

مطالعه عددی اثر اندازه‌ی پی گسترده‌ی دایره‌ی در متوسط ضریب عکس‌العمل بستر خاک‌های سیمانته‌شده‌ی تهران

کاظم فخاریان* (استادیار)

مهرداد صادقی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۲-۱۴۹، شماره‌ی ۳، ص. ۳۷-۳۱

تخمین ضریب عکس‌العمل بستر (k_s) برای پی‌های گسترده معمولاً برای طراحان سازه حائز اهمیت است. یکی از روش‌های تعیین k_s در محل، آزمایش بارگذاری صفحه است. با استفاده از این آزمایش، k_s برای محدوده‌ی تأثیر کوچک صفحه‌ی بارگذاری تعیین می‌شود. از جمله روابطی که به کمک آن‌ها می‌توان k_s را برای اندازه‌های بزرگ‌تر پی تخمین زد، روابط ترزاقی (۱۹۹۵)^[۱] است که با وجود برخی محدودیت‌ها، همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوشتار به کمک مدل‌سازی عددی برای خاک‌های سیمانته، اثر اندازه‌ی پی در k_s بررسی و نتایج آن با روابط ترزاقی (۱۹۵۵) مقایسه شده است. به منظور درستی‌سنجی، نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ی واقعی با مدل عددی مقایسه شده است. همچنین اثر تغییر ضخامت پی در تغییر k_s مختصراً بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی عددی حاکی از آن است که k_s در خاک‌های «سیمانته»، تقریباً نزدیک مقادیری است که روابط ترزاقی (۱۹۵۵) برای خاک‌های «رسی» تخمین زده است.

واژگان کلیدی: ضریب عکس‌العمل بستر، خاک سیمانته، اندازه‌ی پی، آزمایش بارگذاری صفحه.

kfakhari@aut.ac.ir
mehrdadsadeghi2000@yahoo.com

۱. مقدمه

یک پروژه، باید به مواردی چون اندازه‌ی پی و خصوصیات خاک توجه بیشتری شود.

در این نوشتار با استفاده از مدل‌سازی عددی غیرخطی به روش اجزای محدود (FEM)، اثر اندازه‌ی پی‌های مستقر در خاک‌های دارای سیمانناسیون (مانند آبرفت‌های شهر تهران) بررسی و k_s حاصل با تخمین‌های ترزاقی (۱۹۵۵)^[۱] مقایسه می‌شود. سپس براساس مشاهدات انجام‌شده، پیشنهادی برای انتخاب k_s در این خاک‌ها ارائه می‌شود.

۲. مروری بر تئوری مسئله

ضریب عکس‌العمل بستر به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود. اساس این رابطه برگرفته از مدل بستر فنر وینکلر است و کماکان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$k_s = \frac{p}{y} \quad (۱)$$

که در آن، k_s ضریب عکس‌العمل بستر، p فشار در هر نقطه از تماس پی و خاک، و y نشست قائم در آن نقطه است.

مفهوم ضریب عکس‌العمل بستر برای نخستین بار در اواسط قرن ۱۹ میلادی توسط وینکلر در قالب مدل بستر فنرها مطرح شد. در این مدل، بستر به صورت مجموعه‌ی از فنرها با سختی k_s در واحد مساحت کف پی فرض می‌شود که فشارهای وارده از جانب سازه را متحمل می‌شود. به عبارت دیگر، به نسبت «فشار به نشست» در هر نقطه از زیر پی، ضریب عکس‌العمل بستر نامیده و با k_s نشان داده می‌شود. این کمیت بیانگر اندرکنش فشاری مابین خاک و پی است و می‌توان با استفاده از آن، توزیع برش و لنگر را در زیر پی محاسبه کرد. این مدل از فرضیات ساده‌ی استفاده کرده و مورد توجه مهندسان و طراحان سازه قرار گرفته است. به تدریج با پیشرفت در طی چند دهه، محاسباتی تنش‌ها در زیر پی‌های انعطاف‌پذیر مانند پی‌های پیوسته^۱ یا پی‌های گسترده^۲ و همچنین در روسازی‌های بتنی در معرض بار چرخ، با این تئوری امکان‌پذیر شده است. همچنین، پژوهشگران برای تخمین k_s مناسب در زیر پی‌ها روابطی را براساس تجربه یا تئوری ارائه داده‌اند.^[۳-۱] این تحقیقات نشان می‌دهند که برخی عوامل از جمله اندازه و شکل ناحیه‌ی بارگذاری‌شده، جنس خاک (رس یا ماسه)، سختی خمشی پی، و مدول کشسانی خاک و پی در مقدار k_s مؤثر است. به نظر می‌رسد برای تخمین k_s در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۲/۳، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۱۸.

ضریب عکس‌العمل بستر با تغییر عواملی از جمله اندازه‌ی ناحیه‌ی بارگذاری شده،^[۲] جنس خاک (دانه‌یی یا رسی)،^[۱] مدول کشسانی خاک و بتن،^[۵،۴] سختی خمشی پی،^[۳،۱] و... تغییر می‌کند.

توزیعی رابطه‌های ۲ و ۳ را جهت تخمین k_s به ترتیب برای خاک‌های رسی و ماسه‌یی ارائه داده است،^[۱] که در آن‌ها k_s پی به نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه ۲ مرتبط و اثر اندازه‌ی پی به منزله‌ی عامل مؤثر لحاظ شده است.

$$k_s = k_{s1} \frac{B_1}{B} \quad (۲)$$

$$k_s = k_{s1} \left(\frac{B+B_1}{2B} \right)^2 \quad (۳)$$

در این روابط، k_{s1} ضریب عکس‌العمل بستر حاصل از PLT، B_1 قطر صفحه‌ی بارگذاری، و B اندازه‌ی پی است.

این روابط برای $B/B_1 \geq 3$ دقت کافی نداشته،^[۱] و این موضوع در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ نیز نشان داده شده است.^[۶]

همچنین، بنا بر مشاهد‌های صورت گرفته در خاک‌های مختلف (رسی و ماسه‌یی)، توزیع k_s در زیر پی‌های گسترده یک‌نواخت نیست و در نواحی نزدیک به لبه‌ی پی نسبت به نواحی مرکزی متفاوت است، به‌گونه‌یی که در خاک‌های رسی در لبه‌ها بیشتر از مرکز و در خاک‌های ماسه‌یی کمتر از مرکز است.^[۷] پژوهشگران دیگر نیز روابطی بر اساس تئوری کشسانی به‌منظور تخمین k_s پیشنهاد کرده‌اند،^[۲،۱] که در آن‌ها مسئله‌ی تیر مستقر در شالوده‌ی کشسان مطرح و سختی خمشی تیر و پارامترهای کشسان خاک نیز دخالت داده شده است. با توجه به فراوانی ساخت و ساز در شهر تهران و سیمانته‌بودن خاک در اغلب نواحی این منطقه، برآورد مناسبی از k_s برای پی‌های گسترده‌ی واقع در این مناطق می‌تواند حائز اهمیت باشد.

۳. مدل عددی

مدل عددی به‌کاررفته از نوع تقارن محوری است و به روش اجزای محدود با نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده است. در این مدل‌سازی از ترکیب مشخصات رفتاری Poro elastic/ Cap plasticity همراه Modified Drucker-Prager/ Cap plasticity استفاده شده است.^[۸] که امکان تغییر مدول کشسانی خاک بر اثر افزایش تنش مؤثر در اعماق یا سطوح بار بیشتر و همچنین وارد کردن اثر تخلخل خاک (در صورت لزوم) را فراهم می‌کند. بخش Poro elastic/ Cap plasticity با دراختیار گرفتن پارامترهایی نظیر سطح تنش مؤثر، ضریب پواسون و تخلخل مصالح، رفتار کشسان وابسته به تنش را در مسئله اعمال می‌کند. سطح تسلیم Drucker-Prager/ Modified Cap از ۳ بخش «سطح گسیختگی رشی Drucker-Prager»، «Cap بیضی شکل» و یک «ناحیه‌ی انتقالی» بین این دو تشکیل شده است. رابطه‌ی چگونگی محاسبه‌ی مدول کشسانی خاک (E_s) را با مدل رفتاری Poro elastic/ Cap plasticity نشان می‌دهد.

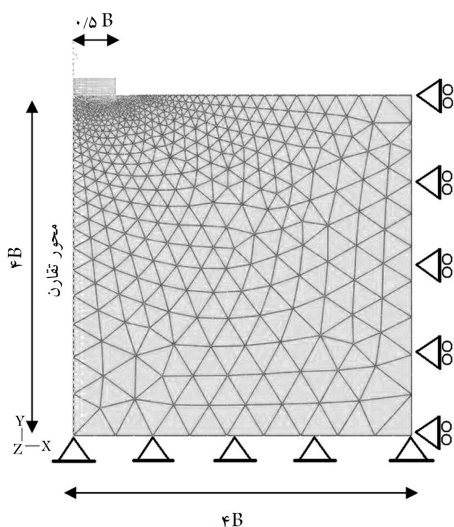
$$E_s = \frac{3(1 - 2\nu_s)(1 + e_s)}{\kappa} (p' + p_t^{el}) \quad (۴)$$

در این رابطه، p' تنش مؤثر میانگین در نقطه‌ی مورد بررسی، و p_t^{el} حد کششی مصالح، e_s تخلخل اولیه‌ی خاک، ν_s نسبت پواسون خاک، و κ شیب خط تورم خاک در فضای $e - \ln p'$ است. لازم به توضیح است که در این رابطه چنانچه p_t^{el} و p' به‌طور هم‌زمان صفر فرض شوند، مدول کشسانی خاک برابر با صفر محاسبه

می‌شود و این تلویحاً به معنای صفر بودن مدول کشسانی در سطح خاک (تنش مؤثر صفر) است. برای برطرف‌شدن این موضوع، می‌توان با دراختیارداشتن مقدار E_s و p' در هر نقطه (برای مثال سطح خاک)، مقدار p_t^{el} را محاسبه کرد. چنانچه مقدار مدول کشسانی در سایر اعماق خاک به نحوی در اختیار باشد، می‌توان مقدار p_t^{el} را با افزایش عمق تغییر داد و به رفتار واقعی خاک نزدیک‌تر شد. اما در مدل کنونی، فرض بر ثابت‌بودن p_t^{el} است و تغییرات تنش مؤثر p' عامل تغییر در مدول کشسانی خواهد بود. همچنین با استفاده از رابطه‌ی ساده شده‌ی Vesic^[۱]، مدول کشسانی خاک محل در اعماق کم از رابطه‌ی $E_s = k_s \cdot B \cdot (1 - \nu_s)$ تخمین زده می‌شود. المان مورد استفاده برای خاک از نوع مثلثی ۶ گره‌یی با نام (CAX6)، و برای صفحه‌ی بارگذاری و پی از نوع چهارضلعی ۸ گره‌یی با نام (CAX8) است. جزءبندی به‌گونه‌یی ترتیب داده شده است که اندازه‌ی المان‌ها با نزدیک‌شدن به لبه‌ی پی کوچک‌تر شود. خاک در کل تحلیل‌ها در حالت بدون فشار آب حفره‌یی در نظر گرفته شده است. جزءبندی و شرایط مرزی مدل عددی برای توده‌ی خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شرایط تقارن محوری در مدل عددی، پلان پی‌ها به‌صورت دایره‌یی است.

۱.۳. درستی‌سنجی مدل عددی

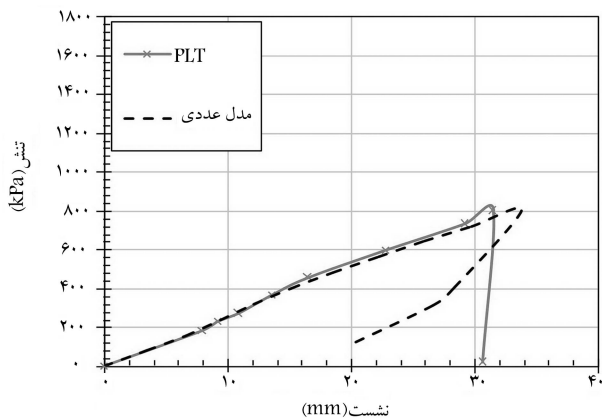
به‌منظور درستی‌سنجی مدل عددی، نتایج آزمایش بارگذاری صفحه بر روی ۳ نوع خاک از نقاط مختلف شهر تهران در نظر گرفته شده و با مدل عددی مربوط به آزمایش مقایسه شده است. با وجود اینکه داده‌های بار-نشست حاصل از این آزمایش فقط می‌توانند مشخصه‌های خاک را در ناحیه‌یی با عمق محدود تخمین بزنند، ولی رایج‌بودن کاربرد و استناد به نتایج حاصل از آن برای تخمین k_s از یک سو، و کمیاب‌بودن داده‌های پایش نشست پی‌های با ابعاد واقعی از سوی دیگر، این آزمایش را به‌منزله‌ی گزینه‌یی برای درستی‌سنجی مدل عددی مطرح کرده است. پارامترهای حاصل از مطالعات انجام‌شده بر روی این ۳ نوع خاک (A، B و C) به شرحی است که در جدول ۱ آمده است. در این جدول، γ وزن مخصوص خاک در حالت خشک، e_s تخلخل اولیه‌ی خاک، ν_s نسبت پواسون خاک، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در حالت زه‌کشی شده، c' چسبندگی خاک در حالت زه‌کشی شده، w درصد رطوبت خاک، κ شیب خط تورم خاک (در فضای



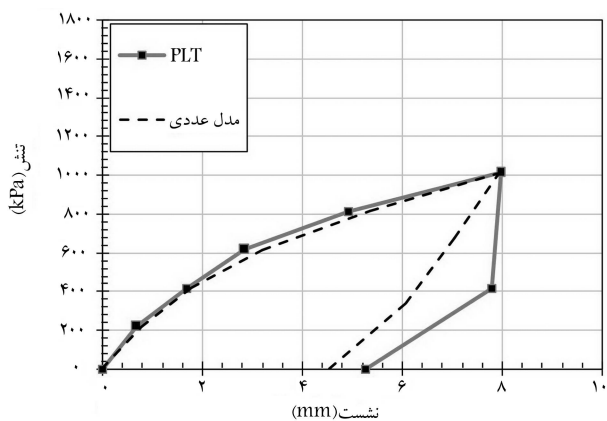
شکل ۱. جزءبندی و شرایط مرزی مدل عددی.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در پژوهش.

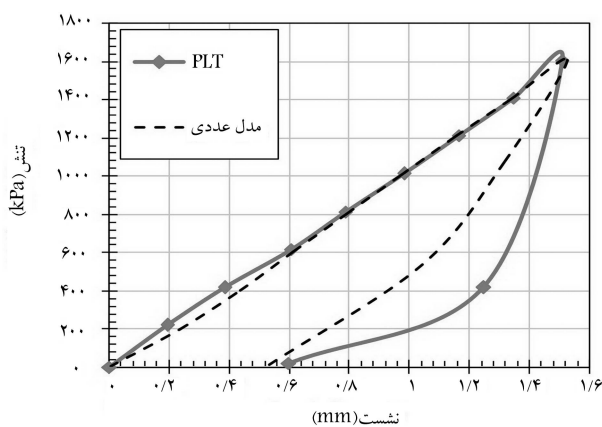
نام خاک	γ (kN/m ³)	e_0	ν_s	ϕ' (°)	c' (kPa)	ω (%)	κ	λ	طبقه‌بندی
A	۲۱٫۳	۰٫۳۸	۰٫۳۱	۳۳	۳۵	۹٫۶	۰٫۰۰۵	۰٫۰۲۵	SW
B	۲۱٫۳	۰٫۴۴۳	۰٫۴	۱۹٫۸	۵۰	۱۶	۰٫۰۰۸۷	۰٫۰۳۲	CL
C	۱۹	۰٫۳۸	۰٫۳	۶۱٫۵	۷۴	۵	۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۰۱۸	SC, GC



شکل ۳. نمودار تنش-نشست حاصل از PLT و مدل عددی برای خاک A.



شکل ۴. نمودار تنش-نشست حاصل از PLT و مدل عددی برای خاک B.



شکل ۵. نمودار تنش-نشست حاصل از PLT و مدل عددی برای خاک C.

$(e - \ln p')$ و λ شیب خط تحکیم عادی خاک (در فضای $(e - \ln p')$ است. با توجه به اینکه خاک‌های A و C طبق طبقه‌بندی خاک‌ها جزء دسته‌ی دانه‌ی محسوب می‌شوند، نتایج آزمایش تحکیم برای آن‌ها موجود نیست. بنابراین، پارامترهای λ و κ برای آن‌ها از طریق آزمون و خطا تخمین زده شده است. مثلاً برای خاکی با مشخصات نزدیک به خاک A، یک آزمایش بارگذاری-باربرداری محصورشده ترتیب داده شد و از طریق رسم منحنی $e - \ln p'$ محدودی تقریبی از λ و κ به دست آمد. سپس با در نظر گرفتن مقادیر λ و κ فرضی در تحلیل و استخراج نشست‌ها، میزان انطباق آن‌ها با نتایج آزمایش بارگذاری صفحه بررسی شد و با تکرار این روند، مقادیر λ و κ مناسب به دست آمد.

به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر آزمایش بارگذاری صفحه، کوشیده شده است مدل‌سازی به گونه‌ی انجام شود که به شرایط بارگذاری با جک صلب در آزمایش واقعی نزدیک باشد. پارامترهای c' و ϕ' با استفاده از آزمایش برش مستقیم برجا روی بلوک‌هایی مکعبی به طول و عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به دست آمده‌اند.

در شکل ۲، موقعیت نقاط مورد بررسی در این پژوهش بر روی تصویر هوایی از شهر تهران نشان داده شده است. در این شکل، نقطه‌ی A مربوط به پروژه‌ی ساختمان اداری بانک پارسیان (بالتر از پارک‌وی)^[۹] نقطه‌ی B مربوط به پروژه‌ی مسجد حضرت ابوالفضل (منطقه‌ی نعمت‌آباد)^[۱۰] و نقطه‌ی C مربوط به پروژه‌ی دروازه‌ی فرهنگی البرز (تپه‌های شمال شرقی فرحزاد)^[۱۱] است.

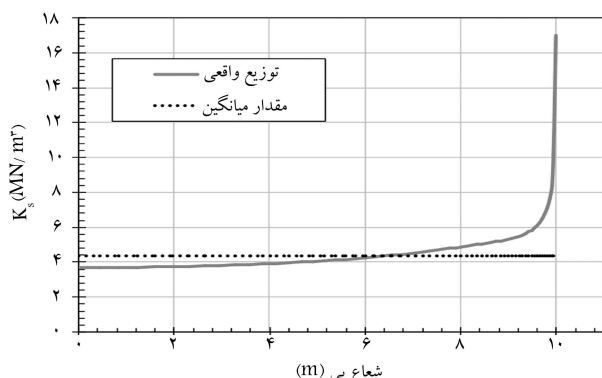
شکل‌های ۳، ۴ و ۵ منحنی‌های تنش-نشست حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه و مدل عددی را به ترتیب برای خاک‌های A، B و C نمایش می‌دهند. لازم به ذکر است که قطر صفحه‌ی بارگذاری در نمونه‌ی A برابر با ۵۰ سانتی‌متر و در بقیه‌ی موارد برابر با ۳۰ سانتی‌متر است. شکل ۶، مجموعه‌ی جک بارگذاری و صفحه‌ی فولادی را در مدل تقارن محوری نشان می‌دهد.

۲.۳. حالت‌های تحلیل

حالت‌های تحلیل موردنظر در این پژوهش به شرحی است که در جدول ۲ ارائه شده



شکل ۲. موقعیت نقاط مورد استفاده برای این پژوهش، در تصویر هوایی شهر تهران.



شکل ۷. مقایسه‌ی توزیع واقعی k_s و مقدار k_{avg} ، برای پی به قطر ۲۰ متر، ضخامت ۸۰ سانتی متر، تحت تنش ۴۰۰ kPa، خاک B.

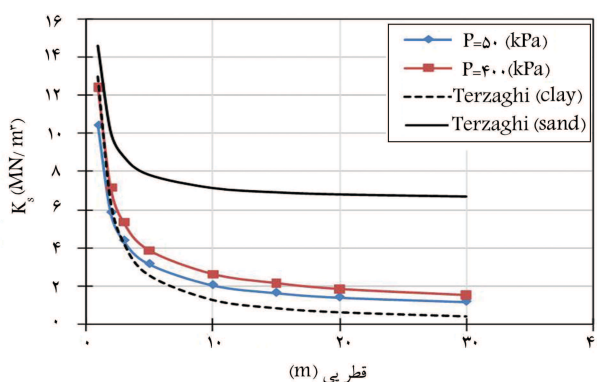
تقریباً نزدیک مقدار k_s در مرکز است و در فواصل دورتر از آن، افزایش شدیدتری دارد. در ادامه، به دلیل رعایت سادگی و اختصار، مقدار k_{avg} به شکل k به کار می‌رود.

۴.۳. مقایسه‌ی k_s حاصل از مدل عددی با روابط تخمینی ترزاقی

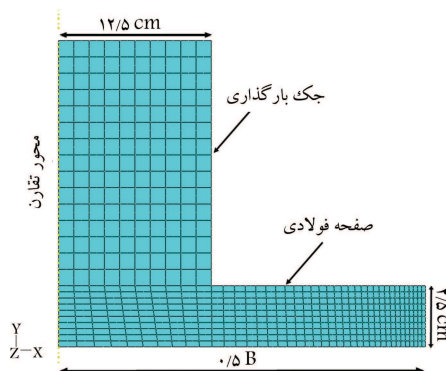
روابط ترزاقی برای تخمین k_s در خاک‌های دانه‌بی و چسبیده با وجود محدودیت بیان شده برای آن‌ها، همچنان به‌طور وسیعی در مورد پی‌های گسترده استفاده می‌شوند. در این بخش، k_s (میانگین) به دست آمده از مدل عددی تحت سطوح بار و مشخصات هندسی در نظر گرفته شده با k_s حاصل از روابط ترزاقی مقایسه می‌شود. با توجه به تعدد حالت‌های بررسی شده (ضخامت پی و سطوح بار)، به منظور نمایش نتایج پی‌های با ضخامت ۶۰ سانتی متر، تحت سطوح بار ۵۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال انتخاب شده‌اند. منحنی‌های مربوط به دیگر سطوح بار در محدوده‌ی بین این دو سطح بار قرار می‌گیرند.

۱.۴.۳. خاک A

خاک A که در بین ۳ نوع خاک بررسی شده کمترین مقدار چسبندگی را دارد، به صورت متعارف به منزله‌ی خاک دانه‌بی محسوب می‌شود. در شکل ۸، مقادیر k_s حاصل از مدل عددی برای اندازه‌های مختلف پی گسترده (مربوط به خاک A)، در مقایسه با مقادیر تخمینی روابط ترزاقی برای ماسه و رس نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که به رغم جای گرفتن خاک A در دسته‌ی خاک‌های دانه‌بی،



شکل ۸. مقایسه‌ی k_s حاصل از روابط ترزاقی (ماسه و رس) با مدل عددی برای ابعاد مختلف پی (به ضخامت ۶۰ cm)، خاک A.



شکل ۶. جزءبندی مجموعه‌ی جک بارگذاری و صفحه‌ی فولادی در مدل تقارن محوری.

جدول ۲. حالت‌های تحلیل در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی.

نام خاک	C و B، A
قطر پی (m)	۳۰، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، ۳، ۲، ۱
ضخامت پی (m)	۱ و ۰٫۸، ۰٫۶
بار یکنواخت وارد بر پی (KPa)	۴۰۰ و ۳۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰
جمع کل حالت‌ها	۵۷۶

است. لازم به توضیح است که برای کلیه‌ی قطرهای ذکر شده برای پی‌ها، ۳ ضخامت ۰٫۶، ۰٫۸ و ۱ متر در نظر گرفته شده است.

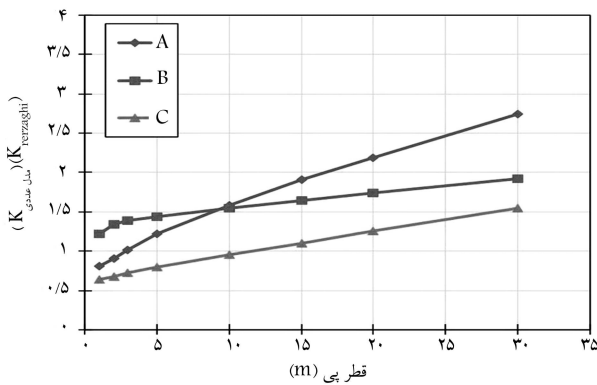
۳.۳. میانگین‌گیری از مقادیر k_s در زیر پی گسترده

جزءبندی مدل عددی در سطح تماس خاک و پی به گونه‌ی است که به تدریج با حرکت در امتداد شعاعی از مرکز به سمت لبه‌ی پی، اندازه‌ی المان کوچک‌تر می‌شود. به نحوی که در سطح تماس پی و خاک، نسبت اندازه‌ی المان در مرکز به اندازه‌ی المان در لبه، برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقدار k_s در نواحی مختلف زیر پی گسترده یکسان نیست و در نزدیکی لبه دچار تغییر ناگهانی می‌شود، رابطه‌ی ۵ برای میانگین‌گیری k_s در زیر پی گسترده‌ی دایره‌ی ارائه می‌شود. لازم به توضیح است که استفاده از مقدار متوسط k_s برای پی‌های با ابعاد بزرگ تا حدی موجب نادیده گرفتن افزایش‌های ناگهانی این کمیت در مجاورت لبه‌های پی می‌شود و میزان این اختلاف برحسب ابعاد مختلف پی می‌تواند به صورت جداگانه بررسی شود. مثلاً برای یک پی دایره‌ی گسترده به قطر ۲۰ متر، نمودار مقایسه‌ی مقادیر واقعی k_s و k_{avg} براساس نتایج مدل عددی به صورتی است که در شکل ۷ ارائه شده است.

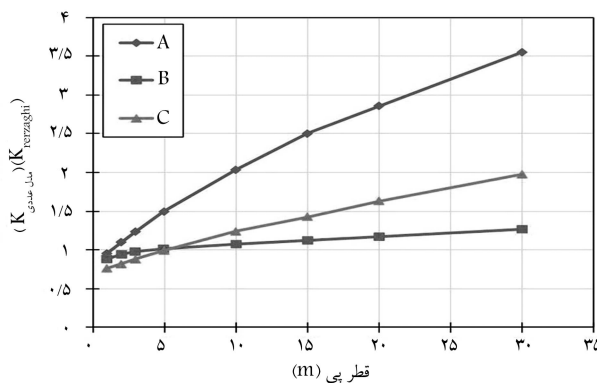
$$k_{avg} = \frac{(r_1 - r_1) k_{center} + \left(\sum_{i=2}^{i=n-1} \left[\frac{r_{i+1} - r_{i-1}}{r} \right] \cdot k_i \right) + \left(\frac{r_n - r_{n-1}}{r} \right) \cdot k_{edge}}{R} \quad (5)$$

در این رابطه، k_{avg} میانگین ضریب عکس‌العمل بستر در امتداد شعاع پی گسترده‌ی دایره‌ی؛ k_{center} مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در مرکز پی؛ k_{edge} ضریب عکس‌العمل بستر در لبه‌ی پی؛ r_i فاصله‌ی گره‌ی شماره‌ی i از مرکز پی ($r_1 = 0$ و $r_n = R$)؛ k_i مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در i امین گره از مرکز پی ($i = 1, 2, \dots, n$) است.

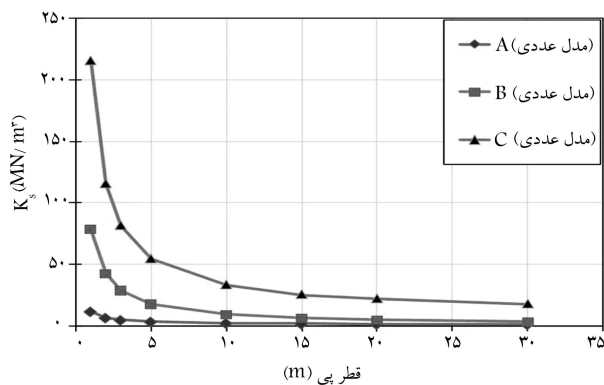
اگر فاصله‌ی گره‌ی i تا مرکز پی، برابر r_i فرض شود، مقدار $k_{avg} \approx 0.7R$



شکل ۱۱. تغییرات نسبت $(k_{Terzaghi} / k)$ مدل عددی k با اندازه‌ی پی (ضخامت ۶۰ سانتی متر، تنش ۵۰ کیلو پاسکال).



شکل ۱۲. تغییرات نسبت $(k_{Terzaghi} / k)$ مدل عددی k با اندازه‌ی پی (ضخامت ۶۰ سانتی متر، تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال).

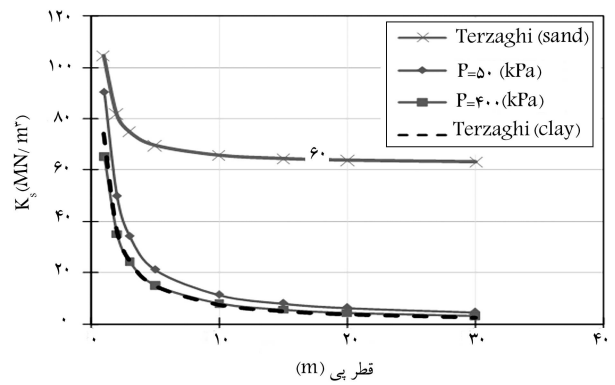


شکل ۱۳. تغییرات k_s بر حسب قطر پی در سه خاک A، B و C.

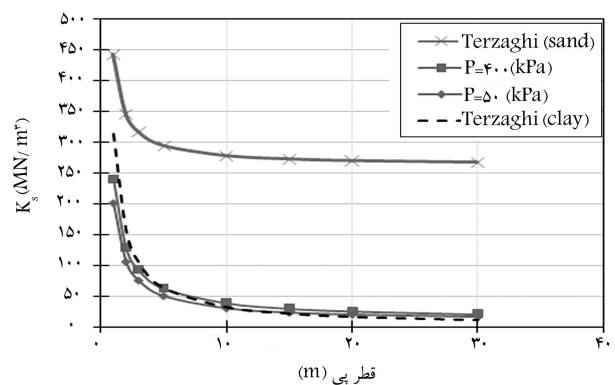
۵.۴.۳. مقایسه‌ی k_s حاصل از مدل عددی برای ۳ نوع خاک مورد بررسی شکل ۱۳، برای مقایسه‌ی تغییرات مقادیر k_s حاصل از تحلیل عددی برحسب اندازه‌ی پی در ۳ نوع خاک مورد بررسی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که خاک C با بیشترین میزان چسبندگی بین ذرات دارای بیشترین مقدار k_s و خاک A با کمترین میزان چسبندگی دارای کمترین مقدار k_s است.

۶.۴.۳. اثر ضخامت پی بر k_s حاصل از مدل عددی برای ۳ نوع خاک مورد بررسی

با بررسی k_s حاصل از مدل‌سازی مشاهده می‌شود که در شرایطی که سایر متغیرها از جمله قطر پی ثابت نگه داشته شوند، نیز با تغییر ضخامت پی (سختی خمشی



شکل ۹. مقایسه‌ی k_s حاصل از روابط ترزاقی (ماسه و رس) با مدل عددی برای ابعاد مختلف پی (به ضخامت ۶۰ cm)، خاک B.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی k_s حاصل از روابط ترزاقی (ماسه و رس) با مدل عددی برای ابعاد مختلف پی (به ضخامت ۶۰ cm)، خاک C.

رابطه‌ی ترزاقی برای ماسه، تخمین مناسبی از k_s در ابعاد مختلف پی ارائه نداده و نتایج مدل عددی متمایل به تخمین ترزاقی برای رس است.

۲.۴.۳. خاک B

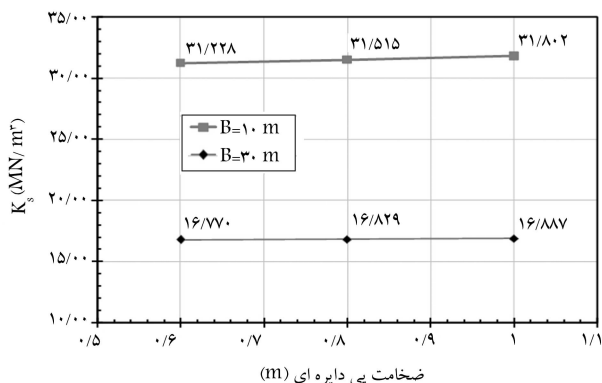
این خاک در دسته‌ی خاک‌های چسبیده قرار دارد و طبق شکل ۹، نتایج مدل عددی برای ابعاد مختلف پی گسترده، با تخمین ترزاقی برای رس مطابقت مناسبی دارد.

۳.۴.۳. خاک C

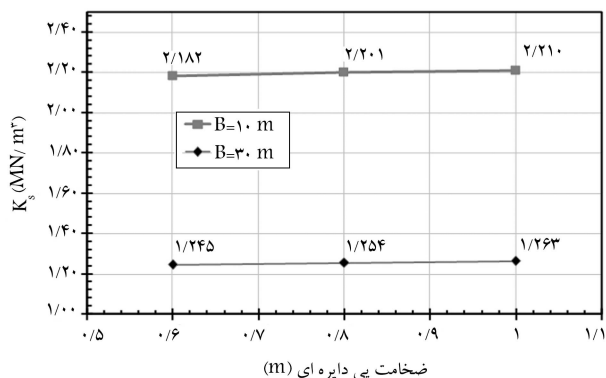
این خاک دارای سیمان‌تاسیون بالایی است و به رغم قرارگرفتن در دسته‌ی خاک‌های دانه‌ی، k_s حاصل از مدل عددی، مطابق شکل ۱۰ به تخمین ترزاقی برای رس نزدیک است.

۴.۴.۳. تغییرات $(k_{Terzaghi} / k)$ مدل عددی k بر حسب اندازه‌ی پی گسترده

چنانچه نمودار $(k_{Terzaghi} / k)$ مدل عددی k برحسب اندازه‌ی (قطر) پی گسترده برای نمونه‌های مورد اشاره در بخش ۴.۳ رسم شود، شکل‌های ۱۱ و ۱۲ حاصل می‌شود. روند مشاهده‌شده در این شکل‌ها مشابه نتایج به‌دست‌آمده در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ است^[۶] و نشان می‌دهد که در خاک‌های دارای چسبندگی یا سیمان‌تاسیون، رابطه‌ی ترزاقی (برای رس) در ابعاد کوچک تطابق نسبتاً مناسبی با مقدار ضریب عکس‌العمل حاصل از مدل عددی دارد. اما این رابطه برای ابعاد بزرگ پی، k_s را کمتر از مدل تخمین می‌زند و نتایج پژوهشی^[۴] در سال ۱۹۹۶ در این زمینه را تأیید می‌کند. همچنین به‌نظر می‌رسد این رابطه برای خاک A که چسبندگی کمتری دارد، تخمین چندان مناسبی ارائه نمی‌دهد.



شکل ۱۶. تغییرات k_s با افزایش ضخامت پی، برای $B = 1.0, 3.0$ m (خاک C).



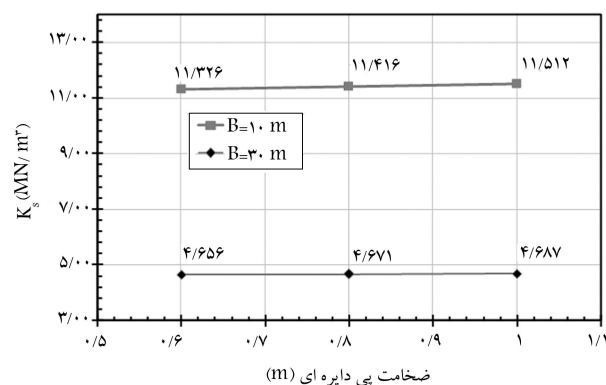
شکل ۱۴. تغییرات k_s با افزایش ضخامت پی، برای $B = 1.0, 3.0$ m (خاک A).

۴. نتیجه‌گیری

در این نوشتار ابتدا به برخی عوامل مؤثر در مقدار ضریب عکس‌العمل بستر، از جمله اندازه پی اشاره شد. سپس با توجه به اهمیت ساخت و ساز در شهر تهران، و وجود خاک‌های دارای سیمانتاسیون (و یا چسبندگی) در این منطقه، اثر اندازه پی‌های گسترده‌ی مستقر در خاک‌های چسبنده (خواه رسی، خواه دانه‌یی با سیمانتاسیون بین ذرات) بررسی شد. این بررسی به کمک مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود انجام شد و برای درستی‌سنجی مدل عددی، از تطبیق نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در محل و مدل عددی بهره گرفته شد. همچنین، نتایج این آزمایش در روابط تخمینی ترزاقی کاربرد دارد.

بررسی‌های انجام‌شده بر روی خاک‌های مورد اشاره‌ی این نوشتار نشان داد که هنگام وجود سیمانتاسیون بین ذرات، حتی با وجود دانه‌یی بودن خاک‌ها، رابطه‌ی ترزاقی برای رس، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر را تقریباً نزدیک به مقادیر حاصل از مدل عددی تخمین می‌زند. هرچند، با افزایش اندازه پی از دقت این تخمین کاسته می‌شود و نسبت $(k_{Terzaghi} / k_{مدل عددی})$ رو به افزایش می‌گذارد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که یکی از عوامل مؤثر در مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در ابعاد بزرگ پی، وجود یا عدم وجود عامل چسبندگی بین ذرات خاک و مقدار آن است.

همچنین مدل‌سازی عددی نشان داد که با ثابت‌بودن قطر (عرض) پی و تغییر ضخامت پی (سختی خمشی)، k_s اندکی دچار تغییر می‌شود؛ به‌گونه‌یی که افزایش ضخامت موجب افزایش k_s می‌شود.



شکل ۱۵. تغییرات k_s با افزایش ضخامت پی، برای $B = 1.0, 3.0$ m (خاک B).

پی) k_s دچار تغییر می‌شود، به‌گونه‌یی که k_s با افزایش ضخامت پی و در نتیجه سختی خمشی آن افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ این روند را برای دو قطر پی ۱.۰ و ۳.۰ متر، به ترتیب در نوع خاک A، B و C تحت فشار یکنواخت ۱۰۰ kPa نشان می‌دهند. با وجود اینکه در محدوده‌ی مشخصات و اندازه‌های در نظر گرفته‌شده برای این پژوهش، اثر ضخامت پی بر تغییرات k_s در مقابل دیگر متغیرها کمتر است، ولی به نظر می‌رسد در صورت توسعه‌ی این تحقیق به نمونه‌های متعددتر و فراهم‌آوردن طیف جامع‌تری از مشخصه‌های خاک‌ها، می‌توان با لحاظ‌کردن اثر سختی پی در زمره‌ی عوامل مؤثر در k_s به نتایج کاربردی دقیق‌تری دست یافت.

پانویس‌ها

1. continuous footings
2. raft foundations
3. plate load test

منابع (References)

1. Terzaghi, K.V. "Evaluation of coefficient of subgrade reaction", *J. Geotechnique*, **5**(4), pp. 297-326 (1955).

2. Biot, M.A. "Bending of an infinite beam on an elastic foundation", *J. Appl. Mech.*, **4**, pp. A1-7, (1937).
3. Vesic, A.S. "Beams on elastic subgrade and the winkler's hypothesis", *5th ICSMFE*, **1**, pp. 845-850 (1961).
4. Bowels, J.E., *Foundation Analysis and Design* 5th ed, Mc Graw-Hill, Chapter 9 (1996).
5. Setiadji, B.H. and Fwa, T.F. "Examining k-E relationship of pavement subgrade based on load-deflection consideration", *J. Transportation Eng.*, **135**(3), pp. 140-148 (2009).

6. Ziaie Moayed, R. and Janbaz, M. "Foundation size effect on modulus of subgrade reaction in clayey soil", *J. EJGE*, **13**, Bund. E (2008).
7. Coduto, D.P., *Foundation Design: Principles and Practices*, 2nd ed., Prentice-Hall Inc., Chapter 10, pp. 352-369 (2001).
8. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, *ABAQUS/Standard User's Manual*, HKS Inc., Dallas (2007).
9. PGE Consulting Engineers Co., "Geotechnical studies report for parsian office building project", Tehran, Iran, (In Persian)(2003).
10. PGE Consulting Engineers Co., "Geotechnical studies report for hazrate- abolfazl mosque project", Tehran, Iran, (In Persian)(2002).
11. PGE Consulting Engineers Co., "Geotechnical studies report for alborz cultural gate project", Tehran, Iran, (In Persian)(2009).

NUMERICAL INVESTIGATION OF CIRCULAR FOUNDATION SIZE EFFECT ON CALCULATION OF AVERAGE COEFFICIENT OF SUBGRADE REACTION

K. Fakharian(corresponding author)

kfakhari@aut.ac.ir

M. Sadeghi

mehrdadsadeghi2000@yahoo.com

**Dept. of Civil and Environmental Engineering
Amirkabir University of Technology**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 31-37, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 17 May 2011; received in revised form 22 February 2012; accepted 8 July 2012.

Abstract

The “Coefficient of Subgrade Reaction” was introduced in the form of a “Set of Springs” model by Winkler during the 19th century. In this model, the subgrade is modeled as a set of springs with a stiffness of k_s per unit area of the foundation carrying the structural load. In other words, the “Contact Pressure to Settlement” ratio for every point located in the contact zone of soil and foundation is called the “Coefficient of Subgrade Reaction”, or k_s . This ratio explains the interaction of soil and foundation, and it can be used for calculation of shear and moment distributions in the foundation.

The model has been used by structural designers for decades, who have improved it to calculate stresses under flexible foundations, like continuous footings or raft foundations, as well as concrete pavements subjected to wheel loads. Therefore, proper estimation of k_s for raft foundations is essential for structural engineers. A commonly used method for in situ direct measurement of k_s is the Plate Load Test (PLT). As the PLT is carried out on a small scale, the influence zone is small. The results cannot then be used directly for large scale calculations. Among the commonly used equations for correlating the PLT results to k_s for large raft foundations are those proposed by Terzaghi (1955).

The main objective of this paper is investigating k_s for cemented granular materials using a numerical model. The results of three plate load tests are used for verification purposes, and calibrating the FEM numerical model used for predictions. The effects of the change

of foundation size and thickness on the value of k_s are briefly discussed.

The results indicate that the Terzaghi (1955) equation for “Clay” estimates an acceptable value for k_s in cemented granular soils similar to Tehran alluvium.

Key Words: Coefficient of subgrade reaction, cemented granular soils, foundation size, plate load test.