

معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

محل ضرب مهرهای تحت کنترل- منسوخ							۰۳
							۰۲
							۰۱
			امیر ساعدی	وحید پاچیده	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)		۰۰
	تاریخ انتشار	تصویب	تأیید	بررسی	تهیه	شرح	REV

	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								
	صفحه: ۲	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
	تیر ۹۴							۰۱	

فهرست مطالب

- ۱-مقدمه ۳
- ۲-انواع دستگاههای CPT ۴
- ۳-اجزاء دستگاه CPT ۷
- ۴-روش انجام آزمایش CPT ۱۱
- ۵-اصلاح نتایج CPT برای تاثیر میزان سربار ۱۱
- ۶-کاربرد نتایج آزمون CPT ۱۲
- ۶-۱- طبقه بندی خاک ۱۲
- ۶-۲- زاویه اصطکاک داخلی خاک ۱۳
- ۷-همبستگی بین نتایج CPT و SPT ۱۳

۱- مقدمه

آزمون نفوذ مخروط که به اختصار آن را CPT می‌گویند، بر اساس نفوذ پیوسته ابزار استوانه ای با نوک مخروطی شکل (نفوذسنج) به داخل زمین عمل می‌نماید. نفوذسنج دارای نوک مخروطی با زاویه پخی ۶۰ درجه و قطر ۳۷,۵ میلیمتر است و با سرعت ۲۰ میلیمتر در ثانیه به داخل زمین نفوذ میکند. مقدار مقاومت خاک در مقابل نفوذ ابزار مذکور به صورت مقاومت نوک و مقاومت جدار توسط دستگاه اندازه گیری می‌شود. مقاومت نوک در این آزمون با q_c و مقاومت جدار با f_s نمایش داده میشود.

در شرایط کنونی با توجه به کارایی بالای CPT در ارائه یک پروفیل پیوسته از وضعیت ژئوتکنیکی لایه های زیر سطحی برای رسها و ماسه ها و همچنین سرعت مناسب و اقتصادی بودن آزمایش، این آزمون به یک آزمایش بر جای معمول در سطح جهان تبدیل شده است. با این حال در ایران به دلیل محدود بودن پهنه های رسی و همچنین عدم اطلاع کامل مهندسين ایرانی از کارایی های گسترده آن این آزمون گسترش چندانی نیافته است. آزمون نفوذ مخروط، صرفاً برای مطالعه مقاومت رسهای خیلی نرم تا ماسه های متراکم کارایی دارد و در مصالح شنی و رسوبات حاوی قطعات سنگی توصیه نمی‌شود. شماره استاندارد این آزمایش در ASTM برای سیستم های مکانیکی آن ASTM-D3441 و برای سیستم های الکتریکی و الکترونیکی آن ASTM-D5778 میباشد. همچنین انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی پی (ISSMFE) دستورالعمل مرجعی را برای انجام آزمایش مخروط ارائه نموده است. در جدول ۱ به طور خلاصه معایب و مزایای نسبی مطرح در ارتباط با آزمون CPT لیست شده است.

جدول ۱: مزایا و معایب نسبی آزمون CPT

معایب نسبی CPT	مزایای نسبی CPT
لازم است اپراتورهای دستگاه آموزش داده شوند.	آزمایش سریع انجام میشود و پروفیل پیوسته ای از خاک به دست می آید.
نمونه از خاک مورد آزمایش به دست نمی آید.	با توجه به نتایج ارزشمند حاصله، این آزمایش اقتصادی محسوب میشود.
این آزمون در خاکهای شنی و قلوه سنگ دار کارایی ندارد.	عمق نفوذ در خاکهای سخت محدود است.
با توجه به مکانیزم عملکرد این آزمون، رفتار خاک در محدوده تشهای کوچک به دست نمی آید.	نتایج چندان وابسته به اپراتور نیست.
	آزمایش از مبانی تئوریک قوی برخوردار است.
	آزمایش در خاکهای نرم از کارایی بالایی برخوردار است.

۲- انواع دستگاههای CPT

به لحاظ تاریخی دستگاه CPT اولین بار توسط هلندی ها در سال ۱۹۳۰ ابداع شده است. هر چند که قبل از آن در راه آهن هلند نوعی CPT جیبی بکار گرفته می شد که با آن مقاومت زمین را اندازه می گرفتند و بر همین اساس به این دستگاه مخروط هلندی (Dutch cone) هم می گویند. سیستم دستگاه هلندی ها برای نفوذ در خاک مکانیکی بود و در فواصل ۲۰ سانتی متری اندازه گیری مقاومت خاک انجام می گردید. هم اکنون این دستگاهها مخروط مکانیکی (Mechanical CPT) نامیده می شوند و اندازه گیری داده ها در آنها به طور ناپیوسته انجام میشود. در سال ۱۹۴۸، مخروطهای الکتریکی (Electrical CPT) به نحوی طراحی گردیدند که از قابلیت ارائه نتایج به صورت پیوسته برخوردار بودند.

در سال ۱۹۶۵ اندازه گیری مقاومت جدار (Sleeve friction) به سیستم اضافه شد و با این کار شناخت طبقه بندی خاک بر اساس آزمون CPT عملی گردید. در سال ۱۹۷۴ به مخروط الکتریکی یک پیزومتر اندازه گیری فشار آب حفره ای منضم گردید، این ابزار جدید را CPTU یا پیزوکن نامیدند. اخیرا ابزارهای دیگری از قبیل مخروط اکوستیک (Acoustic cone)، مخروط لرزه ای (Seismic cone)، مخروط ویبره (Vibro cone)، مخروط با قابلیت اندازه گیری فشار جانبی (Lateral Stress cone) ابداع شده و برخی ابزارهای الکتریکی و الکترونیکی نیز به دستگاه اضافه شده است. مخروط لرزه ای که به آن SCPTU هم گفته می شود از جمله ابزارهای جدید است که علاوه بر امکانات CPTU از این قابلیت برخوردار است که سرعت حرکت موج برشی در محیط مورد آزمایش را اندازه گیری نماید.

به طور کلی از لحاظ نحوه اعمال بار، دستگاههای CPT به سه گروه استاتیکی، دینامیکی و دستگاههای با قابلیت توام اعمال بار استاتیکی و دینامیکی تقسیم می شوند. در نفوذسنج های استاتیکی بارگذاری از طریق جکهای هیدرولیک و به آرامی صورت می پذیرد (شکل ۱)، ولی در نفوذسنجهای دینامیکی مخروط نفوذسنج از طریق ضربات چکش و سقوط یک وزنه روی آن به درون زمین رانده می شود. نفوذسنج های دینامیکی دارای انواع وزنه سبک، متوسط و سنگین هستند و سطح مقطع مخروط و ارتفاع سقوط وزنه در آنها نیز متفاوت می باشد. همچنین نفوذسنج هایی ابداع شده است که قابلیت انجام هر نوع آزمایش استاتیکی و دینامیکی برای آنها وجود دارد. با این حال، اکثر مراجع علمی اصطلاح CPT را صرفا برای نفوذسنج های استاتیکی به کار می برند و نفوذسنجهای دینامیکی تحت عنوان مخروط نفوذ دینامیکی (DCPT) و یا کاوشگر دینامیکی (DP) مورد اشاره واقع می شوند.

از سوی دیگر نفوذسنجهای استاتیکی از لحاظ مکانیزم انجام آزمایش و اندازه گیری داده ها به گروه نفوذسنجهای مکانیکی (شکل ۲) و الکتریکی (شکل ۳) تقسیم می شوند. در هر دو نوع اخیر نیروی لازم برای نفوذ مخروط توسط جکهای هیدرولیکی تولید می شود، ولی اندازه گیری نتایج در نوع مکانیکی توسط گیجهای روغنی و در نوع الکتریکی توسط ابزارهای الکتریکی صورت می پذیرد. از سوی دیگر در انواع الکتریکی اندازه

معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								
پروژه:	REV	SEQ	TYP	DIS	CAT	PRJ	DEP	صفحه: ۵
۰۱								تیر ۹۴



گیری مقاومت مخروط نوک (q_c) و همچنین مقاومت اصطکاکی جدار (f_{sc}) به صورت پیوسته در عمق زمین انجام می شود، در حالی که در نوع مکانیکی که از قدمت بیشتری برخوردار است پیشرفت مخروط در زمین به صورت مرحله ای صورت می گیرد و مقادیر q_c و f_{sc} در فواصل ۲۰ سانتی متری اندازه گیری می شود. در شکل ۴ به صورت شماتیک دو نوع مکانیکی و الکتریکی مخروط دستگاههای CPT نمایش داده شده است.



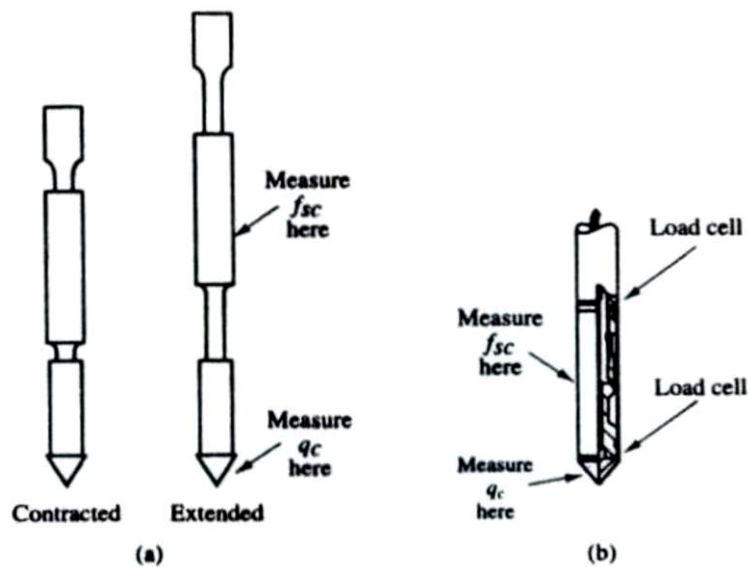
شکل ۱: دستگاه CPT با بار استاتیکی



شکل ۲: دستگاه CPT مکانیکی



شکل ۳: دستگاه CPT الکتریکی



شکل ۴: مخروط CPT مکانیکی (a) و الکتریکی (b)

معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								
صفحه: ۷	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
تیر ۹۴							۰۱	

۳- اجزاء دستگاه CPT

همانگونه که پیشتر بیان گردید در سالهای اخیر انواع دستگاههای CPT با تنوع قابل توجهی در اجزاء آنها تولید شده است و مدل‌های مختلف آن با قابلیت‌های جدید هر روز توسط شرکت‌های تولید کننده به بازار عرضه می‌گردد. با این حال اجزاء اصلی این دستگاه‌ها بر اساس دستورالعمل انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی پی (ISSMFE, 1988) به قرار زیر می باشد:

- ۱- نفوذسنج، (Penetrometer): بخشی از دستگاه است که با فشار وارد زمین شده و شامل اجزاء زیر می‌باشد:
 - مخروط نوک، (Cone) که بخش انتهایی نفوذسنج را تشکیل می دهد و شکل استوانه ای دارد (شکل ۵).
 - غلاف اصطکاکی (Sleeve friction) که بدنه نفوذسنج را تشکیل می دهد و شکل استوانه ای دارد.
 - فیلترهای متخلخل، که فشار آب حفره ای را در نوک نفوذسنج اندازه گیری می کنند.
- ۲- میله های رابط، (Push rods) که نفوذسنج را تا عمق مورد نظر فرو می برند و معمولاً از قطعات یک متری تشکیل شده اند (شکل ۶).
- ۳- جک هیدرولیکی، که بر روی یک دستگاه کامیون یا وانت نصب می گردد (شکل ۷).
- ۴- سیستم ثبت نتایج، (Data acquisition system) که سیگنال‌های آنالوگ ابزار دقیق دستگاه را دریافت کرده و به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل می کند (شکل ۸).
- ۵- کامیون یا وانت حمل دستگاه که حداقل وزن آن معادل ظرفیت دستگاه است (حدود ۲۰ تن) (شکل ۹).



شکل ۵: مخروط نوک

معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

صفحه: ۸

DEP

PRJ

CAT

DIS

TYP

SEQ

REV

پروژه:

تیر ۹۴

۰۱



شکل ۶: نصب میله های رابط روی مخروط CPT



شکل ۷: استفاده از وانت جهت نصب جک هیدرولیکی CPT

معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)



پروژه:	REV	SEQ	TYP	DIS	CAT	PRJ	DEP	صفحه: ۹
۰۱								تیر ۹۴



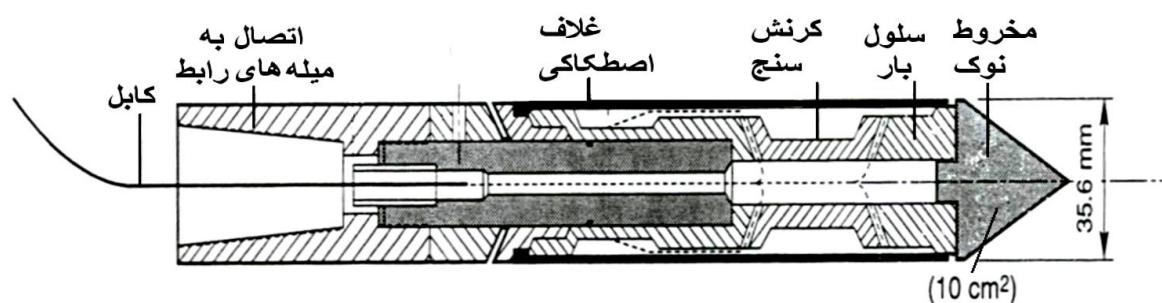
شکل ۸: اتاق کنترل و ثبت داده‌های CPT



شکل ۹: کامیون مخصوص انجام آزمایش CPT

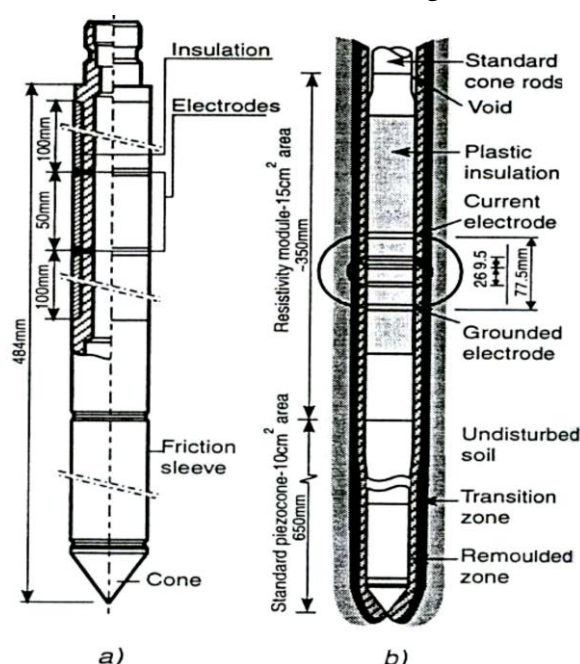
	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								
	پروژه:	REV	SEQ	TYP	DIS	CAT	PRJ	DEP	صفحه: ۱۰
		۰۱							تیر ۹۴

در شکل ۱۰ به طور شماتیک بخش نفوذسنج دستگاه CPT الکتریکی نمایش داده شده است. مخروط نوک در واقع به وجود آورنده مقاومت انتهایی و غلاف اصطکاکی به وجود آورنده اصطکاک جانبی می باشد. ساختار بعضی از نفوذسنجها به نحوی است که می توانند مقاومت انتهایی و اصطکاک جانبی را به طور مستقل از هم اندازه گیری نمایند. با این حال در برخی دیگر از این دستگاهها مقاومت انتهایی توسط یک حسگر الکترونیکی و مجموع مقاومت های انتهایی و جانبی توسط حسگر دیگری اندازه گیری می شود. طول غلاف اصطکاکی حدود ۱۳۴ میلی متر و قطر آن معمولاً اندازه قطر مخروط نوک (۳۵٫۷ میلیمتر) می باشد.



شکل ۱۰: بخش نفوذسنج دستگاه CPT الکتریکی

فیلترهای متخلخل برای اندازه گیری فشار آب حفره ای مورد استفاده قرار می گیرند و در نقاط مختلفی از نفوذسنج قابل نصب هستند. انجمن بین المللی مکانیک خاک و مهندسی پی (ISSMFE, 1988) توصیه کرده است که فیلترهای متخلخل بلافاصله بعد از مخروط نوک قرار گیرند. با این حال در بسیاری از دستگاههای CPT این فیلتر در نوک مخروط و یا میانه آن و حتی بالای غلاف اصطکاکی نصب شده اند. در شکل ۱۱ دو نوع مخروط، که یکی دارای فیلتر متخلخل و دیگری فاقد آن است، نشان داده شده است.



شکل ۱۱: دو نوع مخروط CPT، یکی دارای فیلتر متخلخل و دیگری فاقد آن است.

	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								گروه مهندسی دانا
	صفحه: ۱۱	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
	تیر ۹۴							۰۱	

۴- روش انجام آزمایش CPT

به طور کلی در این آزمون، مخروطی با مشخصات ذکر شده در بندهای قبلی این نوشتار و با سرعت ۲۰ میلیمتر در ثانیه به داخل زمین رانده می شود. برای این منظور از سیستم های کمپرسور تولید کننده فشار استفاده می گردد و با افزایش عمق نفوذ مخروط در زمین میله های جدیدی به آن متصل می کنند تا امکان نفوذ بیشتر را پیدا کند. اضافه کردن میله جدید معمولاً در فواصل ۱ تا ۱٫۵ متری انجام می گردد. ابزارهای الکترونیکی نصب شده در نوک، جدار و فیلترها از طریق یک یا دو سیستم کامپیوتری به سیستم ثبت نتایج متصل هستند و در فواصل ۲ تا ۵ دقیقه ای مقادیر f_{SC} ، q_c و u را با دقت لازم اندازه گیری می کنند. در دستگاههای SCPTU علاوه بر ۳ مشخصه مذکور سرعت امواج برشی تولید شده در سطح زمین نیز به وسیله یک ژئوفن که در ۰٫۵ متری بالای مخروط نوک نصب شده است اندازه گیری می شود. فواصل اندازه گیری سرعت موج برشی معادل فواصل اضافه کردن میله ها بوده و معمولاً ۱ تا ۱٫۵ متر است.

با وجود نمایشگرهای کامپیوتری به راحتی می توان نمودار تغییرات مشخصه های مذکور با پیشرفت عمق نفوذ دستگاه را ترسیم نموده و به موازات حفاری در مورد وضعیت لایه های زیر سطحی و مشخصات مکانیکی آنها به صورت صحرائی قضاوت نمود. البته بهتر است برای جلوگیری از فقدان اطلاعات ضبط شده در حافظه الکترونیکی کامپیوتر، فایل های پشتیبان و یا نسخه های چاپی از اطلاعات مذکور تهیه گردد. همچنین در مورد فیلترهای متخلخل که اطلاعات فشار آب حفره ای از طریق ابزارهای الکترونیکی جاسازی شده در آنها به دست می آید، لازم است که از اشباع کامل آنها و همچنین ملحقات الکترونیکی متصل به آنها اطمینان حاصل گردد. در صورتی که فرایند اشباع شدن به طور کامل صورت نپذیرد، وجود نواحی تراکم پذیر در فیلترها موجب ثبت اطلاعات گمراه کننده می گردد. از سوی دیگر قبل و بعد از اضافه کردن میله به مجموعه میله های حفاری، لازم است اطلاعات به دقت ثبت شده و اصلاحات لازم در نتایج مطابق آنچه شرکت های سازنده برای این منظور به دست می دهند انجام گردد. قابل ذکر است که در حین اضافه کردن میله اختلالاتی در سیستم اعمال فشار به وجود می آید که لازم است در نتایج حاصله در نظر گرفته شود.

۵- اصلاح نتایج CPT برای تاثیر میزان سربار

در بسیاری از روابط تحلیلی نتایج صحرائی CPT بدون هیچ اصلاحی به کار گرفته می شود. با این حال در برخی از موارد لازم است که از نتایج اصلاح شده CPT در روابط مورد نظر استفاده شود. در این موارد می بایست نتایج این آزمایش برای اثر سربار اصلاح گردد. ضریب اصلاح اثر سربار در CPT، نظیر آنچه برای اصلاح عدد SPT وجود دارد، به صورت زیر تعریف می گردد:

$$q_{cl} = q_c \sqrt{100 / \sigma_z}$$

$$f_{scl} = f_{sc} \sqrt{100 / \sigma_z}$$

در روابط بالا داریم:

q_c : مقاومت مخروط که به طور مستقیم از آزمایش صحرایی به دست آمده است.

q_{cl} : مقاومت مخروط اصلاح شده برای تنش سربار

f_{sc} : اصطکاک جانبی مخروط که به طور مستقیم از آزمایش صحرایی به دست آمده است.

f_{scl} : اصطکاک جانبی مخروط اصلاح شده برای اثر تنش سربار

σ'_z : تنش قائم موثر در عمق انجام آزمایش (بر حسب KPa)

۶- کاربرد نتایج آزمون CPT

نتایج آزمون CPT برای تخمین بسیاری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در خاک های ریز دانه و ماسه ها به کار می آید. به این منظور محققین روابط همبستگی متعددی بین خصوصیات خاک و پارامترهای حاصل از CPT ارائه نموده اند. اصلی ترین خصوصیات خاک که از طریق نتایج CPT تخمین زده می شوند به قرار زیر می باشند:

۱. مدول الاستیسیته (E) و مدول برشی (G)

۲. زاویه اصطکاک داخلی

۳. مقاومت برشی زهکشی نشده خاک

۴. طبقه بندی خاک

۵. دانسیته نسبی خاک

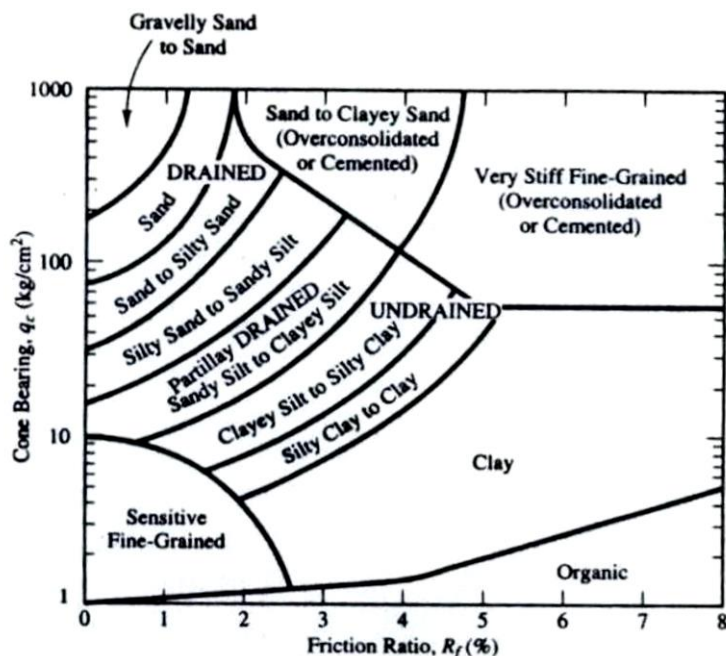
۶. ضریب نفوذپذیری و تحکیم خاک

۶-۱- طبقه بندی خاک

تعیین طبقه بندی خاک یکی از عمومی ترین کاربردهای نتایج آزمون CPT می باشد. با توجه به آنکه این آزمون نمونه ای برای دانه بندی و طبقه بندی آزمایشگاهی به دست نمی دهد، شناخت طبقه بندی خاک آزمایش شده از اهمیت بالایی برخوردار است. محققین مختلف همبستگی های تجربی متعددی بین طبقه بندی خاک و نتایج آزمون CPT ارائه نموده اند که نمونه ای از آنها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این روش طبقه بندی توسط Robertson and Campanella (1983) ارائه شده است و مطابق آن با داشتن نتایج مقاومت مخروط (q_c) و نسبت اصطکاکی (R_f) میتوان نوع خاک را تعیین کرد. نمونه ای دیگر از همبستگی های مذکور توسط (1984)

	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								گروه مهندسين DMS
	صفحه: ۱۳	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
	تیر ۹۴							۰۱	

Douglas and Olsen ارائه شده است که در آن طبقه بندی خاک بر اساس مقاومت مخروط اصلاح شده برای اثر سربار (q_{ci}) و نسبت اصطکاکی (R_f) به دست می آید.



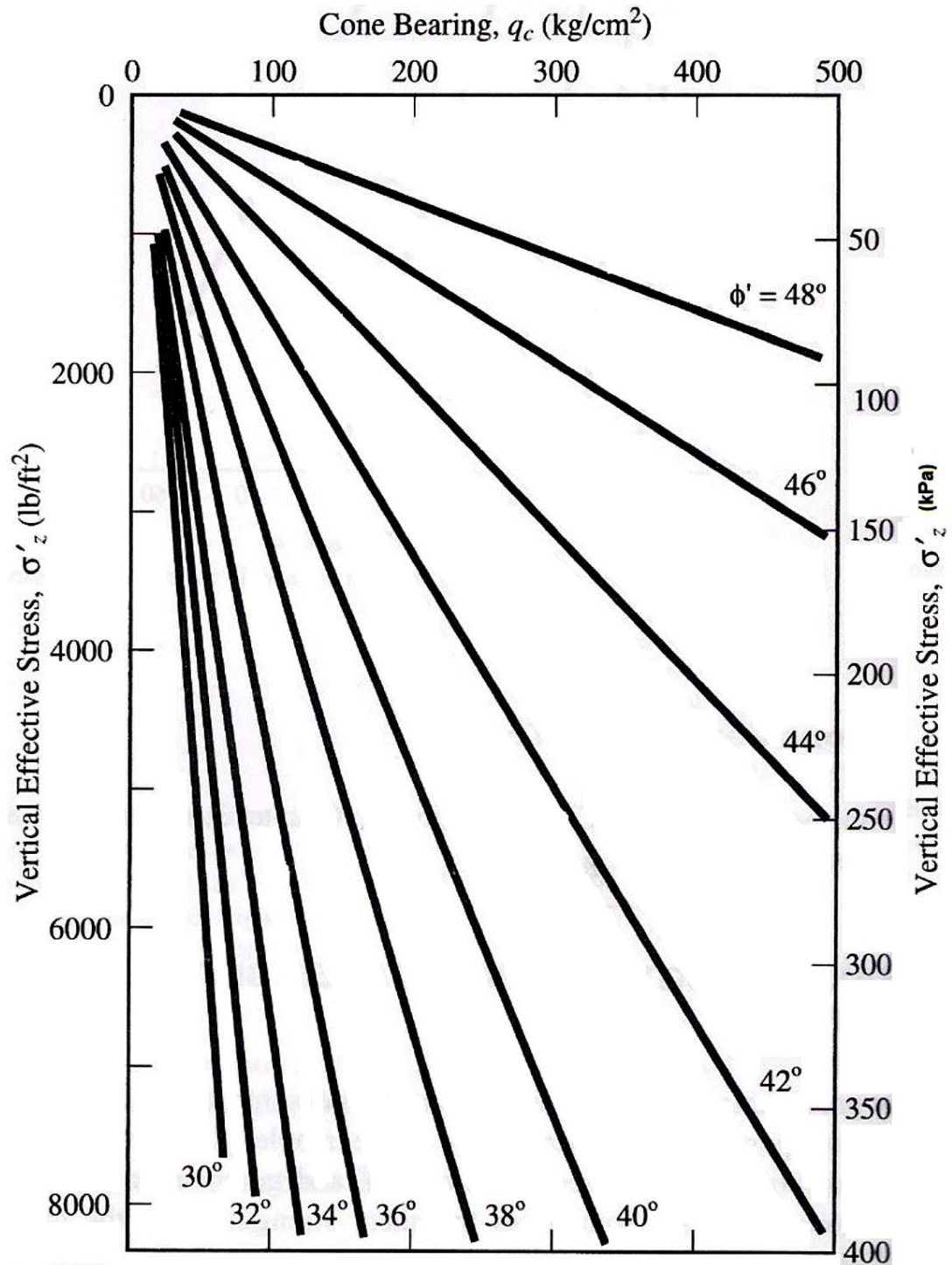
شکل ۱۲: طبقه بندی خاک بر اساس نتایج CPT (Robertson and Campanella 1983)

۶-۲- زاویه اصطکاک داخلی خاک

همبستگی های متعددی بین زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ') و مقاومت نوک در آزمون CPT ارائه شده است که یکی از معمول ترین این همبستگی ها منحنی های ارائه شده توسط Robertson and Campanella (1983) است که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این منحنی ها بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی بر روی ماسه های کوارتزی تحکیم نیافته و سیمانته نشده به دست آمده اند.

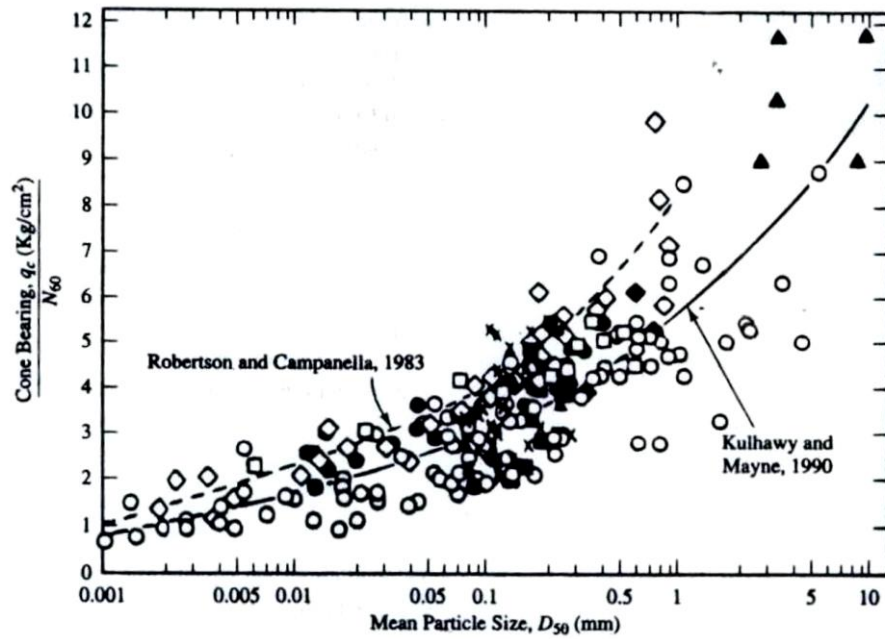
۷- همبستگی بین نتایج SPT و CPT

گرچه آزمایشهای SPT و CPT از ماهیت و مبنای نظری مشابهی برخوردار نیستند و شکل نفوذسنج نیز در آنها متفاوت است، با این حال مهندسان ژئوتکنیک از طریق بررسی تجربی نتایج این دو آزمون در خاکهای مشابه توانسته اند همبستگی معنی داری بین این دو برقرار نمایند. در شکل ۱۴ رابطه بین SPT و CPT بر حسب متوسط اندازه دانه ها (D_{50}) که توسط Kulhawy and Mayne (1990) و Robertson and Campanella (1983) ارائه شده، نشان داده شده است. نسبت مقاومت نوک مخروط CPT به عدد N_{60} حاصل از آزمایش SPT و محور افقی متوسط اندازه دانه ها بر حسب میلیمتر می باشد.



شکل ۱۳: همبستگی تجربی بین ϕ' و مقاومت نوک در آزمون CPT برای ماسه ها

	معرفی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)								
	صفحه: ۱۵	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
	تیر ۹۴							۰۱	



شکل ۱۴: همبستگی نتایج آزمایش های *CPT* و *SPT* (Kulhawy and Mayne ,1990)