

# مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران

نوشته: علی قنبری\*

\* دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۶/۲۱

## چکیده

آبرفت جنوب تهران، بستر بخش قابل توجهی از محدوده شهری تهران را تشکیل می‌دهد و به‌طور عمده ساختاری ریزدانه و یا مخلوط خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه دارد. بررسی‌های صورت پذیرفته نشان می‌دهد که این آبرفت از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، یکنواختی قابل توجهی دارد و بر همین اساس، نتایج مطالعه در بخش‌هایی از آن قابل تعمیم به دیگر مناطق است. در این تحقیق، آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی متعدد بر روی زمین صدها پروژه در دست مطالعه شهرداری تهران توسط گروه دقیق و کنترل شده انجام و نتایج حاصل بررسی شده است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که همبستگی قابل توجهی میان نتایج آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک که از آزمون‌های بارگذاری صفحه‌ای، برش مستقیم و سه محوری به دست آمده، وجود دارد. بر همین اساس، به منظور ارائه روابط کاربردی برای برآورد مدول الاستیسیته در آبرفت جنوب تهران، با توجه به مناطق شهرداری، جنوب تهران به سه بخش تقسیم شده و برای هر بخش رابطه‌ای برای محاسبه مدول الاستیسیته ارائه شده است. همچنین با توجه به اطلاعات حاصل، جدول ویژگی‌های عمومی خاک آبرفت جنوب تهران بر حسب مناطق مختلف شهرداری ارائه شده است.

**کلید واژه‌ها:** مدول الاستیسیته خاک، آبرفت جنوب تهران، آزمون نفوذ استاندارد، بارگذاری صفحه‌ای.

## ۱- مقدمه

بر اساس تقسیم‌بندی (Rieben, 1966) رسوبات تهران بر حسب سن آنها به چهار سری A، B و C و D تقسیم شده‌اند که در میان آنها سری A با سازند هزار دره قدیمی‌تر، سبترتر و با درجه سیمانی شدن بالاتری است. همچنین سری B که آبرفت درشت دانه ناهمگن شمال تهران نیز نامیده می‌شود، ناهمگنی بیشتری دارد و سبترای آن در برخی مناطق به ۶۰ متر می‌رسد. آبرفت سری C که به آن سازند تهران نیز گفته می‌شود، آبرفتی جوان، همگن و سخت نشده است و در قسمت‌های میانی تهران گسترده شده است. سازند آبرفتی تهران در نزدیکی کوهپایه، شکل مخروط افکنه‌ای واضحی را داشته است و به سمت جنوب به لایه‌های سیلتی کم‌شیب تبدیل می‌شود. این سازند پس از یک دوره فرسایش روی سازند B نهشته شده است. این نهشته‌ها همگن بوده و از قله سنگ، شن و ریگ همراه با سیمانی از ماسه و سیلت تشکیل شده‌اند و به‌طور کلی سخت نبوده و لایه‌بندی مشخصی ندارند. لایه‌های این سازند افقی‌اند و دستخوش کوهزایی نشده‌اند. در نهایت آبرفت سری D که به نسبت سایر بخش‌ها جوان‌تر است، صرفاً در سطح زمین و در بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها دیده می‌شود و اصولاً سیمانی نشده‌اند. این آبرفت در قسمت‌های شمالی از قله سنگ و شن گرد شده و سیمانی نشده و در نواحی جنوبی از رسوبات ریزدانه لای و رس تشکیل شده است. سبترای این آبرفت به ۱۰ متر محدود می‌شود.

محدوده مورد مطالعه این تحقیق، مناطق ۱۰ الی ۲۰ شهرداری تهران است که از شمال به خیابان‌های انقلاب و آزادی و از جنوب به حاشیه جنوبی شهر تهران محدود می‌شود. این محدوده به‌طور عمده در آبرفت سری D و گاه آبرفت سری C واقع شده است. بر همین اساس، بیشتر مناطق مورد بررسی در این تحقیق از خاک‌های ریزدانه جنوب تهران تشکیل شده‌اند. خلاصه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محدوده مورد نظر در بخش‌های بعدی این نوشتار ارائه شده است. همچنین در شکل ۱ نقشه مناطق مختلف تهران و موقعیت محدوده تحقیق نشان داده شده است.

## ۳- مدول الاستیسیته خاک و روش‌های تعیین آن

مدول الاستیسیته شیب خط تنش- کرنش در بخش الاستیک منحنی رفتار مصالح است و به‌طور عمومی با علامت E نمایش داده می‌شود. در صورتی که این شیب در ابتدای منحنی محاسبه شود، به آن مدول اولیه ( $E_0$ ) می‌گویند. از آنجا که منحنی تنش کرنش مصالح همواره خطی نیست،

بخش عمده‌ای از طرح‌های عمرانی و ساخت و سازهای درون شهری ایران در کلان شهر تهران اجرا می‌شود و امروزه با افزایش نیازهای شهری تعداد این طرح‌ها و ارقام مالی اختصاص یافته به آنها در حال افزایش است. بر همین اساس، مطالعات ژئوتکنیک و شناخت مشخصات زمین در این پروژه‌ها اهمیت شایان توجهی دارد. از سوی دیگر، وضعیت آبرفت تهران در بخش‌های میانی و جنوبی آن به گونه‌ای است که خاک یکنواختی قابل توجهی دارد. بر همین اساس، ناحیه‌بندی کردن این مناطق و ارائه مشخصات عمومی آنها می‌تواند برای مطالعات اولیه این طرح‌ها قابل استفاده باشد. در این تحقیق، به منظور ارائه رابطه‌ای میان مدول الاستیسیته خاک و عدد آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در آبرفت جنوب تهران و مقایسه آن با روابط ارائه شده در متون فنی، نتایج آزمون‌های متعدد صحرایی و آزمایشگاهی به تحقیق گذاشته می‌شود. کلیه آزمایش‌ها در طی سال‌های اخیر، با نظارت مناسب توسط گروه آموزش دیده مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران انجام شده است و دانشگاه تربیت معلم تهران در قالب این تحقیق با مرکز فوق همکاری کرده است. در این نوشتار، ابتدا به طور اجمالی آبرفت جنوب تهران و محدوده مورد مطالعه معرفی شده و در پی آن، درباره فرایند دسترسی به نتایج و روابط نهایی بحث می‌شود.

## ۲- معرفی آبرفت جنوب تهران و محدوده مورد مطالعه در این تحقیق

شهر تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان دشت تهران که از کوهپایه‌های البرز تا کورب جنوبی تهران گسترش دارند، بنا شده است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی جریان یافته از کوه‌های البرز است (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴ و Rieben, 1966). با این حال، برخی پژوهشگران بر این باورند که در تشکیل قسمت‌هایی از آبرفت تهران، یخرفت و عامل یخچالی نیز مؤثر بوده است (پدرامی، ۱۳۵۶). به طور کلی، این دشت از شمال به جنوب شیب دارد و بلندی‌ها و فرونشست‌های خاوری- باختری است و از مناطق شمالی به سوی مناطق جنوبی، ساختار خاک ریزدانه‌تر شده و میزان سیمانی شدن درشت دانه‌ها نیز کاهش می‌یابد. بر همین اساس می‌توان آبرفت تهران را به دو بخش ریزدانه و درشت دانه تقسیم کرد، که بخش‌هایی از خاک درشت دانه آن سیمانی شده است. بر پایه مطالعه جعفری و کشاورز (۱۳۸۰)، گستره نهشته‌های درشت‌دانه از حوالی خیابان جمهوری تا دامنه بلندی‌های البرز است.

به دست می آید. رابطه میان مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است، با این حال بیشتر روابط ارائه شده مربوط به خاک های دانه ای است و در خاک های چسبنده، به طور عمده این رابطه را بر حسب مقاومت حاصل از آزمون نفوذ مخروط بیان کرده اند. (Papadopoulos, 1992) و (Bowles, 1996) و (Das, 1983) روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف برای خاک های دانه ای را گردآوری و معرفی کرده اند. از سوی دیگر، مطالعات محدودی که پیرامون همبستگی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در خاک های چسبنده توسط (Webb, 1969) و (Behpoor & Ghahramani, 1989) صورت پذیرفته است، نشان می دهد که ارتباط شایان توجه و معنی داری میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در خاک های چسبنده وجود دارد. (Behpoor & Ghahramani, 1989) نتایج حدود ۶۰ مطالعه ژئوتکنیک برای خاک های ریزدانه در سطح ایران را گردآوری کرده و رابطه میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آنها را بررسی کرده اند. بر مبنای نتایج این مطالعات برای خاک های چسبنده با عدد نفوذ استاندارد کمتر از ۲۵، ارتباط قابل قبولی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده وجود دارد. پژوهشگران، این رابطه را به صورت  $E=1.7N$  بیان داشته اند. که در آن  $N$  عدد نفوذ استاندارد و  $E$  مدول الاستیسیته خاک چسبنده بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. روابط ارائه شده (Bowles, 1996) و (Webb, 1969) برای ماسه های رس دار و سیلت ها در جدول ۱ به اختصار ارائه شده است. همچنین (USACE, 1990)، محدوده تقریبی مدول الاستیسیته را برای خاک های ریزدانه و ماسه ها مطابق جدول ۲ ارائه کرده است.

#### ۴- روش تحقیق

به منظور شناسایی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی آبرفت جنوب تهران، دانشگاه تربیت معلم تهران با همکاری مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران مستند سازی اطلاعات کاوش های ژئوتکنیکی در جنوب تهران را آغاز کرد. اطلاعات مورد استفاده در تحقیق حاضر، خلاصه نتایج بیش از ۱۰۰ مورد مطالعات ژئوتکنیک در محدوده مورد مطالعه است که کلیه آزمون های صحرایی و آزمایشگاهی آن توسط گروه آموزش دیده مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران و با نظارت مناسب انجام شده و مشتمل بر دست کم ۲۵۰ گمانه ماشینی و دستی، ۳۰ مورد نتایج آزمایش بارگذاری صفحه ای، ۲۰۰ مورد نتایج آزمایش SPT، ۵۰ مورد نتایج آزمایش چگالی نسبی صحرایی، ۸۰۰ نمونه آزمایشگاهی شامل ۳۶۰ نمونه آزمایش برش مستقیم، ۱۶۰ نمونه آزمایش سه محوری و ۲۸۰ نمونه آزمایش تک محوری است. بر روی همه نمونه های اخذ شده دانه بندی آزمایشگاهی و آزمون حدود اتربرگ انجام شده و در اغلب موارد، ضمن تعیین میزان رطوبت طبیعی نمونه ها، وزن مخصوص طبیعی آنها نیز محاسبه شده است. آزمایش برش مستقیم برای مصالح ریزدانه به ابعاد ۶ سانتی متر و برای نمونه های درشت دانه بسته به شرایط به ابعاد ۱۵ یا ۳۰ سانتی متر انجام شده است. نمونه های مورد استفاده برای آزمایش های برش مستقیم در خاک های ریزدانه دست نخورده و در خاک های درشت دانه بازسازی شده است. همچنین آزمون سه محوری صرفاً برای نمونه های ریزدانه در شرایط دست نخورده به قطر ۳/۸ سانتی متر و در حالت های CU و CD انجام شده است. قابل ذکر است که نمونه های دست نخورده به وسیله نمونه گیر شلبی از گمانه های حفاری شده اخذ شده اند. آزمون صحرایی بارگذاری صفحه ای در گالری و چاهک های حفاری شده به روش دستی و بر روی صفحه دایره ای به قطر ۴۵ سانتی متر انجام شده است. در این آزمون، میزان نشست زمین توسط ۳ عقربه با دقت صدم میلی متر در برابر فشار بیشینه ۱۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع اندازه گیری شده است.

نتایج آزمون های برش مستقیم، سه محوری و بارگذاری صفحه ای به تفکیک ارزیابی شده و از طریق روابط ۱ تا ۳ مقدار مدول الاستیسیته خاک محاسبه شده است. به منظور یافتن رابطه میان تعداد ضربات آزمون نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آبرفت

برای بخش غیر خطی رفتار مصالح مدول تانژانت  $E_t$  و مدول سکانت  $E_s$  نیز مطابق روش نشان داده شده در شکل ۲ تعریف شده و از منحنی تنش - کرنش قابل تعیین هستند. مدول الاستیسیته تانژانت شیب خط مماس بر منحنی تنش - کرنش در نقطه ای بر حسب ملاحظات است. مدول الاستیسیته سکانت شیب خطی است که از مبدأ شروع می شود و منحنی را در نقطه ای مطلوب قطع می کند. مدول الاستیسیته مماسی و سکانت مقادیر ثابتی نیستند و با افزایش کرنش برشی کاهش می یابند. در مورد مصالح الاستوپلاستیک در برخی موارد مرسوم است که نمونه را تحت باربرداری قرار می دهند و شیب خط باربرداری ( $E_t$ ) را به عنوان مدول الاستیسیته مماسی اولیه در نظر می گیرند. این شیب معمولاً با شیب بخش الاستیک منحنی تنش - کرنش برابر است. مدول الاستیسیته خاک به سه روش آزمایشگاهی، صحرایی و تجربی قابل تعیین است. در روش آزمایشگاه نتایج هر یک از آزمون های تحکیم، تک محوری، برش مستقیم و سه محوری می تواند برای محاسبه مدول الاستیسیته به کار رود. همچنین نتایج آزمون های صحرایی نظیر بارگذاری صفحه ای، پرسیمتری و دایلاتومتر تخت برای محاسبه مدول الاستیسیته خاک کارایی دارد. با توجه به آن که در این تحقیق از آزمون های آزمایشگاه سه محوری و برش مستقیم و همچنین آزمون صحرایی بارگذاری صفحه ای برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده شده است، سپس روش محاسبه این پارامتر از آزمون های یاد شده و همچنین روش های تجربی مورد بحث واقع می شود.

#### ۳-۱- روش های آزمایشگاهی و صحرایی تعیین مدول الاستیسیته

آزمایش برش مستقیم ساده ترین روش برای برآورد مدول برشی خاک ( $G$ ) است. با توجه به این که در ناحیه الاستیک مدول های الاستیسیته و برشی خاک با پارامتر ضریب پواسون به هم ارتباط داده می شوند، می توان از نتایج آزمایش برش مستقیم مدول الاستیسیته خاک را به شکل زیر محاسبه کرد:

$$E=2G(1+\nu) \quad (1)$$

در این رابطه  $G$  مدول برشی،  $E$  مدول الاستیسیته و  $\nu$  ضریب پواسون خاک است. همچنین آزمایش سه محوری یکی از روش های تعیین مدول الاستیسیته خاک است. در این آزمایش  $\Delta \epsilon_1$  برابر افزایش تنش محوری ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) محاسبه شده و از رابطه زیر مدول الاستیسیته به دست می آید.

$$E=\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta \epsilon_1 \quad (2)$$

علاوه بر آزمون های آزمایشگاهی برش مستقیم و سه محوری، آزمایش بارگذاری صفحه ای از دقیق ترین روش ها برای محاسبه مدول الاستیسیته بر جای خاک به شمار می آید. هدف از آزمایش بارگذاری صفحه ای، تعیین پارامتر مدول عکس العمل بستر محیط های ژئوتکنیکی است. با این حال، مدول الاستیسیته خاک نیز از نتایج این آزمون مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است: (Bowles, 1996)

$$E_s=\Delta q B \frac{1-\nu^2}{\Delta \rho} I_{\rho} \quad (3)$$

که  $\Delta q$  اضافه فشار اعمال شده به صفحه و خاک،  $B$  عرض صفحه بارگذاری،  $\Delta \rho$  اختلاف نشست حاصل از اضافه تنش اعمال شده و  $\nu$  ضریب پواسون خاک و  $I_{\rho}$  ضریب تأثیر شکل صفحه بارگذاری است که با توجه به شکل صفحه و میزان انعطاف پذیری آن جدول مقادیر آن در مراجع فنی ارائه شده است (Us Army, 1990; IS 8009, 1976). گفتنی است که با توجه به روش انجام آزمون صحرایی بارگذاری صفحه ای، مدول حاصل از این آزمون مربوط به رفتار خاک در جهت قائم است و برای محاسبه نشست از دقت بالاتری برخوردار است. این در حالی است که مدول حاصل از آزمون های پرسیمتری و دایلاتومتر تخت بیانگر رفتار خاک در جهت افقی هستند.

#### ۳-۲- برآورد مدول الاستیسیته با روابط تجربی

در این روش، مدول الاستیسیته از همبستگی های موجود و روابط تجربی ذکر شده در مراجع فنی

است. همچنین در جدول یاد شده محدوده شاخص خمیری نیز ارائه شده است که برای بخش ۳، ارقام بالاتری نسبت به سایر بخش‌ها دارا است. شایان ذکر است اطلاعات جدول یاد شده معرف ویژگی‌های غالب خاک منطقه است و ممکن است در مواردی، مشخصات خاک خارج از محدوده‌های ذکر شده باشد. با این حال به دلیل ناچیز بودن فراوانی موارد خارج از محدوده، موارد یاد شده مورد توجه واقع نشده است.

از سوی دیگر بررسی نتایج ۳۰ مورد آزمون بارگذاری صفحه‌ای در مناطق مورد تحقیق نشان می‌دهد که ضریب عکس‌العمل بستر در جنوب تهران میان ۳ تا ۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. به طور کلی، مقادیر بالای محدوده یاد شده مربوط به بخش ۱ از بخش‌های سه گانه اشاره شده در این تحقیق است، با این حال، در جنوبی‌ترین مناطق تهران نیز خاک‌های ریزدانه سخت با ضریب عکس‌العمل ۱۷/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دیده می‌شود.

قابل ذکر است که مطالعات امینی (۱۳۷۳) نشان داده است که ضریب عکس‌العمل بستر برای بخش میانی آبرفت تهران میان ۲/۵ تا ۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. همچنین براساس گزارش مطالعات شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک در پروژه تونل خیام این ضریب برای آبرفت‌های سیمانی نشده بخش‌های میانی تهران که با نواحی شمالی بخش ۱ این تحقیق همپوشانی دارد، حدود ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. از سوی دیگر، مطالعات ژئوتکنیک برج میلاد تهران نشان می‌دهد که این ضریب برای آبرفت سیمانی شده محدوده برج بر اساس آزمایش بارگذاری صفحه‌ای میان ۲۵ تا ۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. از بررسی نتایج ارقام گزارش شده این نتیجه بدست می‌آید که ضریب عکس‌العمل در آبرفت‌های سیمانی نشده جنوب و میانه تهران بین ۳ تا ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دیده شده است.

#### ۵-۲- مدول الاستیسیته خاک در جنوب تهران

در بخش ۱، منطقه مورد بررسی به‌طور عمده از خاک‌های درشت دانه مخلوط با ریزدانه تشکیل شده است. به‌طور خاص در مناطق شماره ۱۲ و ۱۳ به‌طور عمده رده‌بندی خاک GC, GW-GP و یا SC, SC-SM است، در حالی که در مناطق ۱۰، ۱۱ و ۱۴ درصد ریزدانه بیش از مناطق ۱۲ و ۱۳ است. با این حال، در تمام گستره این بخش اغلب خاک متراکم بوده و عدد نفوذ استاندارد بیش از ۲۵ است. با توجه به مشخصات یاد شده، نتایج آزمون صحرایی بارگذاری صفحه‌ای که آزمایشی مناسب برای محاسبه مدول الاستیسیته است، به منظور تعیین ارتباط میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته در این بخش انتخاب شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که می‌توان ارتباط یاد شده را با در نظر گرفتن اثر بیشینه اندازه دانه‌ها و برآزش خطی میان نتایج مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد با دقت مناسبی برقرار کرد. در شکل ۳ ارتباط میان پارامترهای یاد شده برای این بخش نشان داده شده است. این رابطه در یک برآزش خطی با  $R^2 = 0.73$ ، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$E = 6(N+2D) + 100 \quad (4)$$

که در آن  $N$ ، عدد نفوذ استاندارد،  $E$  مدول الاستیسیته بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و  $D$  بیشینه اندازه دانه‌ها بر حسب سانتی‌متر است.

در بخش ۲، ساختار خاک مخلوطی از درشت دانه و ریزدانه است و بر همین اساس رده‌بندی آن گاه شن، گاه ماسه و گاه رس و یا سیلت است. عدد نفوذ استاندارد در این بخش بین ۱۰ تا ۵۰ گزارش شده است. با این حال، بررسی ارتباط میان مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش برش مستقیم با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و در شرایط اشباع نشان می‌دهد که ارتباط قابل توجهی میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک وجود دارد. در شکل ۴ ارتباط میان مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد برای این بخش نشان داده شده است. رابطه یاد شده در یک برآزش خطی با  $R^2 = 0.76$ ، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$E = 7(N+2D) + 25 \quad (5)$$

به‌نسبت درشت دانه مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ شهرداری تهران از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، در مناطق میانی ۱۵، ۱۶ و ۱۷ از آزمون برش مستقیم و در مناطق ۱۸، ۱۹ و ۲۰ جنوب تهران که ساختاری کاملاً ریزدانه دارند، از نتایج آزمون سه محوری استفاده شده است. قابل ذکر است که مقادیر استفاده شده برای عدد نفوذ استاندارد در این تحلیل، تعداد ضربات لازم برای ۳۰ سانتی‌متر نفوذ بوده و بر روی مقادیر حاصل تصحیح سربار انجام شده است. همچنین در آزمون‌های برش مستقیم و سه‌محوری، نمونه در حین آزمایش به طور معمول زیر ۳ سربار مختلف قرار می‌گیرد و بنابراین، مقدار مدول الاستیسیته حاصل از نتایج این آزمون‌ها، تابع فشار سربار اعمال شده می‌شود. در این تحقیق، برای محاسبه مقادیر مدول الاستیسیته از منحنی تنش کرنش، شیب بخش خطی منحنی یاد شده برای هر سربار محاسبه شده و در نهایت میانگین نتایج ۳ سربار به کار گرفته شده است. از سوی دیگر، بررسی اطلاعات جمع آوری شده در این تحقیق نشان می‌دهد که در نظرگیری بیشینه اندازه دانه‌های خاک، موجب افزایش ضریب همبستگی میان مدول الاستیسیته و تعداد ضربات آزمون نفوذ استاندارد به میزان صفر تا پنج درصد می‌شود. بر همین اساس، برای کلیه مناطق مورد مطالعه، میانگین بیشینه اندازه دانه‌ها در هر ساختگاه محاسبه شده و در ارائه رابطه نهایی تأثیر داده شده است. قابل ذکر است که در مطالعه Lin et al. (2000) تأثیر اندازه دانه‌ها در افزایش مدول برشی، که متناسب با مدول الاستیسیته است، برای خاک درشت دانه نیز گزارش شده است.

#### ۵- تحلیل و بررسی نتایج

اطلاع از وضعیت عمومی و مشخصات اولیه فیزیکی و مکانیکی خاک در جنوب تهران، می‌تواند برای تبیین دورنمای وضعیت ژئوتکنیکی خاک در پروژه‌های بزرگ منطقه مفید واقع شده و در تصمیم‌گیری درمورد نوع و تعداد آزمایش‌ها مؤثر باشد. همچنین در طرح‌های کوچک ساخت و ساز، در صورت عدم دسترسی به اطلاعات دقیق، ضمن رعایت جانب احتیاط، می‌توان از این اطلاعات برای طراحی استفاده کرد. با توجه به اینکه در این تحقیق اطلاعات گسترده‌ای از وضعیت خاک جنوب تهران گردآوری شده است، به منظور ارائه جدول مشخصات عمومی خاک بر اساس این اطلاعات در مناطق مورد بررسی، نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی بررسی شده و پس از حذف درصد کمی از ارقام ناهمگون، میانگین مشخصات خاک جنوب تهران در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۵-۱- ویژگی‌های عمومی خاک در آبرفت جنوب تهران

به‌طور کلی، بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که آبرفت جنوب تهران را با توجه به جنس خاک می‌توان به سه بخش تقسیم کرد. این سه بخش در شمال، میانه و جنوب آبرفت جنوب تهران واقع شده‌اند و بر مبنای تقسیم بندی مناطق شهرداری، مناطق ۱۰ تا ۲۰ را تشکیل می‌دهند. به منظور سهولت ارزیابی‌ها، این سه بخش به ترتیب از شمال به جنوب به نام‌های بخش ۱، بخش ۲ و بخش ۳ نامگذاری شده است. بخش ۱، شامل مناطق ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰ و ۱۴ از شن رس و لای‌دار همراه با ماسه و یا ریزدانه‌های حاوی شن و ماسه تشکیل شده است. همچنین بخش ۲، شامل مناطق ۱۶، ۱۵ و ۱۷ می‌شود که اغلب از رس و لای ماسه‌دار همراه با شن و گاهی ماسه رس و لای‌دار همراه با شن شکل گرفته است. در نهایت بخش ۳، که جنوبی‌ترین مناطق تهران را در بر می‌گیرد شامل مناطق ۱۹، ۱۸ و ۲۰ شهرداری است که جنس خاک در آن اغلب رس و لای ماسه‌دار است و مقدار ریزدانه آن نیز بیش از دیگر مناطق است.

بر اساس اطلاعات جدول ۳، به استثنای مناطق ۱۲ و ۱۳، به‌طور کلی خاک آبرفت جنوب تهران دارای ۳۰ تا ۹۰ درصد ریزدانه است که دارای وزن مخصوص طبیعی ۱/۸ تا ۲/۱ تن بر متر مکعب بوده و بیشینه اندازه دانه‌های آن میان ۰/۲۵ تا ۳/۵ سانتی‌متر

نتایج حدود ۲۸۰ مورد آزمایش تک محوری که بر روی نمونه‌های دست نخورده بخش ریزدانه خاک جنوب تهران انجام شده، در جدول ۵ ارائه شده است.

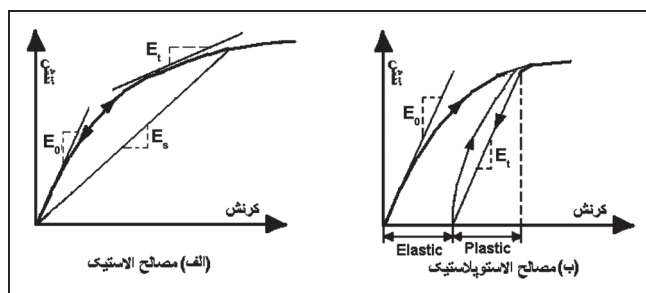
### ۶- نتیجه گیری

آزمایش نفوذ استاندارد یکی از معمول‌ترین آزمایش‌های صحرایی است و پژوهشگران روابط متعددی میان عدد حاصل از این آزمایش و ویژگی‌های مکانیکی خاک ارائه کرده‌اند. در این مطالعه تلاش شده است ارتباط میان عدد نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران تعیین شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌دار و شایان توجهی میان عدد آزمایش نفوذ استاندارد و مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران وجود دارد. به منظور افزایش کارایی و دقت این رابطه محدود مورد مطالعه در جنوب تهران به سه بخش شمالی (بخش ۱)، میانی (بخش ۲) و جنوب (بخش ۳) تفکیک شده و رابطه مناسب برای هر بخش به دست آمده است.

با توجه به این که بخش ۱ به‌طور عمده از خاک‌های مخلوط ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل شده و تعداد قابل توجهی آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در این ناحیه انجام شده بود، رابطه مورد نظر در بخش ۱ از ارتباط نتایج آزمایش‌های صحرایی نفوذ استاندارد و بارگذاری صفحه‌ای به‌دست آمده است. همچنین در بخش ۲، با استناد به نتایج آزمون‌های برش مستقیم در حالت اشباع شده با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و آزمون نفوذ استاندارد رابطه مورد نظر ارائه شده است. در نهایت در بخش ۳، با توجه به آن که درصد ریزدانه در این بخش بیش از دیگر بخش‌ها است، به نتایج آزمون سه محوری زهکشی شده که بر روی نمونه‌ها دست نخورده انجام شده است، استناد شده است. همچنین در این مطالعه اثر بیشینه اندازه دانه‌ها در افزایش مدول الاستیسیته بررسی شده و در روابط ارائه شده به آنها توجه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته خاک برای آبرفت جنوب تهران در بخش ۱ بین ۲۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در بخش ۲ بین ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در بخش ۳ بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. همچنین بر اساس نتایج این تحقیق مقاومت تک محوری خاک ریزدانه جنوب تهران در حالت اشباع برای مناطق مختلف ارائه شده است.

### سیاسگزاری

این مطالعه با استفاده از تسهیلات مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت معلم تهران و همکاری مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران صورت پذیرفته است. بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاسگزاری از مراکز یاد شده اعلام می‌شود. همچنین از همکاری آقایان دکتر علی فرهادی، مهندس علی عزالدین فرهنگ و مهندس هادی قدرت تشکر می‌شود.



شکل ۲- تعریف مدول الاستیسیته اولیه ( $E_0$ )، مماسی ( $E_t$ )، سکانتی ( $E_s$ ) و مدول باربرداری ( $E_r$ )

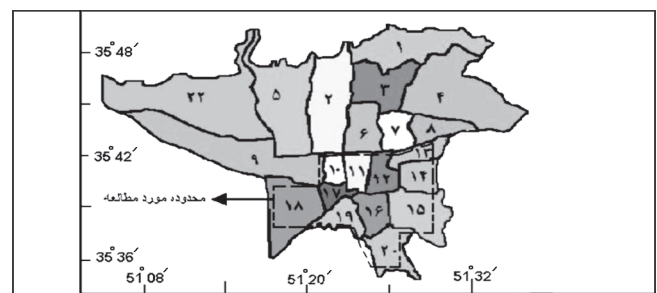
که در آن پارامترهای E,N,D همان پارامترهای تعریف شده در رابطه ۴ است. در بخش ۳، خاک دارای ساختاری ریزدانه بوده، به‌طور عمده رده بندی استاندارد (unified) آن در ردیف خاک‌های CL, CH, ML قرار می‌گیرد و عدد نفوذ استاندارد برای آن کمتر ۳۰ گزارش شده است. باین حال در برخی نقاط عدسی‌های (لنزهای) ماسه‌ای و یا نهشته‌های آبرفتی با ترکیب شن و ماسه در سطح محدودی دیده می‌شود. در این تحقیق در بخش ۳، صرفاً آزمون‌ها بر روی خاک ریزدانه که قسمت عمده منطقه را پوشانده است، انجام شده و موارد استثنایی مورد توجه واقع نشده است. برای تحقیق در مورد مدول الاستیسیته در این بخش، از نتایج آزمایش سه محوری در شرایط اشباع و تحکیم یافته که بر روی نمونه‌های دست نخورده انجام شده، استفاده شده است. در شکل ۵ ارتباط میان مدول الاستیسیته و عدد نفوذ استاندارد برای این بخش نشان داده شده است. رابطه یاد شده در یک برازش خطی با  $R^2=0.75$ ، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$E = 3.5(N+2D)+32 \quad (6)$$

پارامترهای این رابطه نیز مانند موارد تعریف شده در رابطه ۴ است. در جدول ۴ و شکل ۶ روابط استخراج شده برای هر سه بخش ارائه شده است.

### ۵-۳- بررسی نتایج آزمون تک محوری

آزمون تک محوری به دلیل عدم اعمال فشار همه‌جانبه بر نمونه، مقادیر بسیار کمتری نسبت به سایر آزمون‌ها برای مدول الاستیسیته به دست می‌دهد. بر همین اساس، رابطه ارائه شده توسط Behpoor and Ghahramani (1989) صرفاً برای محاسبه کمترین مدول الاستیسیته خاک‌های چسبنده که در حالت بدون فشار جانبی به دست می‌آید، کارایی دارد. این شرایط، برای اغلب پی‌ها که در درون زمین هستند، منطبق بر واقعیت نیست. به نظر (Bowels 1996) مدول الاستیسیته بر جای خاک، به‌طور معمول میان ۴ تا ۱۳ برابر مدول الاستیسیته آزمون تک محوری است و عدم وجود فشار همه‌جانبه در حین آزمایش، دلیل دستیابی به مقادیر بسیار محافظه‌کارانه برای مدول الاستیسیته خاک از نتایج این آزمایش است. به منظور بررسی نسبت میان مدول الاستیسیته حاصل از آزمون تک محوری و مدول الاستیسیته واقعی خاک، نتایج حدود ۲۸۰ مورد آزمون تک محوری در جنوب تهران بررسی شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به‌طور کلی، نسبت یاد شده در آبرفت ریزدانه جنوب تهران بین ۱ تا ۶ است. به‌طور متوسط، نسبت یاد شده در بخش‌های ۲ و ۳ از محدوده مورد بررسی به ترتیب معادل ۵ و ۱/۵ بوده است. بررسی اطلاعات این تحقیق نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته حاصل از آزمون تک محوری در رس‌های با چسبندگی بالا به مقدار برجای آن نزدیک است و به نتایج این آزمون برای این شرایط می‌توان استناد کرد. در بخش ۱ از محدوده مورد بررسی و بخصوص مناطق ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به دلیل فراوانی درشت دانه‌ها و محدود بودن تعداد آزمایش‌های تک محوری، اطلاعات کافی برای ارزیابی یاد شده وجود نداشته است. با توجه به این که مقاومت تک محوری در محاسبه ظرفیت باربری پی‌ها و برآورد چسبندگی نقش قابل توجهی دارد، خلاصه



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه در جنوب شهر تهران

جدول ۲- محدوده مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه‌ای و رسی (USACE,1990)

نوع خاک	توصیف	محدوده مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
ماسه	ماسه سست	۱۰۰-۲۵۰
	ماسه متراکم	۲۵۰-۱۰۰۰
	شن و ماسه متراکم	۱۰۰۰-۲۰۰۰
	ماسه سیلتی	۲۵۰-۲۰۰۰
رس	رس خیلی نرم	۵-۵۰
	رس نرم	۲۰-۵۰
	رس میانگین	۲۰۰-۵۰۰
	رس سخت، رس سیلتی	۵۰۰-۱۰۰۰
	رس ماسه دار	۲۵۰-۲۰۰۰
	شیل رسی	۱۰۰۰-۲۰۰۰

جدول ۱- روابط ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین برای محاسبه مدول الاستیسیته از SPT در خاک‌های حاوی ریزدانه

مرجع	نوع خاک مورد مطالعه	رابطه
Behpoor & Ghahramani(1989)	خاک‌های ریزدانه چسبنده	$E = 1.7N$
Bowles(1996)	ماسه رس دار	$E = 3.2N+48$
	سیلت، سیلت ماسه دار، سیلت رس دار	$E = 3.0N+18$
Webb(1969)	ماسه رس دار	$E = 3.6N+18$

جدول ۳- ویژگی‌های عمومی خاک در مناطق مختلف جنوب تهران بر مبنای اطلاعات جمع آوری شده

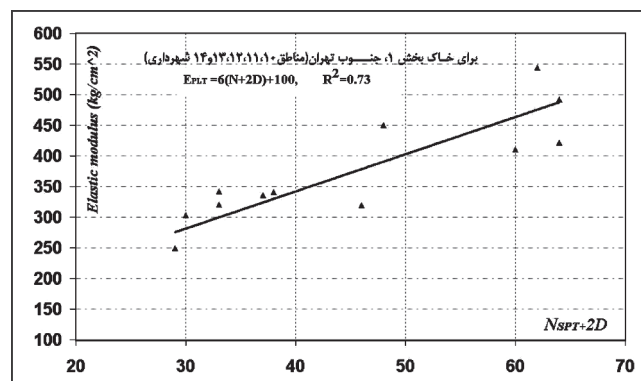
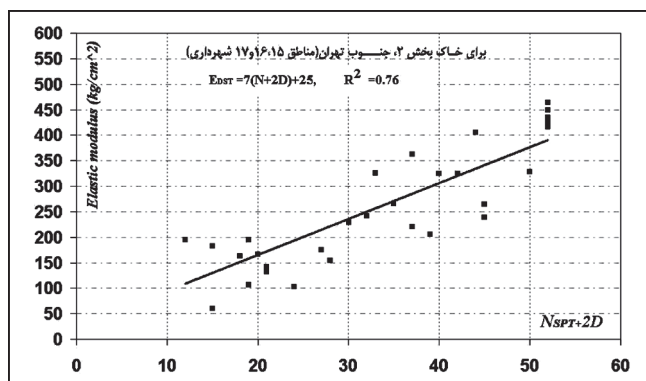
شماره منطقه شهرداری	شماره بخش در این تحقیق	میانگین درصد ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰)	میانگین شاخص خمیری خاک (ریزدانه منطقه (%))	میانگین حداکثر اندازه دانه‌ها (سانتی متر)	میانگین وزن مخصوص طبیعی (t/m3)	میانگین ژرفای سطح آب زیر زمینی (متر)	محدوده ضریب عکس العمل بستر (kg/cm <sup>2</sup> )
۱۰	بخش ۱	۵۰-۷۰	۸-۱۵	۰/۵	۱/۹-۲/۱	۱۹	۳-۲۵
		۳۰-۶۰	۸-۱۴	۱/۰		۱۲	
		۱۵-۵۰	۶-۱۲	۲/۵		۱۳	
		۵-۲۵	-	۳/۵		۳۰	
		۳۰-۸۰	۸-۱۲	۰/۲۵		-	
۱۵	بخش ۲	۳۵-۷۰	۱۰-۱۸	۱/۰	۱/۸۵-۲/۰	۱۶	۳-۲۰
		۶۰-۸۵	۱۱-۲۰	۰/۲۵			
		۵۰-۸۰	۱۲-۲۵	۰/۲۵			
۱۸	بخش ۳	۳۰-۸۵	۶-۲۰	۰/۲۵	۱/۸-۱/۹۵	۱۵	۳-۱۷/۵
		۶۵-۸۵	۱۵-۲۵	۰/۲۵			
		۵۰-۷۰	۱۰-۲۵	۰/۲۵			

جدول ۴- روابط پیشنهادی برای محاسبه مدول الاستیسیته در جنوب تهران

جدول ۵- خلاصه نتایج آزمون‌های تک محوری بر روی نمونه‌های دست نخورده از خاک ریزدانه جنوب تهران

شماره منطقه شهرداری	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
میانگین مقاومت تک محوری اشباع (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۰/۴۳	۰/۲۶	-	-	-	۰/۲۸	۰/۸۱	۰/۳۵	۰/۹۵	۰/۸۹	۱/۶۶

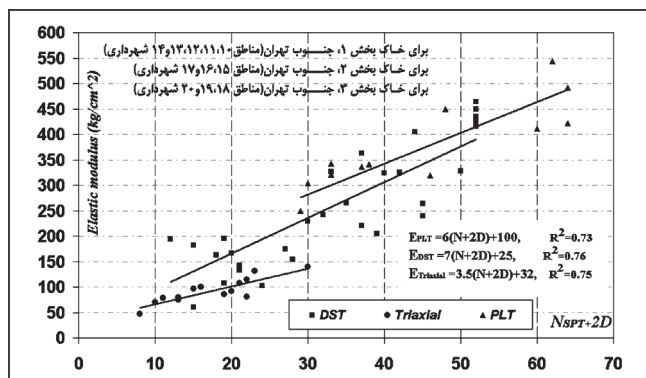
شماره بخش	مناطق شهرداری	محدوده عدد نفوذ استاندارد	رابطه پیشنهادی برای محاسبه مدول الاستیسیته
۱	۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴	۵۰ تا ۲۵	$E = 6(N+2D)+100$
۲	۱۵، ۱۶، ۱۷	۵۰ تا ۱۰	$E = 7(N+2D)+25$
۳	۱۸، ۱۹، ۲۰	۳۰ تا ۰	$E = 3.5(N+2D)+32$



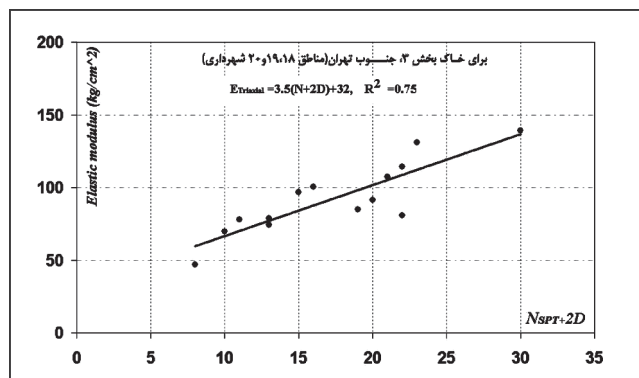
شکل ۴- رابطه میان E و N برای بخش ۲، بر مبنای نتایج آزمون برش مستقیم

شکل ۳- رابطه میان E و N برای بخش ۱، بر مبنای نتایج آزمون بارگذاری صفحه‌ای

شکل ۶- رابطه میان E و N برای هر سه بخش مورد مطالعه در جنوب تهران



شکل ۵- رابطه میان E و N برای بخش ۳، بر مبنای نتایج آزمون سه محوری



### کتابنگاری

- امینی، م.، ۱۳۷۳- ویژگی های ژئوتکنیک رسوبات کوارترنر دشت تهران، مجموعه مقالات نخستین سمپوزیم بین المللی کوارترنر، دانشگاه تهران، ص ۱۷۱-۱۷۵.
- بربریان، م.، قرشی، م.، ارژنگک روش، ا. و مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴- پژوهش و بررسی ژرف نو زمین ساخت و خطر زمینلرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون، گزارش شماره ۵۶ سازمان زمین شناسی کشور.
- پدرامی، م.، ۱۳۵۶- مطالبی مختصر در مورد رسوبات کوارترنر اطراف تهران، سازمان زمین شناسی کشور، ۱۸ صفحه.
- پهلوان، ب.، فاخر، ع.، خامه چیان، م. و صنیعی، ه.، ۱۳۸۲- مطالعه متغیرهای تغییرشکل پذیری آبرفت های درشت دانه با استفاده از پرسومتر منارد، مجله علوم زمین، شماره ۴۷-۴۸، ص ۹۶-۱۱۸ جعفری، م. ک. و کشاورز بخشایش، م.، ۱۳۸۰- بررسی ویژگی های زمین شناسی مهندسی ژئوتکنیکی آبرفت های جنوب تهران، مجموعه مقالات دومین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۵۳۳-۵۴۴.
- حائری، س. م.، یثربی، س. ش.، ارومیه ای، ع. و اصغری، ا.، ۱۳۸۲- ویژگی های زمین شناسی مهندسی آبرفت های درشت دانه و سیمانی شده تهران، مجله علوم زمین، شماره ۴۷-۴۸، ص ۲-۱۵.
- شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک، ۱۳۷۳- گزارش نهایی ژئوتکنیک پروژه تونل خیام، شهرداری تهران.
- شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک، ۱۳۷۵- گزارش ژئوتکنیک برج میلاد تهران، شرکت یادمان سازه.
- قدرت، ه.، ۱۳۸۵- بهینه سازی مطالعات ژئوتکنیک پروژه های جنوب شهر تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، ارائه شده در گروه مهندسی عمران دانشگاه تربیت معلم تهران.
- قنبری، ع.، ۱۳۸۶- ویژگی های ژئوتکنیکی آبرفت جنوب تهران، طرح تحقیقاتی ارائه شده به معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت معلم تهران.

### References

- ASTM, American Society for testing and materials, No. 04.08 and 04.09.
- Behpoor, L. and Gharamani, A., 1989- " Correlation of SPT to strength and modulus of elasticity of cohesive soils", 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Rio do Janeiro, Brazil.
- Bowles, J. E., 1996- "Foundation Analysis and Design", 3rd Edn.
- Broms, B. B., 1986- "Penetration tests". Fourth International Geotechnical Seminar, Field Measurements and In-situ Measurements, Nanyang Technological Institute, pp. 1 - 29.
- Das, B. M., 1983- "Advanced Soil Mechanics". McGraw-Hill Book Company.
- IS 8009. 1976- "Code of Practice for Calculation of Settlement of Foundation", B.I.S., New Delhi.
- Jafari, M. K., Shafiee, A. and Razmkhah, A., 2002- Dynamic properties of fine grained soils in south of Tehran, J. Seismology and Earthquake Eng., Vol. 40, NO. 1, 25-35.
- Lin, S.Y., Lin, P.S., Luo, H. S. & Juang, C.H., 2000- Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits, Can. Geotech. J., Vol. 37, 638-651.
- Rieben, E. H., 1966- Geological observation on alluvial deposits in northern Iran, Geological Survey of Iran, Report No. 9.
- Stroud, M. A., 1974-The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. Proc. European Symposium on Penetration Testing, Stockholm. 2.2, 367-375.
- USACE, 1990- Engineer Manual (EM 1110-1-1904). Engineering and Design- Settlement Analysis.