کاربرد آزمایش نفوذسنجی دینامیکی در کنترل درصد تراکم و برآورد مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های ریزدانه

مهدی خداپرست؛
دانشگاه قم، دانشکده فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۲/۸/۲۷ **پذیرش** ۹۲/۱۲/۱۹

چکیده

آزمایش نفوذسنجی دینامیکی یکی از آزمایش‌های مهم محلی در پژوهش‌های ژئوتکنیک است و در بسیاری موارد که عمق مورد نظر برای بررسی لایه‌های خاک خیلی زیاد نباشد، استفاده می‌شود. در کشور ما چند سالی است که این آزمایش به‌طور گسترده‌ای جای‌گزین آزمایش نفوذ استاندارد شده است. در این مقاله ضمن ارائه تجربه‌های در ارتباط با به‌کارگیری انواع نفوذسنج‌های دینامیکی و بیان ایرادها و خطاهایی که در استفاده از این آزمایش رخ می‌دهد سعی می‌شود دقت این آزمایش در خاک‌های ریزدانه بررسی شود. مهم‌ترین نوآوری و دست‌آورد این تحقیق ارائه روابط تجربی جدیدی بین پارامترهای مقاومت دینامیکی مخروط با مقاومت برشی زهکشی نشده و هم‌چنین با درصد تراکم در خاک‌های ریزدانه است. در نهایت امیدواریم نتایج این تحقیق منجر به اصلاح ایرادهای موجود در استفاده از این آزمایش و توسعهٔ بیش‌تر آن در شناسایی محلی خاک‌های ریزدانه شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش نفوذسنجی دینامیکی، شناسایی محلی، خاک ریزدانه، روابط تجربی، مقاومت برشی زهکشی نشده، درصد تراکم

* **نویسندهٔ مسئول** khodaparast@qom.ac.ir

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

مقدمه

آزمایش‌های محلی و برجا بخش مهمی از پژوهش‌ها و بررسی‌های ژئوتکنیکی را تشکیل می‌دهند. در این آزمایش‌ها یک یا چند مشخصه از خاک به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. حذف اثرات دست‌خوردگی ناشی از نمونه‌گیری و انتقال نمونه به آزمایشگاه از مهم‌ترین مزایای این نوع آزمایش‌ها آن است. از این رو، در بسیاری از موارد در مقایسه با آزمایش‌های آزمایشگاهی، نتایج قابل اعتمادتری دارند.

آزمایش‌های نفوذسنجی[۱] از انواع مهم آزمایش‌های محلی است. آزمایش‌های نفوذسنجی به دودسته کلی تقسیم می‌شوند. دستهٔ اول از نوع استاتیکی است که مشهورترین آن‌ها آزمایش نفوذ مخروط[۲] است و در آن‌ها از فشار استاتیکی استفاده می‌شود. دستهٔ دوم از نوع دینامیکی است. در آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی[۳] یک مخروط در اثر ضربه، در داخل زمین نفوذ می‌کند و مقاومت آن در مقابل نفوذ به مشخصات خاک ارتباط داده می‌شود. کاوش‌گرهای دینامیکی ابزار انجام این آزمایش هستند و از سه بخش اصلی به‌نام چکش، مخروط نفوذ و میله‌های رابط تشکیل شده‌اند. انرژی لازم برای نفوذ در زمین در اثر ضربه تأمین می‌شود. این ضربه از سقوط وزنه‌ای معین و از ارتفاعی مشخص ناشی می‌شود که با توجه به اندازه و ارتفاع سقوط آن ممکن است به‌صورت دستی و یا مک موتور انجام گیرد. تعداد ضربه‌ها برای نفوذ به‌مقدار معین شده روی میله (بسته به‌وزن چکش بین۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) ثبت شده و با حرف M به‌عنوان نتیجه آزمایش نشان داده می‌شود.

استفاده از کاوش‌گرهای دینامیکی در پژوهش‌های محلی مزیت‌های مهمی دارد سهولت استفاده از این ابزار در مناطق با دسترسی سخت و دشوار از مهم‌ترین آن‌ها است. هم‌چنین نتایج آن پیوسته است و امکان شناسایی لایه‌های ضعیف با ضخامت کم بدون نیاز به حفر گمانه وجود دارد [۱]. حتی می‌توان در بررسی پتانسیل روان‌گرایی از نتایج این آزمایش استفاده کرد [۲]. هم‌چنین مؤلف روشی برای تعیین ضخامت و نوع لایه‌های خاک از نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی ارائه کرده است [۳].

---

۱. Penetration Testing ۲. Cone Penetration Test ۳. Dynamic Probing

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

بسیاری از کشورها سال‌هاست از کاوش‌گرهای دینامیکی استفاده می‌کنند. در کشور ما استفاده از کاوش‌گرهای دینامیکی رو به توسعه است. لیکن متأسفانه در برخی موارد به‌عنوان جای‌گزین آزمایش نفوذ استاندارد، به‌درستی و استاندارد از این آزمایش استفاده نمی‌شود. علاوه بر آن در بسیاری موارد از نتایج این آزمایش صرفاً برای معادل‌سازی آن با عدد نفوذ استاندارد N بهره گرفته می‌شود. در این مقاله به ایرادهایی که ممکن است در انجام این آزمایش به‌وجود آید می‌پردازیم. با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در چندین سایت مختلف در مناطق مرکزی و جنوبی ایران، روابط تجربی جدیدی برای برآورد مقاومت برشی زهکشی نشده و هم‌چنین درصد تراکم خاک‌های ریزدانه ارائه می‌شود. بدیهی است که با تعیین درصد تراکم خاک از نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی وان سرعت انجام پروژه‌های راه‌سازی و سدسازی (سد خاکی) به‌میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

دستگاه و ابزار انجام آزمایش نفوذسنجی دینامیکی

مشخصات تجهیزات استفاده شده در این تحقیق در سه گروه مختلف در این بخش، بررسی می‌گردد. البته مؤلف، جزئیات انواع مختلف ابزار انجام آزمایش نفوذسنجی دینامیکی را تشریح کرده است [٤].

الف. کاوش‌گر دینامیکی دستی سبک DPL

در این نوع کاوش‌گر دینامیکی که مشخصات آن در استاندارد DIN٤٠٩٤ [٥] و استاندارد ISO٢٢٤٧٦-٢ [٦] آورده شده است وزن چکش ۱۰ کیلوگرم است و استفاده از آن در خاک‌های نرم تا متوسط ممکن است (شکل۱). مشخصات این نوع کاوش‌گر دینامیکی در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که مشابه این کاوش‌گر با وزن چکش ۸ کیلوگرم که DCP نامیده می‌شود، برای تعیین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا[1] استفاده شده است [۷]، [۸]. ضمناً این ابزارهای دستی امکان انجام آزمایش در کف گمانه‌های دستی و هم‌چنین شرایط دشوار از نظر دسترسی، نظیر زمین‌های بسیار سست و لجنی را نیز فراهم می‌آورند.

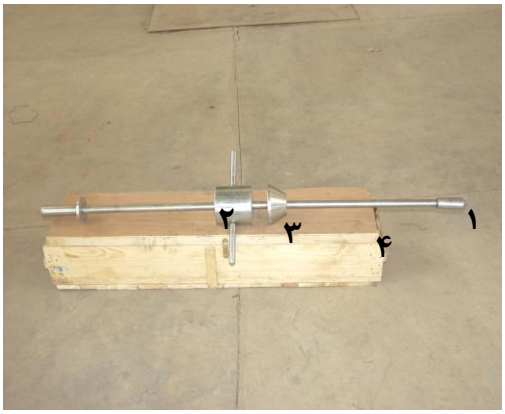
۱. CBR

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

ب. کاوش‌گر دینامیکی دستی متوسط DPM

با افزایش سختی خاک ممکن است نتیجه آزمایش (تعداد ضربات برای نفوذ) با نوع سبک از مقدار استاندارد ۵۰ تجاوز کند. در این صورت دیگر ابزار دستی سبک قابل استفاده نیست. از این‌رو، در تحقیق حاضر کاوش‌گر دینامیکی دستی نوع متوسط نیز به‌کار گرفته شده است. مشخصات این نوع کاوش‌گر دینامیکی نیز در جدول ۱ آمده است.

لازم به‌ذکر است که کار کردن با این نوع، نسبت به نوع دستی سبک مشکل‌تر است و برای بالا بردن چکش آن حداقل دو نیروی انسانی لازم است (شکل۲).



شکل ۱. ابزار کاوش‌گر دینامیکی دستی سبک [٤]

(۱: مخروط نفوذ، ۲: چکش، ۳: سندان (عامل انتقال ضربه چکش به میله و مخروط نفوذ) ٤: میله)

ج. کاوش‌گرهای دینامیکی موتوردار

چنان‌چه نتیجه آزمایش (تعداد ضربه‌ها) با نوع متوسط نیز از مقدار استاندارد ۵۰ تجاوز کند در این حالت ابزار دستی متوسط قابل استفاده نیست و باید از نوع سنگین DPH با وزن چکش ۵۰ کیلوگرم به‌کار گرفته شود. با افزایش وزن چکش امکان استفاده از انواع کاوش‌گرهای دینامیکی به‌شکل دستی بسیار مشکل است. از این‌رو، از نوع موتوردار استفاده می‌شود. بنا بر این محقق نسبت به ساخت دستگاه موتوردار نیز اقدام کرده است (شکل ۳).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

جدول ۱. مشخصات کاوش‌گرهای دینامیکی دستی استفاده شده در این تحقیق

نوع	سبک (DPL)	متوسط (DPM)
وزن چکش (برحسب کیلوگرم)	۱۰ ± ۰/۱	۳۰ ± ۰/۳
ارتفاع سقوط چکش (برحسب متر)	۰/۵ ± ۰/۰۱	۰/۵ ± ۰/۰۱
قطر مخروط (برحسب میلی‌متر)	۳۵/۷ ± ۰/۳	۳۵/۷ ± ۰/۳
سطح مقطع مخروط (برحسب سانتی‌متر مربع)	۱۰	۱۰
قطر میله‌های رابط (برحسب میلی‌متر)	۲۲ ± +۰/۲	۳۲ ± ۰/۲
ضخامت میله‌های رابط (برحسب میلی‌متر)	۶ ± ۰/۲	۹ ± ۰/۲
محدودهٔ استاندارد نتایج	۵۰-۳ (برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر)	۵۰-۳ (برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر)

شکل ۲. ابزار کاوش‌گر دینامیکی دستی نوع متوسط [٤]

این دستگاه تحقیقاتی به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان تغییر مشخصات اصلی آن شامل وزن چکش، ارتفاع سقوط چکش، قطر میله‌های رابط و هم‌چنین نوع مخروط نفود وجود دارد. از این‌رو، همهٔ مشخصات انواع کاوش‌گرهای دینامیکی را پوشش می‌دهد. این ویژگی در دستگاه‌های مشابه خارجی وجود ندارد و آن‌ها تنها می‌توانند یکی از انواع سبک تا سنگین باشند. مؤلف جزئیات دستگاه مزبور را تشریح کرده است [٤].

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

لازم به ذکر است که در استفاده از ابزارهای دستی توجه به‌دقت اپراتور به‌ویژه در بالا بردن چکش به مقدار معین بسیار مهم و تاثیرگذار است در حالی که این مسئله در کاوش‌گرهای دینامیکی موتوردار وجود ندارد.

شکل (۳) کاوشگر دینامیکی موتوردار [٤]

مجدداً تأکید می‌شود که با توجه میزان نرمی یا سفتی خاک باید نوعی از کاوش‌گر دینامیکی انتخاب شود که نتایج آزمایش‌ها در محدودهٔ استاندارد (۳ تا ۵۰ ضربه برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر) باشند. به این ترتیب در خاک‌های نرم مناسب‌ترین کاوش‌گر دینامیکی، نوع سبک و در خاک‌های سفت و سخت نوع سنگین است.

در خصوص نحوهٔ انجام آزمایش، در ابتدا مخروط نفوذ به سر یکی از میله‌ها بسته می‌شود. سپس با فاصله از نوک مخروط در هر فاصلهٔ معین (بسته به وزن چکش بین۱۰ تا۲۰ سانتی‌متر) علامت‌هایی روی میله مشخص شده و نوک مخروط به‌گونه‌ای روی زمین قرار داده می‌شود که میله به‌صورت کاملاً قائم درآید. سپس وزنه چکش تا حداکثر ارتفاع بالا برده شده و رها می‌شود. مخروط در اثر این ضربه در درون خاک نفوذ می‌کند. مجدداً این کار تکرار شده و تعداد ضربات برای نفوذ به‌مقدار معین، ثبت می‌شود [٦]. تعداد ضربه نتیجه هر آزمایش است که با حرف M نشان می‌دهند. این‌کار تا عمق مورد نظر تداوم یافته و در نهایت نموداری پیوسته از تغییرات M در عمق به‌دست می‌آید. پس از اتمام آزمایش و رسیدن به‌عمق مورد نظر، بیرون کشیدن میله‌ها با جک مخصوصی صورت می‌گیرد [٤].

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

مکان‌های بررسی شده و مشخصات لایه‌های خاک

در این تحقیق آزمایش‌های نفوذسنجی در ٦ سایت در مناطق مختلف ایران انجام شده است که در آن‌ها سایر آزمایش‌های متداول ژئوتکنیکی نیز به‌دقت انجام شده است. مشخصات اصلی و مهم خاک در مکان‌های مزبور در جدول ۲ آمده است [٤].

نکات مهم در استفاده از نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی

در این بخش به بیان برخی از نکات مهم در استفاده از انواع کاوش‌گرهای دینامیکی و نتایج آن‌ها پرداخته می شود:

الف. برای انجام آزمایش باید با توجه میزان نرمی خاک نوعی از کاوش‌گر دینامیکی انتخاب شود که نتایج آزمایش‌ها در محدودهٔ استاندارد (با توجه به جدول ۱) باشند. اگر نتایج در خارج از محدوده استاندارد باشند، قابل اعتماد نخواهند بود. در این شرایط باید دستگاه سبک‌تر یا سنگین‌تر به‌کار برد تا نتایج وارد محدوده استاندارد شوند.

بنا بر این در خاک‌های نرم مناسب‌ترین کاوش‌گر دینامیکی، نوع سبک خواهد بود. با افزایش سختی خاک ممکن است نتیجه آزمایش (تعداد ضربات برای نفوذ) با نوع سبک از مقدار استاندارد ۵۰ که در جدول ۱ آورده شده است تجاوز کند. در این صورت دیگر ابزار نوع سبک قابل استفاده نیست و باید از نوع متوسط و یا سنگین استفاده شود تا نتایج در محدودهٔ استاندارد باشند.

متأسفانه در حال حاضر بسیاری از شرکت‌هایی که از این آزمایش استفاده می‌کنند به این نکته توجهی ندارند و حتی در زمین‌های خیلی سخت از نوع سبک استفاده می‌کنند و نتایج بیش از ۵۰ ضربه به‌ازای ۱۰ سانتی‌متر نفوذ را ارائه می‌کنند که در این صورت نتایج آن‌ها فاقد اعتبار خواهد بود.از این رو، باید هم‌زمان همه انواع کاوش‌گرهای دینامیکی از نوع سبک تا سنگین در محل هر پروژه در اختیار باشد تا در صورت لزوم بتوان از هر یک از آن‌ها بهره برد.

موضوع دیگر آن است که در این آزمایش، عمق نفوذ تا جایی که نتایج بیان‌گر حداقل ۵۰ ضربه به‌ازای ۱۰ سانتی‌متر نفوذ باشد، باید ادامه یابد [٦] و انجام آزمایش صرفاً در ۳ مرحله

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

۱۰ سانتی‌متری (مشابه آزمایش نفوذ استاندارد که برای ۳ مرحلهٔ نفوذ ۱۵ سانتی‌متری انجام می‌شود) صحیح نیست. بنا بر این باید میله‌های رابط و قطعات اتصال بین میله‌ها به اندازهٔ کافی در اختیار باشد که بتوان تا عمق مورد نیاز آزمایش را ادامه داد.

جدول ۲. مشخصات مهم خاک در سایت‌های بررسی شده [٤]

سایت		عمق برحسب متر	توصیف خاک	دانسیته (تن/ مترمربع)	میزان رطوبت ٪	حد خمیری ٪	شاخص خمیری ٪	چسندگی زهکشی نشده (کیلو پاسکال)
بندر امامیه (در ۱٤۰ کیلومتری ماهشهر)		۲/۵	رس سیلتی نرم تا خیلی نرم	۱/۸۸	۳۲	۲۰	۷	۱۸
		۵/۰		۱/۹٦	٤۱	۱۸	۷	۲۳
		۷/۵		۱/۸۹	۳۷	۲۳	۱٦	۳۲
		۱۰/۰		۱/۸۸	۳٦	۱۹	۱۹	٤٦
بندر خمیر (در ٦۰ کیلومتری شرق بندرعباس)		۲/۰	رس نرم همراه با سیلت	۱/۸۵	۳۱	۲۰	۹	۱۰
		۵/۰		۱/۹۱	۳۵	۲۲	۲۲	۲۳
		۷/۰		۱/۹۵	۳۹	۲۵	۱۷	۳۰
بندر امام خمینی (ره)		۳/۰	رس سیلتی نرم	۱/۹۵	۳۰	۲۰	۱۹	۲۸
		۵/۰		۲/۰۰	۳۳	۲۰	۱۲	۳٤
		۸/۰		۱/۹۰	۳۱	۱۸	۱٦	٤۵
		۱۲/۰		۱/۹۹	۲۷	۱٦	۹	٤۸
شهرک صنعتی محمود آباد (کیلومتر ۲۰ بزرگراه قم- تهران)		۲/۰	رس سیلتی نرم تا متوسط	۱/٦۵	۲۱	۲۲	۸	۲۲
		٤/۰		۱/۷۵	۱۷	۲۱	۱۱	٤٦
		۷/۰		۱/۸۲	۱۱	۲۲	۹	٦۵
شهرک صنعتی شکوهیه (در کیلومتر ۱۲ جاده قدیم قم- تهران)		۲/۰	رس نرم تا متوسط	۱/۳٦	٤	۲۰	۱٤	۲٤
		٦/۰		۱/٤۰	٦	۲۵	۱۲	٦۰
بندر شهید رجایی (بندرعباس)	ناحیه ۱	۳/۵	رس سیلتی نرم تا سخت	۱/۷۵	۳۲	۱۸	۱٤	۲٤
		۸/۵		۱/۷۷	۲۰	–	–	۸٦
	ناحیه ۲	۷/۰	رس متوسط تا سخت	۱/٦۵	۲۱	۱۷	۷	۸۵
		۹/۰		۱/۷۰	۲٤	۱۷	۹	٤۰
	ناحیه ۳	٦/۵	رس سیلت‌دار متوسط تا سخت	–	–	۲۱	٦	۱۳۰
		۱۱/۰		۱/۷	۲۵	۲۱	۷	۷۵

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

البته بدیهی است در صورت استفاده از این آزمایش به‌منظور تعیین درصد تراکم لایه‌های خاک‌ریز عمق این آزمایش باید به ضخامت خاک‌ریز محدود شود.

هم‌چنین حداکثر انحراف میله‌ها و چکش از راستای قائم ۲ درصد یکی دیگر از نکات اجرایی در استفاده از ابزار این آزمایش است [٦] که در غیر این صورت نتایج حاصل غیرقابل اعتماد هستند.

ب. در هر آزمایش ژئوتکنیکی در صورتی می‌توان به نتایج آن استناد کرد که نتایج آن تکرارپذیر باشند. به‌طورکلی پس از آن‌که تصویر روشنی از تکرارپذیری نتایج به‌دست آید، می‌توان به سراغ تولید روابط تجربی بین نتایج آزمایش و متغیرهای خاک رفت.

برای بررسی تکرارپذیری با استفاده از هر یک از انواع کاوش‌گرهای دینامیکی، در محل‌های مختلف دو، سه و یا چهار آزمایش در فواصل نزدیک به هم (کم‌تر از ۰/۵ متر) انجام شده است. ارائه و تحلیل همهٔ نتایج این پژوهش در مقالهٔ حاضر نمی‌گنجد و مؤلف در پژوهشی دیگر تشریح کرده است [۹].

لازم به ذکر است که یکی از متغیرهای نشان‌گر تکرارپذیری، ضریب تغییرات (C_v) است که بر اساس رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \qquad (۱)$$

در این رابطه s انحراف معیار و $\bar{x}$ متوسط مقادیر حاصل از نتایج آزمایش‌ها است. متغیر مزبور بی‌بعد است و مبین درجهٔ پراکندگی بی‌بعد شده نسبت به میانگین است.

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٪ به‌دست آمده است.

از آن‌جاکه مقدار استاندارد پارامتر ضریب تغییرات در آزمایش نفوذ استاندارد که یک نفوذسنج دینامیکی خیلی سنگین، ۳۰٪ است [۱۰]، از این رو، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی تکرارپذیری قابل قبولی دارد. هم‌چنین با توجه به آزمایش‌های انجام شده در انواع کاوش‌گرهای دینامیکی، عمدتاً بهترین مدل توزیع احتمال نتایج، توزیع لوگ نرمال است [۹].

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

ج. اصطکاک بین خاک و میله‌های رابط از عواملی است که بر نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی تأثیر می‌گذارد.

بهترین شیوه برای تعیین میزان اصطکاک، اندازه‌گیری گشتاور لازم برای چرخاندن میله‌های رابط است.

محققانی مانند بوچر و همکاران [۱۱] سعی کرده‌اند که میزان گشتاور معادل یک ضربه را تعیین کنند. این محققان در ابتدا در تعدادی آزمایش در اعماق مختلف میزان گشتاور لازم برای چرخاندن میله‌های رابط را اندازه‌گیری کردند. سپس در مجاورت آن با استفاده از میله‌های رابط سوراخ‌دار (شکل ٤) و بنتونیت (به‌کار گرفته شده در درون و سطح بیرونی میله‌ها) اثر اصطکاک را از بین برده و از مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده در دو حالت میزان گشتاور معادل یک ضربه را تعیین کردند. کارد و همکاران [۱۲] با توجه به بررسی‌ها و تحقیقات خود به‌منظور در نظر گرفتن اثر اصطکاک بین میله‌ها و خاک و تصحیح نتایج، رابطهٔ (۲) را برای انواع کاوش‌گرهای دینامیکی ارائه کردند:

$$N = \frac{۲}{d}\frac{e\tau}{WgH} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق τ میزان گشتاور اندازه‌گیری شده بر حسب نیوتن متر و N تعداد ضربات معادل اثر اصطکاک است که باید از اعداد اندازه‌گیری شده کسر گردد.

هم‌چنین e مقدار نفوذ در هر مرحله بر حسب متر، W وزن چکش بر حسب کیلوگرم، H ارتفاع سقوط چکش بر حسب متر، d قطر میله‌های نفوذ بر حسب متر و g شتاب جاذبه بر حسب متر بر مجذور ثانیه است.

در مقاله حاضر در تعدادی از آزمایش‌ها در اعماق مختلف، میزان گشتاور برای چرخاندن میله‌های رابط اندازه‌گیری شده و براساس رابطهٔ فوق نتایج آزمایش‌ها اصلاح شده‌اند. در بعضی از آزمایش‌ها نیز با استفاده از بنتونیت کوشش شده است اصطکاک بین میله‌ها و خاک در حد چشم‌گیری تقلیل می‌یابد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

شکل ٤. نمونه‌هایی از میله‌های رابط سوراخ‌دار که با تزریق بنتونیت از طریق سوراخ‌ها می‌توان اصطکاک را کاهش داد

لازم به ذکر است چنان‌که قطر قطعات اتصال‌دهندهٔ میله‌های رابط اندکی بزرگ‌تر از قطر میله‌ها (و کوچک‌تر از قطر مخروط نفوذ) ساخته شود تأثیر زیادی در کاهش اصطکاک خواهد داشت (شکل ۵) و عملاً اصطکاک را برای کارهای حرفه‌ای می‌تواند به حد قابل اغماض برساند که موفقیت این روش در تحقیق حاضر تجربه شده است. هم‌چنین چنان‌چه در حین آزمایش به‌طور منظم در موقع اضافه کردن میله‌های رابط، این میله‌ها چرخانده شوند اثر چشم‌گیری در حداقل کردن اصطکاک دارد.

شکل ۵. افزایش قطر قطعات اتصال‌دهندهٔ میله‌های رابط برای کاهش اصطکاک (قطعه تحتانی هم قطر میله‌های رابط و قطعه فوقانی با قطر بزرگ‌تر است)

روابط تجربی در مورد انواع متداول کاوش‌گرهای دینامیکی

۱. مقاومت برشی زهکشی نشده

به‌منظور آنالیز نتایج ابزار کاوش‌گر دینامیکی، محققان فرورفت مخروط نفوذ در خاک را به مثابه یک شمع در نظر گرفته‌اند که بر اساس تعیین مقاومت مخروط در حین فرورفت، میزان مقاومت خاک ارزیابی می‌شود.

با توجه به بررسی‌ها وتحقیقات انجام شده در مورد آزمایش نفوذسنجی دینامیکی یکی از روابط پایه و مهم در این خصوص محاسبهٔ مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) است که بدین شکل ارائه شده است [۱۳]:

$$q_d = \frac{۱}{A}\frac{۱/۲M_۱V^۲}{۱+\frac{M_۲}{M_۱}}\frac{۱}{x_{۹۰}} \qquad (۳)$$

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

که در آن M_1 وزن چکش و M_2 وزن میله‌ها و مخروط نفوذ بر حسب کیلوگرم، V سرعت ضربهٔ چکش بر حسب متر بر ثانیه، A سطح مقطع مخروط بر حسب مترمربع و x_{90} مقدار نفوذ به‌ازای یک ضربهٔ چکش در حالت زاویهٔ ۹۰ درجه نسبت به سطح افق، نفوذ مخروط است.

استفاده از این رابطه نیاز به اندازه‌گیری سرعت ضربه (از طریق نصب ابزار الکترونیکی) دارد. نوع خاصی از کاوش‌گرهای دینامیکی موسوم به پاندا[1] [۱٤] این قابلیت را دارد.

بوچر و همکاران [۱۱] با در نظر گرفتن تعدادی فرضیات ساده کننده رابطهٔ فوق را به این شکل ساده‌تر ارائه کرده‌اند:

$$q_d = \frac{M_1}{(M_1 + M_2)} r_d \qquad (٤)$$

$$r_d = \frac{M_1 g h}{A e} \qquad (٥)$$

که 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 برابر ۰/۱/ M۱۰ و برای نوع خیلی سنگین برابر ۰/۲/ M۲۰ 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 میله‌ها و سایر ملحقات، پارامتر r_d را برای انواع کاوش‌گرها اصلاح می‌کند. هم‌چنین این محققان دریافتند که مقدار مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) برای انواع کاوش‌گرهای دینامیکی در یک خاک مشخص مقدار ثابتی به‌دست می‌آید. از این رو، برای این‌که بتوان از نتایج انواع کاوش‌گرهای دینامیکی در برآورد مشخصات مختلف خاک استفاده کرد، این پارامتر نقش بسیار مهمی دارد. در استاندارد ISO۲۲٤۷٦-۲ نیز تبدیل نتایج هر نوع کاوش‌گر دینامیکی به پارامتر مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) تأکید شده است [٦].

محققان مزبور بر اساس تحقیقات خود در ۱۰ مکان مختلف در کشورهای انگلستان و نروژ با لایه‌های خاک ریزدانه با استفاده از انواع نفوذسنج‌های دینامیکی، روابط زیر را برای تعیین چسبندگی زهکشی نشده (C_u) در خاک‌های رسی نرم و خاک‌های رسی سخت ارئه کردند:

۱. PANDA

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

$$C_u = \frac{q_d}{۱۷۰} + ۲۰ \qquad (C_u < ۵۰kPa)$$
$$C_u = \frac{q_d}{۲۲} \qquad (C_u < ۵۰kPa) \tag{٦}$$

لانگتن [۱۵] رابطه بین مقاومت دینامیکی مخروط و چسبندگی زهکشی نشده خاک‌های رسی را بدین‌صورت پیشنهاد کرده است:

$$C_u = \frac{q_d}{۲۰} \tag{۸}$$

برای تعیین رابطه‌ای بین مقاومت دینامیکی مخروط و چسبندگی زهکشی نشده خاک، در ابتدا سعی شد تابع توزیع فراوانی آن‌ها را تعیین کنیم. چنان‌که 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 به‌انجام رسیده است که در جدول ۲ وضعیت لایه‌های خاک و مشخصات مقاومتی آن در هر محل به تفکیک ارائه شد. جزئیات مربوط به این بررسی در [۱] تشریح شده است که بر اساس آن مدل توزیع فراوانی پارامترهای لگاریتم مقاومت دینامیکی مخروط و لگاریتم چسبندگی زهکشی نشده هر دو از نوع نرمال به‌دست آمده است. این به آن معنی است که مدل توزیع فراوانی هر یک از پارامترهای مذکور به‌صورت لوگ نرمال است.

بر این اساس رابطهٔ بین مقاومت دینامیکی و چسبندگی زهکشی نشده خاک به‌شکل لگاریتمی جستجو شده و این روابط ارائه شده است [۱]:

$$Log\, q_d = ۰/۶۹ Log C_u + ۲/۱۶ \tag{۹}$$

$$C_u = q_d^{۱/۴۵} / ۱۳۸۵ \tag{۱۰}$$

در روابط مذکور ضریب هم‌بستگی پیرسن (r) ۰/٦۷ است و در نهایت روابط (۹) و (۱۰) که منطبق بر توزیع آماری متغیرها است، مبنای مناسبی برای کالیبراسیون و تعیین روابط جدیدتر ذکر شده است که این روابط با داده‌های بیش‌تر دقیق‌تر می‌شود.

در این تحقیق با اضافه کردن داده‌های جدید و بر اساس شکل ٦ رابطهٔ تجربی جدیدی بدین‌صورت به‌دست آمده است:

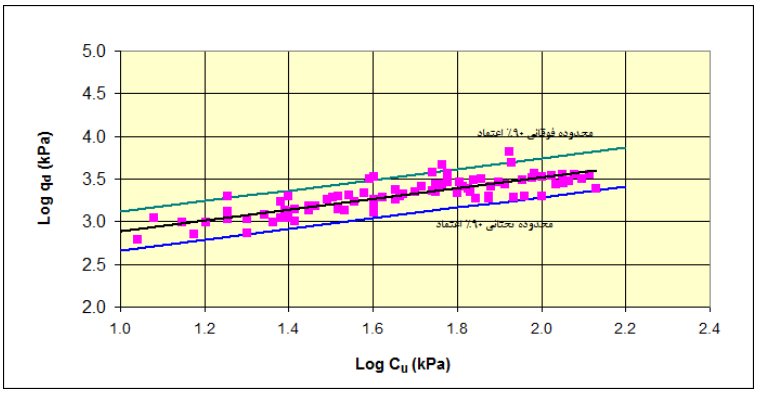
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

$$Log\, q_d = ۰/۶۲۵ Log C_u + ۲/۲۶۵ \qquad (۱۱)$$

در شکل ٦ مبنای ترسیم خطوط محدودهٔ تقریبی ۹۰٪ اعتماد، درصد نقاط داخل محدوده نسبت به کل نقاط است. رابطهٔ فوق را می‌توان بدین‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_u = q_d^{۱/۶} / ۴۲۱۰ \qquad (۱۲)$$

در رابطهٔ مذکور مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) و چسبندگی زهکشی نشده (C_u) بر حسب کیلوپاسکال است و ضریب هم‌بستگی پیرسن آن ۰/۸۸ است که در مقایسه با این ضریب در رابطهٔ (۱۰) رشد مناسبی یافته است. البته لازم به ذکر است که روابط پیشنهادی در این مقاله بر اساس مجموع داده‌های در اختیار به‌دست آمده است.



شکل٦. نمودار تغییرات Log q_d **برحسب** Log C_u

پیشنهاد می‌شود در هر منطقه جدید با استفاده از اطلاعات دقیق ژئوتکنیکی ضرایب معادلهٔ مذکور بررسی شده (معادله مزبور کالیبره گردد) و سپس برای آزمایش‌های دیگر نفوذسنجی دینامیکی استفاده شود. به‌این‌ترتیب امکان برآورد چسبندگی زهکشی نشده خاک از نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی با دقت قابل قبولی فراهم می‌شود.

۲. برآورد درصد تراکم

از موارد کاربرد نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی، برآورد مشخصات مرتبط با تراکم و فشردگی خاک و به‌صورت خاص درصد تراکم در پروژه‌های راه‌سازی است. به‌طور معمول برای تعیین درصد تراکم لایه‌های خاک باید ابتدا وزن مخصوص خشک خاک از طریق

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

آزمایش دانسیته در محل اندازه‌گیری شود. سپس وزن مخصوص خشک حداکثر با انجام آزمایش تراکم آزمایشگاهی تعیین می‌شود و این پروسه برای یک لایه راه با توجه به طول مسیر، باید به‌تعداد چشم‌گیری انجام شود. از این رو، این فرآیند بسیار وقت‌گیر و پر هزینه است. هم‌چنین ممکن است بعد از انجام آزمایش‌های مذکور درصد تراکم لازم حاصل نشود، در این صورت باید بعد از تقویت و کوبش مجدد خاک این آزمایش‌ها دوباره تکرار گردند و این مسئله پروژه را با وقفهٔ زیادی می‌کند. از سوی دیگر چنان‌چه در محلی سطح آب زیرزمینی بالا باشد عملاً امکان انجام آزمایش دانسیته در محل وجود نخواهد داشت.

اما در صورت تعیین درصد تراکم یک لایه با آزمایش نفوذسنجی دینامیکی چالش‌های اخیر برطرف شده و در وقت و هزینه کاهش چشم‌گیری صورت می‌گیرد که بسیار مهم و ارزشمند است.

در مورد برآورد مشخصات مرتبط با تراکم و فشردگی خاک تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای صورت گرفته است. محققان مختلف این موضوع را تأیید کرده‌اند، به‌عنوان نمونه می‌توان آزمایش نفوذسنجی را بر بسیاری از آزمایش‌های رایج ترجیح داد [١٦]. آمور و همکاران با توجه به آزمایش‌های انجام شده در ۹ منطقهٔ انگلستان روی لایه‌های خاک ریزدانه رابطهٔ لگاریتمی (۱۳) را برای تعیین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا از نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی در خاک‌های ریزدانه ارائه کردند [١٤]:

$$\log_{۱۰} CBR = ۰/۳۵ + ۱/۰۶ \log_{۱۰} q_d \qquad (۱۳)$$

در روابط مذکور (CBR) مقدار نسبت باربری کالیفرنیا و (q_d) مقاومت دینامیکی مخروط در آزمایش نفوذسنجی دینامیکی بر حسب کیلوپاسکال است. به‌عبارت دیگر رابطهٔ بین نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت دینامیکی مخروط به‌صورت توانی ارائه شده است.

در همین خصوص برازوان و فخری [۱۷] رابطهٔ (١٤) را بین مقادیر مدول برجهندگی که یک مشخصه مرتبط با سختی بستر راه برای طراحی لایه‌های روسازی است و شاخص نفوذ بر حسب میلی‌متر بر ضربه با استفاده از ابزار DCP، بدین‌صورت ارائه کرده‌اند:

$$M_R = ۳۱۱/۹۲ (DCPI)^{-۰/۱۰۴} \qquad (١٤)$$

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

که در آن (DCPI) شاخص نفوذ آزمایش نفوذسنجی دینامیکی بر حسب میلی‌متر بر ضربه و (MR) مدول برجهندگی بستر راه بر حسب مگاپاسکال است.

(M_R) مشابه (CBR) پارامتری مهم در طراحی روسازی است که آئین‌نامه آشتو ۱۹۹۰ استفاده از آن را توصیه می‌کند [۱۸]. این مشخصه بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست‌نخورده (به‌دست آمده با نمونه‌گیر شلبی تیوب) تعیین می‌گردد.

مشاهده می‌شود که در روابط مذکور رابطهٔ بین نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی و پارامترهای مرتبط با تراکم و فشردگی خاک از نوع توانی است. بر این اساس در این تحقیق با استفاده از دو نوع نفوذسنج دینامیکی سبک و متوسط سعی شد روابط تجربی برای تعیین درصد تراکم لایه خاک به‌شکل توانی (یا لگاریتمی) ارائه شود.

بر این اساس در تعدادی پروژه راه‌سازی در مناطق بررسی شده، ضمن این‌که آزمایش‌های تراکم در لایهٔ بستر، بسیاری انجام شد، در مجاورت آن‌ها آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی نیز انجام شد که بر اساس شکل ۷ رابطهٔ (۱۵) برای نفوذسنج دینامیکی نوع سبک حاصل شد:

$$CP = ۱۳۱/۲۷(DCPI)^{-۰/۲۴۰} \quad (۱۵)$$

که در آن (DCPI) شاخص نفوذ بر حسب میلی‌متر بر ضربه و (CP) درصد تراکم خاک است.

هم‌چنین به‌طور مشابه رابطهٔ (۱٦) برای نفوذسنج دینامیکی نوع متوسط به‌دست آمد:

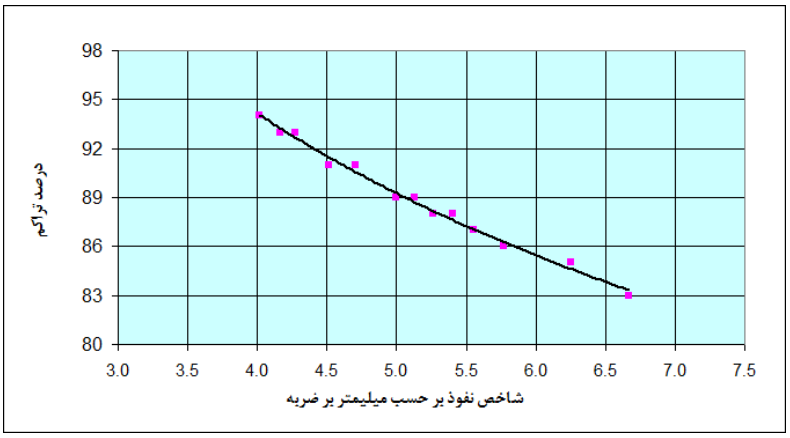
$$CP = ۱۵۵/۹۶(DCPI)^{-۰/۲۸۰} \quad (۱٦)$$

چنان‌که قبلا اشاره شد مقدار مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) برای انواع کاوش‌گرهای دینامیکی در خاکی مشخص مقدار ثابتی است از این رو، به‌منظور حصول رابطه‌ای که برای انواع کاوش‌گرهای دینامیکی قابل استفاده باشد با محاسبه و تعیین (q_d) در همهٔ آزمایش‌های انجام شده در نهایت بر اساس شکل ۸ رابطهٔ (۱۷) به‌دست آمد:

$$CP = ۱۶/۶۵q_d^{۰/۱۹۳} \quad (۱۷)$$

که در آن (CP) درصد تراکم خاک و (q_d) مقاومت دینامیکی مخروط بر حسب کیلوپاسکال است. در این رابطه ضریب ($R^۲$) برابر ۰/۹۰ و ضریب هم‌بستگی پیرسن (r) ۰/۹۵ است.

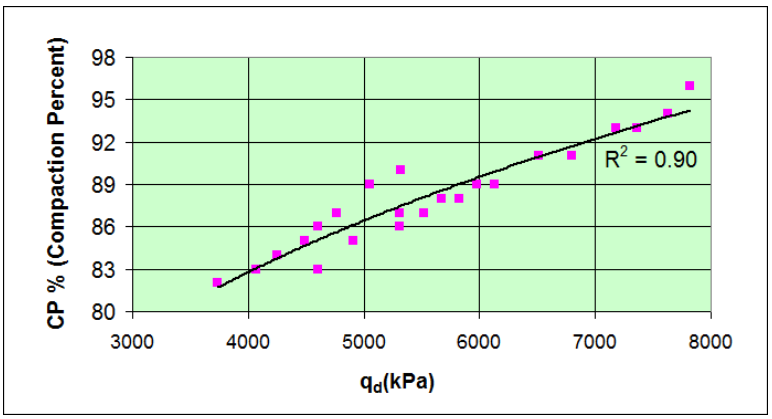
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]



شکل ۷. نمودار تغییرات درصد تراکم خاک در مقابل شاخص نفوذ

ویژگی و امتیاز مهم این رابطه در مقایسه با سایر روابط ارائه شده برای تعیین درصد تراکم آن است که روابط دیگران فقط برای نوعی خاص کاوش‌گر دینامیکی قابل استفاده است، لیکن رابطهٔ مذکور که بر اساس مقاومت دینامیکی مخروط (q_d) ارائه شده، برای انواع مختلف کاوش‌گرهای دینامیکی قابل استفاده است.

شایان ذکر است که گاهی اوقات این آزمایش برای کنترل خاک‌های اصلاح شده یک منطقه نیز به‌کار برده می‌شود. در این مواقع بررسی میزان افزایش مقاومت خاک و یا درصد تراکم از مقایسهٔ نتایج این آزمایش‌ها قبل و بعد از اصلاح خاک انجام می‌گیرد. به‌عنوان نمونه در سایت بندر امام خمینی (ره) [۱۹] از این تکنیک بهره گرفته شده است.



شکل ۸. نمودار تغییرات درصد تراکم خاک برحسب q_d

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱. در این تحقیق ضمن ارائه تجربیات در ارتباط با به‌کارگیری انواع نفوذسنج‌های دینامیکی ایرادها و خطاهایی که در استفاده از این آزمایش می‌تواند رخ دهد تشریح شد.

۲. در بیش از ۹۵ درصد آزمایش‌های انجام شده با انواع کاوش‌گرهای دینامیکی، ضریب تغییرات نتایج از مقدار استاندارد آزمایش نفوذ استاندارد کم‌تر است که در مجموع می‌تواند نشان‌گر تکرار پذیری خوب نتایج این آزمایش باشد.

۳. انواع کاوش‌گرهای دینامیکی را می‌توان برای برآورد مقاومت و تعیین درصد تراکم خاک‌های ریزدانه به‌کار برد. برای این کار نیاز به روابط تجربی کالیبره شده در مناطق مختلف است. در این مقاله بر اساس مجموع داده‌های در اختیار از نقاط مختلف در ایران روابط (۱۲) و (۱۷) برای کاوش‌گرهای دینامیکی و برای خاک‌های ریزدانه متعارف پیشنهاد شد.

٤. اگر در منطقهٔ جدیدی از کاوش‌گر دینامیکی استفاده شود، می‌توان با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۷) و با انجام تعدادی آزمایش دقیق ژئوتکنیکی اقدام به کالیبره کردن این روابط برای تخمین مقاومت زهکشی نشده و تعیین درصد تراکم خاک کرد و یا به‌تقریب از آن‌ها استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

از همهٔ همکاران و سازمان‌هایی که با حمایت خود امکان انجام این پژوهش را فراهم آوردند به‌ویژه از آقایان دکتر علی فاخر دانشیار دانشگاه تهران، مهندس روح الله دیرباز کارشناس آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه قم و مهندس علی گلابچی‌فرد کارشناس اداره راه و ترابری استان قم، که در بخشی از این تحقیق نویسنده را یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. خداپرست م.، فاخر ع.، *استفاده از نتایج کاوش‌گرهای دینامیکی در مطالعهٔ خاک‌های ریزدانه و برآورد پارامتر چسبندگی*، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران مدرس، دورهٔ یازدهم، شمارهٔ ۲ (۱۳۹۰) ۱۰۱–۱۱۰.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

2. Alam M. J., Azad A. K., Rahman Z., "Prediction of Liquefaction Potential of Dredge Fill Sand by DCP and Dynamic Probing" Proc. Seismic Engineering Conference, Reggio Calabria, Italy (2008) 413-418.

۳. خداپرست م.، *روشی پیشنهادی برای تعیین وضعیت لایه‌بندی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تحلیل گروهی*، مجلهٔ علمی پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران (۱۳۹۰)۷۵-۹۰.

٤. خداپرست م.، *توسعه تکنیک‌های شناسایی خاک با استفاده از کاوش‌گرهای دینامیکی*، پایان‌نامهٔ دکتری، گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۸٤).

5. DIN 4094, "Dynamic and Static penetrometers, Dimensions of apparatus and method of operation", Deutsches Institut fur Normung e. V. Berlin (1974).

6. ISO 22476-2, "Geotechnical investigation and testing, Field testing, Part 2: Dynamic probing", Case postale 56, CH-1211 Geneva 20 (2005).

7. Colin J., "Improved measurement of pavement strength by dynamic cone penetrometer", Technical Information Note, Transport Research Laboratory, Old Wokingham Road, Crowthorne, Berkshire, RG45 6AU (2004).

8. Rahim A. M., George K. P., "Dynamic cone penetrometer to estimate subgrade resilient modulus for low volume roads design", Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization; Porto (2004) 367-371.

9. Khodaparast M., "Repeatability and empirical formula for dynamic probing in cohesive soils", the 6th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran (2011).

10. Lee I. K., White W., Ingles O. G., "Geotechnical Engineering", Copp Clark Pitman, Inc. (1983) 57-89.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]

11. Butcher A. P., Mcelmeel K., Powel J. J. M., "Dynamic probing and its use in clay soils", Advances in Site Investigation Practice, Thomas Telford, London (1995) 383-395.

12. Card G. B., Roche D. P., Herbert S. M., "Application of continuous dynamic probing in ground investigation", Field Testing in Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication No 6 (1990) 129-135.

13. Cassan M., "Les essays in situ en mechanique des sols" realization et interpretation, Vol. 1, Eyrolles (1988) 146-151.

14. Amor S. J., Burtwell M. H., Turner A. S., "Panda dynamic cone penetrometer assessment", Transport Research Laboratory, Old Wokingham Road, Crowthorne, Berkshire, RG45 6AU (1999).

15. Langton D. D., "The panda light-weight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction", Soil Solution Ltd, 8 Marlowe court, Macclsfield, Cheshire, SK118AY (2000).

16. Hasan A., Alshibli K.A., "Discrete element simulation of strength properties of Johnson Space Center (JSC-1A) Lunar Regolith Simulant", ASCE, Journal of Aerospace Engineering, Vol.23, No.3 (2010) 157-165.

۱۷. برازوان س.، فخری م.، *بررسی هم‌بستگی نتایج آزمایش‌های CBR، DCP و سه‌محوری سیکلی (در محور قم- سمنان)*، مجلهٔ علمی پژوهشی حمل ونقل، سال چهارم، شمارهٔ اول (۱۳۹۱).

18. AASHTO Guide for design of pavement structures, "American association of state highway and transportation officials", Washington, DC. (1986).

19. Fakher A., Khodaparast M., Jones C. J. F. P., "The use of Mackintosh Probe for site investigation in soft soils ", Q.J.E.G. (Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology) London, No. 39 (2006) 189-196.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2633]