

# استفاده از نتایج کاوشگرهای دینامیکی در مطالعه خاک‌های ریزدانه و برآورد پارامتر چسبندگی

مهدی خداپرست<sup>۱\*</sup>، علی فاخر<sup>۲</sup>

۱- استادیار و عضو هیأت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

khodaparast@qom.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۴/۰۱/۲۱

**چکیده-** کاوشگر دینامیکی نوعی نفوذسنج است و نفوذسنجی نقش مهمی در شناسایی محلی خاک‌ها دارد. شیوه مذکور نسبت به روش‌های گمانه‌زنی و مطالعات معمول ژئوتکنیک، ارزان‌تر و سریع‌تر است و در بسیاری موارد به‌خصوص زمانی که عمق مورد نظر برای مطالعه لایه‌های خاک خیلی زیاد نباشد استفاده می‌شود. در این مقاله ضمن ارائه تجربیات مربوط به ساخت یک نفوذسنج دینامیکی تحقیقاتی، به افزودن نوعی نمونه‌گیر ویژه برای افزایش کارایی نفوذسنج‌های کلاسیک اشاره می‌شود. همچنین ضمن اشاره به تکرارپذیری نتایج این آزمایش سعی می‌شود دقت این آزمایش در مطالعه خاک‌های ریزدانه بررسی و سپس تعدادی رابطه‌ی تجربی برای استفاده در آبرفت‌های ذکر شده در مقاله ارائه می‌شود. در نهایت امید می‌رود پژوهش تشریح‌شده در این مقاله به ترغیب و توسعه استفاده از این روش در شناسایی محلی خاک‌های ریزدانه منجر شود.

**کلیدواژگان:** کاوشگر دینامیکی، تکرارپذیری، شناسایی محلی، خاک ریزدانه، مقاومت زهکشی‌نشده

## ۱- مقدمه

استفاده می‌شود. دسته دوم از نوع دینامیکی است که از ضربه برای نفوذ استفاده می‌شود و آزمایش‌های «نفوذ استاندارد»<sup>۳</sup> و «کاوشگر دینامیکی»<sup>۴</sup> از متداول‌ترین آزمایش‌های این دسته است. البته ابزار آزمایش نفوذ استاندارد با کاوشگر دینامیکی به دلیل شکل و اندازه نوک و روش استفاده تفاوت دارد.

کاوشگرهای دینامیکی از سه قسمت اصلی به نام چکش، مخروط نفوذ و میله‌های رابط تشکیل شده‌اند و

نفوذسنجی<sup>۱</sup> یکی از انواع مهم آزمایش‌های محلی است. در این آزمایش‌ها جسمی شبیه یک مخروط یا شکل دیگر در اثر فشار یا ضربه، داخل خاک نفوذ می‌کند و مقاومت آن در مقابل نفوذ، به مشخصات خاک ارتباط داده می‌شود. آزمایش‌های نفوذسنجی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول از نوع استاتیکی بوده که متداول‌ترین آن‌ها آزمایش «نفوذ مخروط»<sup>۲</sup> است و در آن‌ها از فشار استاتیکی

3- SPT

4- Dynamic Probing

1- Penetration Testing

2- CPT

برخلاف آزمایش نفوذ استاندارد معمولاً نیاز به حفر گمانه نیست. انرژی لازم برای نفوذ در خاک با ضربه تأمین می‌شود. این ضربه از سقوط وزنه‌ای معین از ارتفاع مشخص ناشی می‌شود. این کار با توجه به اندازه و ارتفاع سقوط آن ممکن است به صورت دستی و یا به کمک موتور انجام شود. در نهایت تعداد ضربه لازم برای مقدار نفوذ مشخص تعیین می‌شود. جزئیات وزنه‌ها و شکل نوک و روش آزمایش با کاوشگرهای دینامیکی و تفاوت آن‌ها با سایر آزمایش‌های نفوذسنجی در قسمت بعدی مقاله بیان می‌شود.

استفاده از کاوشگرهای دینامیکی سال‌هاست که در بسیاری از کشورهای جهان آغاز شده و در برخی کشورها مانند آلمان و ژاپن توسعه خوبی یافته است. اما در کشور ما استفاده از کاوشگرهای دینامیکی توسعه چندانی نیافته و به ندرت استفاده می‌شود.

انجام بررسی‌ها و مطالعات محلی با استفاده از کاوشگرهای دینامیکی مزایا و امتیازهای ویژه‌ای دارد که به آن‌ها اشاره می‌شود:

- ۱- سرعت بالا در استفاده از این ابزار [۱]؛
- ۲- انعطاف‌پذیری و سهولت استفاده از این ابزار در مناطق با دسترسی دشوار [۲]؛
- ۳- اقتصادی بودن این ابزار از نظر ساخت اولیه و همچنین کاربرد آن [۱] و [۳]؛
- ۴- پیوسته بودن نتایج آن و امکان شناسایی لایه‌های ضعیف با ضخامت کم [۴] و [۳]؛
- ۵- نیاز نداشتن به حفر گمانه برای انجام آزمایش [۵]؛
- ۶- امکان کاهش تعداد گمانه‌ها، در صورت جایگزینی گمانه‌زنی با نفوذسنجی به کمک این ابزار [۶]؛
- ۷- کاهش نیروی انسانی و نیاز نداشتن به افراد با تخصص بالا [۷]؛

۸- امکان نمونه‌گیری از خاک [۸].

۹- امکان برآورد پتانسیل روانگرایی [۹]

نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که زمانی اعتماد به نتایج این ابزار (کاوشگر دینامیکی) به میزان قابل قبولی خواهد رسید که نتایج آن تکرارپذیر<sup>۱</sup> باشد [۳]. بنابراین این مقاله به نتایج تحقیق انجام‌شده درباره‌ی تکرارپذیری نتایج نیز می‌پردازد.

در مقاله حاضر ضمن بیان ویژگی‌ها و مشخصات تجهیزات انجام آزمایش نفوذسنجی دینامیکی، با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در ۶ سایت مختلف در مناطق مرکزی و جنوبی ایران به مطالعه تکرارپذیری پرداخته شده است و همچنین به میزان دقت روابط تجربی در برآورد برخی از مشخصات خاک در آن مناطق اشاره می‌شود.

## ۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

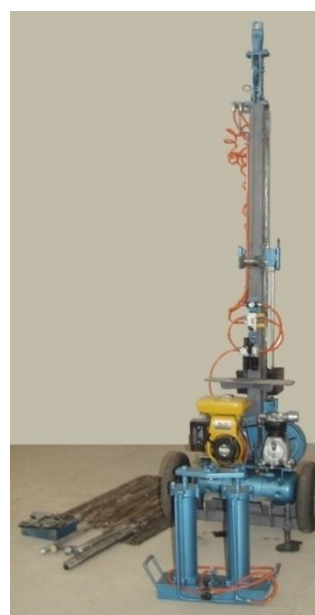
تاکنون کاوشگرهای دینامیکی در ابعاد و اندازه‌های مختلفی ساخته شده و تعدادی از آن‌ها تحت استانداردهای DIN آلمان و BS انگلستان درآمده‌اند. در جدول ۱ مشخصات مهم‌ترین آن‌ها براساس استاندارد DIN4094 آمده است [۱۰]؛ استاندارد ISO 22476-2 نیز این مشخصات را ارائه کرده است [۴].

### ۲-۱- کاوشگر دینامیکی موتوردار

با توجه به جدول ۱ می‌بینید که ویژگی‌های ابزار کاوشگرهای دینامیکی مختلف با هم تفاوت دارد. بنابراین در این پژوهش، محقق برای بررسی اثر مشخصات انواع کاوشگرهای دینامیکی نسبت به ساخت یک دستگاه موتوردار اقدام کرد. این دستگاه تحقیقاتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

1- Repeatable

این دستگاه مزبور به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان تغییر مشخصات اصلی آن مانند وزن چکش، ارتفاع سقوط چکش، قطر میله‌های رابط و همچنین نوع مخروط نفوذ وجود دارد. به این ترتیب با استفاده از این دستگاه و ساخت انواع وزنه‌ها، مخروط نفوذ و میله‌های رابط، امکان انجام آزمایش با هر یک از انواع مختلف سبک، متوسط، سنگین و خیلی سنگین فراهم می‌شود و همه‌ی مشخصات جدول ۱ بجز آزمایش نفوذ استاندارد را پوشش می‌دهد.



شکل (۱) دستگاه کاوشگر دینامیکی موتور دار ساخته شده در این تحقیق و سایر ملحقات آن

مخروط در کاوشگر دینامیکی در واقع یک مخروط کامل و نوک‌تیز است ولی مخروط در آزمایش نفوذ استاندارد یک فضای خالی در نوک برای نمونه‌گیری دارد و به همین دلیل همان‌طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود، نمی‌توان مخروط آزمایش نفوذ استاندارد را در ابعاد کوچک و وزنه‌های سبک به کار برد.

در شروع آزمایش، مخروط نفوذ به سر یکی از میله‌ها بسته می‌شود. سپس با فاصله از نوک مخروط در هر فاصله معین (بسته به وزن چکش بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) علامت‌هایی روی میله مشخص می‌شود و نوک مخروط به گونه‌ای روی زمین قرار داده می‌شود که میله به صورت کاملاً قائم در آید. سپس وزنه چکش تا بیشترین ارتفاع بالا برده شده و رها می‌شود. مخروط در اثر این ضربه درون خاک نفوذ می‌کند. دوباره این کار تکرار شده و تعداد ضربات نفوذ به مقدار معین، ثبت می‌شود. تعداد ضربه، نتیجه هر آزمایش است و با حرف M نشان داده می‌شود. این کار تا عمق مورد نظر تداوم یافته و در نهایت نموداری پیوسته از تغییرات M در عمق به دست می‌آید. پس از به پایان رسیدن آزمایش و رسیدن به عمق مورد نظر، بیرون کشیدن میله‌ها به وسیله‌ی جک مخصوصی که در شکل ۱ نشان داده شده است انجام می‌شود.

جدول (۱) مشخصات انواع متعارف کاوشگرهای دینامیکی و ابزار آزمایش نفوذ استاندارد [۱۰]

| نوع                                    | سبک (DPL)                    | متوسط (DPM)                  | سنگین (DPH)                  | خیلی سنگین (DPSH)             | نفوذ استاندارد (SPT)              |
|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| وزن چکش (بر حسب کیلوگرم)               | ۱۰±۰/۱                       | ۳۰±۰/۳                       | ۵۰±۰/۵                       | ۶۳/۵±۰/۵                      | ۶۳/۵±۰/۵                          |
| ارتفاع سقوط چکش (بر حسب متر)           | ۰/۵±۰/۰۱                     | ۰/۵±۰/۰۱                     | ۰/۷۵±۰/۰۲                    | ۰/۷۵±۰/۰۲                     | ۰/۷۶±۰/۰۳                         |
| قطر مخروط (بر حسب میلی‌متر)            | ۳۵/۷±۰/۳                     | ۳۵/۷±۰/۳                     | ۴۳/۷±۰/۳                     | ۵۰/۵±۰/۵                      | ۵۰/۵±۰/۵                          |
| سطح مقطع مخروط (بر حسب سانتی‌متر مربع) | ۱۰                           | ۱۰                           | ۱۵                           | ۲۰                            | ۲۰*                               |
| قطر میله های رابط (بر حسب میلی‌متر)    | ۲۲±۰/۲                       | ۳۲±۰/۲                       | ۳۲±۰/۲                       | ۳۲±۰/۲                        | ۳۲-۴۰/۵-۵۰                        |
| ضخامت میله های رابط (بر حسب میلی‌متر)  | ۶±۰/۲                        | ۹±۰/۲                        | ۹±۰/۲                        | -                             | -                                 |
| محدوده استاندارد نتایج                 | ۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتیمتر) | ۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتیمتر) | ۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتیمتر) | ۵-۱۰۰ (برای نفوذ ۲۰ سانتیمتر) | حداکثر ۵۰ (برای نفوذ ۳۰ سانتیمتر) |

\* شبه مخروط با نوک باز



الف) نمونه‌گیر و مخروط نوک



ب) نمونه‌گیر در حالت حرکت مخروط نوک به داخل



ج) میله وسط نمونه‌گیر



د) نمونه خاک اخذشده از نمونه‌گیر



ر) نمونه‌گیر در حالت باز شده بدون مخروط نوک

شکل (۳) نمونه‌گیر ویژه دستگاه

تفاوت اصلی نمونه‌گیر پیشنهاد شده در این تحقیق با نمونه‌گیر آزمایش نفوذ استاندارد، وجود مخروط نوک تیز است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از حرکت مخروط

## ۲-۲- ساخت نمونه‌گیر

آگاهی از جنس خاک در آزمایش نفوذسنجی بسیار مفید و با ارزش است؛ ولی در کاوشگرهای دینامیکی متداول با مشخصات ذکرشده در بخش‌های قبل، امکان نمونه‌گیری از خاک نیست. از این نظر، آزمایش نفوذ استاندارد به دلیل اخذ مقداری نمونه دست‌خورده در آزمایش اولویت دارد. بنابراین در این پژوهش طراحی و ساخت یک نمونه‌گیر ویژه برای کاوشگرهای دینامیکی مورد توجه قرار گرفت. در گام اول پژوهش تلاش شد که نمونه‌گیر متداول پنجره‌ای<sup>۱</sup> در بخشی از میله‌های دستگاه جایگزین شود. خاک در نمونه‌گیر پنجره‌ای از کنار وارد نمونه‌گیر که بخشی از میله است وارد می‌شود. ولی تجربه کسب شده در این پژوهش نشان داد که با استفاده از نمونه‌گیر پنجره‌ای فقط امکان نمونه‌گیری از اعماق سطحی وجود دارد (شکل ۲)؛ بنابراین ایده دیگری برای ساخت نمونه‌گیر مورد توجه قرار گرفت به گونه‌ای که با آن بتوان از هر عمق دلخواه نمونه‌گیری کرد.

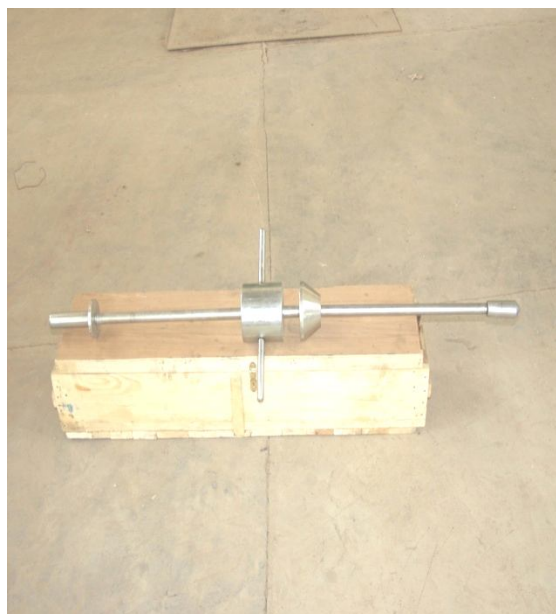


شکل (۲) نمونه‌گیر پنجره‌ای

در نهایت، نمونه‌گیر قابل استفاده با کاوشگر دینامیکی با الهام از نمونه‌گیر آزمایش نفوذ استاندارد به صورت دوکفه‌ای ساخته شد که در قسمت ابتدایی آن برخلاف نمونه‌گیر آزمایش نفوذ استاندارد، یک مخروط نوک‌تیز قرار دارد. این مخروط به وسیله یک میله که از وسط نمونه‌گیر عبور می‌کند از محل خود حرکت کرده و هنگام نمونه‌گیری داخل نمونه‌گیر می‌رود. لذا امکان ورود خاک به داخل نمونه‌گیر فراهم می‌شود (شکل ۳).

1- Windows Sampler

در این شرایط باید دستگاه سبک‌تر یا سنگین‌تر به کار برد تا نتایج وارد محدوده استاندارد شوند.



شکل (۵) ابزار کاوشگر دینامیکی دستی سبک

در این تحقیق آزمایش‌های نفوذسنجی در ۶ سایت در مناطق مختلف ایران انجام شده است که در آن‌ها سایر آزمایش‌های متداول ژئوتکنیکی نیز به‌دقت انجام شده است [۸].

### ۳- بررسی تکرارپذیری نتایج

در هر آزمایش ژئوتکنیکی در صورتی می‌توان به نتایج آن استناد کرد که تکرارپذیری و نسبتاً ثابت در شرایط مشابه باشند. در مورد آزمایش نفوذسنجی دینامیکی نیز زمانی اعتماد به این شیوه به میزان قابل قبولی خواهد رسید که بتوان تکرارپذیری را در نتایج آن به اثبات رساند [۳].

به‌خصوص در رس‌های نرم و حساس، بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش‌های کاوشگر دینامیکی اهمیت زیادی دارد [۸].

انتخاب متغیر مناسب آماری برای مطالعه تکرارپذیری بسیار مهم است. یکی از متغیرهای نشانگر تکرارپذیری، ضریب

نوک نمونه‌گیر به داخل آن تا رسیدن به عمق مورد نظر، سوزن‌هایی داخل سوراخ میانی میله‌های رابط قرار داده شده است (شکل ۴). سوزن‌ها در واقع میله‌های فلزی با قطر کمتر از میله رابط است و در هنگام آزمایش، فضای خالی میله رابط را در تمام طول آن پر کرده است. هنگامی که نمونه‌گیر به عمق مطلوب رسید، آخرین سوزن داخل میله‌های رابط برداشته شده و امکان حرکت مخروط نوک نمونه‌گیر به داخل آن و گرفتن نمونه فراهم می‌شود [۸].



شکل (۴) یک میله نفوذ و سوزن آن

### ۲-۳- ساخت کاوشگر دینامیکی دستی

علاوه بر دستگاه کاوشگر دینامیکی موتوردار مطابق شکل ۱ که قبلاً تشریح شد، ابزار ساده دستی مطابق شکل ۵ نیز ساخته شد. این ابزار که مشخصات آن زیر عنوان «سبک»<sup>۱</sup> در جدول ۱ آمده است، امکان آزمایش در کف چاهک‌های دستی و شرایط دشوار از نظر دسترسی را فراهم می‌آورد. البته نکته مهم در استفاده از ابزارهای دستی، اثر دقت اپراتور به‌خصوص در بالا بردن چکش به مقدار معین، است.

لازم به ذکر است که با توجه به میزان نرمی خاک باید نوعی از کاوشگر دینامیکی انتخاب شود که نتایج آزمایش‌ها در محدوده استاندارد (با توجه به جدول ۱) باشند. اگر نتایج خارج از محدوده استاندارد باشند، قابل اعتماد نیست.

1- DPL

تغییرات ( $C_v$ ) می باشد که بر اساس رابطه ۱ تعریف می شود:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (۱)$$

در این رابطه،  $s$  انحراف معیار و  $\bar{x}$  متوسط مقادیر حاصل از نتایج آزمایش‌ها است. متغیر مزبور بی‌بعد بوده و مبین درجه پراکندگی بی‌بعد شده نسبت به میانگین است. برخی محققان نیز در بیشتر آزمایش‌های ژئوتکنیکی برای تعیین خواص خاک، تکرارپذیری نتایج را با استفاده از این متغیر بررسی کرده‌اند. در جدول ۲ برای تعدادی از مشخصات مقاومتی خاک، میزان متداول ضریب تغییرات آمده است [۱۱].

جدول (۲) ضریب تغییرات متداول در تعدادی از آزمایش‌های خاک [۱۱]

| میزان بیشتر توصیه شده | آزمایش                                   |
|-----------------------|------------------------------------------|
| ۳۰                    | نفوذ استاندارد                           |
| ۲۵                    | باربری کالیفرنیا                         |
| ۴۰                    | مقاومت تک محوری در رسها                  |
| ۳۰                    | چسبندگی زهکشی نشده رسها در سه محوری      |
| ۱۰                    | زاویه اصطکاک داخلی ماسه ها در برش مستقیم |

همان‌طور که در جدول ۲ دیده می شود مقدار ضریب تغییرات در آزمایش نفوذ استاندارد که یک نفوذسنج دینامیکی خیلی سنگین می باشد ۳۰ است .

بنابراین با تعیین مقدار ضریب تغییرات نتایج حاصل از آزمایش با کاوشگر دینامیکی، می توان قضاوت مناسبی در مورد میزان تکرارپذیری نتایج آن داشت.

برای بررسی تکرارپذیری با استفاده انواع کاوشگرهای دینامیکی و با تغییر در مشخصات اصلی شامل وزن چکش، قطر مخروط و قطر میله های رابط، در محل‌های مختلف دو، سه و یا چهار آزمایش در فواصل نزدیک به هم (کمتر از

۰/۵ متر) انجام شده است.

شایان ذکر است که با توجه به آزمایش‌های انجام شده، مقدار ضریب تغییرات نتایج در بیش از ۷۰ درصد موارد کمتر از ۱۰٪ و در بیش از ۹۵ درصد موارد کمتر از ۳۰٪ است [۸].

از آنجا که مقدار پارامتر ضریب تغییرات نتایج در همه انواع کاوشگرهای دینامیکی در بیش از ۹۵ درصد موارد کمتر از ۳۰٪ است با مقایسه با اعداد جدول ۲ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج آزمایش‌های کاوشگر دینامیکی تکرارپذیری قابل قبولی دارد.

## ۴- روابط تجربی در مورد انواع متداول کاوشگرهای دینامیکی

در این قسمت برخی از مهم‌ترین روابط تجربی موجود بین نتایج انواع کاوشگرهای دینامیکی با مقاومت زهکشی‌نشده خاک‌های ریزدانه و حدود دقت آن‌ها در مناطق مطالعه شده در این پژوهش بررسی می‌شود.

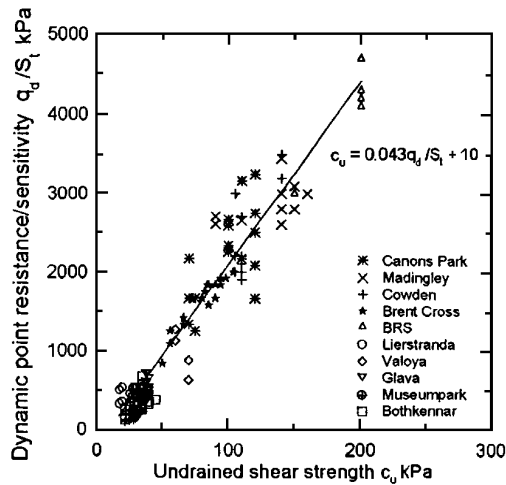
### ۴-۱- روابط پایه کاوشگرهای دینامیکی

برای آنالیز نتایج ابزار کاوشگر دینامیکی، محققین فرورفت مخروط نفوذ در خاک را به مثابه یک شمع در نظر گرفته‌اند که براساس تعیین مقاومت مخروط در حین فرورفت، میزان مقاومت خاک ارزیابی می‌شود.

با توجه به مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در مورد آزمایش نفوذسنجی دینامیکی یکی از روابط پایه و مهم در این خصوص محاسبه مقاومت دینامیکی مخروط ( $q_d$ ) است که به شکل زیر ارائه گردیده است [۱۴]:

$$q_d = \frac{1}{A} \frac{1/2 M V^2}{1 + \frac{M_2}{M_1}} \frac{1}{x_{90^\circ}} \quad (۲)$$

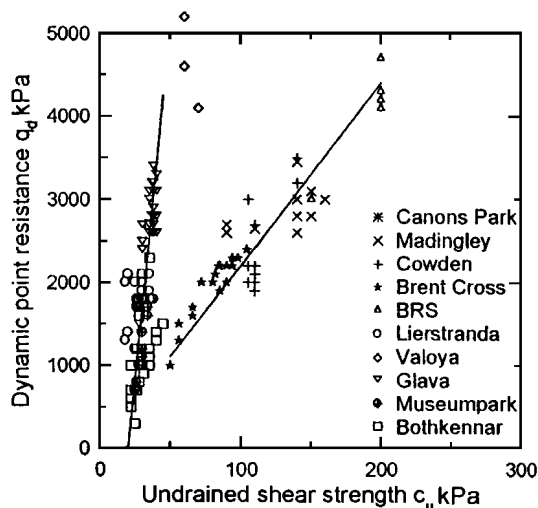
$$C_u = \frac{q_d}{22} \quad (C_u \geq 50 \text{ kPa}) \quad (V)$$



شکل (۶) نمودار ارائه شده به وسیله ی بوچر و همکاران [۳]

همچنین این محققان با وارد کردن پارامتر  $St$  (میزان حساسیت خاک) و با توجه به شکل ۷ که در آن تغییرات  $\frac{q_d}{S_t}$  بر حسب  $C_u$  ترسیم شده است رابطه کلی زیر را برای انواع خاکهای رسی پیشنهاد کرده اند:

$$C_u = .045 \left( \frac{q_d}{S_t} \right) + 10 \quad (A)$$



شکل (۷) تغییرات  $\frac{q_d}{S_t}$  بر حسب  $C_u$  در تحقیق بوچر و همکاران [۳]

در آن  $M1$  وزن چکش و  $M2$  وزن میله ها و مخروط نفوذ بر حسب کیلوگرم ،  $V$  سرعت ضربه چکش بر حسب متر بر ثانیه ،  $A$  سطح مقطع مخروط بر حسب متر مربع و  $x_{90^\circ}$  مقدار نفوذ به ازای یک ضربه چکش [در حالتی که زاویه نفوذ مخروط نسبت به سطح افق  $90^\circ$  درجه باشد]، است. بوچر و همکاران [۳] با در نظر گرفتن تعدادی فرضیات ساده کننده، رابطه بالا را به شکل ساده تر زیر ارائه داده اند:

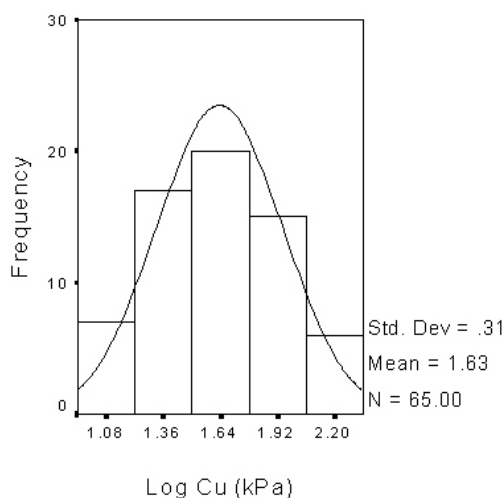
$$q_d = \frac{M_1}{(M_1 + M_2)} r_d \quad (E)$$

$$r_d = \frac{M_1 g h}{A e} \quad (O)$$

در آن  $g$  شتاب جاذبه بر حسب متر بر مجذور ثانیه ،  $h$  ارتفاع سقوط چکش بر حسب متر و  $e$  مقدار نفوذ بر حسب متر بخش بر تعداد ضربات (که مقدار آن برای کاوشگرهای نوع سبک و متوسط و سنگین  $M10/0.1$  و برای نوع خیلی سنگین  $M20/0.2$  است) است.

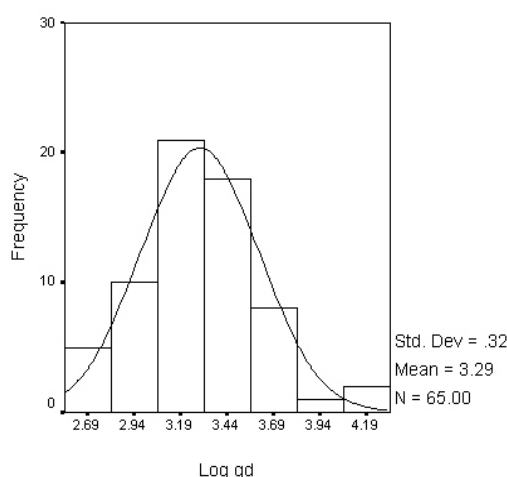
پارامتر  $r_d$  بر حسب پاسکال بیانگر کار انجام شده برای کوبش مخروط در زمین است و پارامتر مقاومت دینامیکی مخروط ( $q_d$ ) نیز بر حسب پاسکال با در نظر گرفتن وزن میله ها و سایر ملحقات، پارامتر  $r_d$  را برای انواع کاوشگرها اصلاح می کند. همچنین این محققین دریافتند که مقدار مقاومت دینامیکی مخروط ( $q_d$ ) برای انواع کاوشگرهای دینامیکی در یک خاک مشخص مقدار ثابتی به دست می آید. محققان براساس تحقیقات خود روی ۱۰ مکان مختلف با بافت خاک ریزدانه با استفاده از انواع نفوذسنج های دینامیکی، روابط زیر را برای تعیین مقاومت زهکشی نشده ( $C_u$ ) در خاک های رسی نرم و خاک های رسی سخت ارائه دادند (شکل ۶):

$$C_u = \frac{q_d}{170} + 20 \quad (C_u < 50 \text{ kPa}) \quad (F)$$



شکل (۸) نمودار تابع توزیع فراوانی  $\text{Log } C_u$

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود روابط ارائه شده به وسیله‌ی بوچر و همکاران [روابط (۶) و (۷)] قادر به پوشش همه داده‌های این شکل که از اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در این تحقیق بدست آمده نیست. از طرف دیگر بدیهی است نمودار تغییرات چسبندگی زهکشی‌نشده خاک باید برای خاک‌های نرم تا سخت به صورت پیوسته باشد و متناظر با هر مقدار  $q_d$  یک مقدار  $C_u$  تعیین شود که این نکته در روابط ایشان لحاظ نشده است.



شکل (۹) نمودار تابع توزیع فراوانی  $\text{Log } q_d$

## ۲-۴- رابطه پیشنهادی برای کاوشگرهای دینامیکی متداول

در این پژوهش برای تعیین رابطه‌ای بین مقاومت دینامیکی مخروط و چسبندگی زهکشی‌نشده خاک، در ابتدا سعی شد تابع توزیع فراوانی آن‌ها تعیین شود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در محل هر یک از پروژه‌هایی که آزمایش نفوذسنجی دینامیکی انجام شده است، سایر آزمایش‌ها و بررسی‌های متداول ژئوتکنیکی نیز برای برآورد پارامترهای خاک انجام شده است. همچنین در این بررسی از نتایج آزمایش‌های بوچر و همکاران استفاده شده است.

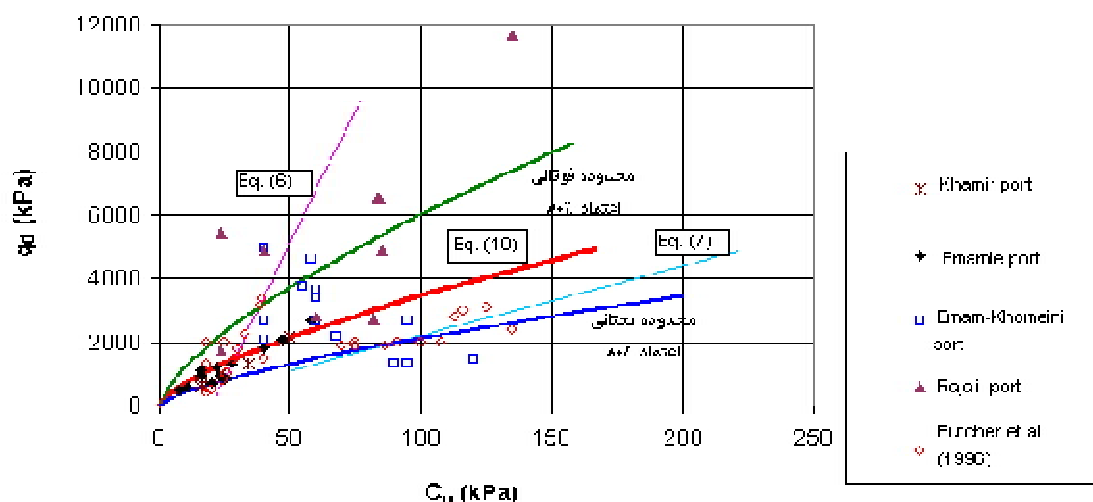
با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ که در آن‌ها هیستوگرام مربوط به لگاریتم مقاومت دینامیکی مخروط و لگاریتم چسبندگی زهکشی‌نشده خاک مشاهده می‌شود که مدل توزیع فراوانی در هر دو از نوع نرمال است. این به آن معنی است که مدل توزیع فراوانی هر یک از مشخصات مذکور، به صورت لوگ نرمال است. به این ترتیب می‌توان گفت که باید رابطه بین مقاومت دینامیکی و چسبندگی زهکشی‌نشده خاک را به شکل لگاریتمی جست‌وجو کرد. با توجه به این مطلب رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Log } q_d = 0.69 \text{Log } C_u + 2.16 \quad (9)$$

رابطه بالا را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$C_u = q_d^{1.45} / 1385 \quad (10)$$

در شکل ۱۰ در مقیاس معمولی (غیر لگاریتمی) نمودارهای تغییرات مقاومت دینامیکی مخروط برحسب چسبندگی زهکشی‌نشده خاک بر مبنای نتایج آزمایش‌های انجام شده در ۴ سایت داخلی و همچنین نتایج آزمایش‌های بوچر و همکاران ترسیم شده است.



شکل (۱۰) نمودار تغییرات  $q_u$  بر حسب  $C_u$

مانند مشخصات خمیری، میزان پیش تحکیم‌یافتگی و ... می‌توان به روابط دقیق‌تری دست یافت.

لازم به ذکر است که روابط پیشنهادی در این پژوهش یعنی روابط (۹) و (۱۰) براساس داده‌های این پژوهش به‌دست آمده است. با توجه به محدود بودن تعداد نقاط مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود در هر منطقه جدید با استفاده از اطلاعات دقیق ژئوتکنیکی ضرایب معادله مذکور تعیین شده (معادله مزبور کالیبره شود) و سپس برای آزمایش‌های دیگر از نفوذسنجی دینامیکی استفاده شود. به این ترتیب امکان برآورد چسبندگی زهکشی‌نشده خاک از نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی با دقت قابل قبولی فراهم خواهد بود. اصلی‌ترین نتیجه‌گیری این پژوهش این است که شکل کلی رابطه (۱۰) که منطبق بر توزیع آماری متغیرها نیز هست، مبنای مناسبی برای کالیبراسیون و تعیین رابطه خاص هر ساختگاه جدید است.

شایان ذکر است که گاهی از اوقات این آزمایش برای کنترل خاک‌های اصلاح‌شده یک منطقه نیز به‌کار برده می‌شود. در این مواقع بررسی میزان افزایش مقاومت خاک از مقایسه نتایج این آزمایش‌ها، قبل و بعد از اصلاح خاک انجام می‌گیرد.

با توجه به شکل (۱۰) و براساس داده‌های این پژوهش منحنی ارائه شده در این پژوهش یعنی رابطه (۱۰) وضع بهتری نسبت به روابط بوچر و همکاران دارد. همچنین با توجه به توزیع فراوانی متغیرهای آن، از مبنای مستدل و منطقی برخوردار است؛ اما همچنان نماینده خیلی خوبی از داده‌ها نیست. به‌خصوص آن‌که ضریب همبستگی آن ۰/۶۷ است. ولی در این پژوهش رابطه توانی (۱۰) در محدوده داده‌های در دسترس ارائه شد تا در آینده با داده‌های بیشتر دقت آن هم افزایش یابد.

بوچر و همکاران نخست دو رابطه مستقل برای رس‌های نرم و سخت پیشنهاد کردند سپس تلاش کردند با وارد کردن حساسیت، رابطه واحدی ارائه کنند. شاید روابط بوچر و همکاران با وارد کردن حساسیت خاک و با استفاده از نسبت  $\frac{q_d}{S_r}$  روابط پیشرفته‌تری محسوب شود زیرا نسبت به رابطه (۱۰) یک متغیر بیشتر در خود گنجانده است؛ ولی بررسی‌های این پژوهش و پراکندگی نتایج مطابق شکل (۷) نشان می‌دهد که تمام مسائل تنها در حساسیت خاک ختم نمی‌شود و به‌نظر می‌رسد با وارد کردن متغیرهای دیگر

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- ۱- نوعی نمونه‌گیر جدید و ابداعی برای استفاده با کاوشگرهای دینامیکی پیشنهاد شد و تجربه موفق آن در عمل ذکر شد.
- ۲- کاوشگرهای دینامیکی خیلی سبک تا سنگین را می‌توان برای تخمین مقاومت خاک‌های ریزدانه به کار برد. برای این کار نیاز به روابط تجربی کالیبره‌شده در مناطق مختلف است. در این مقاله براساس داده‌های حاصل از نقاط مختلف در ایران رابطه (۱۰) برای کاوشگرهای دینامیکی متعارف پیشنهاد شد.
- ۳- در بیش از ۹۵ درصد آزمایش‌های انجام‌شده به‌وسیله انواع کاوشگرهای دینامیکی، ضریب تغییرات نتایج از مقدار استاندارد آزمایش نفوذ استاندارد کمتر است که در مجموع می‌تواند نشانگر تکرارپذیری خوب نتایج این آزمایش باشد.
- ۴- اگر در منطقه جدیدی از کاوشگر دینامیکی استفاده شود می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) برای تخمین مقاومت زهکشی نشده با تعدادی اندازه‌گیری مقاومت، اقدام به کالیبره کردن این رابطه کرد یا از آن به تقریب استفاده کرد. با توجه به نکات بالا و مزایای ویژه این آزمایش‌ها مانند ارزانی و سرعت آن، توسعه کاربرد این روش در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی آبرفت‌های ریزدانه پیشنهاد می‌شود.

## ۶- مراجع

- Advances in Site Investigation Practice; Thomas Telford; London; 1996; pp. 383-395.
- [4] Eitner V.; Katzenbach R.; Stolben F.; "International and European Standards on characterization"; Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization; Porto; 2004; pp 307-313.
- [۵] خدایپرست، مهدی؛ چشمی، اکبر؛ شکرانی، سید حامد؛ و فاخر، علی؛ «استفاده از نفوذسنج‌های دینامیکی در پروژه‌های بهسازی زمین»؛ نخستین کنفرانس بهسازی زمین؛ دانشگاه امیرکبیر تهران؛ ۱۵-۱۴ اسفند ۱۳۸۰؛ صفحات ۳۳۵ الی ۳۴۳.
- [6] Fakher, A.; Khodaparast, M. and Pahlvan, B.; "Coastal soft clay improvements using preloading - A case study"; Proceeding of 3rd International Conference Soft Soil Engineering; Hong Kong; 2001; pp. 465-469.
- [۷] شکرانی، سید حامد؛ «ساخت، به‌کارگیری و کالیبره نمودن ابزار مکیتاش برای شناسایی زمین»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی؛ گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ ۱۳۷۹؛ ۷۷ صفحه.
- [۸] خدایپرست، مهدی؛ «توسعه تکنیک‌های شناسایی خاک با استفاده از کاوشگرهای دینامیکی»؛ پایان‌نامه دکتری؛ گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ ۱۳۸۴.
- [9] Alam, M. J.; Azad, A. K. and Rahman, Z.; "Prediction of Liquefaction Potential of Dredge Fill Sand by DCP and Dynamic Probing"; Proc. Seismic Engineering Conference; Reggio Calabria; Italy; 2008; pp 413-418.
- [10] DIN 4094; "Dynamic and Static penetrometers, Dimensions of apparatus and method of operation"; Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin; 1974.
- [11] Lee, I. K.; White W.; Ingles, O. G.; "Geotechnical Engineering", Copp Clark Pitman; Inc.; 1983; pp. 57-89.
- [12] Cassan M.; "Les essais in situ en mécanique des sols" realization et interpretation; Vol. 1; Eyrolles; 1988; pp 146-151.
- [1] Sabtan, A. A. and Shehata, W.M.; "Mackintosh Probe as an exploration tool"; Bulletin of the International Association of Engineering Geology; Paris; 1995; No. 50; pp. 89-94.
- [2] Fakher, A. and Khodaparast, M.; "The repeatability in results of Mackintosh Probe test"; Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization; Porto; 2004; pp 325-330.
- [3] Butcher, A. P.; Mcelmeel, K. and Powel, J. J. M.; "Dynamic probing and its use in clay soils";

«Research Note»

## The Use of Dynamic Probing For Investigation of Fine Soils and Evaluation of Undrained Shear Strength

M. Khodaparast<sup>1\*</sup>, A. Fakher<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Qom, Iran, Email: khodaparast@qom.ac.ir

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Tehran, Iran, Email: afakher@ut.ac.ir

khodaparast@qom.ac.ir

**Abstract:**

The Dynamic Probe is an effective and efficient tool used in site investigation. It is more economic than the use of boring equipment particularly when the depth of exploration is moderate. The paper covers the design and development of a dynamic probing rig and a new soil sampler to increase the efficiency of conventional dynamic probes. The repeatability of the results are considered and correlations between dynamic probing results and undrained shear strength identified. A new equation relating dynamic resistance to undrained shear strength is proposed. The paper encourages the wider application of dynamic probing for site investigation in fine soils.

**Keywords:** Dynamic Probing, Repeatability, Site investigation, Fine soil, Undrained shear strength