

تعیین قابلیت اطمینان ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش‌های سه محوری خاک (مورد مطالعاتی: شهر کرمان)

ناهید رجائی‌مقدم^{۱*}، حسین توکلی^۲، محمدحسین باقری‌پور^۳، محمد بهرامی^۴

- ۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
 - ۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
 - ۳- استاد، گروه مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
 - ۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- (دریافت: شهریور ۱۳۹۵، پذیرش: دی ۱۳۹۷)

چکیده

ضریب عکس‌العمل بستر به طور گسترده‌ای در محاسبات پی سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین ضریب عکس‌العمل بستر یکی از مباحث مهم در بخش اندرکنش خاک-سازه است. عموماً مقادیری که برای این ضریب در طراحی پی و بحث بررسی احتمال خرابی سازه به کار برده می‌شود، به صورت قطعی و بدون در نظر گرفتن تحلیل قابلیت اطمینان هستند. در این مطالعه برای تعیین قابلیت اطمینان ضریب عکس‌العمل بستر از نتایج آزمایش‌های سه محوری که نتایج آنها در فرآیندهای طراحی پی سازه‌ها به کار می‌روند، استفاده شده است. برای تعیین احتمال شکست، ابتدا این ضریب از نتایج آزمایش‌های سه محوری انجام شده در آزمایشگاه استخراج شد. سپس نتایج حاصله با مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر به دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای انجام شده در محل مقایسه گردیدند. در تحلیل قابلیت اطمینان (برآورد احتمال شکست)، میزان تغییرات تابع هدف با تعیین نوع تابع توزیع و بهره‌گیری از تابع بقا مشخص شد. برای نیل به این هدف، تابع توزیع نتایج ضریب عکس‌العمل بستر حاصل از آزمایش سه محوری در چهار تنش جانبی مختلف (۰/۵، ۰/۷، ۳ و ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ترسیم شدند. سپس با استفاده از تابع توزیع تجمعی و تابع بقا میزان احتمال شکست محاسبه گردیدند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش سه محوری با احتمال شکست بیشتری نسبت به ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای می‌تواند در محاسبات طراحی سازه وارد شود.

کلید واژه‌ها

ضریب عکس‌العمل بستر، آزمایش سه محوری، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، قابلیت اطمینان، احتمال شکست

* عهده دار مکاتبات: nahid502@rocketmail.com

۱- مقدمه

لذا روابط و نمودارهای همبستگی برای تخمین پارامترها و ویژگی‌های خاک در قضاوت مهندسی باید به کار گرفته شود [۳].

در مهندسی ژئوتکنیک نیز مانند سایر شاخه‌های مهندسی، مسئله عدم قطعیت در طراحی‌ها با استفاده از ضرایب اطمینان تجربی حل شده است. اغلب پارامترهایی که در بررسی ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی وجود دارند دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که طراح قادر به پیش‌بینی آنها نیست. به عبارت دیگر پارامترهای مختلف در مکان و زمان‌های گوناگون دارای فراوانی متفاوتی هستند که خروجی‌های چندگانه و بدون الگوی مشخصی با عباراتی مانند شانس یا احتمال بیان می‌شوند. بنا براین روش‌هایی که عدم قطعیت‌ها و برآیند آن‌ها را در نظر می‌گیرند، می‌توانند بسیار با ارزش باشند و به روش‌های تعیین قابلیت اعتماد مشهورند [۴].

در تقسیم‌بندی کلی، روش‌های بررسی قابلیت اعتماد در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول: روش‌های تحلیلی مانند روش ترکیب توزیع متغیرها^۱، دسته دوم: روش‌های تقریبی مانند تخمین نقطه^۲ و مرتبه اول ممان دوم^۳ و دسته سوم: روش مونت کارلو^۴، که در این میان روش مونت کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت در پاسخ‌های به دست آمده بیش از سایر روش‌ها جهت تحلیل‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۵].

طبق اصول علمی و مهندسی باید برای ارزیابی قابلیت اعتماد ساختارهای ژئوتکنیکی (پایداری شیب‌ها)، تابع توزیع تجمعی^۵ (CDF) درزه یا تابع چگالی احتمال^۶ (PDF) تغییرات تصادفی به کار رود. در مهندسی ژئوتکنیک کاربردی هرچند CDF و PDF درزه اغلب ناشناخته است. زیرا به داده‌های آزمایش صحرایی و آزمایشگاهی بسنده می‌کند. در بیشتر موارد، تنها توزیع‌های کم حاشیه و ماتریس کواریانس شناخته می‌شود [۶]. برخی تجزیه و تحلیل‌های قابلیت اعتماد یا احتمال شکست صورت گرفته در زمینه ژئوتکنیک (در طراحی شیب‌های سنگی) انجام شده است [۷]. در این مطالعه پس از تشخیص تابع توزیع، با توجه به پارامترهای توزیع، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام به شبیه‌سازی داده‌ها نموده و سپس با استفاده از تابع توزیع تجمعی مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده، با به کارگیری تابع بقا یا تابع قابلیت

تعیین ضریب عکس‌العمل بستر (K_s) در طراحی سازه‌ها از جمله مسائل مهمی بوده که از قرن نوزدهم توجه مهندسان ژئوتکنیک را به خود جلب نموده و بنا به اهمیت آن، پژوهشگران روابط همبستگی متعددی ارائه کرده‌اند. از طرفی به واسطه ماهیت غیر همگن خاک و عدم قطعیت در محاسبه این ضریب در طراحی پی‌ها، اتکا به تنها یک عدد به عنوان ضریب عکس‌العمل بستر منطقی به نظر نمی‌رسد. بر همین اساس استفاده از روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد که در مهندسی ژئوتکنیک جایگاه ویژه‌ای پیدا نموده است، مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل چند فازی بودن و هم‌چنین وجود متغیرهای ژئوتکنیکی وابسته به هم در خاک، برآورد واقعی و دقیق این پارامتر کار دشواری است.

مقدار K_s یکی از پارامترهای وابسته به ویژگی‌های الاستیک خاک که در محاسبه ظرفیت باربری و تخمین نشست پی‌های مستقر بر خاک یا سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب به طور متداول با استفاده از آزمایش بارگذاری صحرایی در محل اجرای پی به دست می‌آید. از این‌رو اثر محیط خاک با سیستم ساده‌تری که در مسائل مربوط به اندرکنش خاک-سازه مدل می‌شود، جایگزین می‌گردد [۱]. محققین تا کنون ضریب عکس‌العمل بستر را با استفاده از روابط همبستگی بین نتایج آزمایش سه محوری، CBR، تحکیم و رابطه‌های تئوریک و تجربی ارائه نمایند [۲]. بدیهی است آزمایش‌های صحرایی می‌توانند به نتایج دقیق‌تری منتهی شوند. اما این نوع آزمایش‌ها هزینه بیشتری داشته و زمان‌بر هم هستند و در بسیاری موارد انجام آنها مشکل و بعضاً با توجه به شرایط محل مورد مطالعه غیرممکن می‌باشند. در همین راستا پژوهشگران سعی نموده‌اند با مقایسه نتایج آزمایش‌های صحرایی در محل و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های در مقیاس کوچک، رابطه‌ای برقرار نمایند. در این پژوهش جهت نیل به اهداف تعریف‌شده از لحاظ آماری، استفاده از نتایج آزمایش سه محوری به جای بارگذاری صفحه‌ای پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفت. خاک موجود در طبیعت به ندرت همگن، ایزوتروپیک (همسان‌گرد) است. هم‌چنین رفتار خاک تحت بارهای مختلف از بخش الاستیک عبور کرده و عمدتاً رفتار الاستوپلاستیک از خود بروز می‌دهد.

۲-۱- تعداد نمونه و روش نمونه‌گیری صحرائی

تعداد ۱۰۰ عدد نمونه صحرائی^۷ خاک با استفاده از لوله‌ای استوانه‌ای به روش دست نخورده از محل برداشت شد. در شکل ۱ نقاط نمونه‌برداری در نقشه شهر کرمان مشخص شده‌است.

برای تهیه نمونه صحرائی ابتدا گودالی به قطر ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع بیش از ۸ سانتی‌متر به نحوی حفر شد که در این عمق، در وسط گودال لوله نوک تیز استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر با فشار به داخل خاک رانده شد. وقتی که نمونه درون استوانه نمونه‌گیر قرار گرفت، خاک اطراف استوانه در تمام ارتفاع آن تخلیه شد (شکل ۲). در نهایت استوانه نمونه‌گیر از خاک زیر آن با بریدن خاک با یک سیم نازک جدا شد. استوانه نمونه درون پلاستیک قرار گرفته و به منظور حفظ رطوبت و جلوگیری از دست‌خوردگی پیچیده و فوراً به آزمایشگاه منتقل شد.

اعتماد، احتمال آن که متغیر در مقداری بزرگ‌تر از حد بحرانی X قرار گیرد، به دست آورده شد (مفهوم احتمال شکست).

۲- مشخصات خاک

محل نمونه‌برداری خاک، شهر کرمان در محدوده جغرافیایی $57^{\circ} 5'$ طول شرقی و $18^{\circ} 30'$ عرض شمالی واقع شده است. دارای آب و هوای متغیر به طوری که زمستان‌های آن سرد تا شدیداً سرد و تابستان‌های آن معتدل و نیمه گرم است. میانگین بارندگی سالیانه آن ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه از ۲ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. محدوده مورد بررسی شهر کرمان از مناطق مسکونی و تجاری بود [۸]. خاک مورد مطالعه در این محل عموماً از نوع خاک‌های رس‌دار بوده که در طبقه‌بندی متحد (یونیفاید) در رده CL قرار می‌گیرد. خاک محل عموماً ریزدانه با خاصیت خمیری کم است.



شکل ۱: محدوده مورد بررسی شهر کرمان (۱- خیابان شهید مصطفی خمینی، ۲- میدان قرنی، ۳- خیابان زهره کرمانی، ۴- بلوار شفا، ۵- پارک مطهری) [۹]

۲-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

آزمایشگاهی^۸ دست‌نخورده برای انجام آزمایش سه محوری خاک تهیه شدند.

سپس نمونه‌های آزمایشگاهی طبق روش استاندارد آزمایش تعیین سه محوری فشاری تحکیم‌نشده زهکشی‌نشده خاک‌های چسبنده طبق ASTM D:2850، مورد آزمایش قرار گرفتند. در این روش آزمایش، نمونه دست‌نخورده در محفظه سه محوری تحت اثر فشار سیال

در آزمایشگاه لوله‌های تو خالی فلزی نوک تیز به قطر $3/81$ و ارتفاع $7/62$ سانتی‌متر درون استوانه نمونه‌گیر صحرائی با استفاده از ابزار رانش فروبرده شدند تا لوله‌ها از خاک دست‌نخورده پر شوند. به این ترتیب نمونه‌های

بستر به دست آمد. برای تعیین سایر مشخصات فیزیکی از آزمایش‌های زیر استفاده شد.

- آزمایش دانه‌بندی (ASTM D422)
- آزمایش تعیین حدود اتربرگ شامل تعیین حد روانی و حد خمیری (ASTM D423 & D424)
- آزمایش تعیین درصد رطوبت (ASTM D2216)
- آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک (ASTM D1557)

مشخصات مکانیکی خاک و همچنین مقادیر بیشینه تنش تفاضلی در آزمایش سه محوری، که برای محاسبات نهایی مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۱ ارائه شده است. تغییرات مشخصات فیزیکی نمونه‌ها که برای مثال تعدادی از آنها در جدول ۱ آورده شد، شامل: درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها بین ۱۶ تا ۳۲/۶، درصد عبوری از ۷۵ میکرون بین ۶۰ تا ۹۹، درصد عبوری از ۲ میکرون ۹ تا ۴۶، وزن واحد حجم خشک ۱/۲۹ تا ۱/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، حد خمیری ۸ تا ۱۳، حد مایع ۲۸ تا ۳۴ است.

۲-۳- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در محل

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در ۸ نقطه در غرب شهر کرمان بر اساس استاندارد *ASTM D1194* انجام شد. (نقطه شماره ۵ شکل ۱). از نتایج این آزمایش ضریب عکس‌العمل بستر خاک محاسبه شد. این آزمایش در نقاط مشخص شده و در عمق ۵ تا ۷ متری از سطح طبیعی زمین (زمین گودبرداری شده) بودند. صفحه مورد آزمایش به قطر ۳۰ اینچ (۷۶/۲ سانتی‌متر) و در عمق ۵ سانتی‌متری متر از سطح تسطیح شده (منظور تأمین گیرداری نسبی) قرار گرفته بود. ابتدا بار نشاننده خاک اعمال و بعد از صفر کردن آن سایر پله‌های بارگذاری طبق استاندارد تأمین گردید. در هر پله بارگذاری، قرائت مسافت‌سنج‌های اندازه‌گیری نشست تدریجی انجام شد.

بعد از هر افزایش بار، زمان کافی جهت وقوع نشست اجازه داده شد (حدود ۴۰ دقیقه). قرائت‌های جابجایی قائم صفحه در زمان‌های معین تا وقتی که نشست صفحه متوقف گردید یا روند آن کاهش نشان داد، ادامه داشت. افزایش بار تا رسیدن بیشینه بار مورد نظر ادامه یافت. با رسم نمودار

(آب) محصورکننده قرار می‌گیرد، بار فشاری محوری در شرایط کنترل کرنش به تدریج اضافه می‌شود تا این که نمونه به گسیختگی برسد (شکل ۳). در آزمایش سه محوری تند اجازه زهکشی به نمونه در حین آزمایش داده نمی‌شود.



شکل ۲: تهیه نمونه دست نخورده توسط لوله استوانه‌ای شکل برای آزمایش سه محوری خاک



شکل ۳: دستگاه آزمایش سه محوری

داده‌های برداشت شده در حین انجام آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده با ابعاد نمونه استاندارد $3/81\text{ cm} \times 7/62\text{ cm}$ شامل: تغییرات ارتفاع نمونه، ϵ مقدار تغییر شکل نسبی (کرنش) نمونه خاک، قرائت نیروسنج برای میزان اعمال بار فشاری محوری در تنش‌های جانبی متفاوت $0/5$ ، $0/7$ ، 3 و $4/2$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و مقدار تنش تفاضلی $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ بودند. با این اطلاعات منحنی تنش تفاضلی بر حسب جابجایی محوری قابل ترسیم شد. از رسم شیب این منحنی ضریب عکس‌العمل

فشار- نشست و محاسبه شیب نمودار مقدار ضریب عکس‌العمل بستر خاک تعیین شد (شکل ۴).

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و ضریب عکس‌العمل بستر مربوط به تعدادی (۱۰) نمونه آزمایش (از ۱۰۰ نمونه) سه محوری در تنش جانبی 2 kg/cm^2

شماره نمونه	درصد ریزتر از ۲ میکرون	درصد ریزتر از ۷۵ میکرون	PI	LL	ω (%)	γ_d (g/cm^3)	$\Delta\sigma_{1\max}$ (kg/cm^2)
۳۹۲۰۳۵	۴۶	۸۹	۱۳	۳۳	۲۶/۹	۱/۵۱	۲/۲
۳۹۲۱۰۸	۲۵	۷۴	۱۱	۳۱	۳۰/۴	۱/۴۷	۱/۸
۳۹۲۱۳۶	۳۱	۸۲	۹	۲۹	۳۰/۳	۱/۵۱	۳/۵۱
۴۳۹۰۱۳	۱۷	۸۲	۱۰	۳۲	۱۹/۹	۱/۵۳	۱/۳۶
۴۳۰۱۶	۲۲	۸۸	۱۱	۳۲	۲۲	۱/۵۲	۱/۷۱
۴۳۹۰۳۵	۱۶	۸۲	۱۰	۳۲	۱۹/۶	۱/۴۴	۲/۲
۴۴۴۴۰	۲۸	۹۳	۱۳	۳۴	۲۴/۳	۱/۵۸	۲/۰۴
۴۳۹۰۵۴	۲۰	۸۰	۱۰	۳۰	۲۱/۳	۱/۶۴	۱/۷
۴۳۹۰۵۶	۱۴	۷۸	۹	۳۰	۱۰	۱/۵۴	۱/۹۶
۴۳۹۰۷۰	۱۸	۸۱	۱۲	۳۱	۱۶/۲	۱/۵۹	۲/۲۲

*نمادهای مورد استفاده در جدول (۱) به موارد زیر اشاره می‌کنند: LL, PI, ω (%), γ_d (g/cm^3), $\Delta\sigma_{1\max}$ (kg/cm^2): به ترتیب حد خمیری، حد مایع، درصد رطوبت، وزن مخصوص خشک، تنش تفاضلی بیشینه.

$$k_s = \frac{\Delta q}{\Delta s} = \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta h} \quad (1)$$

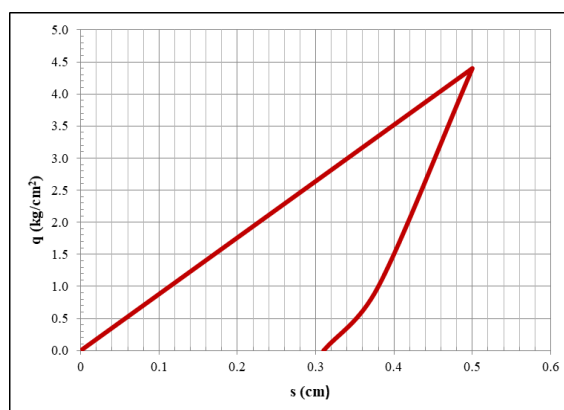
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (2)$$

که در این روابط Δq : فشار تماسی (کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع)، Δs : نشست (سانتی‌متر) و k_s : ضریب عکس‌العمل بستر (کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

۳-۱- تعیین ضریب عکس‌العمل بستر با روش پیشنهادی

برای محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش‌های سه محوری با توجه به رابطه‌های (۱) و (۲)، نمودارهای تنش تفاضلی- کرنش در دستگاه تنش تفاضلی- تغییرات ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار اکسل ترسیم شد. شیب منحنی در منحنی تنش- تغییرات ارتفاع نمایشگر k_s است. تعداد ۱۰۰ منحنی ترسیم گردید و سپس با استفاده تابع بقا میزان احتمال شکست ضریب عکس‌العمل بستر محاسبه شده، تعیین گردید.

از بین ۳۰۰ نمونه صحرایی ۱۰۰ نمونه جهت تحلیل انتخاب شدند. برای به دست آوردن k_s از نتایج آزمایش سه محوری تحکیم‌نشده زهکشی‌نشده با ترسیم تنش در مقابل تغییرات ارتفاع، که به طور کلی غیر خطی است، از شیب سکانتی استفاده شد (شکل ۴). شیب سکانتی توسط مبدأ



شکل ۴: نمودار فشار- نشست از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صحرایی (یکی از ۸ نقطه)

۳- تجزیه و تحلیل و محاسبات

یکی از رایج‌ترین مدل‌های تعیین ضریب عکس‌العمل بستر، روش وینکلر است که در بین اکثر طراحان شناخته شده است. وی محیط خاک را مجموعه‌ای از فشرده یکسان الاستیک خطی، مستقل از دو طرف، با فاصله نزدیک ولی مجزا از هم در نظر گرفته است. روش وینکلر از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای پیروی می‌کند که رابطه (۱) بیانگر آن است [۱۰] و مقدار Δh (تغییرات نشست) در رابطه (۱) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

الف- در مقاومت بیشینه، تغییر شکل نسبی افزایش داشت.

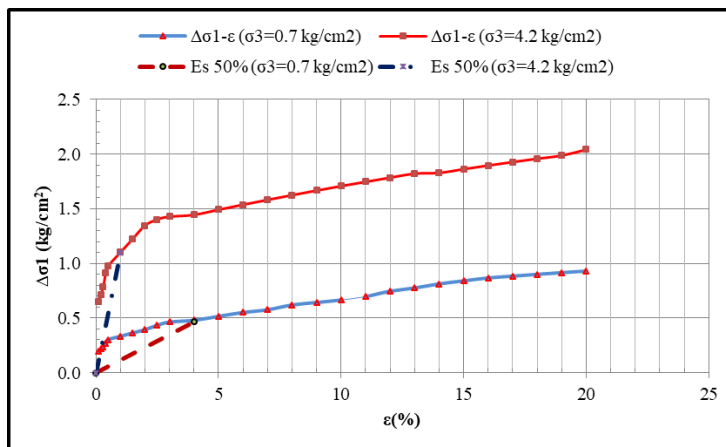
ب- دامنه تغییر شکل نسبی غیرالاستیک قبل از شکست افزایش پیدا کرد.

ج- مقدار مدول الاستیسیته افزایش داشت [۱۲].

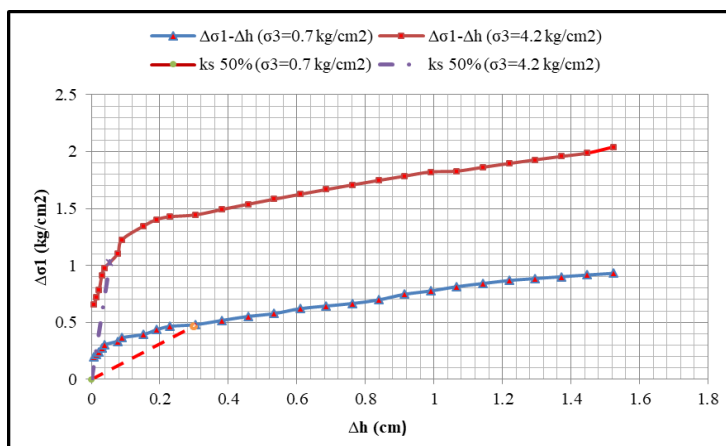
د- مدول عکس‌العمل بستر k_s افزایش یافت.

($\Delta h=0$) و در تنش تفاضلی ۵۰ درصد یعنی ($\Delta\sigma_{1max}/2$) تعریف می‌شود [۱۱]. مدول الاستیسیته نیز به طریق مشابه با استفاده از شیب سکانتی محاسبه شده است (شکل ۵).

نتایج زیر با افزایش تنش همه جانبه در شرایط آزمایش سه محوری در نمونه رس شهر کرمان مشاهده شد (شکل ۵ و ۶)؛



شکل ۵: نمودار تنش تفاضلی - کرنش نسبی از آزمایش سه محوری خاک رس تحکیم نیافته زهکشی نشده



شکل ۶: نمودار تنش تفاضلی - تغییرات طول از آزمایش سه محوری خاک رس تحکیم نیافته زهکشی نشده

هندسی سیستم انتقال بار و حتی نوع بار وارده نیز وابسته دانست [۱۳] و هم چنین می‌توان آن را بر اساس پژوهش صورت گرفته روی رس‌های فوق تحکیم یافته و سفت لندن، تفسیر کرد که نشان می‌دهد تکرارپذیری فشار بارگذاری نهایی در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای نسبت به آزمایش سه محوری زهکشی نشده بسیار بیشتر است [۱۴]. ربط داد. به همین دلیل با کوچک‌بودن قطر صفحه بارگذاری (مشخصات هندسی سیستم انتقال بار) در آزمایش سه محوری و عدم تکرارپذیری فشار بارگذاری نهایی، مقادیر محاسبه شده حاصل از آزمایش سه محوری

۳-۲- بررسی آمار توصیفی ضریب عکس‌العمل بستر

در جدول ۲ تغییرات ضریب محاسبه شده از آزمایش‌های سه محوری در تنش‌های جانبی متفاوت و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ارائه شده است. تغییرات ضریب عکس‌العمل حاصل از آزمایش‌های سه محوری دامنه بیشتری را با انحراف معیار بزرگ‌تری در بر دارد در حالی که نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای دامنه تغییرات کمتر با انحراف معیار کمتری را نشان می‌دهد. با صرف‌نظر از نوع خاک و دانه‌بندی آن که در تمام محدوده مورد بررسی یکسان بوده، دلیل این اختلاف را می‌توان به مشخصات

در اغلب موارد مقادیری بیش تر از آزمایش بارگذاری صفحه ای را نشان می دهد.

جدول ۲: مقادیر ضریب عکس العمل بستر در تحلیل احتمالاتی

ردیف	متغیر ضریب عکس العمل بستر k_s	گروه	دامنه تغییرات	میانگین	انحراف معیار
۱	تنش جانبی ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	۱	۱/۲-۳۷/۷	۱۰/۷	۱۱/۶
	تنش جانبی ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	۲	۱-۳۵/۸	۸/۷	۱۰
	تنش جانبی ۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	۳	۲/۸-۱۲/۷	۷/۵	۳/۶
	تنش جانبی ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	۴	۲/۳-۴۹/۶	۱۱/۳	۱۲
۲	آزمایش بارگذاری صفحه ای	۵	۳/۵-۸	۵/۸	۱/۶

متغیر به صورت تصادفی یک مقدار تولید شده و سیستم بر اساس این مقادیر تولید شده و مقادیر متغیرهای ورودی قطعی، به صورت قطعی شبیه سازی می گردد. با تکرار زیاد این فرآیند، خصوصیات آماری متغیرهای خروجی چون میانگین، انحراف معیار و تابع توزیع احتمالی آنها قابل برآورد است. برای دستیابی به مشخصات تابع توزیع فراوانی و نیز تابع چگالی احتمال همیشه لازم نیست که تمام اطلاعات مربوط به تابع را دقیقاً در اختیار داشت. تعریف پارامترهای توزیع یا خصوصیات آماری آن می تواند تا حد زیادی کافی باشد. بنابراین در اینجا ابتدا به معرفی تابعهای توزیع استفاده شده در این مقاله و پارامترهای آنها پرداخته شده است که با توجه به این تابعها و پارامترهای مشخص شده در جدول ۳ تابعهای برازش شده مشخص می شود (جدول ۴).

۳-۳- تعیین منحنی های توزیع ضریب عکس العمل بستر خاک شهر کرمان

عدم قطعیت می تواند در اندازه گیری متغیرها، در تخمین پارامترها یا در فرآیندهای موجود در مدل رخ دهد. عدم توجه به تغییرات متغیرهای غیرقطعی مؤثر در پارامترهای سازه باعث افزایش هزینه های اجرا و نگهداری از سازه، کاهش کارایی سازه در دوران بهره برداری و کاهش عمر مفید سازه می شود. از این رو آشنایی با روش های بررسی عدم قطعیت در محاسبات مربوط به طراحی ضروری به نظر می رسد. روش های شبیه سازی مونت کارلو از مهم ترین و پرکاربردترین روش ها در تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان در بسیاری از علوم مهندسی خصوصاً مهندسی ژئوتکنیک است. در این روش با توجه به خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی سیستم، برای هر

جدول ۳: توزیع های آماری مربوط به داده های آزمایشگاهی در ردیف های یک تا چهار و صحرایی در ردیف پنجم

ردیف	شماره شکل	نوع آزمایش	نوع توزیع	پارامترهای توزیع
۱	۷	آزمایش سه محوری خاک در تنش جانبی ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	بار	$k = 0.173$ $\alpha = 4.436$ $\beta = 1.742$ $\gamma = 0$
۲	۸	آزمایش سه محوری خاک در تنش جانبی ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	ویبول سه پارامتری	$\alpha = 0.595$ $\beta = 6.7$ $\gamma = 0.98$
۳	۹	آزمایش سه محوری خاک در تنش جانبی ۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	جانسون SB	$\lambda = 10.983$ $\xi = 2.727$ $\gamma = 0.221$ $\delta = 0.452$
۴	۱۰	آزمایش سه محوری خاک در تنش جانبی ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع	بار	$k = 0.328$ $\alpha = 4.190$ $\beta = 4.21$ $\gamma = 0$
۵	۱۱	آزمایش بارگذاری صفحه ای	جانسون SB	$\lambda = 5.405$ $\xi = 3.168$ $\gamma = 0.069$ $\delta = 0.556$

جدول ۴: توابع توزیع برازش شده

ردیف	شماره شکل	تابع توزیع
۱	۷	$f(x) = \frac{0.767 \left(\frac{x}{1.742} \right)^{3.436}}{1.742 \left(1 + \left(\frac{x}{1.742} \right)^{4.436} \right)^{1.173}}$
۲	۸	$f(x) = 0.089 \left(\frac{x-0.98}{6.7} \right)^{-0.405} \exp \left(- \left(\frac{x-0.98}{6.7} \right)^{0.595} \right)$
۳	۹	$f(x) = \frac{0.452}{10.983\sqrt{2\pi}z(1-z)} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(0.221 + 0.452 \ln \left(\frac{z}{1-z} \right) \right)^2 \right)$ $z \equiv \frac{x-\xi}{\lambda} \& \Phi \text{isLaplaceIntegral}$
۴	۱۰	$f(x) = \frac{1.374 \left(\frac{x}{4.21} \right)^{3.19}}{4.21 \left(1 + \left(\frac{x}{4.21} \right)^{4.19} \right)^{1.328}}$
۵	۱۱	$f(x) = \frac{0.556}{5.405\sqrt{2\pi}z(1-z)} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(0.069 + 0.556 \ln \left(\frac{z}{1-z} \right) \right)^2 \right)$ $z \equiv \frac{x-\xi}{\lambda} \& \Phi \text{isLaplaceIntegral}$

۳-۳-۱- تابع توزیع بار

۳-۳-۲- تابع توزیع جانسون SB

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda \sqrt{2\pi}z(1-z)} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\gamma + \delta \ln \left(\frac{z}{1-z} \right) \right)^2 \right), z \equiv \frac{x-\xi}{\lambda}$$

δ ، γ و λ : پارامترهای شکل
 ξ : پارامتر موقعیت

تابع توزیع احتمال متغیر پیوسته ضریب عکس‌العمل بستر که به ترتیب در تنش‌های جانبی ۰/۵، ۰/۷، ۳، ۴/۲ کیلوگرم بر مترمربع در شکل‌های ۷ تا ۱۱ داده شده است. در این شکل‌ها محور x ، مقادیر k_s و محور قائم $f(x)$ ، تابع توزیع احتمال است. تابع توزیع احتمال ضریب عکس‌العمل بستر با استفاده از تست برازش در تنش جانبی kg/cm^2 ۰/۵ از تابع توزیع بور پیروی می‌کند (شکل ۷). این توزیع دارای چهار پارامتر است که پارامتر موقعیت آن مقدار صفر را به خود اختصاص داده است (جدول ۳). این توزیع از روندی نزولی پیروی می‌کند. همچنین توزیعی نمایی از نوع منفی است، مقادیر کوچک دارای فراوانی بیشتر و مقادیر بزرگ دارای فراوانی کمتری هستند و هر چه متغیر مورد

$$f(x) = \frac{\alpha K \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha} \right)^{K+1}}$$

α و K : پارامترهای شکل

β : پارامتر مقیاس

γ : پارامتر موقعیت

۳-۳-۲- تابع ویبول سه پارامتری

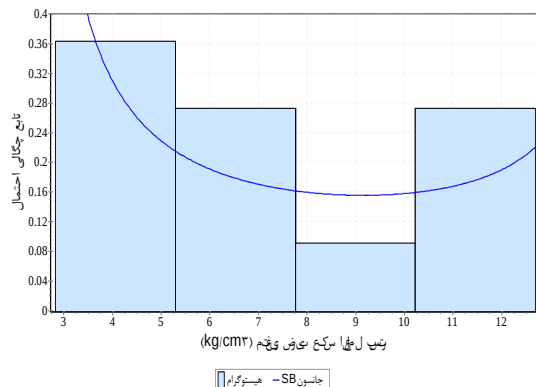
$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left(- \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha} \right)$$

α : پارامتر شکل

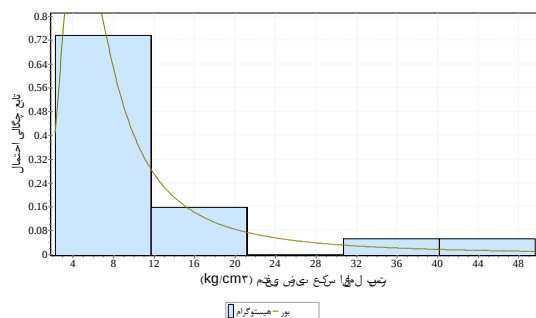
β : پارامتر مقیاس

γ : پارامتر موقعیت

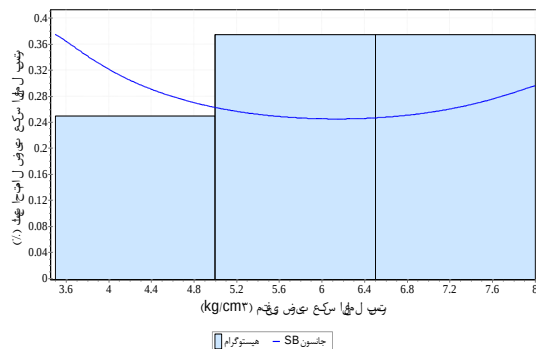
سانتی‌مترمکعب با احتمال 0.02 تغییر می‌کند که تمرکز داده‌ها در مقادیر کوچک‌تر k_s بیش‌تر است.



شکل ۹: تابع توزیع احتمال جانسون SB ضریب عکس‌العمل بستر در تنش جانبی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع



شکل ۱۰: تابع توزیع احتمال بور ضریب عکس‌العمل بستر در تنش جانبی ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع

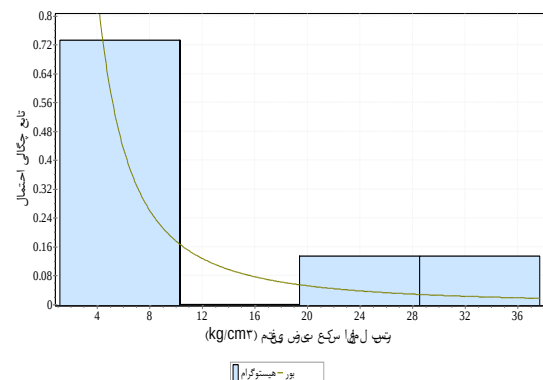


شکل ۱۱: تابع توزیع احتمال جانسون SB ضریب عکس‌العمل بستر از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (در تنش جانبی تقریباً صفر)

۳-۴- احتمال شکست یا موفقیت سازه در اثر بارگذاری خاک

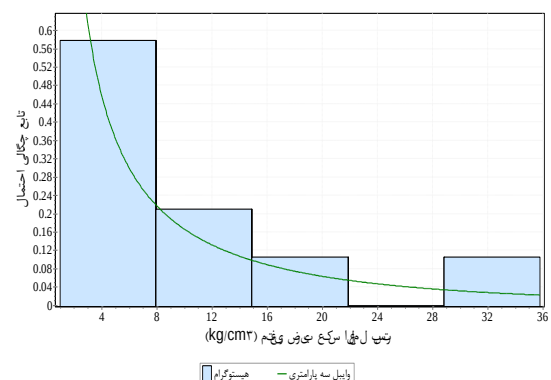
برای تحلیل قابلیت اطمینان یک سیستم لازم است ورودی و نیز عکس‌العمل خروجی سیستم تعیین شود. در بعضی از سیستم‌های مهندسی انجام این امر به سادگی امکان‌پذیر است. به عنوان مثال در مورد یک سازه بستگی

نظر به سمت عدد بزرگ‌تری میل می‌کند تعداد نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تابع توزیع احتمال بور ضریب عکس‌العمل بستر در تنش جانبی ۵/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع

تست برازش تابع توزیع احتمال ضریب عکس‌العمل بستر در تنش جانبی ۷/۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع از توزیع ویبول سه پارامتری پیروی می‌کند (شکل ۸). این نوع توزیع از مقدار k_s بین 0.02 تا 0.64 و از روندی نزولی تبعیت می‌کند.



شکل ۸: تابع توزیع احتمال ویبول ضریب عکس‌العمل بستر در تنش جانبی ۷/۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع

مقادیر k_s در تنش‌های جانبی ۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و تقریباً صفر در شکل‌های ۹ و ۱۱ از توزیع جانسون پیروی می‌کنند. این توزیع دارای چهار پارامتر است و در کل از یک ریتم یکنواخت پیروی می‌کند و به صورت محسوسی از یک روند صعودی و یا نزولی پیروی نمی‌کند. k_s در تنش جانبی ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در شکل ۱۰ همانند شکل ۷ از توزیع بور پیروی می‌کند که روند آن به این صورت است که از مقدار k_s از ۲/۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب با احتمال 0.39 تا 49.5 کیلوگرم بر

$$k_s = k_{s1} \frac{1}{B} \quad (۴)$$

که در آن؛

k_s : ضریب عکس‌العمل بستر برای صفحه مورد نظر،
 k_{s1} : ضریب عکس‌العمل برای صفحه‌ای مربعی یا
 دایره‌ای به قطر ۱ فوت (۰/۳ متر)، B : عرض پی (بر حسب
 متر).

رابطه (۴) در این پژوهش به این صورت بازنویسی
 می‌شود:

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

بنابراین ضریب عکس‌العمل برای صفحه ۳/۸۱
 سانتی‌متر برابر است با؛

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

شبیه‌سازی داده‌ها با استفاده از روش مونت کارلو به
 تعداد ۵۰۰۰ داده شبیه‌سازی گردید که تابع‌های توزیع
 تجمعی مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی
 شبیه‌سازی شده، ترسیم گردید (شکل‌های ۱۲ تا ۱۶). در
 این شکل‌ها محور افقی متغیر ضریب عکس‌العمل بستر و
 محور قائم مقدار تابع توزیع تجمعی را نشان می‌دهد که
 طبق آنها مقدار بحرانی (همان ۱۴۰ کیلوگرم بر
 سانتی‌مترمکعب برای آزمایش سه محوری و ۷ کیلوگرم بر
 سانتی‌مترمکعب برای آزمایش بارگذاری صفحه‌ای) که با
 خطوط نقطه چین مشخص شده قرائت می‌شود. نتایج
 حاصل با توجه به رابطه (۲) و قرائت نقطه متناظر در
 تابع‌های توزیع تجمعی رسم شده در جدول ۵ آورده شده
 است. نتیجه آنکه احتمال شکست ضریب عکس‌العمل بستر
 در ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب برای صفحه ۳/۸۱
 سانتی‌متر از آزمایش‌های سه محوری از ۹۰ تا ۹۸ درصد
 متغیر است، اما در آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای ۷۰
 درصد محاسبه شده است.

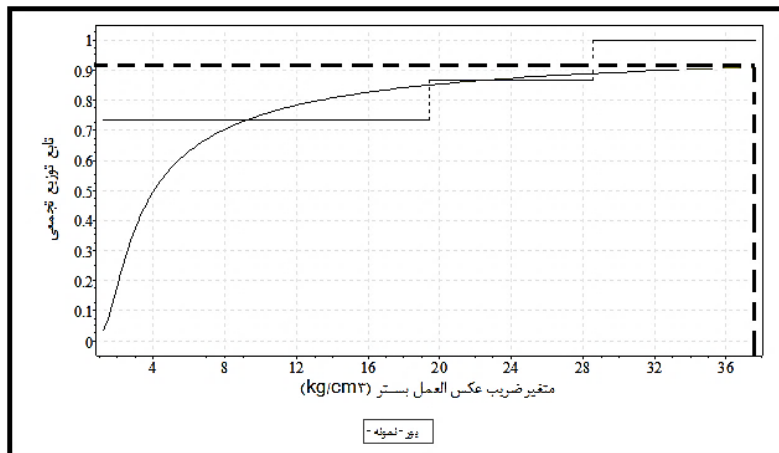
به بیشینه بارهای وارده به سازه در طول عمر مفید آن و
 ظرفیت باربری یا مقاومت آن سازه و اجرای آن دارد. از
 آنجایی که پیش‌بینی بیشینه بار وارده و همچنین ظرفیت
 باربری واقعی سازه همراه با عدم قطعیت است، مهندسين
 نمی‌توانند از ایمنی سازه به طور کامل مطمئن باشند،
 بنابراین باید از مفاهیم احتمالاتی استفاده شود. بر اساس
 این مفاهیم، احتمال شکست یک سیستم تحت شرایط
 عملکردی خاص در طول عمر مفید آن، بیانگر ریسک آن
 در مقابل مقدار بار بیش از ظرفیت است. در نتیجه مشاهده
 می‌شود که برای تحلیل قابلیت اطمینان یک سیستم در
 درجه اول باید عدم قطعیت‌های مربوط به آن بررسی شده و
 سپس تحلیل اعتمادپذیری انجام گیرد.

احتمال شکست یک سازه عبارت از عدم توانایی حمل
 بار توسط آن سازه است. لذا در محاسبه احتمال شکست،
 ظرفیت باربری اجزاء سازه که مقاومت آن توسط
 آزمایش‌های مکانیک خاک و سنگ، تعیین می‌شود. در
 اینجا ظرفیت قابل قبول k_s برای محدوده مورد مطالعه از
 شهر کرمان طبق آزمایش‌های بارگذاری، برابر ۶ تا ۸
 کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب تعیین شد که به طور میانگین
 ۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب منظور شد. لذا با توجه به
 توزیع توابع آماری k_s خاک (مقدار قابلیت اعتماد) طبق
 رابطه (۳) عبارت است از:

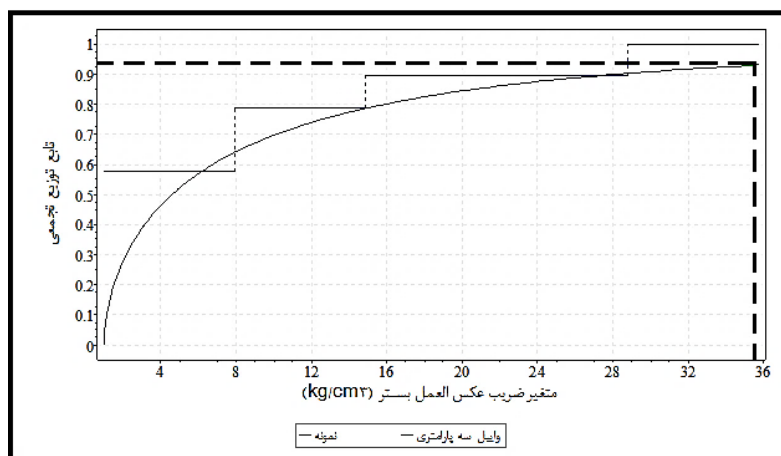
$$S = 1 - F(k_s) \quad (۳)$$

که در آن؛

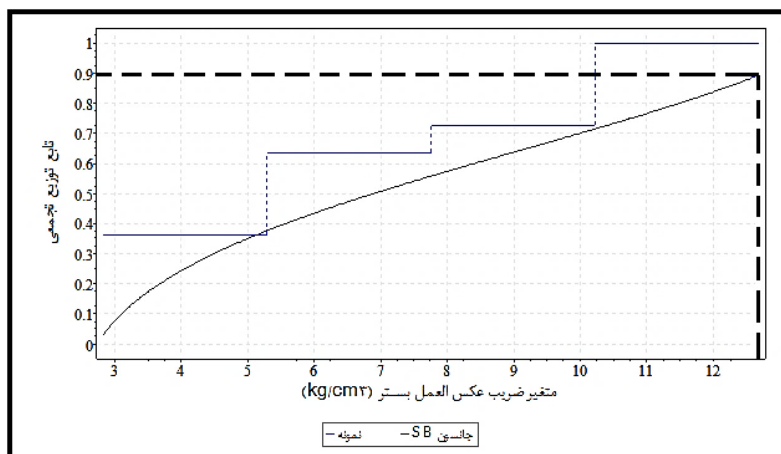
k_s : مقدار بحرانی تعریف شده برای ضریب
 عکس‌العمل بستر، $F(k_s)$: تابع توزیع تجمعی، S : مقدار
 قابلیت اعتماد (احتمال شکست سازه) [۱۵] است. البته
 ذکر این نکته ضروری است که مقدار $k_s = 7 \text{ kg/cm}^3$
 تعیین شده برای ضریب عکس‌العمل بستر برای صفحه‌ای به
 قطر ۳۰ اینچ (۷۶/۲ سانتی‌متر) است که طبق رابطه ۴
 (برای خاک‌های رس) به ضریب عکس‌العملی برای صفحه
 ۳/۸۱ سانتی‌متر تبدیل می‌شود.



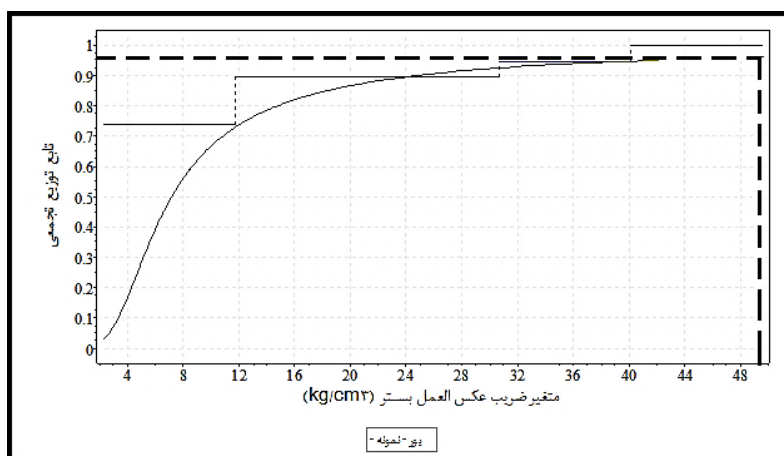
شکل ۱۲: تابع توزیع تجمعی مربوط به توزیع آماری بور در تنش جانبی ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



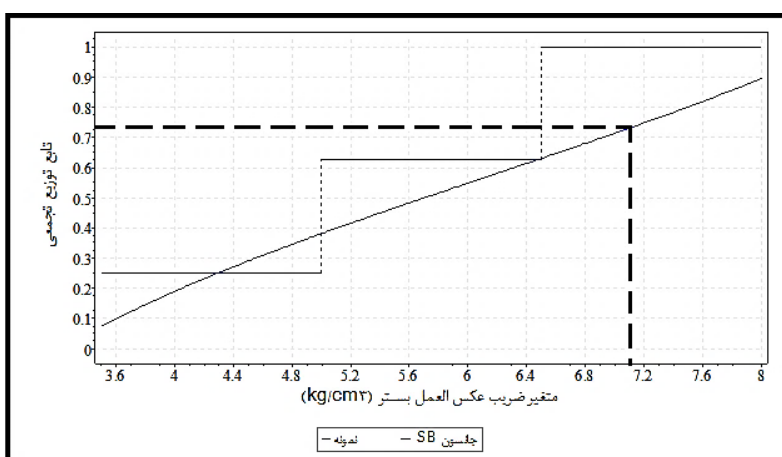
شکل ۱۳: تابع توزیع تجمعی وایبول در تنش جانبی ۰/۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۱۴: تابع توزیع تجمعی جانسون SB در تنش جانبی ۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۱۵: تابع توزیع تجمعی بور در تنش جانبی ۴/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع



شکل ۱۶: تابع توزیع تجمعی جانشون SB برای آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (در تنش جانبی تقریباً صفر)

جدول ۵: احتمال شکست باربری خاک در به ضریب عکس العمل ۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب با تابع‌های توزیع بور، ویبول، جانشون

شماره آزمایش	نوع آزمایش	نوع توزیع	احتمال شکست $F(x)$
۱	در تنش جانبی ۰/۵	بور	۰/۹
۲	در تنش جانبی ۰/۷	وایبل سه پارامتری	۰/۹۲۵
۳	در تنش جانبی ۳	جانشون SB	۰/۹
۴	در تنش جانبی ۴/۲	بور	۰/۹۷۵
۵	بارگذاری صفحه‌ای	جانشون SB	۰/۷۲۵

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای با استفاده از آمار توصیفی پرداخته شد. در نهایت مقایسه احتمال شکست در دو نوع آزمایش (سه محوری و بارگذاری صفحه‌ای) با استفاده از تابع بقا صورت گرفت. نتایج زیر از مطالعه به دست آمد:

- ضریب عکس‌العمل آزمایش‌های سه محوری دامنه تغییرات و انحراف معیار بزرگ‌تری را در برمی‌گیرد در حالی که آزمایش بارگذاری صفحه‌ای دامنه تغییرات کمتر با انحراف معیار کمتری را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های سه محوری خاک رس بر روی تعداد یک‌صد نمونه در شهر کرمان انجام پذیرفت و ضریب k_3 بین ۱ تا ۴۹/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. همچنین آزمایش بارگذاری صفحه‌ای مقدار این ضریب را ۳/۵ تا ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب به دست داد که در مقایسه مقادیر حاصل از آزمایش سه محوری با نتایج

[11] Naeini, S.A., Ziaie Moayed, R. and Allahyari, F. (2014). "Subgrade Reaction Modulus (Ks) of Clayey Soils Based on Field Test". Journal of Engineering, Vol.8, No.1, pp. 2021-45.

[12] Vafaian, M. (1932). "Rock Mechanics". Yazd: Iran University of Science and Technology, 87 (In Persian).

[13] Taherzade Torbaty, M. Hajeyannia and Hodhidi, M. (2013). "Forecasts of p-y curve of PLT "International Conference of Civil Engineering, Architecture and urban sustainable development, 27 and 28 November 2013, Tabriz, Iran (In Persian).

[14] Ajallonnienyan, R., & Sedaghat, M. (2015). "Application of Situ tests in geotechnical". Publications (SID), Khatam Construction Headquarters (In Persian).

[15] <http://www.mathwave.com/help/easyfit/html/analyses/fitting/manual.html>. Accessed July 15, 2016.

-
- 1 - Jointed Distribution
 - 2 - PointEstimation
 - 3 - First Order Second Moment
 - 4 - MontCarlo Method
 - 5 - Cumulative distribution function
 - 6 - Probability density function
 - 7 - Sample
 - 8 - Specimen

- احتمال شکست در توزیع های آزمایش سه محوری مورد نظر در $k_s = \gamma \text{kg/cm}^3$ از ۹۰ تا ۹۸ درصد متغیر است و در مورد آزمایش بارگذاری صفحه ای ۷۲/۵ درصد است.

مراجع

[1] Dutta, S. C., and Roy, R., (2002). "A Critical review on idalization and modeling for interaction among soil-foundaton structure system". Computers and structures, Vol. 80, p.p. 1576-94.

[2] Sadrekarimi, J. and Akbarzade Ghamari, M. (2009). "Comparative study of methods for determining coefficient of subgrade reaction, Journal of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, (1), 45-61(In Persian).

[3] Braja M, Das. (2014). "Principles of Geotechnical Engineering". 8th edition, Stamford, CT: Cengage.

[4] Rabieivazriri, M., Kariminasab, S., Mohammadi, H.R., (2016). "Effects of probability distributions geological strength index in the analysis of geo-mechanical parameters of the rock mass". Engineering Geology journal, 1 (10), pp., 3325-3350, (In Persian).

[5] Johari, A., Zerangthani, F and Parvaz, M, P. (2011). "Unlimited earthen roof leak-free reliability analysis using a Jointed of variables distribution curve". The Sixth National Congress of Civil Engineering, 26 and 27 April (In Persian).

[6] Tang, X. S., Li, D. Q., Rong, G., Phoon, K. K., & Zhou, C. B. (2013). Impact of copula selection on geotechnical reliability under incomplete probability information. Computers and Geotechnics, 49, 264-278.

[7] Wang, L., Hwang, J. H., Juang, C. H., & Atamturktur, S. (2013). Reliability-based design of rock slopes- a new perspective on design robustness. Engineering Geology, 154, 56-63.

[8] Stock company of Technical and Soil Mechanics Laboratory. (2016). "Geology Report of Department of Technical and Soil Mechanics Laboratory of Kerman province". (In Persian).

[9] <https://www.google.ro/maps/@30.2955642,57.0767237,13z>, Accessed July 21, 2016.

[10] Hussein, M. G. A. (2004). "Evaluations of Some elastic properties of cohesionless soil". Kassem El-Samny. M. Cairo, Egypt, Department of Civil Engineering, Al-Azhar University.