبت به بسیاری از آزمایشهای مکانیک خاک محیط تحت آزمایش، دست خوردگی کمتری دارد. به دلیل مزیت مذکور و سهولت کار با دستگاه، این آزمایش در پروژه های مختلف از کاربرد بالایی برخوردار است و روز به روز کاربرد آن بیشتر میشود.

## مقدمه:

ایده استفاده از ابزاری منبسط شونده در داخل گمانه برای اندازه گیری ویژگی های تغییر شکل پذیری خاک در ابتدا توسط دانشمند آلمانی در سال ۱۹۳۳ مطرح گردید. وی از یک بالن استوانه ای که از دو انتها توسط صفحات فلزی محدود شده و با فشار گاز منبسط می شد برای رسیدن به هدف فوق استفاده نمود. در سال ۱۹۵۴، فانگ ۱ در دانشگاه بورد و منارد ۲ در دانشگاه ایلینویز ۳، بطور مستقل شروع به ساخت پرسیمتر مدرن کردند. دستگاه ساخته شده توسط منارد در سال ۱۹۵۵ به ثبت رسید و بعنوان پرسیمتر منارد شناخته شد. این دستگاه اولین بار در شیکاگو برای بدست آوردن ویژگیهای خاک به منظور طراحی سازه ها استفاده شد و از آن زمان تا به حال یکی از پر استفاده ترین انواع پرسیمتر می باشد. در فرانسه لوئیس منارد به عنوان پدر پرسیمتر شناخته میشود، زیرا او نه تنها این دستگاه را ابداع نمود بلکه روشهای طراحی که بر نتایج این دستگاه استوار است را نیز به وجود آورد [۷].

مشخصات عمومی پرسیمتر

مقطع آزمایش مورد استفاده قرار می گیرند. این میله ها می توانند میله های حفاری یا میله های دستگاه نفوذ مخروط باشند.

## انواع پرسیمتر

روش قراردادن سوند پرسیمترها در داخل زمین، از جمله معیارهایی است که برای تقسیم بندی انواع پرسیمترها مد نظر قرار می گیرد. کلارک ۷ بر این اساس پرسیمترها را در سه گروه به شرح ذیل تقسیم بندی نمود [۵]:

الف) پرسیمترهای پیش حفار ۸: برای قرار دادن این پرسیمترها در داخل زمین نیاز به حفر و آماده نمودن گمانه می باشد. این نوع پرسیمترها در کلیه خاکها و سنگهای ضعیف که امکان ایجاد گمانه در آنها باشد قابل استفاده میباشند. این پرسیمترها فراگیرترین نوع پرسیمتر در مطالعات ژئوتکنیک هستند (PBP)

ب) پرسیمترهای خود حفار ۹: در سر سوند این نوع پرسیمترها یک حفار نصب میشود تا عمل حفاری و انتقال به زمین همزمان انجام گیرد. بنابراین کمترین دستخوردگی در (SBP) طرف خاک بوجود می آید.

ج) پرسیمترهای فشاری ۱۰: پرسیمتر رانشی توسط هندرسون (Hannde-SON, ۱۹۷۹) در مرکز تحقیقات مسکن انگلستان طراحی و ساخته شد. این نوع پرسیمتر در ابتدا برای تحقیقات و کاوشهای برجا در سواحل به کار رفت. سوند این نوع پرسیمترها با فشار در زمین فرو میرود.

مراحل انجام آزمایش

نصب صحیح پرسیمتر در درون زمین از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا نتایج حاصل از این آزمایش تا حد زیادی به دستخوردگی خاک وابسته است که آن هم به نحوه جایگذاری دستگاه درون زمین بر میگردد. گمانه های آزمایش پرسیمتری باید با حداقل بهم خوردگی حفر گردند. اما در گمانه هایی که برای نمونه گیری حفر می شوند، بهم خوردگی خاک اطراف معمولاً اهمیتی ندارد. پس بهتر است گمانه هایی که برای آزمایش پرسیمتری حفر می شوند از گمانه هایی که برای نمونه گیری دست نخورده حفر می شوند، مجزا باشند. به طور کلی انجام آزمایش پرسیمتری شامل مراحل کالیبراسیون ۱۱ تجهیزات، حفاری (برای پرسیمترهای پیش حفار)، جایگذاری سوند درون زمین، اعمال فشار و تشکیل حلقه های باربرداری- بار گذاری مجدد و ثبت همزمان داده ها، اصلاح داده های خام و تجزیه و تحلیل داده ها و استخراج پارامترهای مهندسی میباشد [۴].

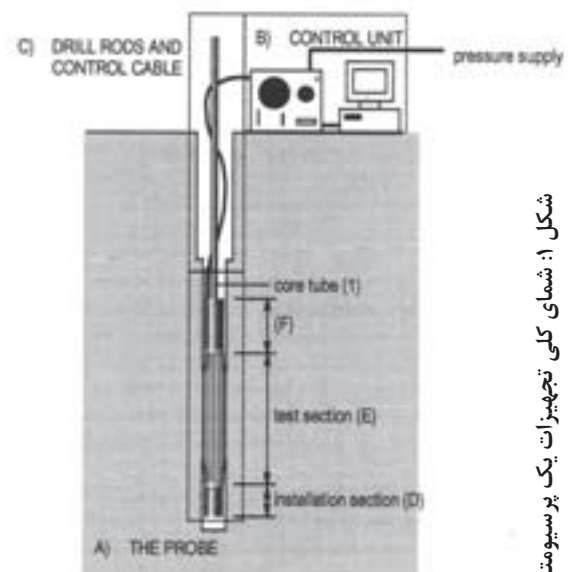
در آزمایش با پرسیمترهای پیش حفار (مانند پرسیمتر منارد) سوند درون گمانه-هایی که از قبل حفر شده است قرار میگیرد. بنابراین حفاری نیز جزئی از آزمایش بوده و نحوه انجام آن قطعاً در نتایج موثر خواهد بود. برای حفاری صحیح دو شرط باید مد

بطور کلی دستگاه پرسیمتر از سه بخش عمده مطابق شکل ۱ تشکیل شده است [۳]:

الف) سوند (Prob) پرسیمتر: اصلی ترین بخش دستگاه پرسیمتر را تشکیل می دهد. این بخش نیز به نوبه خود از سه قسمت تشکیل می شود که عبارتند از: ۱- بخش نصب یا کارگذاری ۲- بخش آزمایشگر و بخش سوم که بسته به نوع پرسیمتر می تواند یک فضای تو خالی، یک لوله حاوی ابزار دقیق یا یک مدول حفاری باشد. این سه بخش توسط یک هسته فلزی به یکدیگر متصل می گردند (بخش A در شکل ۱)

ب) واحد کنترل و اندازه گیری (Control Unit): واحد کنترل نیز که بسته به نوع پرسیمتر متفاوت می باشد، در سطح زمین قرار داشته و جهت کنترل تنش، کرنش و قرائت داده ها بکار می رود. آزمایش های پرسیمتر را می توان بصورت کنترل تنش ۴ یا کنترل کرنش ۵ و یا ترکیبی از هر دو انجام داد. واحد کنترل در ساده ترین شکلش شامل منبع تامین فشار گاز یا پمپ هیدرولیک، واحد اندازه گیری جابجایی و فشار و نیز سیستم کنترل جابجایی و فشار می باشد (بخش B در شکل ۱).

ج) واحد رابط: سوند پرسیمتر، توسط میله های فلزی، شیلنگ هیدرولیک یا گاز و یا کابل الکتریکی به سطح زمین متصل می گردند. میله های فلزی برای ثابت نگه داشتن سوند در



شکل ۱: شمای کلی تجهیزات یک پرسیمتر

نظر باشد: اول قطر حفره رواداری مشخص باشد و دوم اینکه استقرار دستگاه و روش حفاری کمترین دستخوردگی را در گمانه ایجاد کند. طبق توصیه ASTM نسبت قطر حفره  $(D_H)$ ، به قطر سوند  $(D_{PM})$  باید به صورت زیر باشد [۱]:

$$1.03 < D_H/D_{PM} < 1.2$$

پس از قرارگیری سوند در محل مورد نظر می توان آزمایش را شروع نمود. آزمایشها معمولاً به دو دسته تنش کنترل شده و کرنش کنترل شده تقسیم می شوند. انتخاب هر یک از این دو به نوع سوند و سیستم کنترل بستگی دارد. در آزمایشهای تنش کنترلی، مقدار بار (فشار) در گامهایی اضافه شده و تغییرات حجم ثبت میشود. طبق توصیه ASTM-D۷۱۹ افزایش بار بهتر است یک دهم  $P_L$  باشد و برای مدت ۱ دقیقه ثابت نگه داشته شود. در پایان هر افزایش می توان یک سیکل باربرداری - بارگذاری با انقباض و انبساط غشاء طبق همان روند قبلی انجام داد [۱].

در آزمایشهای کرنش کنترل شده، غشاء با یک نرخ ثابت تغییر مکان، منبسط میگردد. این روش برای سیستمهایی که با مایعات کار می کنند نسبتاً ساده تر می باشد. مقدار مشخصی آب یا روغن به داخل غشاء پمپ شده و فشار به وجود آمده را ثبت می کنند. Briaud و همکاران پیشنهاد کردند که هر افزایش حجم به اندازه یک چهارم  $V_0 V_0$  بوده و برای مدت ۱۵ ثانیه ثابت نگه داشته شود و فشار در پایان هر افزایش ثبت گردد [۶].

### تفسیر نتایج و تعیین پارامترهای مهندسی خاک

نتایج آزمایش پرسیمتری با توجه به تاثیراتی که از فشار هیدروستاتیک، افت حجم و فشار میپذیرند، باید تصحیح شوند. این اصلاحات که به اصلاح فشار و حجم معروفند توسط روابط زیر بیان می شوند:

$$P = P_R + P_W - P_C \quad P = P_R + P_W - P_C$$

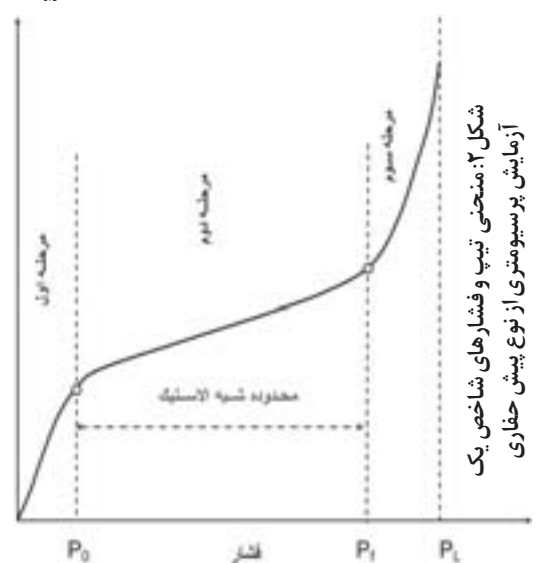
$$V = V_R - V_C \quad V = V_R - V_C$$

در اینجا،  $P$  فشار واقعی اعمال شده به خاک،  $P_R$  فشار قرائت شده در واحد کنترل،  $P_C$  فشار مربوط به مقاومت پوسته ها بوده که از کالیبراسیون و برای حجم های مختلف به دست می آید،  $P_W$  فشار هیدروستاتیک بین واحد کنترل و سوند بوده که به ازاء هر متر ۱۰ کیلو پاسکال می باشد.  $V$  حجم اصلاح شده،  $V_R$  حجم قرائت شده در واحد کنترل،  $V_C$  حجم مربوط به افت که از مرحله کالیبراسیون به دست می آید [۸].

در شکل ۲ نمودار تیپ یک آزمایش پرسیمتری نشان داده شده است. در این نمودار سه مرحله مشخص دیده می شود [۸]:

مرحله اول: در مرحله اول تعادل بین مجموعه دستگاه، سوند و زمین برقرار می شود، به طوری که غشاهای سوند به طور کامل به دیواره گمانه چسبیده و مقدار فشار به حالت قبل از حفاری  $(P_0)$  در زمین طبیعی برسد.

مرحله دوم: رفتار کنشسان و تقریباً خطی (شبه الاستیک) بوده و تا نقطه  $P_f$  یا فشار خزش ادامه می یابد. ضریب تغییر شکل یا ضریب پرسیمتری  $(E_p)$  و یا مدول منارد  $(E_M)$  از شیب این



قسمت از منحنی بدست می آید. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$E_p = E_M = 2(1+\nu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

که در آن  $\nu$  نسبت پواسون،  $V_0$  حجم قسمت اندازه گیر محفظه (سوند) هنگامی که هنوز افزایش حجم پیدا نکرده،  $\Delta V$  اختلاف حجم اصلاحی در قسمت خطی نمودار،  $\Delta P$  اختلاف فشار اصلاحی در قسمت خطی نمودار و  $V_m$  حجم اصلاحی در وسط محدوده افزایش حجم  $\Delta V$  می باشد.

مرحله سوم: شروع رفتار خمیری بوده و در این مرحله تغییر شکلها افزایش یافته و به مقدار قابل توجهی می رسد که سرانجام مرحله تعادل حدی حاصل می شود. مقدار مجانب در این نقطه (فشار حدی) را  $P_L$  گویند. اگر نمودار پرسیمتری امکان رسم مجانب را بدهد، فشار متناظر با این مجانب فشار حدی نامیده میشود در غیر این صورت فشار حدی  $P_L$  فشاری است که حجم محفظه را به دو برابر حجم اولیه حفره که به صورت  $V+V_0$  تعریف میگردد، برساند.

با توجه به نوع پرسیمتر مورد استفاده، متغیرهای زیر و یا بخشی از آن ها می توان از آزمایش پرسیمتری بدست آورد:

فشار افقی برجا (کل و موثر)، مدول برشی  $(G)$ ، مدول الاستیسیته منارد  $(E_m)$ ، مقاومت برشی زهکشی نشده رس ها  $(C_u)$ ، زاویه اصطکاک موثر و زاویه اتساع ماسه ها، فشار حدی  $(P_L)$ ، ضریب تحکیم افقی.

### مزایا و کاربردهای پرسیمتری

با توجه به نتایج حاصل از آزمون پرسیمتری و کاربردهایی که این نتایج در تحلیل و تفسیر ویژگیهای مهندسی خاک و استفاده از آنها در ارائه روابط مورد استفاده در طراحیهای ژئوتکنیکی دارد میتوان پرسیمتری را به عنوان یکی از کارآمدترین آزمونهای برجا معرفی نمود. بریود  $(Briaud, ۱۹۹۲)$  در یک تقسیم بندی کلی از دو دیدگاه مزایای زیر را برای پرسیمتر PBP مطرح مینماید [۶]:

الف) از نقطه نظر انجام آزمایش

در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک می توان این مزایا را برای پرسیمتر برشمرد: قابل کاربرد در تعیین پارامترهای زیادی از خاک، نسبت به سایر آزمایشات پایه نظری محکم تری دارد، نسبت به سایر آزمایشات بر جا ناحیه بزرگتری از خاک را تحت آزمایش قرار میدهد، برخلاف آزمایشهای دیگر نظیر نفوذ مخروط یا برش پره، این آزمایش علاوه بر مقاومت برشی و فشار حدی  $P_L$ ، ویژگیهای تغییر شکل پذیری خاک را نیز اندازه گیری می کند.

ب) از نقطه نظر کاربرد در طراحی

علاوه بر بدست آوردن پارامترهای زیادی از خاک، برخی از کاربردهای پرسیمتری را بصورت زیر میتوان نام برد:

در طراحی شمع های با بار گذاری افقی در محیط های خشکی و دریایی

در طراحی پی های سطحی و بخصوص پی های گسترده

در طراحی شمع های با بار گذاری قائم و بویژه در شمع های با باربری انتهایی

علاوه بر موارد فوق، نتایج آزمایش پرسیمتری در طراحی دیوارهای حائل، طراحی مهارهای ترزیقی و طراحی زیر سازی نیز قابل کاربرد است.

### مراجع

- 1- ASTM-D4719, 2002, Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils, Annual book of ASTM standards, Vol.04.
- 2- Hai-Su-Yu, 1990, Cavity Expansion Theory and its Applications to Analysis of Pressuremeters, Doctor of Philosophy Thesis, Oxford University.
- 3- C.R.I. Caytone, M.C. Matthews, N.E. Simons, 1997, Site Investigation, Department of Civil Engineering, University of Surrey.
- 4- Gambine, Rousseau, 1988, pressuremeter Test Interpretation.
- 5- Clarke, B.G. (1995), Pressuremeter in Geotechnical Design, Chaman & Hall, Cambridge, U.K.
- 6- Briaud, J.-L. (1992), The pressuremeter, Balkema, Rotterdam.

۷- پهلوان، ب. (۱۳۸۱)، مطالعه تغییر شکل پذیری ابرفت درشت دانه تهران با استفاده از پرسیمتر، رساله دکترا، دانشگاه تربیت مدرس.

۸- دستورالعمل آزمایش پرسیمتری در مطالعات ژئوتکنیک، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی، نشریه شماره ۲۳۳، ۱۳۸۰