

مطالعه تجربی و آماری تعیین ضریب عکس‌العمل بستر خاک رس‌دار با استفاده از نتایج آزمایش سه‌محوری

ناهید رجائی مقدم^{۱*}، حسین توکلی^۲، محمد بهرامی^۳

۱- دکتری، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۲- استادیار، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۳- دکتری، گروه عمران گرایش مکانیک خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۷؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

(*نویسنده مسئول: nahid502@rocketmail.com)

چکیده

ضریب عکس‌العمل بستر (K_s) یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل و طراحی پی‌های نواری، گسترده انعطاف‌پذیر و شمع‌هاست. تعیین دقیق این ضریب، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ، نقش مهمی در بهینه‌سازی فنی و اقتصادی طرح دارد. روش متداول و نسبتاً دقیق برای اندازه‌گیری K_s ، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای است. این آزمایش به دلیل هزینه و زمان زیاد، در بسیاری از پروژه‌ها کاربرد عملی محدودی دارد. در این تحقیق، استفاده از نتایج آزمایش سه‌محوری برای تخمین ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های ریزدانه رس‌دار مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، داده‌های حاصل از ۵۲ آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و ۸ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای تحلیل و مقایسه شدند. نتایج آماری نشان داد که اگرچه مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری هستند، اما همبستگی معناداری میان پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و K_s وجود دارد. به علاوه، تحلیل رگرسیون چندمتغیره این قابلیت را فراهم کرد که K_s با دقت قابل قبولی از طریق نتایج آزمایش سه‌محوری تخمین زده شود. بنابراین، این پژوهش نشان می‌دهد که آزمایش سه‌محوری، علاوه بر کاهش هزینه و زمان، می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب و معتبر برای برآورد ضریب عکس‌العمل بستر مورد استفاده قرار گیرد.

ضریب عکس‌العمل بستر، آزمایش سه‌محوری، رگرسیون چند متغیره، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

در مهندسی ژئوتکنیک، برای تحلیل اندرکنش خاک و پی‌های انعطاف‌پذیر و شمع‌ها از ضریب عکس‌العمل خاک بستر (K_s) استفاده می‌شود. عکس‌العمل محیط خاک در مسائل مربوط به اندرکنش خاک-سازه با سیستم ساده فنر الاستیک جایگزین می‌گردد (معادله (۱) مدل وینکلر^۱) [۱]. محاسبه نشست الاستیک یک صفحه صلب روی یک محیط نیمه بی‌نهایت با توجه به تئوری الاستیسیته، طبق معادله (۲) انجام می‌شود.

$$K_s = q/S_e \quad (1)$$

$$S_e = qB \frac{1 - \mu^2}{E_s} \quad (2)$$

در معادله (۲) S_e میزان نشست الاستیک، q شدت بار وارده به صفحه یا پی، B عرض پی، μ ضریب پواسون و E_s مدول الاستیسیته می‌باشد [۲]. این معادله را می‌توان برحسب K_s بازنویسی نمود.

$$K_s = \frac{E_s}{B(1 - \mu^2)} \quad (3)$$

خصوصیات و پارامترهای شکل‌پذیری در معادله (۳) را می‌توان از نتایج آزمایش‌هایی نظیر آزمایش سه‌محوری بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی استخراج نمود و در محاسبه K_s به کار گرفت. بدین ترتیب ارتباط بین نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و آزمایش سه‌محوری برقراری می‌گردد.

ضریب عکس‌العمل خاک بستر به‌طور متداول با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در محل به‌دست می‌آید. از آن‌جا که این آزمایش زمان‌بر و پرهزینه است و اهمیت زیادی در کاربردهای مهندسی دارد، پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا معادلاتی برای تخمین K_s ارائه کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تخمین K_s بر اساس روابط همبستگی میان نتایج آزمایش‌های سه‌محوری، CBR ^۲، تحکیم و همچنین معادلات نظری و تجربی اشاره کرد [۳ و ۴]. در میان این روش‌ها استفاده از معادلات نظری و تجربی بعد از استفاده مستقیم از آزمون بارگذاری صفحه‌ای، بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این معادله‌ها، روابط ارائه‌شده توسط بیوت و وسیک^۳ برای تیرهای نامتناهی واقع بر محیط خاکی پیوسته الاستیک تعریف‌شده‌اند، اما کاربرد آن‌ها در فونداسیون‌های صفحه‌ای به‌طور وسیعی در ادبیات فنی مشاهده می‌شود. معادله ارائه‌شده توسط باولز^۴ زمانی که مقدار

ضریب عکس‌العمل بستر زیر یک صفحه ۱ فوتی تعریف می‌شود، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این معادله هم‌چنین در تحلیل نتایج آزمایش بار صفحه با جایگزینی عرض صفحه بارگذاری به مقدار ۱ فوت مرتبط است. اما برخی از محققان به‌جای استفاده از این معادلات در آزمایش بارگذاری صفحه، پیشنهاد استفاده از روابطی که توسط آرنولد^۵ اصلاح‌شده‌اند را می‌دهند [۵]. معادله ارائه شده توسط والاس^۶ برای تیرها و صفحات واقع بر نیم فضای الاستیک معرفی شده‌است [۶]. اما عدم وضوح در تخمین جرم خاک بدون بعد در واحد طول مساله را پیچیده‌تر می‌کند [۴]. معادله‌های مایرهورف و بایک^۷، کلویل و گلاک^۸ و سلوادورای^۹ برای محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر افقی در پی‌های دایره‌ای دفن‌شده پیشنهاد شده‌اند [۷] و در چند مورد محدود برای ارزیابی K_s به کار رفته‌اند [۶]. هم‌چنین، K_s می‌تواند با بازنویسی رابطه نشست صفحات مستطیلی واقع بر نیم فضای الاستیک با استفاده از نظریه الاستیسیته تعیین شود [۸].

از توضیحات فوق، می‌توان نتیجه گرفت که معادلات به‌دست‌آمده از تئوری الاستیسیته، روابط بیوت و روابط وسیک برای ارزیابی K_s مناسب‌تر هستند. هم‌چنین استفاده از این سه معادله بیشتر از دیگران در کاربردهای فنی پیشنهاد شده و بسیاری از محققان نتایج روابط و روش‌های پیشنهادی خود را با نتایج به‌دست‌آمده از این معادلات برای ارزیابی و مزایا مقایسه کرده‌اند [۴]. با این وجود رابطه وینکلر به دلایلی سادگی در استفاده هم‌چنان در مراحل اولیه طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نائینی^{۱۰} و همکاران روابط همبستگی بین ضریب عکس‌العمل بستر، مدول الاستیسیته و تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)^{۱۱} را برای رسوبات رسی آبرفت قزوین ارائه کردند. نتایج نشان داد که بین K_s و ضربات SPT ارتباط معناداری وجود دارد [۹]. کانگ^{۱۲} و همکاران نیز همبستگی آماری بین مدول تغییرشکل درجا با درجه هوازدگی و سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q را بررسی کرده و معادلات جدیدی برای ارتباط میان آن‌ها ارائه نمودند [۱۰]. امینی آهی‌دشت و حدادی^{۱۳} روشی نوین برای تخمین K_s بر اساس آزمایش ژئوفیزیک لرزه‌ای با کرنش کم پیشنهاد دادند. یافته‌های آنان نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثری در پیش‌بینی K_s خاک‌های دانه‌ای به کار گرفته شود [۱۱].

سالاری^{۱۴} و همکاران با انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و تحلیل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، روابط بهینه‌ای میان شکل دانه‌های خاک و ضریب عکس‌العمل بستر ارائه کردند و یک معادله معتبر برای

⁸ Kloppele and Glock

⁹ Selvadurai

¹⁰ Naeini

¹¹ Standard Penetration Test

¹² Kang

¹³ Amini Ahidasht and Hadad

¹⁴ Salari

¹ Winkler

² California Bearing Ratio

³ Biot and Vesic

⁴ Bowles

⁵ Arnold

⁶ Vlassov

⁷ Meyerhof and Baiko

اصلاح روابط تجربی پیشین معرفی نمودند [۱۲].

دینسر^۱ مدل‌هایی برای پیش‌بینی مدول تغییرشکل و ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های ماسه‌ای ارائه کرد. او از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۲) و تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه بهره برد. نتایج تحقیق نشان داد زمانی که پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون - که مستقیماً بر K_s اثرگذارند به‌عنوان ورودی در مدل استفاده شوند، دقت پیش‌بینی به‌طور محسوسه افزایش می‌یابد [۱۳].

پوری^۳ و همکاران در یک سیستم ترکیبی دال بتنی-شمع، ضریب عکس‌العمل بستر خاک ناشی از اجرای شمع را از طریق اندازه‌گیری جابجایی سر شمع محاسبه کردند. پژوهش آنان با در نظر گرفتن نشست مجاز روسازی صلب به دنبال ارائه روشی نوین بود و اعتبارسنجی نتایج نیز با آزمایش بارگذاری مدل‌های دال و شمع انجام گرفت [۱۴].

عساکره و مصفا^۴ مقادیر K_s به‌دست‌آمده از معادلات تجربی را با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مقایسه کرده و ضریب عکس‌العمل بستر خاک ماسه‌ای شهر بندرعباس را ارزیابی نمودند. تحلیل‌ها با روش اجزای محدود انجام شد و نتایج نشان داد که روش عددی هماهنگی بیشتری نسبت به روش‌های تجربی دارد [۱۵].

بارمنکووا و ماتویوا^۵ نیز خمش صفحه در محیط الاستیک با ضرایب ثابت و متغیر عکس‌العمل بستر را با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل کرده و نتایج محاسبات را با تئوری الاستیک مقایسه نمودند [۱۶].

آلواگارسیا و همکاران با ترکیب آزمایش میدانی در مقیاس کامل و شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس^۶، رفتار جانبی شمع منفرد را تحلیل کردند و با استخراج جابجایی، نیروهای داخلی و منحنی‌های p - γ ، ضریب عکس‌العمل بستر خاک را برآورد کردند. نتایج عددی ارائه‌شده توسط آن‌ها درک روشن‌تری از توزیع تنش و تغییرشکل در خاک و شمع فراهم آورد [۱۷].

خیاط‌علی^۸ و همکاران با ترکیب روش‌های تجربی، عددی و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در منطقه کوی فرشته تبریز، ضریب عکس‌العمل بستر را تعیین و در نهایت معادله‌ای (بر حسب نسبت پواسون، مدول الاستیسیته خاک، قطر صفحه بارگذاری و سختی

صفحه بارگذاری) برای برآورد آن ارائه کردند [۱۸].

کولتوک^۹ اثر ابعاد و جنس فونداسیون بر ضریب عکس‌العمل بستر (K_s) در فونداسیون‌های مربعی تحت بار یکنواخت بررسی کرد. نتایج مطالعات تحلیل عددی آن‌ها نشان داد که مدول یانگ فونداسیون تأثیر ناچیزی بر K_s دارد، در حالی که ابعاد فونداسیون نقش کلیدی ایفای می‌کند. نسبت K_s حاصل از اندرکنش خاک-فونداسیون برای حالت بی‌نهایت انعطاف‌پذیر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۶ متغیر بوده که وابستگی مستقیم به موقعیت (مرکز یا لبه) و ابعاد فونداسیون دارد. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش واقعی خاک-فونداسیون را در برآورد دقیق‌تر ضریب عکس‌العمل بستر نشان می‌دهد [۱۹].

کولتوک و توپچو^{۱۰} با بهره‌گیری از مفهوم سختی نسبی سیستم‌های خاک-پی و مقایسه نتایج روش تحلیلی و تحلیل اجزای محدود، چارچوبی برای تخمین دقیق ضریب عکس‌العمل بستر در فونداسیون‌های گسترده ارائه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در شرایط صلب یا انعطاف‌پذیر بودن سیستم، این روش تحلیلی قادر است ضریب عکس‌العمل بستر را با دقتی قابل‌قبول و بدون نیاز به بارگذاری‌های سنگین اولیه برآورد نماید [۲۰].

سالم^{۱۱} و همکاران ضریب عکس‌العمل بستر (K_s) خاک‌های ماسه‌ای را با توسعه یک مدل آماری ساده و قابل‌اعتماد بر اساس داده‌های آزمایش نفوذسنج مخروطی دینامیکی (DCP^{12}) پیش‌بینی کرد. مقایسه نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای (PLT^{13})، جایگزینی ماسه (SRM^{14}) و DCP نشان داد که پارامترهای به‌دست‌آمده از DCP (CBR^{15} ، $DCPI^{16}$ ، q^{16}) همراه با خواص فیزیکی خاک (DC^{17} ، Cc^{18} ، Cu^{19}) می‌توانند K_s را با دقت بالایی ($R^2 \approx 0.88$) تخمین بزنند. نتایج حاکی از آن است که DCP ابزاری آزمایش در جای غیرمخرب و کارآمد برای ارزیابی سریع و دقیق ضریب عکس‌العمل بستر است [۲۱].

زارزوند و فرانکوفسکا^{۲۰} با شبیه‌سازی عددی سیستم‌های شمع رادیه^{۲۱}، به تخمین ضریب عکس‌العمل بستر و بررسی توزیع آن در اجزای مختلف پی پرداختند. نتایج حاصل، با نمایش دوبعدی کانتور توزیع ضریب، نشان داد که مدلسازی عددی می‌تواند ابزاری دقیق و کارآمد برای برآورد و به‌کارگیری ضریب عکس‌العمل بستر در طراحی پی‌های ترکیبی باشد و به ارتقای ایمنی و بهینه‌سازی اقتصادی سازه‌ها

¹² Dynamic cone penetrometer

¹³ Plate load test

¹⁴ Sand replacement test

¹⁵ Penetration index

¹⁶ Bearing capacity

¹⁷ Degree of compaction

¹⁸ Curvature coefficient

¹⁹ Uniformity coefficient

²⁰ Zarazvand and Frankovska

²¹ Pilled Raft

¹ Dinçer

² Artificial Neural Networks

³ Puri

⁴ Asakereh and Mossafa

⁵ Barmenkova and Matveeva

⁶ Alva García

⁷ Abaqus

⁸ Khaiatali

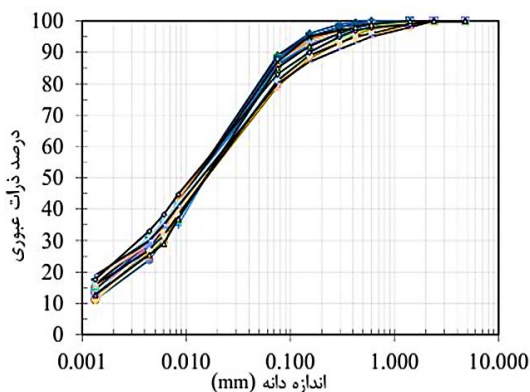
⁹ Koltuk

¹⁰ Topçu

¹¹ Salem

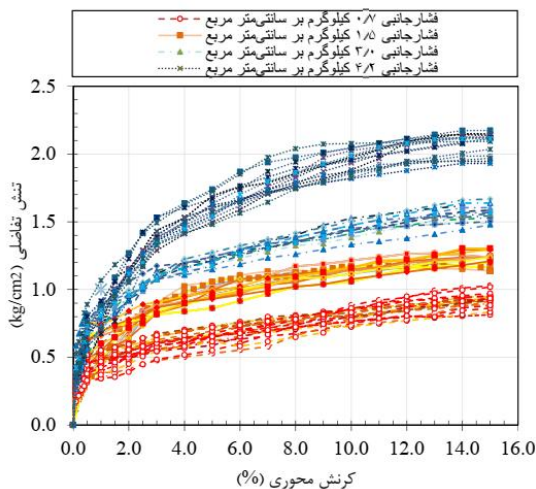
کمک کند [۲۲].

طبقه‌بندی خاک، شامل آزمایش دانه‌بندی ($ASTM D422$)، آزمایش حدوداتریب شامل تعیین حدروانی و حدخمیری ($ASTM D424$) و $ASTM D423$ و آزمایش تعیین درصد رطوبت ($ASTM D2216$) انجام شد. این آزمایش‌ها در شرکت آزمایشگاه مکانیک خاک استان کرمان انجام شدند. خاک رس‌دار این ناحیه از لحاظ سیستم طبقه‌بندی متحد ($USCS$) عموماً در رده CL قرار گرفت. محدوده نمودارهای دانه‌بندی خاک مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. مقادیر تغییرات مشخصات فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۱ نمایان است.



شکل ۱- محدوده منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

تعداد ۵۲ آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده بر روی نمونه‌هایی با قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر به روش استاندارد $ASTM D2850$ انجام شد. نمونه‌ها در شرایط رطوبت طبیعی و فشارهای جانبی (σ_3) ۰/۷۰، ۱/۵۰، ۳/۰۰ و ۴/۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع آزمایش شدند. منحنی‌های تنش تفاضلی بر حسب کرنش محوری آزمایش سه‌محوری با فشارهای جانبی مختلف که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند، در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲- منحنی‌های تنش تفاضلی-کرنش محوری آزمایش سه‌محوری

بدیهی است که آزمایش‌های صحرایی می‌توانند نتایج دقیق‌تری ارائه دهند، اما این نوع آزمایش‌ها هزینه‌بر، زمان‌بر و در بسیاری موارد به دلیل شرایط محل مطالعه دشوار یا حتی غیرممکن هستند. بررسی‌های انجام شده روی روش‌های مختلف محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر نشان می‌دهد که روش‌های نظری به دلیل پیچیدگی محاسبات و روش‌های عددی به علت حجم بالای عملیات محاسباتی، در مقایسه با روش‌های آماری و تجربی کمتر در مراحل ابتدایی طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزون بر این، کمبود بهره‌گیری از روش‌های آماری برای برقراری ارتباط میان پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و Ks نیز مشاهده می‌شود.

بنابراین، برآورد آماری ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از ویژگی‌های خاک، کاربردتری از روش‌های تجربی است. لذا ضرورت انجام تحقیق و مطالعه تجربی و آماری تعیین ضریب عکس‌العمل خاک رس‌دار با استفاده از آزمایش سه‌محوری ایجاد می‌گردد. در این تحقیق سعی بر آن است تا علاوه بر تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش‌های صحرایی (بارگذاری صفحه‌ای) و آزمایش‌های آزمایشگاهی (سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده)، با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره مدلی مناسب برای برآورد ضریب عکس‌العمل بستر (Ks) ارائه گردد. در این راستا، ابتدا نتایج آزمایش سه‌محوری و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای گردآوری و مقایسه شدند و سپس ارتباط بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک با Ks مورد ارزیابی قرار گرفت تا دقت و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی سنجیده شود.

مدل استفاده شده در این پژوهش مبتنی بر فرضیه وینکلر و روابط کلاسیک نشست یک صفحه صلب روی نیم‌فضای الاستیک است که در عمل به‌طور گسترده در طراحی اولیه پی‌ها به کار می‌رود. در این پژوهش این روابط با داده‌های واقعی خاک ریزدانه کالیبره شده‌اند.

نوآوری این تحقیق در ارائه یک مدل رگرسیون چندمتغیره است که با استفاده از نتایج ۵۲ آزمایش سه‌محوری و ۸ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، ارتباط کمی میان پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و Ks را برقرار می‌کند و دقت و قابلیت اعتماد این مدل را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، برای نخستین بار در خاک‌های ریزدانه رس‌دار امکان برآورد Ks تنها بر پایه نتایج سه‌محوری فراهم شده و نیاز به آزمایش‌های پرهزینه بارگذاری صفحه‌ای کاهش می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌برداری و آزمایش‌های خاک

در این تحقیق، تعداد ۵۲ نمونه دست‌نخورده صحرایی از نوع شلیبی تیوب به قطر ۷۵ میلی‌متر از خاک‌های ریزدانه شهر کرمان، ایران در محدوده جغرافیایی $51^{\circ} 57'$ طول شرقی و $18^{\circ} 30'$ عرض شمالی تهیه شد. در حین حفاری و نمونه‌برداری تا عمق حدود ۳۰ متری به سطح آب زیرزمینی برخوردند. آزمایش‌های مربوط به تعیین

آزمون t معمولاً برای تحلیل و مقایسه میانگین‌ها به کار می‌رود؛ از جمله در پژوهش‌های تک‌متغیره یک‌گروهی، دوگروهی و نیز در تحلیل‌های چندمتغیره دوگروهی. این آزمون ابزاری مؤثر برای تشخیص تفاوت‌ها و مقایسه میانگین‌ها میان گروه‌ها یا شرایط مختلف است و می‌تواند در بررسی روابط علی نیز مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

آزمون t با دو فرض H_0 و دو فرض H_1 تعریف می‌شود:

H_0 : برابری واریانس‌های دو نمونه (K_S) از نمونه‌های آزمایشگاهی

و صحرایی)

H_1 : عدم برابری واریانس‌های دو نمونه (K_S) از نمونه‌های

آزمایشگاهی و صحرایی)

H_0 : برابری میانگین‌های دو نمونه (K_S) آزمایشگاهی و

صحرایی)

H_1 : عدم برابری میانگین‌های دو نمونه (K_S) نمونه‌های

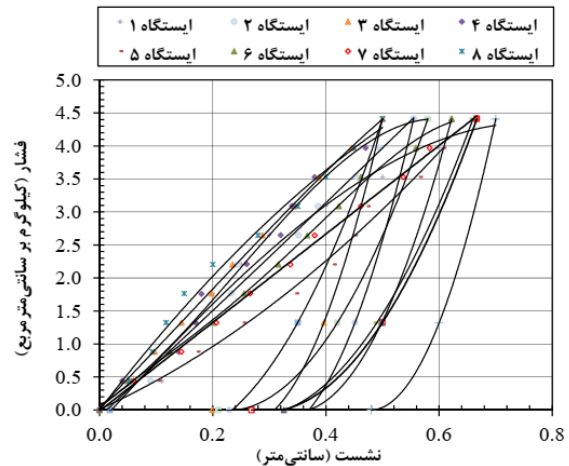
آزمایشگاهی و صحرایی).

این آزمون برای مقایسه میانگین دو نمونه مستقل به‌ویژه در شرایطی که احتمال تفاوت واریانس‌ها وجود دارد به کار می‌رود. پیش از انجام آزمون، ابتدا فرض صفر ($H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$) یا برابری واریانس‌های دو نمونه بررسی می‌شود. نتایج آزمون لون^۲ در قالب آماره F و سطح معنی‌داری (Sig) گزارش می‌شود. اگر مقدار معنی‌داری (Sig) کمتر یا مساوی سطح خطا (α) باشد، فرض صفر رد شده و نابرابری واریانس‌ها تأیید می‌شود؛ اما اگر Sig بزرگ‌تر از α باشد، فرض صفر پذیرفته شده و برابری واریانس‌های دو نمونه تأیید می‌شود. در این حالت باید نسخه مناسب از آزمون t (برای واریانس‌های برابر یا نابرابر) انتخاب شود تا مقایسه میانگین‌ها به درستی انجام شود [۲۴].

۲-۲-۱-۲-۲-ب-آزمون F ^۳

گاهی اوقات پژوهشگر قصد دارد تفاوت اثرگذاری چند متغیر یا گروه را بررسی یا بین آن‌ها انتخاب کند. در چنین شرایطی می‌توان از آزمون t به صورت زوجی استفاده کرد، اما با افزایش تعداد مقایسه‌ها احتمال بروز خطاهای آماری و محاسباتی بالا می‌رود و این روش عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد. به همین دلیل، روش دیگری به نام آزمون F یا تحلیل واریانس^۴ به کار گرفته می‌شود. این روش امکان شناسایی تفاوت‌های معنی‌دار بین گروه‌ها و بررسی تأثیر متغیرها را فراهم می‌کند [۲۳].

علاوه بر این تعداد ۸ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در تراز گودبرداری ۵ تا ۷ متری از سطح زمین، طبق استاندارد ۱۱۹۴ $ASTM D$ با استفاده از صفحه صلب به قطر ۷۶/۲ سانتی‌متر انجام شد. منحنی‌های فشار وارده به زیر صفحه بر حسب نشست حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در شکل ۳ نمایان هستند.



شکل ۳- منحنی فشار-نشست آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

۲-۲- روش تحقیق

آمار استنباطی به منظور برآورد پارامترهای جامعه (مانند میانگین) بر پایه نمونه‌گیری علمی و همچنین برای مقایسه پارامترهای دو یا چند جامعه به کار می‌رود. این شاخه از آمار به روش‌هایی اطلاق می‌شود که با استفاده از اندازه‌گیری ویژگی‌ها در گروه‌های کوچک، ویژگی‌های گروه‌های بزرگ‌تر را استنباط می‌کنند. در این تحقیق نیز با بهره‌گیری از چندین آزمون آماری، ضریب عکس‌العمل بستر بر اساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری خاک بررسی شده است.

۲-۲-۱- آزمون فرضیه

۲-۲-۱-الف-آزمون t ^۱

آزمون t یکی از آزمون‌های آماری پرکاربرد است که بر پایه یک خانواده از توزیع‌ها تعریف می‌شود و امکان بررسی فرضیه‌ها را در شرایطی که توزیع جامعه ناشناخته باشد فراهم می‌کند. اهمیت این آزمون در آن است که پژوهشگر می‌تواند حتی با نمونه‌های کوچک (حداقل دو مشاهده) اطلاعات معتبری درباره جامعه به دست آورد.

جدول ۱- محدوده تغییرات ویژگی‌های نمونه‌های اخذشده

وزن واحد حجم خاک خشک (gr/cm^3)	درصد رطوبت (ω)	حد روانی (LL)	شاخص خمیری (PI)	ریزتر از ۷۵ میکرون (%)	ریزتر از ۲ میکرون (%)	عمق نمونه (m)
۱/۳۹ تا ۱/۶۴	۱۶/۰ تا ۳۲/۶	۲۸ تا ۳۴	۸ تا ۱۳	۶۰ تا ۹۹	۹ تا ۴۶	۰ تا ۳۰

^۳ F-test

^۴ ANOVA

^۱ t-test

^۲ Levene

۲-۱-ج-رگرسیون چند متغیره

با استفاده از رگرسیون چندمتغیره می‌توان رابطه‌ی خطی میان مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل و یک متغیر وابسته را بررسی کرد، به‌گونه‌ای که هم اثرات هر متغیر مستقل و هم روابط احتمالی میان متغیرهای مستقل در نظر گرفته‌شود. هدف اصلی این روش، تبیین واریانس متغیر وابسته از طریق برآورد سهم هر یک از متغیرهای مستقل (دو یا چند متغیر) در آن است.

رگرسیون چندمتغیره ابزاری مناسب برای تحلیل هم‌زمان اثر چندین متغیر مستقل - از جمله متغیرهای آزمایشی - بر یک متغیر وابسته است. در این روش، ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل ساخته می‌شود که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته داشته‌باشد. این ترکیب نه تنها امکان پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته را فراهم می‌کند، بلکه اهمیت نسبی هر متغیر مستقل را نیز در پیش‌بینی نشان می‌دهد.

ویژگی مهم رگرسیون چندمتغیره آن است که امکان استفاده‌ی آسان از انواع مختلف متغیرها را فراهم می‌کند و بیشترین بهره را از داده‌ها برای تبیین و توضیح پراکندگی‌های مشاهده‌شده به عمل می‌آورد [۲۴].

۲-۲-۲- تعیین ضریب عکس‌العمل بستر با روش پیشنهادی

یکی از رایج‌ترین مدل‌های تعیین ضریب عکس‌العمل بستر، روش وینکلر می‌باشد که در بین اکثر طراحان شناخته شده است. او محیط خاک را مجموعه‌ای از فنرهای الاستیک خطی با فاصله نزدیک ولی مجزا از هم در نظر گرفته است. مدل وینکلر معادله بار (Δq) و نشست (ΔS) را ارائه می‌کند. با استفاده از این مدل، معادله تنش تفاضلی (بار محوری) بر حسب تغییر ارتفاع نمونه آزمایش سه‌محوری بصورت معادله (۴) را می‌توان معرفی کرد.

$$K_s = \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\Delta h} \quad (4)$$

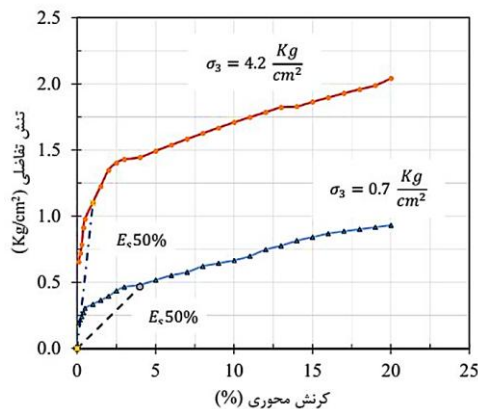
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (5)$$

در معادلات (۴) و (۵)، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر، ε کرنش محوری، h ارتفاع اولیه و Δh تغییر ارتفاع نمونه در آزمایش سه‌محوری هستند. معادله (۴) ارتباط بین آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و آزمایش سه‌محوری را در تعیین K_s بیان می‌کند. کمیت‌هایی که K_s را تحت تاثیر قرار می‌دهند، عرض پی و فشار محصورکننده یا عمق هستند.

برای محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش‌های سه‌محوری با توجه به معادلات (۴) و (۵)، نمودارهای تنش تفاضلی-کرنش محوری در دستگاه تنش تفاضلی-تغییرات ارتفاع با استفاده از نرم افزار اکسل ترسیم گردید. شیب منحنی در دستگاه تنش-تغییرات

ارتفاع، نمایان گر K_s است (شکل ۴). از این نمودارها، شیب سکانتی مورد استفاده قرار گرفت. شیب سکانتی از وصل کردن با خطی از مبدأ ($\Delta h=0$) به نقطه ۵۰٪ تنش تفاضلی تعریف می‌شود.

بعد از تعیین ضریب عکس‌العمل بستر از منحنی‌های اصلاح‌شده آزمایش سه‌محوری، با استفاده از روش‌های احتمالاتی با جمع‌آوری و جمع‌بندی داده‌ها به آنالیز داده‌ها با استفاده از آزمون‌های فرضیه (آزمون t و F) پرداخته‌شد.



شکل ۴- نمودار تنش تفاضلی-کرنش محوری آزمایش سه‌محوری

در شرایط آزمایش سه‌محوری، با افزایش فشار جانبی در نمونه خاک رس دار شهر کرمان، نتایج زیر مشاهده شد:

(الف) در مقاومت اوج، میزان تغییرشکل نسبی افزایش یافت.

(ب) دامنه تغییرشکل نسبی غیرالاستیک پیش از شکست افزایش یافت.

(ج) مقدار مدول الاستیسیته افزایش پیدا کرد [۲۵].

مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در صحرا برای صفحه‌ای به قطر ۷۶/۲ سانتی‌متر، $K_s = 7 kg/cm^3$ تعیین شد. نظر به این که ضریب عکس‌العمل بستر تابع عرض صفحه یا پی است، لذا از ترکیب معادله (۳)، (۵) و (۶) [۲۶] که برای تبدیل ضریب عکس‌العمل خاک‌های ریزدانه برای صفحه یا پی به عرض‌های دیگر است، استفاده شد و معادله (۹) بدست آورده شد. طبق معادله (۹) مقدار K_s حاصله از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به صفحه ۳/۸۱ سانتی‌متر (معادل قطر نمونه‌های آزمایش سه‌محوری) تبدیل شد.

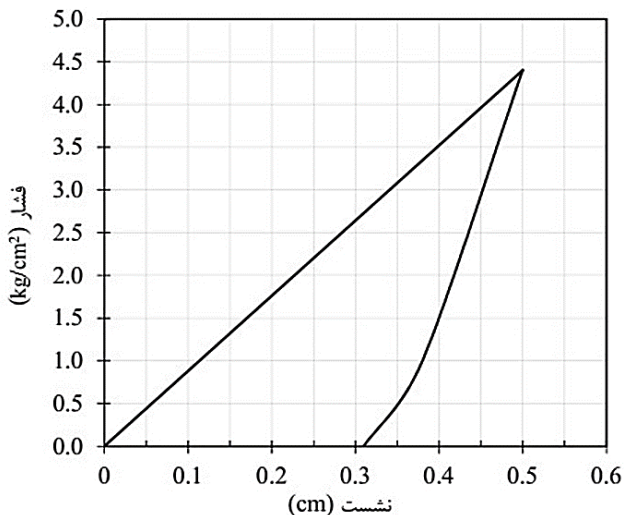
$$q_F = q_{F1} \quad (6)$$

$$K_s = K_{s1} \frac{1}{B} \quad (7)$$

که در آن؛

q_F : ظرفیت باربری نهایی برای صفحه‌ای مربعی یا دایره‌ای به

قطر صفحه مورد نظر،



شکل ۶- نمودار فشار-نشست از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صحرایی

۳-۲- مقایسه و تحلیل آماری K_s آزمایش

سه‌محوری و بارگذاری صفحه‌ای

۳-۲-۱- تحلیل K_s با آمار توصیفی

در جدول ۲ تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر محاسبه‌شده از آزمایش‌های سه‌محوری در فشارهای جانبی متفاوت و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ارائه شده است. تغییرات ضریب عکس‌العمل آزمایش‌های سه‌محوری دامنه تغییرات کم‌تری را با انحراف معیار کوچک‌تری در برمی‌گیرد در حالی که نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، دامنه تغییرات زیادتری با انحراف معیار بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. با صرف‌نظر از نوع خاک، دانه‌بندی و درصد رطوبت آن که در کل محدوده مورد بررسی یکسان بوده دلیل این اختلاف را می‌توان به مشخصات هندسی سیستم انتقال بار و حتی نوع بار وارده نیز وابسته دانست [۲۷]. هم‌چنین می‌توان آن را براساس تحقیق صورت‌گرفته روی رس‌های فوق‌تحکیم‌یافته و سفت، تفسیر کرد که نشان می‌دهد تکرارپذیری فشار بارگذاری نهایی در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای نسبت به آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده بسیار بیش‌تر می‌باشد، ربط‌داد [۲۸]. به همین دلیل با کوچک‌بودن قطر صفحه بارگذاری (مشخصات هندسی سیستم انتقال بار) در آزمایش سه‌محوری و عدم تکرارپذیری فشار بارگذاری نهایی، مقادیر محاسبه‌شده حاصل از آزمایش سه‌محوری در بیش‌تر موارد مقادیری کم‌تری از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای را نشان می‌دهد.

q_{F1} : ظرفیت باربری نهایی برای صفحه‌ای مربعی یا دایره‌ای به

قطر $0/3$ متر،

K_s : ضریب عکس‌العمل بستر برای صفحه مورد نظر،

K_{s1} : ضریب عکس‌العمل برای صفحه‌ای مربعی یا دایره‌ای به قطر

$0/3$ متر،

B : عرض پی (بر حسب متر).

معادله (۷) در این تحقیق به این صورت بازنویسی شد:

$$k_{s(3.81)} = k_{s1(76.2)} \frac{76.2}{B}$$

بنابراین ضریب عکس‌العمل برای صفحه به قطر $3/81$ سانتی‌متر

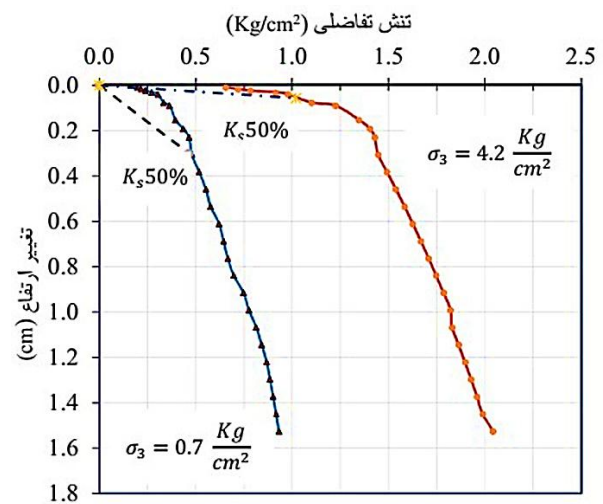
برابر است با :

$$k_{s(3.81)} = 7 \times \frac{76.2}{3.81} = 140 \text{ kg/cm}^3$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارائه نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل

با رسم نمودار تنش تفاضلی برحسب تغییر ارتفاع نمونه در آزمایش سه‌محوری و ترسیم نمودارهای بار-نشست در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در محل (صحرایی)، شیب نمودارها به عنوان مقدار ضریب عکس‌العمل بستر خاک تعیین گردید (شکل ۵ و شکل ۶). این شکل‌ها نمونه‌های از نتایج آزمایش سه‌محوری و بارگذاری صفحه‌ای را ارائه می‌دهند.



شکل ۵- نمودار تنش تفاضلی-تغییرات ارتفاع نمونه در آزمایش

سه‌محوری

جدول ۲- مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر مورد استفاده در آمار توصیفی

ردیف	متغیر ضریب عکس‌العمل بستر Ks	گروه	دامنه تغییرات	میانگین	انحراف معیار
۱	آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (فشار جانبی ۰ kg/cm ²)	۱	۹۰/۰۰	۱۲۵/۲۵	۳۲/۲۱
۲	آزمایش سه‌محوری در ۰/۷ kg/cm ²	۲	۵/۹۷	۲/۰۵	۲/۰۱
	فشارهای جانبی متفاوت	۳	۱/۷۴	۳/۲۱	۹/۱۲
	۳/۰ kg/cm ²	۴	۸/۳۲	۴/۸۳	۳/۲۱
	۴/۲ kg/cm ²	۵	۷/۱۳	۶/۱۸	۲/۲۳

رد شده و نابرابری واریانس‌ها ($H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$) پذیرفته می‌شود. در مقابل، اگر $Sig > \alpha$ باشد، فرض صفر پذیرفته شده و برابری واریانس‌ها تأیید می‌شود و در این حالت باید نسخه آزمون t برای واریانس‌های برابر به کار رود.

به‌عنوان مثال، در سطر دوم جدول ۳ که مقایسه دو گروه ۱ و ۲ صورت گرفته است، سطح خطا $\alpha = 0.05$ در نظر گرفته شده و مقدار سطح معنی‌داری اول $Sig = 0.002$ است. از آنجا که $Sig < \alpha$ است، فرض صفر رد و نابرابری واریانس‌ها تأیید می‌شود؛ بنابراین برای آزمون فرض $H_0: \mu_1 = \mu_2$ باید از شرط نابرابری واریانس‌ها استفاده شود. همچنین مقدار سطح معنی‌داری دوم در ستون آخر $Sig = 0.001$ است که باز هم کمتر از α است؛ در نتیجه اختلاف میانگین‌ها معنادار بوده و میانگین ضریب عکس‌العمل بستر حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (با فشار جانبی صفر) به‌طور معناداری بیشتر از نتایج آزمون سه‌محوری با صفحه ۳/۸۱ سانتی‌متری است.

نتایج میانگین ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و آزمایش سه‌محوری در جدول ۲ نشان داد که نتایج Ks تبدیل شده صحرائی در مقایسه با نتایج آزمایش سه‌محوری با نمونه دارای قطر ۳/۸۱ سانتی‌متر، دارای ضریب تشدید در حدود ۲۰ در خاک‌های ریزدانه وجود دارد. ضریب عکس‌العمل بستر شدیداً به عرض صفحه وابسته است. لذا Ks حاصله از نتایج آزمایش سه‌محوری با نمونه‌های به قطر ۳/۸۱ سانتی‌متر متفاوت از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در محل می‌باشد. علاوه بر این مدول الاستیسیته در آزمایش سه‌محوری با فشار همه‌جانبه نسبت مستقیم دارد. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای نمونه اعمال بار یک پی واقعی در شرایط طبیعی خاک است. از این جهت می‌توان در تعیین Ks بر آزمایش بارگذاری صفحه‌ای تکیه کرد.

۳-۲-۲- تحلیل Ks با آزمون t و F

با توجه به آماره F و سطح معنی‌داری (Sig) در ستون‌های دوم و سوم جدول ۳، ابتدا فرض صفر ($H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$) یا برابری واریانس‌های دو نمونه بررسی می‌شود. اگر $Sig \leq \alpha$ باشد، فرض صفر

جدول ۳- خروجی آزمون t مستقل با داده‌های گروه‌بندی شده آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و سه‌محوری

دو گروه مورد مقایسه	سطح معنی‌داری اول (sig)	فرض واریانس‌ها	آماره t	سطح معنی‌داری دوم (sig-2tailed)	اختلاف میانگین
گروه ۱ و ۲	۰/۰۰۲		۸/۸۷۵	۰/۰۰۱	۱۰۴/۷۰۷
گروه ۱ و ۳	۰/۰۰۲	نابرابری واریانس‌ها	۹/۱۲۱	۰/۰۰۱	۱۰۶/۰۸۷
گروه ۱ و ۴	۰/۰۰۲	$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_5^2$	۹/۴۲۳	۰/۰۰۱	۱۰۷/۷۹۹
گروه ۱ و ۵	۰/۰۰۱		۸/۸۳۲	۰/۰۰۱	۱۰۳/۴۵۶

تا این مرحله، نتایج نشان داده است که تنش جانبی اعمال شده بر ضریب عکس‌العمل بستر تأثیرگذار بوده و باعث ایجاد تغییراتی شده است. با این حال، به‌منظور اطمینان بیشتر از این نتیجه‌گیری، از آزمون تحلیل کوواریانس استفاده شد. در جدول ۴، مقایسه‌های چندگانه میان میانگین‌ها به‌صورت دو به دو با روش آماری LSD (فیشر) ارائه شده است. به‌عنوان مثال، در این آزمون ابتدا میانگین ضریب عکس‌العمل بستر در فشار جانبی ۰/۷ کیلوگرم بر

سانتی‌مترمربع با میانگین‌های به‌دست‌آمده در فشارهای جانبی ۱/۵، ۳/۰ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع مقایسه شد. در مرحله بعد نیز میانگین ضریب عکس‌العمل بستر در فشار جانبی ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع با سه گروه دیگر مقایسه گردید. ستون دوم جدول ۴ گروه‌های مقایسه شده و ستون سوم تفسیر نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. در این فرایند، ابتدا شرط برابری یا نابرابری واریانس‌ها بررسی شد که در تمام موارد نابرابری واریانس‌ها مشاهده گردید. پس از

یافته‌های جدول ۳ نیز که حاصل آزمون واریانس مبتنی بر فرض نابرابری واریانس‌هاست، همخوانی دارد.

پذیرش این شرط، فرض دوم یعنی برابری یا نابرابری میانگین‌ها آزمون شد که باز در تمام موارد، فرض نابرابری میانگین‌ها پذیرفته شد. بنابراین، میانگین پنج گروه مورد بررسی یکسان نیست. این نتیجه با

جدول ۴- مقایسه چندگانه حاصل از آزمون F یا واریانس با داده‌های گروه بندی شده آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و آزمایش سه محوری

ردیف	گروه‌های مورد مقایسه	سطح معنی داری اول (sig)	نتیجه
۱	۱ و ۵	۰/۰۰۱	میانگین گروه ۱ از ۵ بیشتر است.
۲	۲ و ۵	۰/۰۰۱	میانگین گروه ۲ از ۵ بیشتر است.
۳	۳ و ۵	۰/۰۰۱	میانگین گروه ۳ از ۵ بیشتر است.
۴	۴ و ۵	۰/۰۰۱	میانگین گروه ۴ از ۵ بیشتر است.

ارزیابی شد. در این پژوهش اثر شش عامل شامل درصد دانه‌بندی ریزتر از ۷۵ و ۲ میکرون، حد روانی (LL)، شاخص خمیری (PI)، درصد رطوبت (w) و وزن واحد حجم خشک خاک (γ_d) بر ضریب عکس‌العمل بستر مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۵ به‌عنوان اولین خروجی تحقیق نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته، یعنی ضریب عکس‌العمل بستر، بر اساس این شش متغیر مستقل از یک مدل رگرسیون با روش واردسازی استفاده شده‌است. جدول ۶ نیز خلاصه‌ای از اطلاعات مدل‌ها را ارائه می‌دهد. مقدار R^2 (مربع ضریب همبستگی) نشان می‌دهد که بین مجموعه متغیرهای مستقل و متغیر وابسته تحقیق (ضریب عکس‌العمل بستر) در مدل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ متناظر با فشارهای جانبی ۰/۷، ۱/۵، ۳/۰ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ترتیب همبستگی متوسط، عالی، عالی و نسبتاً ضعیف تا متوسط وجود دارد.

۳-۲-۳- تحلیل Ks با رگرسیون چند متغیره

در اوایل قرن بیستم، مهندسان بر این باور بودند که ضریب عکس‌العمل بستر (Ks) یک ویژگی ثابت و ذاتی برای هر نوع خاک است. با این حال، ترزاقی^۱ نشان داد که Ks صرفاً یک خصوصیت ذاتی خاک نیست، بلکه علاوه بر ویژگی‌های الاستیک خاک، به هندسه سیستم انتقال بار و حتی نوع بار اعمال شده نیز وابسته است. از آن زمان تاکنون، این موضوع به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و روابط تجربی و تحلیلی متعددی برای آن ارائه شده‌است. به‌عنوان نمونه، بیو و وسیک^۲ روابطی را بر اساس تئوری محیط‌های الاستیک برای تیرهای قرار گرفته بر روی بستر الاستیک معرفی کردند که در بسیاری از مطالعات برای پی‌های گسترده نیز به کار گرفته شده‌است. همچنین، رابطه مایهوف و بایک^۳ که در اصل برای تخمین ضریب عکس‌العمل بستر افقی بستر در لوله‌های مدفون ارائه شده بود، در برخی موارد برای برآورد ضریب عکس‌العمل بستر نیز استفاده شده‌است [۲]. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، در این تحقیق تأثیر متغیرهای مختلف خاکی (متغیرهای مستقل) بر ضریب عکس‌العمل بستر (متغیر وابسته) با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری و تحلیل رگرسیون چندمتغیره ساده

جدول ۵- اولین خروجی از آنالیز رگرسیون چند متغیره

مدل	متغیرهای ورودی
۱ تا ۴	تنش، شاخص خمیری، حد روانی، درصد رطوبت، دانه بندی، وزن واحد حجم خشک

جدول ۶- خلاصه از اطلاعات مدل‌های حاصل از رگرسیون چند متغیره

مدل	ضریب همبستگی (R)	مربع ضریب همبستگی (R^2)	R ² adjusted	خطای انحراف معیار
۱	۰/۷۶۸	۰/۵۸۹	۰/۲۳۷	۱/۷۵۳
۲	۰/۹۷۳	۰/۹۴۷	۰/۸۴۱	۰/۲۰۱
۳	۰/۸۸۸	۰/۷۸۸	۰/۳۶۳	۲/۵۵۸
۴	۰/۶۷۳	۰/۴۵۳	-۰/۱۵۵	۲/۰۵۴

باقی‌مانده^۴ نشان داده شده و برای هر یک از این منابع، مجموع

جدول ۷ منبع تغییرات متغیر وابسته در دو منبع رگرسیون و

^۳ Meyerhof and Baika

^۴ Residual

^۱ Terzaghi

^۲ Biot and Vesic

می‌باشد، مدل رگرسیون چند متغیره بصورت معادله (۸) می‌باشد:

$$y' = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_6x_6 \quad (8)$$

در این معادله، y' تغییرات ضریب عکس‌العمل، پارامترهای B_1, B_2, \dots, B_6 همان ضرایب استاندارد نشده B هستند و مقدار عرض از مبدأ (B_0)، مقدار ثابت رگرسیون است. و متغیرهای $x_1, x_2, x_3, \dots, x_6$ بترتیب مربوط به تغییرات ω, γ_d, LL, PI درصد ذرات ریزتر از ۷۵ و ۲ میکرون می‌باشند. در نهایت مقادیر متغیرهای مربوط به نمونه‌های آزمایش‌های سه‌محوری در فشارهای محصورکننده ۰/۷، ۱/۵، ۳/۰ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در معادلات (۹) تا (۱۲)، برای محاسبه Ks جایگزین گردید.

$$y' = -10.562 - 4.099x_1 + 0.091x_2 + 0.012x_3 - 0.010x_4 + 0.248x_5 - 0.135x_6 \quad (9)$$

$$y' = 187.300 - 0.014x_1 + 1.043x_2 + 0.632x_3 - 4.710x_4 - 0.835x_5 - 69.101x_6 \quad (10)$$

$$y' = 75.460 + 0.078x_1 + 0.236x_2 - 0.603x_3 - 1.589x_4 - 0.338x_5 - 16.753x_6 \quad (11)$$

$$y' = 4.570 - 0.724x_1 + 0.614x_2 + 0.349x_3 + 0.183x_4 - 0.096x_5 - 20.929x_6 \quad (12)$$

مجذورات، درجه آزادی و میانگین مجذورات آمده‌است. که می‌توان از آن نتیجه گرفت، هر چه مقدار مجموع مجذورات باقی‌مانده کوچک‌تر از مجموع مجذورات رگرسیون باشد، نشان‌دهنده قدرت تبیین‌گیری بالای مدل در توضیح تغییرات متغیر وابسته است. برعکس هر چه مقدار باقی‌مانده به میزان بیش‌تری از رگرسیون بزرگ‌تر باشد، نشان‌می‌دهد که نقش مدل در تبیین تغییرات متغیر وابسته ضعیف است. در این تحقیق نیز مدل‌های ۲ و ۳ ارائه‌شده در تبیین تغییرات متغیر وابسته قوی‌تر عمل کرده‌اند.

جدول ۸ نتایج مربوط میزان تأثیر هر متغیر در مدل و هم‌چنین میزان همبستگی بین آن‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول ضرایب تأثیر رگرسیونی هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته را نشان می‌دهد که تفسیر ضرایب رگرسیونی براساس ضریب β انجام می‌گیرد. زیرا این آماره نشان‌دهنده ضریب رگرسیونی استاندارد شده هر یک از متغیرهای مستقل بر روی متغیر وابسته تحقیق می‌باشد. بنابراین، می‌توان با استفاده از آن، سهم نسبی هر متغیر مستقل در مدل را مشخص کرد. مقایسه متغیرها با توجه به سطح معنی‌داری در ستون پنجم این جدول نشان می‌دهد:

تأثیر متغیرهای مستقل بر ضریب عکس‌العمل بستر زمانی معنی‌دار است که فرض H_1 پذیرفته می‌شود. یعنی سطح خطای آن‌ها در ۴ مدل ارائه شده کم‌تر از ۰/۰۵ باشد و نشان‌دهنده این است که متغیرهای مذکور بر ضریب عکس‌العمل بستر تأثیر داشته‌اند.

با توجه به ستون دوم از

جدول ۸ تا جدول ۱۱ که مربوط به ضرایب استاندارد نشده B

جدول ۷- واریانس از آزمون رگرسیون چند متغیره

شماره مدل	مدل	درجه آزادی df	آماره F	سطح معنی‌داری Sig
۱	رگرسیون	۶	۱/۶۷۳	۰/۲۵۸
	باقی‌مانده	۷	-	-
	کل ^۱	۱۳	-	-
۲	رگرسیون	۶	۸/۹۵۰	۰/۰۵۰
	باقی‌مانده	۳	-	-
	کل	۹	-	-
۳	رگرسیون	۶	۱/۸۸۵	۰/۳۲۷
	باقی‌مانده	۳	-	-
	کل	۹	-	-
۴	رگرسیون	۶	۱/۵۱۹	۰/۲۵۹
	باقی‌مانده	۱۱	-	-
	کل	۱۷	-	-

^۱ Total

جدول ۸- خروجی تحلیل رگرسیون مربوط به تأثیر متغیرها بر Ks از آزمایش سه محوری در فشار همه‌جانبه ۷/۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

مدل ۱	ضرایب استاندارد نشده		ضریب استاندارد شده β	آماره F	سطح معنی‌داری Sig
	B	Std. Error			
(مقدار ثابت)	-۱۰/۵۶۲	۲۲/۶۹۴		-۰/۴۶۵	۰/۶۵۶
$(g/cm^3)\gamma_d$	-۴/۰۹۹	۸/۰۷۴	-۰/۱۴۲	-۰/۵۰۸	۰/۶۲۷
$(\%) \omega$	۰/۰۹۱	۰/۱۱۳	۰/۲۶۲	۰/۸۱۰	۰/۴۴۵
LL	۰/۰۱۲	۰/۶۶۳	۰/۰۰۹	-۰/۰۱۷	۰/۹۸۶
PI	-۰/۰۱۰	۰/۶۰۲	-۰/۰۰۸	۲/۰۳۱	۰/۹۸۷
درصد عبوری از ۷۵ میکرون	۰/۲۴۸	۰/۱۲۲	۱/۰۱۱	۱/۰۱۱	۰/۰۸۲
درصد عبوری از ۲ میکرون	-۰/۱۳۵	۰/۱۵۵	-۰/۵۵۳	-۰/۵۵۳	۰/۲۷۷

جدول ۹- خروجی تحلیل رگرسیون مربوط به تأثیر متغیرها بر Ks از آزمایش سه محوری در فشار همه‌جانبه ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

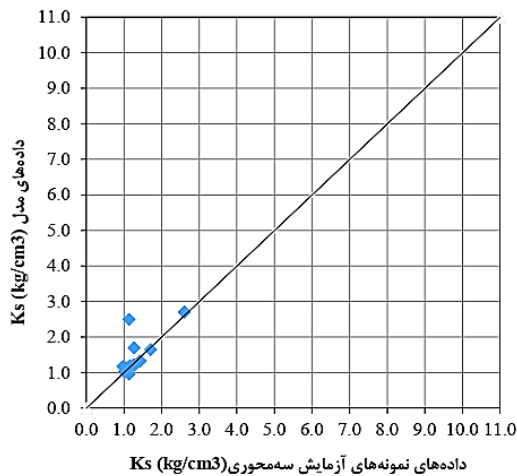
مدل ۲	ضرایب استاندارد نشده		ضریب استاندارد شده β	آماره F	سطح معنی‌داری Sig
	B	Std. Error			
(مقدار ثابت)	۸/۶۷۵	۲/۸۰۷		۳/۰۹۱	۰/۰۵۴
$(g/cm^3)\gamma_d$	۱/۹۵۲	۱/۰۵۷	-۰/۲۷۱	-۱/۸۴۶	۰/۱۶۲
$(\%) \omega$	-۰/۰۱۴	-۰/۰۳۳	-۰/۱۷۰	-۰/۴۱۷	۰/۷۰۵
LL	۰/۰۱۰	۰/۱۱۰	۰/۰۲۸	۰/۰۸۹	۰/۹۳۴
PI	۰/۳۰۰	-۰/۰۸۶	۰/۸۹۰	۳/۵۰۷	۰/۰۳۹
درصد عبوری از ۷۵ میکرون	-۰/۱۰۷	۰/۰۲۶	-۱/۳۶۷	-۴/۱۷۲	۰/۰۲۵
درصد عبوری از ۲ میکرون	۰/۰۶۰	۰/۰۴۳	۰/۷۰۵	۱/۴۰۹	۰/۲۵۴

جدول ۱۰- خروجی تحلیل رگرسیون مربوط به تأثیر متغیرها بر Ks از آزمایش سه محوری در فشار همه‌جانبه ۳/۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

مدل ۳	ضرایب استاندارد نشده		ضریب استاندارد شده β	آماره F	سطح معنی‌داری Sig
	B	Std. Error			
(مقدار ثابت)	-۳۰/۶۴۳	۳۵/۷۶۶		-۰/۸۵۷	۰/۴۵۵
$(g/cm^3)\gamma_d$	۲۸/۷۰۱	۱۳/۴۷۶	۰/۶۲۷	۲/۱۳۰	۰/۱۲۳
$(\%) \omega$	-۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۸۱۷	۰/۹۹۸	۰/۳۹۲
LL	-۰/۵۶۳	۱/۳۹۷	-۰/۲۵۵	-۰/۴۰۳	۰/۷۱۴
PI	-۰/۲۴۶	۱/۰۹۱	-۰/۱۱۵	-۰/۲۲۶	۰/۸۳۶
درصد عبوری از ۷۵ میکرون	۰/۰۵۰	۰/۳۲۶	۰/۱۰۰	۰/۱۵۲	۰/۸۸۹
درصد عبوری از ۲ میکرون	-۰/۰۳۰	۰/۵۴۶	-۰/۰۵۵	-۰/۰۵۵	۰/۹۶۰

جدول ۱۱- خروجی تحلیل رگرسیون مربوط به تأثیر متغیرها بر Ks از آزمایش سه محوری در فشار همه‌جانبه ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

مدل ۴	ضرایب استاندارد نشده		ضریب استاندارد شده β	آماره F	سطح معنی‌داری Sig
	B	Std. Error			
(مقدار ثابت)	۲۷/۴۹۹	۲۷/۶۷۰		۰/۹۹۴	۰/۳۴۲
$(g/cm^3)\gamma_d$	-۱۲/۰۶۳	۱۱/۷۵۹	-۰/۲۶۴	-۱/۰۲۶	۰/۳۲۷
$(\%) \omega$	-۰/۲۵۲	۰/۱۳۳	-۰/۵۳۵	-۱/۸۹۲	۰/۰۸۵
LL	-۰/۵۴۷	۰/۷۲۴	-۰/۳۲۸	-۰/۷۵۵	۰/۴۶۶
PI	-۰/۱۴۶	۰/۴۶۵	-۰/۱۰۱	-۰/۳۱۳	۰/۷۶۰
درصد عبوری از ۷۵ میکرون	۰/۲۵۰	۰/۱۸۰	۰/۶۳۶	۱/۳۸۶	۰/۱۹۳
درصد عبوری از ۲ میکرون	۰/۰۱۴	۰/۰۹۳	۰/۰۶۱	۰/۱۵۲	۰/۸۸۲



شکل ۷- تطابق داده‌های مدل ۲ با نتایج تجربی

۴- نتیجه گیری

به منظور تعیین ضریب عکس‌العمل بستر از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، داده‌های حاصل از آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، به همراه خصوصیات فیزیکی خاک رس‌دار مورد مطالعه قرار گرفت. با تحلیل آماری نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و بارگذاری صفحه‌ای، یافته‌های زیر به دست آمد:

الف) نتایج آزمون‌های t مستقل و F نشان داد که میانگین ضریب عکس‌العمل بستر تبدیل‌شده حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای بیش‌تر از میانگین ضریب عکس‌العمل بستر به دست آمده از آزمایش سه‌محوری است؛ این موضوع بیانگر تأثیر معنادار فشار جانبی در سطوح مختلف آن بر ضریب عکس‌العمل بستر است.

ب) مقایسه میانگین‌های ضریب عکس‌العمل بستر نشان داد که مقادیر K_s تبدیل‌شده صحرائی در مقایسه با نتایج آزمایش سه‌محوری دارای ضریب تشدید برای برابر با ۱۹/۹۷ است.

ج) تایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که معادله ارائه شده در مدل ۲ (با فشار جانبی ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع) و با مربع ضریب همبستگی ۰/۹۵ عملکرد قوی‌تری دارد و می‌توان آن را با دقت نسبتاً خوبی در محاسبات K_s به کار برد. با این حال، باید توجه داشت که این معادله تنها برای پیش‌بینی ضریب عکس‌العمل بستر (K_s) براساس آزمایش‌های سه‌محوری و در محدوده داده‌های جمع‌آوری شده و ویژگی‌های خاک مورد بررسی معتبر است.

چنانچه بعد از ارائه مدل‌های حاصل از تحلیل رگرسیون چند متغیره به منظور اعتبار سنجی مدل‌ها به سطح معناداری آن‌ها که در ستون پنجم جدول ۱ جدول ۷ ذکر شده است، توجه گردد. سطح معناداری مدل‌ها نشان می‌دهند که ۳ مدل ارائه شده در تنش‌های جانبی ۰/۷، ۳/۰ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع با سطح اعتبار به ترتیب ۷۴، ۶۷ و ۷۴ درصد فاقد اعتبار عملی هستند (و نظر به این‌که هیچ‌کدام از متغیرهای مختلف خاک در این ۳ فشار جانبی تأثیر معناداری بر ضریب عکس‌العمل بستر نداشتند) و تنها مدل ارائه شده در فشار جانبی ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع با اعتبار عملی ۹۵ درصد می‌تواند برای پیش‌بینی ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از آزمون سه محوری مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این، نتایج آماری مدل ۲ نشان داد که متغیرهای درصد عبوری از ۷۵ میکرون و شاخص خمیری به ترتیب بیش‌ترین تأثیر رگرسیونی را بر روی متغیر ضریب عکس‌العمل بستر داشتند. بنابراین معادله (۱۰) بصورت معادله نهایی (۱۳) بازنویسی شد.

$$y' = 187.300 - 4.710x_4 - 0.835x_5 \quad (13)$$

به منظور ارزیابی بیشتر میزان تطابق ضریب عکس‌العمل بستر، نتایج مدل ارائه شده با داده‌های تجربی واقعی حاصل از آزمون بارگذاری صفحه‌ای در شکل ۷ مورد مقایسه قرار گرفتند. توزیع نقاط در شکل ۷ در نزدیکی محور با زاویه ۴۵ درجه قرار دارند. مربع ضریب همبستگی در نمودار شکل ۷، مقدار ۰/۹۵ می‌باشد که نشانه تطابق عالی بین داده‌های مدل و نتایج آزمایش‌های سه‌محوری برقرار است. مقادیر فشار جانبی فوق‌نشانه‌ای از عمق تا حدود ۲۰ متر در زمین‌های حاوی خاک ریزدانه گواهی می‌دهد. این یافته برای تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در طراحی شمع‌ها که طول نسبتاً زیادی دارند و نمی‌توان در اعماق آزمایش بارگذاری صفحه‌ای را انجام داد، بسیار حائز اهمیت است. لذا این امکان فراهم شد که با دقت خوبی از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تا عمق زیاد برای محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر استفاده گردد.

نتایج بیان‌گر آن است که به دلیل عدم تأثیر معنادار برخی متغیرهای خاک (از جمله وزن مخصوص، شاخص خمیری، حد روانی و درصد عبوری از ۲ و ۷۵ میکرون) در مدل‌های رگرسیون چندمتغیره، استفاده عملی از این مدل‌ها برای تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در محدوده داده‌های جمع‌آوری شده و ویژگی‌های خاک مورد بررسی با محدودیت همراه است.

هر یک از مدل‌های رگرسیونی تنها برای یک سطح فشار جانبی تدوین شده‌اند، دامنه متغیرهای ورودی (w, LL, PI) و درصد ریزدانه‌ها) محدود و تعداد آزمایش‌ها نسبتاً کم است؛ بنابراین تعمیم نتایج به شرایط خارج از این بازه باید با احتیاط انجام شود. از این رو، انجام تحقیقات گسترده‌تر با جامعه آماری وسیع‌تر توصیه می‌شود.

د) تحلیل آماری مدل‌های ۱، ۳ و ۴ متناظر با فشارهای جانبی ۰/۷، ۳/۰ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داد که به ترتیب دارای سطوح اعتبار ۷۴، ۶۷ و ۷۴ درصد هستند. این

۵- منابع

1. Dutta, S.C. and R. Roy, *A critical review on idealization and modeling for interaction among soil–foundation–structure system*. Computers & structures, 2002. **80**(20-21): p. 1579–1594.
2. Meyerhof, G., *The ultimate bearing capacity of foundations*. Geotechnique, 1951. **2**(4): p. 301–332.
3. Al-Shayea, N.A., *Estimating the Coefficient of Subgrade Reaction in the Laboratory Using the CBR Testing Apparatus*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025. **50**(3): p. 2123–2147.
4. Sadrekarimi, J. and G.M. AKBARZAD, *comparative study of methods for determining coefficient of subgrade reaction* 2009.
5. Al-Sanad, H.A., N.F. Ismael, and R.P. Brenner, *Settlement of circular and ring plates in very dense calcareous sands*. Journal of geotechnical engineering, 1993. **119**(4): p. 622–638.
6. Elachachi, S.M., D. Breyse, and L. Houy, *Longitudinal variability of soils and structural response of sewer networks*. Computers and geotechnics, 2004. **31**(8): p. 625–641.
7. Okeagu, B. and G. Abdel-Sayed, *Coefficients of soil reaction for buried flexible conduits*. Journal of Geotechnical Engineering, 1984. **110**(7): p. 908–922.
8. Bowles, J.E. and Y. Guo, *Foundation analysis and design*. Vol. 5. 1996: McGraw-hill New York.
9. Naeini, S., R. Ziaie Moayed, and F. Allahyari, *Subgrade reaction modulus (Ks) of clayey soils based on field tests*. Journal of Engineering Geology, 2014. **8**(1): p. 2021–2046.
10. Kang, S.-S., H.-Y. Kim, and B.-A. Jang, *Correlation of in situ modulus of deformation with degree of weathering, RMR and Q-system*. Environmental earth sciences, 2013. **69**(8): p. 2671–2678.
11. Amini Ahidashti, R. and A. Hadad, *Estimation of the Coefficient of Subgrade Reaction using Small-Strain Stiffness*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2015. **47**(2): p. 67–79.
12. Salari, P., et al., *Evaluating the Subgrade Reaction Modulus Variations with Soil Grains Shape in Coarse-Grained Soils Using Genetic Algorithm*. Open Journal of Geology, 2020. **10**(2): p. 111–123.
13. Dinçer, İ., *Models to predict the deformation modulus and the coefficient of subgrade reaction for earth filling structures*. Advances in Engineering Software, 2011. **42**(4): p. 160–171.
14. Puri, A., et al., *Determining Additional Modulus of Subgrade Reaction Based on Tolerable Settlement for the Nailed-slab System Resting on Soft Clay*. International Journal of Civil and Environmental Engineering (IJCEE)-IJENS, 2012. **12**(03).
15. Asakereh, A. and M. Mossafa, *Numerical Investigation of Subgrade Reaction Coefficient in Sand Soils of Bandar Abbas City*. Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques, 2017. **7**(2): p. 15–26.
16. Barmenkova, E.V. and A.V. Matveeva, *Calculation of plates of variable rigidity on elastic foundation with variable coefficient of subgrade reaction*. Procedia Engineering, 2015. **111**: p. 97–102.
17. Alva García, F.J., L. Medina García, and M.M. de Farias, *Numerical estimation of the subgrade reaction modulus of a horizontally loaded piled raft*. Revista de la construcción, 2024. **23**(3): p. 538–553.
18. Khaiatoli, S., et al., *Estimation of the subgrade reaction modulus using field and numerical*

- analysis methods*. Journal of Civil Engineering and Structures, 2024. **8**(1): p. 1–7.
19. Koltuk, S. *Effect of soil-foundation interaction on the modulus of subgrade reaction*. in *MATEC Web of Conferences*. 2024. EDP Sciences.
 20. Koltuk, S. and S. Topçu, *Determination of Subgrade Reaction Modulus Considering the Relative Stiffnesses of Soil–Foundation Systems*. Applied Sciences, 2025. **15**(9): p. 4714.
 21. Salem, L.A., A.M. Shaban, and R.R. Almuhanha. *Predicting subgrade reaction modulus of sand soils using dynamic cone penetrometer*. in *AIP Conference Proceedings*. 2024. AIP Publishing LLC.
 22. Zarazvand, B. and J. Frankovska, *Determining the modulus of subgrade reaction for piled raft foundations by numerical modelling*, in *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. 2024, CRC Press. p. 971–974.
 23. Hafeznia , M.R., *Introduction to Research Methodology in Humanities*. 2001, Tehran: Organization for the Study and Compilation of University Humanities Books(In Persian).
 24. Habibpour, K. and R. Safari, *Comprehensive Guide to Using SPSS in Survey Research (Quantitative Data Analysis)*. Tehran. 2014, Loya Publications (In Persian).
 25. Vafaian, M., *Rock Mechanics*. 1932, Yazd: Iran University of Science and Technology, 87(In Persian).
 26. Das, B.M., Sivakugan , N., *Principles of Foundation Engineering*. Ninth Edition. 2019, Cengage Learning, Inc., USA.
 27. Taherzade Dorbaty, M.H.a.H., *Forecasts of p-y curve of PLT*, in *International Conference of Civil Engineering, Architecture and urban sustainable development*. 2013, 27 and 28 November 2013: Tabriz, Iran(In Persian).
 28. Ajallonnieyan, R., and Sedaghat, M, *application of In-Situ tests in geotechnical*. 2015, Publications (SID): Khatam Construction Headquarters (In Persian).



Experimental and Statistical Evaluation of the Subgrade Reaction Modulus of Clayey Soils from Triaxial Test Results

N. Rajaei Moghaddam^{1*}; H. Tavakoli¹; M. Bahrami¹

1- Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Received: 18 July 2025 Accepted: 03 September 2025

(*Corresponding author: nahid502@rocketmail.com)

Keywords

Modulus of subgrade reaction
Triaxial test
Plate load test
Multiple regression

Final English Extended Abstract

The modulus of subgrade reaction (K_s) is a fundamental parameter in the analysis and design of shallow and deep foundations, including strip footings, flexible raft foundations, and piles. Its accurate determination is particularly critical in large-scale engineering projects, where it can significantly influence both technical optimization and economic efficiency. The plate load test (PLT) is the most conventional and reliable method for evaluating K_s ; however, due to its high cost and time-consuming nature, its application in practical projects is often limited. This limitation highlights the need for alternative laboratory-

based approaches that are both reliable and efficient.

In this study, the potential of unconsolidated undrained triaxial tests as a substitute for estimating K_s in fine-grained clayey soils is examined. A total of 52 triaxial tests and 8 PLTs were performed, and their results were statistically analyzed and compared. The findings revealed that K_s values obtained from PLTs were consistently higher than those derived from triaxial tests. Nevertheless, strong correlations were observed between K_s and several physical and mechanical soil parameters. To enhance prediction accuracy, multiple regression analysis was employed, incorporating parameters such as density, plasticity index, and moisture content. The regression model achieved a significant correlation coefficient, confirming the feasibility of estimating K_s using triaxial test data.

The outcomes of this research demonstrate that triaxial testing, in addition to being more cost- and time-effective, can provide a reliable and practical alternative for estimating K_s in geotechnical design. By integrating triaxial test results with statistical modeling, this study offers an efficient approach for improving the estimation of the modulus of subgrade reaction, which can ultimately contribute to safer and more economical foundation design.

Summary

This study investigates the estimation of the subgrade reaction modulus (K_s) of clayey soils using triaxial test results as an alternative to the conventional but costly and time-consuming plate load test. A comprehensive program involving 52 unconsolidated undrained (UU) triaxial tests and 8 field plate load tests was conducted on fine-grained clayey soils from Kerman, Iran. Statistical and regression analyses were performed to evaluate the correlations between soil physical-mechanical properties and K_s . The results revealed that although K_s values obtained from plate load tests were generally higher than those from triaxial tests, a strong correlation exists between the two methods. A multivariate regression model demonstrated that triaxial test parameters can reliably estimate K_s , providing a practical, cost-effective tool for geotechnical design.

Introduction

The modulus of subgrade reaction is a key parameter in the analysis and design of shallow foundations, mats, and piles. Traditionally determined through plate load testing, K_s reflects soil-structure interaction but is strongly influenced by soil type, geometry, and loading conditions. Given the limitations of in-situ testing, there is growing interest in predicting K_s from laboratory-based soil parameters. Previous studies have proposed correlations using SPT, CBR, and geophysical methods. However, limited work has been conducted on directly linking K_s to triaxial test results for fine-grained clayey soils. This research addresses this gap by experimentally and statistically evaluating K_s through triaxial testing.



Methodology and Approaches

Undisturbed clayey soil samples were collected using Shelby tubes and classified as CL based on USCS. Laboratory characterization included grain size distribution, Atterberg limits, and natural moisture content. UU triaxial tests were performed under confining pressures of 0.7, 1.5, 3.0, and 4.2 kg/cm². Additionally, eight plate load tests were conducted at excavation depths of 5–7 m using a 76.2 cm diameter plate. K_s was determined from stress–strain relationships in triaxial tests and load–settlement curves in plate load tests. Statistical analyses included t-tests, F-tests, and multivariate regression to establish predictive relationships between K_s and soil parameters such as liquid limit, plasticity index, fines content, moisture content, and dry unit weight.

Results and Conclusions

(a) Independent t-tests and F-tests showed that the mean converted subgrade reaction coefficient obtained from the plate load tests is higher than the mean subgrade reaction coefficient derived from the triaxial tests. This indicates a statistically significant influence of confining pressure at different levels on the subgrade reaction coefficient.

(b) A comparison of the mean subgrade reaction coefficients revealed that the field-converted values of K_s are amplified by a factor of 19.97 compared with the results of the triaxial tests.

(c) The results of the multiple regression analysis showed that the equation proposed in Model 2 (with a confining pressure of 1.5 kg/cm²) and a coefficient of determination $R^2=0.95$ performs more strongly and can be used with relatively good accuracy in the calculation of K_s . However, it should be noted that this equation is valid only for predicting the subgrade reaction coefficient based on triaxial tests within the range of the collected data and the soil properties studied, and extrapolation beyond this range should be made with caution.

(d) Statistical analyses of Models 1, 3 and 4 corresponding to confining pressures of 0.7, 0.3 and 4.2 kg/cm², respectively, showed confidence levels of 74 %, 67 % and 74 %. These results indicate that, due to the non-significant effects of some soil variables (including unit weight, plasticity index, liquid limit and the percentage passing 2 and 75 μm) in the multiple regression models, the practical application of these models for determining the subgrade reaction coefficient within the collected data range and the studied soil characteristics is limited.
