

تأثیر عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های ماسه‌ای

مهدی خداپرست^{۱*}، امیر حسین جعفری^۲

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه قم

*khodaparast@qom.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۵/۴]

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۰/۲۵]

چکیده

ضریب عکس‌العمل بستر یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های عمرانی است. این پارامتر جز مشخصات ذاتی خاک نبوده و به عوامل متعددی بستگی دارد. یکی از عواملی که کمتر به آن پرداخته شده است عمق قرارگیری پی است. در این پژوهش با استفاده از روش عددی تأثیر عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر بررسی شده است. برای این منظور نتایج ۴ آزمایش بارگذاری صفحه که روی خاک‌های ماسه‌ای شهر قم و در عمق‌های مختلف انجام شده، استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر و افزایش این ضریب نسبت به عمق است. همچنین در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با دو رابطه ترزاقی و بولز پرداخته شده است. بر این اساس در پی‌های با عرض کوچک‌تر از ۵ متر، رابطه ترزاقی مقادیر کمتر و در پی‌های با عرض بیشتر از ۵ متر، مقادیر بزرگ‌تری از مدل عددی ارائه می‌کند و در رابطه بولز تا عمق ۵ متری از سطح زمین هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از مدل عددی مشاهده شده است. در نهایت با استفاده از داده‌های به دست آمده، رابطه‌ای تجربی برای خاک‌های ماسه‌ای مورد بررسی ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: ضریب عکس‌العمل بستر، خاک ماسه‌ای، عمق قرارگیری پی، مدل‌سازی عددی.

۱- مقدمه

تیر، فرض بر این است که میزان تغییر شکل در هر نقطه از تیر متناسب با میزان فشار تماسی وارد از بستر ارتجاعی در آن نقطه است. برای بیان ریاضی این مفهوم از عبارت ضریب عکس‌العمل بستر به شکل رابطه (۱) استفاده شده است.

$$K_s = \frac{P}{y} \quad (1)$$

بررسی اندرکنش بین پی و خاک، یکی از مسائل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک است. برای در نظر گرفتن این مفهوم توسط وینکلر (۱۸۶۷)، روش تیر روی بستر ارتجاعی ارائه شد [1]. در این روش، به منظور ارزیابی و محاسبه تغییر مکان قائم

پژوهشگران دیگری نیز سعی کرده‌اند که بین نتایج آزمایش‌های مختلف و مقدار ضریب عکس العمل بستر ارتباط برقرار کنند که می‌توان به ارتباط ضریب عکس العمل بستر و عدد SPT [5] و ارتباط بین ضریب عکس العمل بستر و نتایج آزمایش CBR [6] اشاره کرد.

همان‌طور که در روابط ارائه‌شده جدول (۱) نیز مشاهده شد، علاوه بر مشخصات ذاتی خاک، پارامترهای پی نیز در روابط ضریب عکس العمل بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد. عرض یا بعد پی (B)، مدول الاستیسیته خاک (E) و ممان اینرسی پی (I) در دو رابطه بایوت و وسیک بکار رفته‌اند. نکته‌ای که در ارتباط با روابط ترزاقی [1]، بایوت [2] و وسیک [3] وجود دارد، عدم در نظرگیری عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس العمل بستر است. این مورد در رابطه باولز با در نظرگیری ضریب عمق (I_F)، با نمودارهای ارائه‌شده توسط باولز، تا حدودی لحاظ شده است.

نایینی و حسین‌زاده [7] در پژوهشی با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس به بررسی اثر بار خروج از مرکز وارد بر پی دایره‌ای در خاک ماسه‌ای روی ضریب عکس العمل بستر، ظرفیت باربری و نشست پی پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده است که با افزایش میزان خروج از مرکزیت بار، میزان ظرفیت باربری و ضریب عکس العمل بستر کاهش یافته است.

احمدی و همکاران [8] در پژوهشی با استفاده از روش اجزا مجزا^۱ در نرم‌افزار PFC 3D به بررسی اثر اندازه دانه‌ها در خاک ماسه‌ای متراکم و شل روی ضریب عکس العمل بستر پرداختند. نتایج نشان‌دهنده است که با افزایش میزان اندازه دانه‌ها به ویژه در خاک ماسه‌ای متراکم، میزان ضریب عکس العمل بستر به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است.

تحقیقات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که عوامل مختلفی از جمله اندازه، شکل پی، ناحیه بارگذاری، جنس و شکل دانه‌های خاک، سختی خمشی خاک و پی [9] و سطح آب زیرزمین و رطوبت [10] نیز بر مقدار ضریب عکس العمل بستر مؤثر است.

که در آن K_s ضریب عکس العمل بستر، P فشار تماسی وارد در سطح تماس خاک و پی و γ میزان نشست قائم در آن نقطه است.

مدل وینکلر (۱۸۶۷) سال‌های متمادی مورد استفاده طراحان قرار گرفت. مزیت این مدل فرضیات ساده‌کننده و از معایب آن می‌توان به عدم انتقال تنش برشی جانبی اشاره کرد. در سال‌های بعد پژوهشگران روابط دیگری را برای تعیین ضریب عکس العمل بستر ارائه دادند و مشخصات خاک و پی را در تعیین آن دخالت دادند. به دلیل چند فازی بودن محیط خاک و همچنین وجود متغیرهای وابسته، برآورد دقیق مجهولات تعیین ضریب عکس العمل بستر کاری دشوار است. از شناخته‌شده‌ترین این روابط می‌توان به روابط ترزاقی [1]، بایوت [2]، وسیک [3] و باولز [4] اشاره کرد. ترزاقی (۱۹۵۵) با مطالعات خود روابط (۲ و ۳) را به ترتیب برای خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ای ارائه کرد. این روابط بر مبنای ضریب عکس العمل بستر به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری صفحه و عرض پی واقعی است [1].

$$k_s = K_1 \left(\frac{B_1}{B} \right) \quad (2)$$

$$k_s = K_1 \left(\frac{B + B_1}{2B} \right)^2 \quad (3)$$

در این روابط k₁ ضریب عکس العمل بستر حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه، B₁ عرض و یا قطر صفحه آزمایش بارگذاری صفحه و B قطر پی سطحی است.

روابط بایوت [2]، وسیک [3] و باولز [4] نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. روابط بایوت [2]، وسیک [3] و باولز [4]

Equation	Researchers
$K_s = \frac{0.95E_s}{(1-\nu^2)B} \left[\frac{B^4 E_s}{(1-\nu^2)EI} \right]^{0.108}$	Baiot
$K_s = \frac{1}{B} (0.65)^{12} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI} \times \frac{E_s}{1-\nu^2}}$	Vesic
$K_s = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)mI_s I_f}$	Bowles

Table 1. Equation of Baiot [2], Vesic [3] and Bowles [4]

¹ DEM

با توجه به نتایج حفاری‌های انجام‌شده برای آزمایش بارگذاری صفحه که تا عمق ۲۰ متری صورت گرفته و در آن سطح آب زیرزمینی مشاهده نشد، در مدل عددی نیز سطح آب زیرزمینی لحاظ نشد.

۲-۱- مدل رفتاری

در نرم‌افزار PLAXIS چند مدل رفتاری وجود دارد. در میان آن‌ها، دو مدل موهر-کولمپ و سخت شونده دارای فراوانی و کاربرد بیشتری هستند. مدل موهر-کولمپ خاک را تا سطح مشخصی از تنش، الاستیک فرض کرده و پس از آن خاک دارای رفتار پلاستیک می‌شود. در این مدل مقدار سختی خاک در دو حالت بارگذاری و باربرداری یکسان فرض می‌شود. همچنین در آن میزان سختی خاک در محدوده‌های مختلف تنش ثابت بوده و با مقدار تنش اعمالی وارد شده تغییر نمی‌کند. مدل خاک سخت شونده بر مبنای مدل الاستیک هذلولی (Duncan and Chang, 1970) ارائه شده است (شکل ۲) [11]. در این مدل گسیختگی مشابه معیار موهر-کولمپ است. مطابق با این مدل میزان سختی خاک ثابت نیست و وابسته به میزان تنش اعمالی است که به حالت طبیعی خاک نزدیک‌تر است.

در این مدل سختی خاک در دو حالت بارگذاری و باربرداری جداگانه در نظر گرفته شده و متفاوت است.

با توجه به اینکه در این پژوهش اثر عمق بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر بررسی و در نتیجه پی‌ها در اعماق مختلف مطالعه شده، پس لازم است که پارامترهای مربوط به سختی خاک متناسب با حالت بارگذاری و باربرداری انتخاب شود.

از طرف دیگر و با توجه به وابستگی مقدار سختی خاک به میزان تنش اعمالی و تاثیر آن بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در ادامه از مدل خاک سخت شونده که این دو ویژگی را پوشش داده، استفاده خواهد شد.

با توجه به محدودیت‌های ارتفاع ساختمان‌ها در شهرها و استفاده از فضاهای زیرزمینی، پی آن‌ها ممکن است در اعماق و ترازهای مختلف قرار گیرد. با توجه به اینکه تحقیقات چندانی در این زمینه صورت نگرفته، پس در این مطالعه اثر عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر مورد بررسی قرار گرفته است و به اندازه پی و مدول الاستیسیته خاک نیز توجه شده است. تاثیر پارامترهای ذکر شده بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در این پژوهش با استفاده از روش اجزای محدود صورت گرفته و با استفاده از تحلیل نتایج، رابطه تجربی متناسب با آن ارائه شده است.

۲- مدل سازی عددی

در این پژوهش مدلسازی عددی محیط خاک و پی در نرم افزار اجزا محدود PLAXIS انجام شده است، که در این بخش به تشریح اجزای مختلف مدلسازی پرداخته می‌شود. در نرم‌افزار PLAXIS ابعاد مش به صورت کیفی توسط کاربر تعیین می‌شود که با توجه به ابعاد و اعماق مختلف پی در مدل‌های ساخته شده متفاوت است. المان به کاررفته در مدل عددی تهیه شده در این مطالعه از نوع مثلثی ۱۵ گره‌ای است. در حالت کلی برای مدل از مش‌هایی با اندازه متوسط استفاده شده است ولی برای افزایش دقت جواب‌ها، دو ناحیه به عرض دو و چهار برابر قطر صفحه و پی تعیین شد و اندازه مش‌ها در این دو بخش^۱ ریزتر شدند. علاوه بر ریزتر کردن مش دو بخش مذکور، مش اطراف پی نیز (به علت تمرکز تنش بالا) ریزتر شد. در شکل (۱) چگونگی مش‌بندی نشان داده شده است. از آنجایی که یکی از اهداف این پژوهش بررسی اثر عمق بر مقدار نشست و ضریب عکس‌العمل است، در مدل عددی ابتدا خاک تا سطح زمین در نظر گرفته شد و تنش‌های اولیه و مؤثر بر توده خاک وارد شدند. در مرحله بعد خاک‌برداری سطحی که قرار است پی روی آن قرار بگیرد صورت گرفته و پس از آن پی در سطح موردنظر قرار داده و بارگذاری شد.

انجام شده است. در این پژوهش از نتایج چهار آزمایش بارگذاری صفحه که در ۳ گمانه و در عمق‌های مختلف صورت پذیرفته، استفاده شده است. در جدول (۲) مشخصات و نامگذاری چهار خاک و همچنین ضریب عکس‌العمل بستر متناظر با صفحه به قطر ۳۰ سانتی متر به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش

Soil Type	Depth of PLT Test (m)	Borehole No.	K_s (MN/m ³)
A	20	1	286.1
B	12	1	262.1
C	14	3	282.7
D	10	4	297.6

Table 2. Specifications of tested soils

نمونه‌های خاک محل از نوع ماسه‌ای است. با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌هایی صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین بر اساس درستی‌آزمایی مدل، سعی و خطا و با استفاده از مقادیر معمول پارامترهای ماسه در مدل خاک سخت شونده، پارامترهای استفاده شده در ایجاد مدل عددی چهار نوع خاک مطابق جدول (۳) است.

جدول ۳. پارامترها و مشخصات خاک‌های مطالعه شده و استفاده شده

Type soil	*USCS	C (KN/m ²)	Φ	ψ
A	SP-SM	10	39	4
B	SP	10	31	9
C	SP-SM	10	40	9
D	SM	8	38	8

*Unified Soil Classification System

Table 3. Parameters and specifications of studied soils

در جدول ۳، C چسبندگی خاک، Φ زاویه اصطکاک داخلی و ψ زاویه اتساع خاک است. همچنین در این جدول خاک A و C از نوع ماسه لای‌دار بدانه‌بندی شده، خاک B از نوع ماسه بدانه‌بندی شده و خاک D ماسه لای‌دا است. با استفاده از پارامترهای جدول (۳) و مدل‌سازی عددی انجام شده، نمودار تنش-نشست برای هر ۴ نمونه به دست آمده

شکل ۱. هندسه و مش مدل عددی

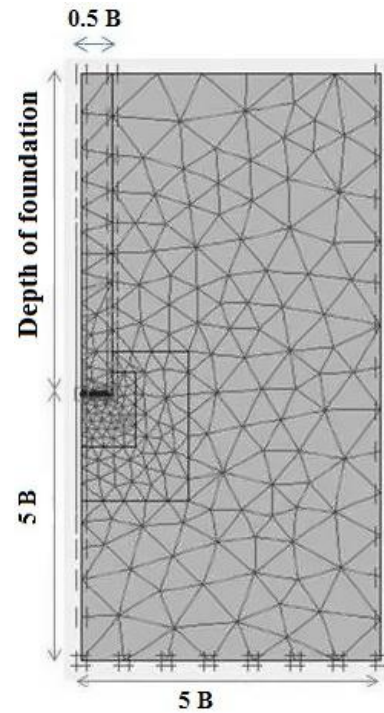


Fig. 1. Geometry and mesh of numerical model

شکل ۲. رفتار خاک مطابق مدل خاک سخت شونده [11]

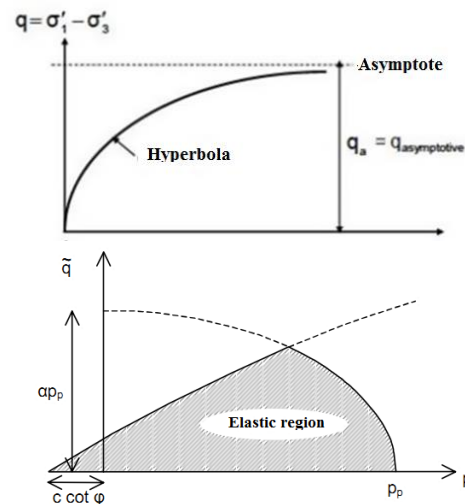


Fig. 2. Soil behavior according to hardening soil model

۳- درستی‌آزمایی و تعیین پارامترهای مدل

در این مطالعه برای تهیه مدل عددی و درستی‌آزمایی آن، اطلاعات چهار آزمایش بارگذاری صفحه انجام شده و همچنین سایر آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در شهر قم استفاده شده است. این آزمایش‌ها بخشی از مطالعات تکمیلی پروژه صحن عتیق حرم حضرت معصومه (س) است. در پروژه مذکور پنج گمانه حفر شده و آزمایش‌های بارگذاری صفحه در گمانه‌ها

شکل ۶. نمودار تنش - نشست آزمایش بارگذاری صفحه و مدل عددی خاک D

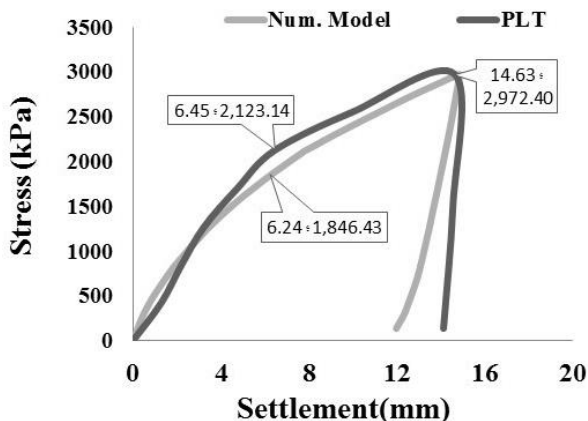


Fig. 6. Stress-Settlement curve of PLT & Numerical model of soil D

با مقایسه نتایج مدل‌ها با منحنی‌های آزمایش‌های بارگذاری صفحه و بر اساس میزان هماهنگی آن‌ها می‌توان از درستی-آزمایی مدل‌های عددی اطمینان حاصل نمود.

۴- حالت‌های بررسی شده

برای تعیین حالت‌های مختلف، پارامترهای عمق قرارگیری پی، بار وارد شده و عرض پی در نظر گرفته و مجموع ۱۵۶۸ حالت بررسی شد. ضخامت پی در تمام حالت‌ها ثابت و معادل یک متر در مدل استفاده شد. در جدول (۴)، حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده نشان داده شده است.

جدول ۴. حالت‌های مختلف مورد بررسی در این مطالعه

Soil type	A,B, C, D
Foundation width(m)	1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30
Depth of foundation (m)	0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25
Uniform stress (kPa)	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400

Table 4. Different conditions evaluated in this study

است. این نمودارها با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه مقایسه شد که نتایج آن در شکل‌های (۳ تا ۶) مشاهده می‌شود.

شکل ۳. نمودار تنش - نشست آزمایش بارگذاری صفحه و مدل عددی خاک A

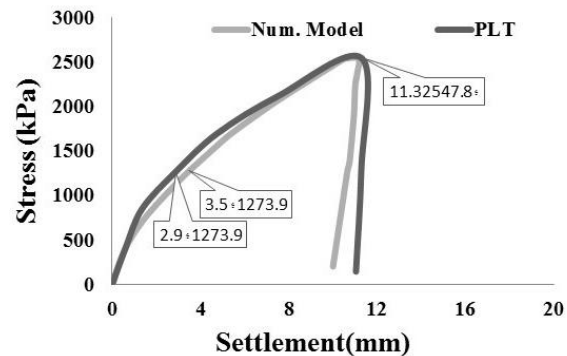


Fig. 3. Stress-Settlement curve of PLT & Numerical model of soil A

شکل ۴. نمودار تنش - نشست آزمایش بارگذاری صفحه و مدل عددی خاک B

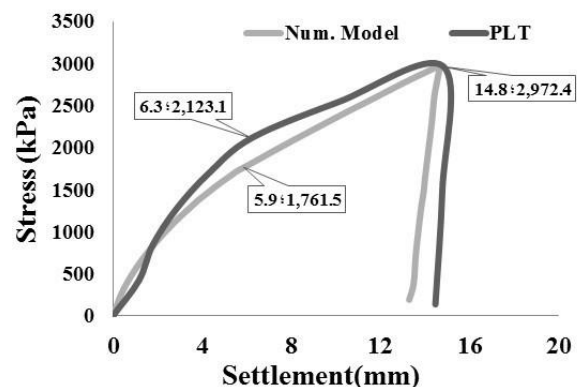


Fig. 4. Stress-Settlement curve of PLT & Numerical model of soil B

شکل ۵. نمودار تنش - نشست آزمایش بارگذاری صفحه و مدل عددی خاک C

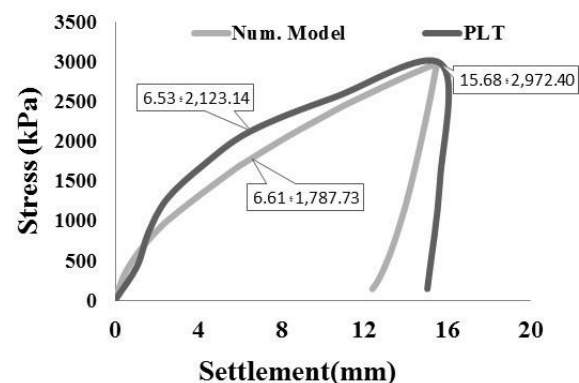


Fig. 5. Stress-Settlement curve of PLT & Numerical model of soil C

۵- مقایسه مقادیر حاصل از مدل عددی و روابط تجربی موجود

۵-۱- مقایسه مقادیر حاصل از مدل عددی و رابطه ترازقی

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه استفاده‌شده در این پژوهش مربوط به اعماق مختلف زمین است. از طرفی رابطه ترازقی به صورت مستقیم عمق انجام آزمایش را در نظر نمی‌گیرد. با این حال می‌توان از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه انجام شده در یک عمق مشخص استفاده کرده و مقادیر رابطه ترازقی متناظر با آن را برای پی‌های با ابعاد مختلف به دست آورد و با نتایج به دست آمده از مدل عددی در آن عمق مقایسه کرد این مورد برای دو نوع از خاک‌ها در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج مدل‌های عددی با مقادیر به دست آمده از رابطه ترازقی متفاوت است. البته در مقدار این تفاوت عمق انجام آزمایش مؤثر است.

شکل ۷. تغییر ضریب عکس‌العمل بستر با ابعاد مختلف پی در عمق‌های

مختلف در خاک D در تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال

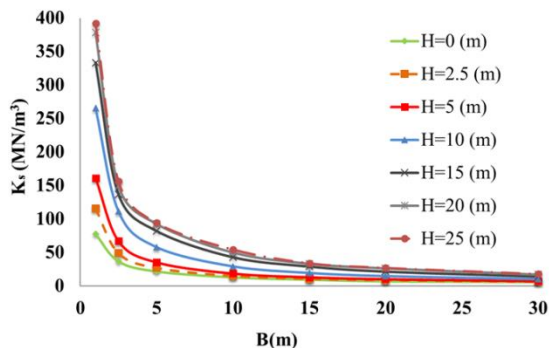


Fig. 7. subgrade reaction coefficient vs foundation diffrenet dimintions in soil D at different depth under loading 400 kPa

شکل ۸. تغییر ضریب عکس‌العمل بستر با عمق‌های مختلف پی به ازای

ابعاد گوناگون پی در خاک D در تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال

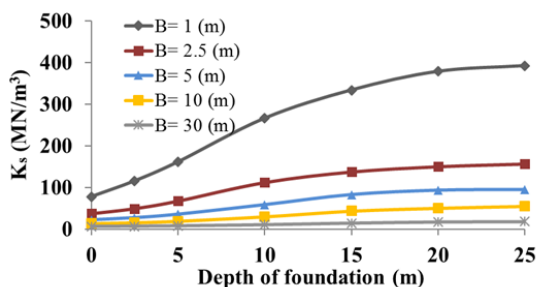


Fig. 8. subgrade reaction coefficient vs foundation diffrenet depths in soil D For various dimensions of foundation under loading 400 kPa

۴-۱- تأثیر عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر رفتار دو خاک با ویژگی‌های یکسان که در عمق‌های مختلف قرارگرفته متفاوت است. این تفاوت می‌تواند ناشی از فشار محصورکننده خاک‌های مجاور، تنش‌های اولیه و برجای خاک، درصد تحکیم خاک (در خاک‌های چسبنده) و علل دیگر باشد. در پژوهش‌هایی درگذشته تأثیر عمق بر پارامترهای مرتبط با ضریب عکس‌العمل بستر بررسی شده است. به عنوان نمونه تأثیر ضریب عمق بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر و مقدار عمق بر پیش بینی نشست خاک مورد مطالعه قرار گرفته است [4]. اما در بیشتر تحلیل‌ها، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر بدون در نظرگیری عمق قرارگیری پی، تخمین زده و مورد استفاده قرار گرفته است.

به دلایل اشاره شده، در این پژوهش توجه ویژه‌ای به این مسئله شده و نتایج برای تمام حالت‌های در نظر گرفته شده به دست آمد. از میان نتایج به عنوان نمونه، نمودار خاک D تحت بارگذاری ۴۰۰ کیلو پاسکال در دو شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که در هر عمقی، با افزایش ابعاد پی، ضریب عکس‌العمل بستر پی کاهش می‌یابد. مقدار تغییر در پی‌های با ابعاد ۱ تا ۵ متر مشهودتر است. همچنین مقدار تغییر ضریب عکس‌العمل بستر در پی‌هایی که در نقاط عمیق‌تر گرفته‌اند، بیشتر است. این تفاوت می‌تواند به علت تنش‌های اثرگذار خاک‌های مجاور باشد که در پی‌های با عمق کم نسبت به پی‌های قرار گرفته در عمق‌های بزرگتر، تأثیر کمتری دارد. با افزایش ابعاد پی، این تأثیر تا حد زیادی خنثی شده و عملاً مقدار ضریب عکس به مقدار ثابتی می‌رسد.

شکل (۸) نشان می‌دهد که در پی‌های با ابعاد مختلف، با افزایش عمق قرارگیری پی، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر افزایش می‌یابد. مقدار تغییر در پی‌های با ابعاد کوچک‌تر، مقدار بیشتری دارد و با افزایش ابعاد پی، درصد افزایش ضریب عکس‌العمل بستر کاهش می‌یابد. افزایش عمق از یک اندازه‌ای به بعد تأثیر کمی بر مقدار ضریب عکس‌العمل دارد و تقریباً بعدازآن، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر به حد ثابتی رسیده است.

ارائه می‌کند.

۲-۵- مقایسه مقادیر حاصل از مدل عددی و رابطه باولز

باولز [4] رابطه‌ای را برای تخمین نشست آنی در گوشه‌ی پی مستطیلی شکلی و تحت بار گسترده یکنواخت برای انواع خاک‌ها ارائه کرده است. رابطه یادشده بر تئوری الاستیسیته استوار بوده و با ساده کردن آن می‌توان به رابطه (۴) دست یافت.

$$K_S = \frac{E_S}{\hat{B} (1 - \nu^2) m I_S I_F} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، \hat{B} کمترین بعد جانبی پی با یکای اندازه‌گیری نشست، m تعداد گوشه‌هایی است که در نشست مشارکت می‌کند، I_F ضریب تأثیر است که با استفاده از نمودار ارائه شده توسط باولز به دست می‌آید [4]، I_S ضریب تأثیر که به نسبت ابعاد پی و عمق لایه تحت تأثیر زیر پی بستگی دارد. در این مطالعه پی دایروی معادل پی مربعی در نظر گرفته شد. مقدار ضریب عکس‌العمل بستر برای تمام حالت‌های عرض پی و عمق قرارگرفته مندرج در جدول (۴) محاسبه شد. به عنوان نمونه نتایج خاک C و در عمق‌های ۰، ۵ و ۲۵ متر در شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج نشان‌دهنده هماهنگی خوب مقادیر حاصل از مدل عددی و رابطه باولز است و روند تغییر مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر با ابعاد پی مشابه است. البته میزان هماهنگی و نزدیکی نتایج با افزایش عمق کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در سطح زمین و در عمق ۵ متری، کمترین اختلاف بین نتایج حاصل از مدل عددی و رابطه باولز مشاهده شده و این اختلاف با افزایش عمق قرارگیری پی افزایش می‌یابد.

۶- ارائه رابطه پیشنهادی برای تخمین ضریب عکس‌العمل بستر

در این قسمت رابطه‌ای برای به دست آوردن ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های ماسه‌ای ارائه می‌شود به گونه‌ای

شکل ۹. مقایسه مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر حاصل از مدل عددی و رابطه ترزاقی در خاک A به ازای پی‌های با ابعاد مختلف

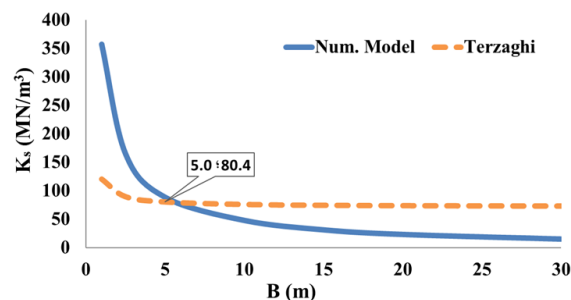


Fig. 9. Comparison of the subgrade reaction coefficient obtained from the numerical model and Terzaghi formula in soil A for different dimensions of foundations

شکل ۱۰. مقایسه مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر حاصل از مدل عددی و رابطه ترزاقی در خاک D به ازای پی‌های با ابعاد مختلف

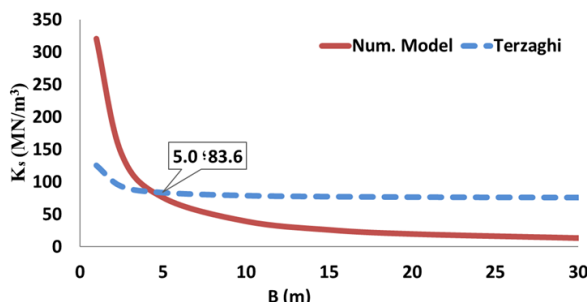


Fig. 10. Comparison of the subgrade reaction coefficient obtained from the numerical model and Terzaghi formula in soil D for different dimensions of foundations

در این خصوص لازم به ذکر است که آزمایش‌های بارگذاری صفحه در خاک‌های A تا D به ترتیب در عمق‌های ۲۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۰ متری انجام شده است. همان‌گونه که در نمودارها نیز مشخص است هر چه عمق انجام آزمایش کمتر باشد مقادیر حاصل از رابطه ترزاقی با مدل عددی در عرض پی کوچک‌تری باهم هماهنگی دارند. در عمق ۱۰ تا ۲۰ متری این پژوهش، به صورت حدودی در عرض پی ۵ متر مقادیر حاصل از مدل عددی با رابطه ترزاقی هماهنگی دارد. در پی‌های با عرض بیشتر از ۵ متر، هرچه آزمایش در عمق بیشتری انجام شده باشد، اختلاف مقادیر مدل عددی با رابطه ترزاقی کمتر است. مطابق نتایج حاصل و در محدوده عمق‌های بررسی شده، در پی‌های با عرض کوچک‌تر از ۵ متر، رابطه ترزاقی مقادیر کمتر و در پی‌های با عرض بیشتر از ۵ متر، مقادیر بزرگتری از مدل عددی

شکل کلی الگو در رابطه شماره (۵) نشان داده شده است.

$$K_s = \alpha \left(\frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{h}{\sqrt{I}} \right)^\beta \quad (5)$$

برای حصول الگوی مناسب، روابط مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت منجر به انتخاب رابطه‌ای مشابه بافرم رابطه باولز شد. مطابق این روابط می‌توان مقدار ضریب عکس‌العمل بستر را متشکل از دو قسمت در نظر گرفت و ضرایب متناسب با هر خاک را به دست آورد.

ضریب α و توان β در این رابطه بدون بعد هستند که از نتایج مدل‌سازی صورت گرفته در این پژوهش مقادیر مناسبی برای آن‌ها تعیین می‌شود. مقدار I_s ضریب شکل پی است که برای پی‌های دایره‌ای گسترده در این پژوهش $0/5071$ است. همچنین h و I به ترتیب ارتفاع و ممان اینرسی پی هستند.

برای به دست آوردن α و β ای که در رابطه فوق صدق کنند، K_s های به دست آمده از کلیه حالت‌های تحلیل و برای عمق‌های مختلف به تفکیک هر چهار نوع خاک دسته‌بندی و مشخصات هر خاک و حالت‌های مختلف پی برای هر خاک در نظر گرفته شد. سپس به ازای اطلاعات هر خاک به‌وسیله رگرسیون غیرخطی α و β به‌گونه‌ای محاسبه شدند که نزدیک‌ترین مقدار را به داده‌های به‌دست آمده از مدل عددی داشته باشند. در نهایت نیز این مراحل برای تمام داده‌های چهار خاک انجام شد تا ضرایب α و β برای حالت کلی چهار خاک محاسبه شود. نتایج حاصل در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵. ضرایب به‌دست آمده برای رابطه تخمین ضریب عکس‌العمل

Soil type	بستر		r^{2*}
	α^{**}	β^{**}	
A	0.865	0.265	0.95
B	0.931	0.28	0.942
C	0.869	0.267	0.956
D	0.783	0.292	0.953
total	0.856	0.274	0.944

* correlation coefficient

** Dimensionless coefficient in equation 5

Table 5. Coefficients obtained to estimate the subgrade reaction coefficient

که در آن اثر عمق قرارگیری پی نیز لحاظ شود. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل نیز اشاره شد خاک‌های بررسی شده از خاک‌های ماسه‌ای شهر قم انتخاب شده است.

شکل ۱۱. مقایسه مقادیر رابطه باولز و مدل عددی در سطح

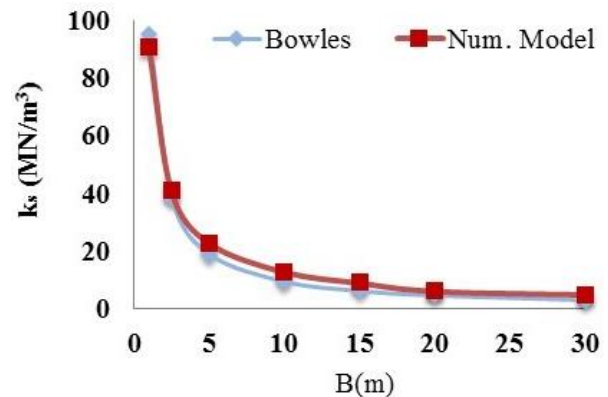


Fig. 11. Comparison of Bowles formula and numerical model values at ground level

شکل ۱۲. مقایسه مقادیر رابطه باولز و مدل عددی در عمق ۵ متر

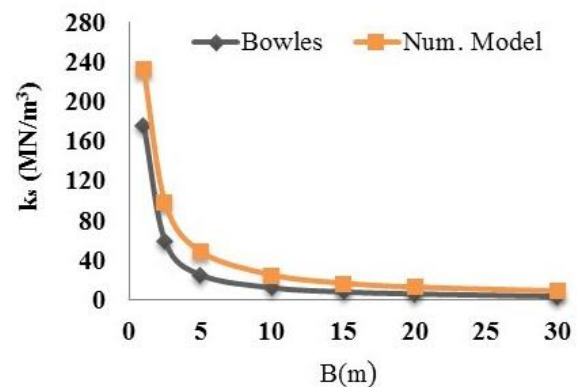


Fig. 12. Comparison of Bowles formula and numerical model values at depth of 5 meters

شکل ۱۳. مقایسه مقادیر رابطه باولز و مدل عددی در عمق ۲۵ متر

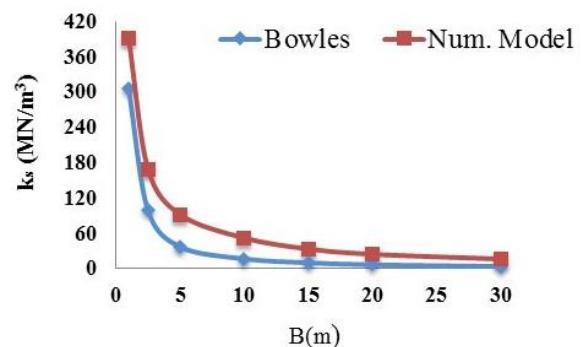


Fig. 13. Comparison of Bowles formula and numerical model values at depth of 25 meters

حاصل از مدل عددی ارائه می‌دهد. در کلیه حالت‌ها، رابطه بولز مقادیر بیشتر از نتایج حاصل از مدل عددی ارائه می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی با رابطه بولز

Depth of foundation (m)	dimention of Foundation (m)	Ks (MN/m ³)			
		Soil A		Soil B	
		Bowles formula	Proposed formula	Bowles formula	Proposed formula
2.5	1	177.8	220.5	163.0	170.5
	3	59.1	82.8	54.2	68.2
	5	24.9	39.5	22.9	34.1
	10	12.0	18.8	11.0	17.1
	15	71.7	12.2	7.1	11.4
	20	5.8	9.0	5.3	8.5
	30	3.2	5.8	2.9	5.7
5	1	192.1	176.1	176.1	206.1
	3	68.6	100.2	62.9	82.5
	5	29.6	47.8	27.1	41.2
	10	12.5	22.8	11.4	20.6
	15	8.0	14.8	7.3	13.7
	20	6.0	10.9	5.5	10.3
	30	3.9	7.0	3.5	6.9
15	1	274.4	360.2	251.5	278.5
	3	85.4	135.2	78.3	111.4
	5	36.2	64.5	33.2	55.7
	10	16.0	30.8	14.7	27.9
	15	9.9	20.0	9.0	18.6
	20	6.9	14.7	6.3	13.9
	30	4.2	9.5	3.8	9.3
25	1	309.8	414.3	284.0	320.4
	3	101.1	155.7	92.7	128.2
	5	38.4	74.2	35.2	64.1
	10	17.8	35.4	16.3	32.0
	15	11.0	23.0	10.1	21.4
	20	7.6	16.9	7.0	16.0
	30	4.7	10.9	4.3	10.7

Table. 7. Comparison of the values of the proposed formula with the Bowles formula

د- با توجه به نتایج حاصل، رابطه (۶) برای ضریب عکس‌العمل بستر پی‌های دایره‌ای واقع بر بسترهای ماسه‌ای ارائه شد.

مطابق جدول و ضرایب به‌دست‌آمده، رابطه نهایی برای مجموع خاک‌های ماسه‌ای بررسی شده و متناسب با پی‌های دایره‌ای ($I_s = 0.071$) مطابق ذیل به دست می‌آید.

$$K_S = 0.856 \left(\frac{E_S}{B(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{h}{4\sqrt{I}} \right)^{0.274} \quad (6)$$

مقادیر بدست آمده از مدل عددی در کنار مقادیر حاصل از رابطه بولز برای دو خاک A و B در عمق‌های ۰.۲، ۰.۵، ۱.۵ و ۲.۵ متر در جدول (۶) نشان داده شده است که نشان دهنده افزایش اختلاف مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی و رابطه بولز با افزایش عمق است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر موضوع اصلی این پژوهش است. برای این منظور از نتایج چهار آزمایش بارگذاری صفحه که در عمق‌های مختلف انجام شده و مربوط به خاک ماسه‌ای شهر قم بودند استفاده شد. با استفاده از نتایج مدل‌های عددی مربوط به پی‌های دایره‌ای با قطرهای ۱ تا ۳۰ متر و در اعماق ۰ تا ۲۵ متر و تجزیه و تحلیل و بررسی آن‌ها نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

الف- عمق قرارگیری پی بر مقدار ضریب عکس‌العمل بستر تأثیر می‌گذارد و باید در تحلیل‌ها لحاظ شود. این در حالی است که در بیشتر روابط این موضوع دیده نمی‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش عمق مقدار ضریب عکس‌العمل افزایش می‌یابد. در پی‌های گسترده دایروی تا قطر ۵ متر، درصد افزایش این مقدار بیشتر از پی‌های با قطر بزرگ‌تر است.

ب- برای خاک‌های ماسه‌ای و با در نظرگیری عمق ۱۰ تا ۲۰ متری، مقادیر حاصل از رابطه ترزاقی و مدل عددی در عرض پی حدود ۵ متر باهم انطباق دارند و برای مقادیر کوچک‌تر از آن رابطه ترزاقی مقادیر کمتر و برای عرض‌های بزرگ‌تر مقادیر بیشتری از مدل عددی را ارائه می‌دهد.

ج- مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه بولز برای خاک‌های ماسه‌ای تا عمق حدود ۲/۵ متری تخمین نزدیکی به مقادیر

- [8] Ahmadi H., Farzi Sizkow S., "Numerical Modelling of Size Effect on Subgrade Reaction Modulus Using DEM" *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, Vol. 03, 2017, 115-122.
- [9] Fakharian K., Sadeghi M., "Numerical investigation of circular foundation size effect on calculation of average coefficient of subgrade reaction" *Sharif Civil Engineering Journal*, Vol. 29 (3), 2013, 31-37 (In Persian).
- [10] Aminaton M., Latifi N., Jabaz M., kholghifard M., khari M., Alimohammadi P., Banadaki A., "Foundation Size Effect on Modulus of Subgrade Reaction on Sandy Soils" *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 17, 2012, 2523-2530.
- [11] PLAXIS Manual, "Finite Element Code for Delft University of Soil and Rock Plasticity Technology" Netherlands, 2D, Version 8, 2002.

References

۸- مراجع

- [1] Terzaghi K., "Evaluation of coefficient of subgrade reaction" *J Geotechnique*, Vol. 5 (4), 1955, 297-326.
- [2] Biot M.A., "Bending of an infinite beam on an elastic foundation" *J. Appl. Mech.*, Vol. 4, 1937, A1-7.
- [3] Vesic A.S., "Beams on elastic subgrade and the winkler's hypothesis", 5th ICSMFE, 1, 1961, 845-850.
- [4] Bowels J.E., "Foundation Analysis and Design" Mc Graw-Hill, 1996, Chapter 9.
- [5] Naeini S. A., Ziaie Moayed R., Allahyari F., "Subgrade Reaction Modulus (Ks) of Clayey Soils Based on Field Tests" *Journal of Engineering Geology*, No.1, 2014, 2021-2045.
- [6] Elsa Eka Putri N. S. V., Kameswara Rao M., Mannan A., "Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test" *Journal of Civil Engineering Research*, Vol. 2 (1), 2012, 34-40.
- [7] Naeini S. A., Hossein Zade M., "Numerical Study of Modulus of Subgrade Reaction in Eccentrically Loaded Circular Footing Resting" *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 11 (1), 2017.

The effect of foundation depth on subgrade reaction coefficient in sandy soils

M. Khodaparast^{1*}, A.H. Jafari²

1- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom

2- M.Sc Student of Geotechnical Engineering, Dept. of Civil Engineering, University of Qom

*Khodaparast@qom.ac.ir

Abstract:

Subgrade reaction coefficient is one of the important parameters in the design of structures that for the first time was presented by Winkler (1867). In the Winkler method, in order to evaluate and calculate the vertical displacement of the beam, it is assumed that the deformation at each point of the beam fits with the contact pressure of the reactive bed at that point and for mathematical defining of this ratio, the term "Subgrade reaction coefficient" was used. After Winkler so many researchers such as Baiot, Terzaghi, Vesic and Bowles have studied on this parameter. Researches show that this parameter is not a constant characteristic of soil and depends on many factors. Factors such as size, shape of foundation, soil type, bending stiffness of soil and foundation, level of under ground water and water content are effective on Subgrade reaction coefficient. One of this factor that less attention has been in prior research is the depth of foundation. In this study by using of numerical method, the effect of the depth of foundation on the amount of Subgrade reaction coefficient was studied. For this purpose the results of 4 samples of plate load test at four depths 10, 12, 14 and 20 meters and an numerical models that consider the depth of foundation placement have been used. Plate load tests have been conducted on sandy soils of Qom city. Numerical model was done by PLAXIS 2D V8.2 software and hardening soil behavior model was used for sandy soil. The results of numerical model in this study show significant effect of the depth of foundation on the value of Subgrade reaction coefficient and that by increasing the depth, this coefficient is increased and changes in foundations with smaller dimension is more and with increasing the dimension of foundation, the percentage of increasing of Subgrade reaction coefficient decreases. The increase in the depth of the foundation from a given value to the next has a small effect on the amount of response coefficient, and almost immediately afterwards, the coefficient of reaction of the bed has reached a constant. In the following, results of numerical model is compared with two formula of Terzaghi and Bowles. For the comparing with Terzaghi formula, the results of plate load test is used and for different width of foundation this amount was calculated and compared with results of numerical model. Terzaghi formula for sandy soils first presents smaller amount and then larger amount than the numerical model. Based on the results of four studied soils, with the fewer depth of test implementation, results of Terzaghi formula and numerical model have adaptation in fewer width of foundation. In depth of 10 to 20 meters of current research, almost in foundation width of 5 meter, the results of numerical model is adapted to Terzaghi formula. The results of comparing the numerical model with Bowles formula shows, to a definite depth for foundation, there is good adaptation between results of this formula and numerical model and with increasing the depth, the differences between Bowles formula and numerical model increases. Finally by using of all states data and nonlinear regression method and SPSS V20 software, for studied sand soils a proposed formula was presented.

Keywords: Subgrade reaction coefficient, Sandy soil, Depth of foundation, Numerical model