مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۲۹-۱۳۶، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی تأثیر عدم قطعیت پارامترهای مکانیک خاک در ظرفیت باربری شالوده‌های نواری

سید محمدعلی زمردیان * **(دانشیار)**
فرزان زرنگ ثانی (کارشناس ارشد)
بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های نواری از مهم‌ترین مباحث مربوط به مهندسی خاک است. از طرفی، با توجه به ماهیت غیرقطعی ناشی از ناهمگنی ذاتی پارامترهای خاک حتی در یک ناحیه‌ی کوچک مورد بررسی، روش‌های قطعی معمول راه حل مناسبی برای تعیین این مشخصه نیستند. با توجه به اینکه روش‌های مبتنی بر قابلیت اعتماد با قابلیت تغییرپذیری ذاتی در محاسبات ژئوتکنیکی کمتر مورد استفاده بوده است. در این نوشتار، تأثیر میزان عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری (C، φ و γ) با استفاده از روش مونت‌کارلو بررسی شده است. نتایج آنالیز مبین کاهش ضریب اطمینان ظرفیت باربری در حالت احتمالاتی در مقایسه با روش قطعی معمول است. همچنین افزایش عدم قطعیت پارامترهای مذکور باعث کاهش ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده می‌شود و این در حالی است که تأثیر پارامتر φ بیش از دو مؤلفه‌ی C و γ است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری، ضریب اطمینان، عدم قطعیت، روش مونت‌کارلو، قابلیت اعتماد.

mzomorod@shirazu.ac.ir
farzansani@gmail.com

۱. مقدمه

شالوده‌ها پایین‌ترین قسمت هر سازه هستند، که بار اصلی ساختمان را به خاک زیر خود منتقل می‌کنند. از این رو تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ها از ارکان نخستین و اصلی آنالیز هر سازه‌یی است. در حالت قطعی، تعیین پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری خاک توسط آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی در مرحله‌ی اول و استفاده از روابط کلاسیک موجود در علم مکانیک خاک جهت به‌دست‌آوردن ظرفیت باربری نهایی در مرحله‌ی بعد انجام‌پذیر است.

از سوی دیگر، به واسطه‌ی ماهیت غیرهمگن خاک و عدم قطعیت پارامترهای آن حتی در محدوده‌ی کوچکی از ناحیه‌ی مورد بررسی، ارائه‌ی فقط یک عدد به‌عنوان یک پارامتر معین خاک ناحیه‌ی مورد بررسی منطقی به نظر نمی‌رسد. به همین دلیل استفاده از روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد در ارزیابی پارامترهای خاک جایگاه ویژه‌یی پیدا کرده است. در روش ارزیابی قابلیت اعتماد تلاش می‌شود تا با به‌کارگیری دامنه‌یی از مقادیر ممکن برای متغیرها، دامنه‌ی تغییرات پارامتر و درنهایت، تابع هدف تعیین شود. به‌صورت کلی روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد به ۳ دسته تقسیم می‌شوند: ۱. روش‌های تحلیلی، مانند: روش ترکیب توزیع متغیرها[۱] و طراحی براساس معیار نیرو و مقاومت[۲]؛ ۲. روش‌های تقریبی، مانند:تخمین نقطه[۳]، مرتبه‌ی اول ممان دوم،[۴] روش هوسفر ـ لیند[۵] و روش اجزاء محدود تصادفی[۶]؛ ۳. روش مونت‌کارلو[۷].[۱]

در این میان روش ارزیابی احتمالاتی مونت‌کارلو به علت سهولت درکاربرد و همچنین بالابودن قابلیت اطمینان نتایج، بیشتر مورد توجه پژوهشگران است. لیکن تاکنون اغلب ارزیابی احتمالاتی شالوده‌ها معطوف به روش‌های مبتنی بر ضرایب جهت ظرفیت باربری شالوده‌های عمیق (شمع‌ها) بوده است.[۲و۳] پژوهش‌های قابلیت اطمینان مربوط به شالوده‌های سطحی نیز مبتنی بر نحوه‌ی بارگذاری بر روی شالوده‌ها،[۴و۵] و نیز بررسی ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده‌ها با توجه به عدم قطعیت یک پارامتر ورودی و یا یک ترکیب از پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری با پذیرفتن ضریب تغییرات فقط پارامترهای مقاومتی خاک (C و φ) میسر بوده است.[۶] در این نوشتار، با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای تمام پارامترهای ورودی مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری و نیز ترکیب تمامی حالات ممکن ترکیب پارامترها، اقدام به تعیین ظرفیت باربری مبتنی بر قابلیت اطمینان معین و ضریب اطمینان مربوط به آن شده است.

۲. آنالیز قابلیت اعتماد در مکانیک خاک

جهت انجام یک آنالیز قابلیت اعتماد در مهندسی ژئوتکنیک، این مراحل را به‌صورت کلی می‌توان بر شمرد:[۷]

۱. تعیین مدل تحلیلی، برای به‌دست‌آوردن حاشیه‌ی اطمینان یا ضریب اطمینان؛

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۵، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۷.

۲. برآورد توصیف آماری از پارامترها، که شامل به‌دست‌آوردن پارامترهای آماری (میانگین، واریانس و...) مشخصات پارامترهای خاک و نیز نیروها و هندسه‌ی مسئله است؛

۳. محاسبه‌ی‌ممان آماری تابع عملکرد، که شامل به‌دست‌آوردن میانگین و واریانس عملکرد سازه‌ی ژئوتکنیکی (یا همان ضریب اطمینان) است؛

۴. به‌دست آوردن شاخص قابلیت اطمینان؛

۵. محاسبه‌ی احتمال گسیختگی.

باید توجه داشت که روش آنالیز ذکرشده احتمالاتی است، حتی اگر دو یا چند گام دقیق محاسبه شده باشد. پس باید همواره دو یا چند روش آنالیز انجام و با یکدیگر مقایسه شوند.

۱.۲. تغییرپذیری پارامترهای خاک

به‌صورت کلی پارامترهای فیزیکی خاک به ۳ دسته تقسیم می‌شوند:[۸]

۱. پارامترهای مشخصه و طبقه‌بندی خاک؛

۲. پارامترهای مکانیکی نمونه‌ی دست‌نخورده؛

۳. پارامترهای درجای توده‌ی خاک.

تغییرپذیری مربوط به پارامترهای خاک ناشی از علل مختلف است، که در ۳ دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شود:[۳]

۱. تغییرپذیری طبیعی، که ناشی از ذات پارامترهای خاک است.

۲. عدم قطعیت علمی، که به علت فقدان اطلاعات یا عدم درک صحیح علمی است. این نوع از عدم قطعیت در مکانیک خاک به ۳ دسته تقسیم می‌شود: الف) عدم قطعیت در آزمایش‌های درجا، ب) عدم قطعیت در مدل‌سازی، ج) عدم قطعیت در تعیین پارامترها.

۳. عدم قطعیت عملیاتی، که شامل کلیه‌ی عدم قطعیت‌های ممکن مانند: خطاهای انسانی غیرقابل پیش‌بینی در تهیه، ساخت و نگهداری تجهیزات و همچنین خطا در تصمیم‌گیری‌های مهندسان در انتخاب مدل بهینه و ایمن است.

پژوهشگران در طول سال‌های متمادی و با انجام آزمایش‌های متعدد ضریب تغییرات پارامترهای مکانیکی خاک، که معرف میزان تغییرپذیری آن پارامتر است، را تعیین کرده‌اند.[۹]

۳. نظریه‌های تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ها

ترزاقی[۸] اولین نظریه را در سال ۱۹۴۸ برای تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ها ارائه کرده است (رابطه‌ی ۱):

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma \qquad (۱)$$

که در آن، ۳ عبارت q_c، q_q و q_γ مربوط به ظرفیت باربری متناظر با چسبندگی، بار و چگالی خاک هستند و در صورت جایگزینی با ضرایب به‌صورت رابطه‌ی ۲ خواهد شد:

$$q_u = CN_c + qN_q + \frac{۱}{۲}\gamma BN_\gamma \qquad (۲)$$

که در آن، N_c، N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری شالوده هستند.

پژوهشگران مختلف براساس نتایج آزمایشگاهی یا روش‌های ریاضی، مقادیر متفاوتی جهت ضرایب ظرفیت باربری ارائه کرده‌اند،[۱۰] ولی عمده‌ی تفاوت آنها مربوط به ضریب وابسته به γ است.

۱.۳. انتخاب روش تعیین ظرفیت باربری شالوده

انتخاب روش تعیین ظرفیت باربری شالوده، که کمترین میزان خطا را داشته باشد، اهمیت دارد. به‌علت محدودیت‌های موجود در مقایسه‌ی نتایج در مقیاس واقعی، که مهم‌ترین آن محدودیت هزینه است، مقایسه‌های اندکی در تعیین واقعی ظرفیت باربری به روش‌های مختلف صورت گرفته است.[۱۱] با وجود این، توصیه‌های مختلفی در مورد استفاده از هرکدام از این روابط وجود دارد.[۱۲] روابط پیشنهادشده جهت ضرایب ظرفیت باربری شالوده توسط مایرهوف[۹] کامل‌ترین عامل برای تعیین این مهم هستند (روابط ۳ الی ۵):

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi}\left(\frac{۱+\sin\varphi}{۱-\sin\varphi}\right) \qquad (۳)$$

$$N_c = (N_q - ۱)\cot\varphi \qquad (۴)$$

$$N_\gamma = (N_q - ۱)\tan(۱/۴\varphi) \qquad (۵)$$

که در این روابط، φ، زاویه‌ی اصطکاک داخلی دانه‌های خاک است. در این نوشتار نیز از روابط پیشنهادی مایرهوف جهت تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در دو حالت قطعی و احتمالاتی استفاده شده است.

۲.۳. انتخاب مقدار پارامترها

پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری شامل: چسبندگی (C)، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (φ)، و چگالی خاک (γ) هستند. مقدارکمینه و بیشینه‌ی هر یک از این پارامترها با روش‌های آزمایشگاهی تعیین شده است و این بازه، مقدار یکسانی دارد.[۱۳] بر همین اساس مقدار پارامترها به‌صورت جدول ۱ انتخاب شده است.

با توجه به مقادیر پارامترهای انتخابی، تعداد حالات ممکن، ترکیب این مقادیر است. بنابراین تعداد ۱۴۰ حالت ($۵ \times ۷ \times ۴$) برای یک خاک نمونه، احتمال وقوع دارد. بدیهی است برخی از ترکیب‌ها امکان وقوع نخواهد داشت. برای مثال، رویداد هم‌زمان چسبندگی بالای ۵۰ kpa و زاویه‌ی اصطکاک داخلی بزرگ‌تر از ۳۰ درجه و یا هم‌زمان صفر برای یک نمونه‌ی خاک در منطقه‌ی مورد بررسی نامحتمل است، که در آنالیز لحاظ شده است.

۳.۳. انتخاب ابعاد شالوده

برای نمونه و جهت آنالیز ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری، ابعاد شالوده‌ی نواری به‌صورت عرض ۰٫۸۰ متر و عمق ۱٫۰۰ متر انتخاب شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای C، φ و γ.

پارامتر	واحد	مقدار پارامتر									
C	kPa	۰		۲۵		۵۰		۷۵		۱۰۰	
φ	Deg	۰	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۴۰	۴۵			
γ	$kN/m^۳$	۱۶		۱۸		۲۰		۲۲			

۴. تعیین ظرفیت باربری شالوده نواری به روش قطعی

تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به‌صورت معمول توسط روش قطعی انجام می‌شود. برای این منظور کافی است مقدار پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در روابط تعیین ضرایب ظرفیت باربری شالوده (روابط ۳ الی ۵) جای‌گذاری شود و پس از به‌دست‌آمدن هرکدام، با جای‌گذاری مقادیر چسبندگی و چگالی در رابطه‌ی مربوط (معادله‌ی ۲)، ظرفیت باربری نهایی شالوده‌ی نواری به‌دست آید. این روند برای تمامی حالات ترکیب ممکن پارامترها (رجوع به ۲.۳.) تکرار می‌شود. به این ترتیب ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با هندسه‌ی نمونه و پارامترهای مکانیکی معین به‌دست می‌آید.

۵. ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به روش احتمالاتی

پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری، تغییرپذیری ذاتی دارند و این عدم قطعیت را با ضریب تغییرات آن پارامتر نمایش می‌دهند.[۳] با درنظرگرفتن عدم قطعیت پارامترهای ورودی، پاسخ مسئله عدد واحدی نیست؛ بلکه به‌صورت بازه‌یی از ظرفیت‌های باربری به‌صورت یک توزیع احتمالاتی است. جهت تعیین انجام آنالیز قابلیت اعتماد روش‌های مختلفی وجود دارد، که روش شبیه‌سازی مونت کارلو متداول‌ترین آن‌هاست.

۱.۵. شبیه‌سازی مونت‌کارلو

آنالیز مونت‌کارلو، شبیه‌سازی یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه‌ی نتایج استفاده می‌کند. برای مثال، متغیر x دارای ویژگی‌های آماری نامشخص است و امکان نمونه‌گیری نیز وجود ندارد. با در دست‌داشتن توزیع متغیر y که با اصول علمی به متغیر x وابسته است، می‌توان ویژگی موردنظر مجهول را به‌دست آورد. به این ترتیب که با تولید اعداد تصادفی با توزیع معلوم (y) و نسبت‌دادن آن به متغیر موردنظر (x)، اقدام به تخمین ویژگی مجهول کرد. این روند، اصول روش مونت‌کارلو را تشکیل می‌دهد.

۲.۵. مراحل تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به روش مونت‌کارلو

برای تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به روش مونت‌کارلو، این مراحل صورت می‌پذیرد:

۱. برای هرکدام از داده‌های ورودی (C، φ، γ) یک مقدار تصادفی در رابطه با درنظرگرفتن مقدار عدم قطعیت به‌عنوان مقدار میانگین به همراه ضریب تغییرات (COV)، که در یک رابطه‌ی احتمالاتی متداول فرض یا گنجانده می‌شوند، تولید می‌شود.

۲. مقادیر تولیدشده در مرحله‌ی اول وارد معادله‌ی حاکم بر ظرفیت باربری شالوده می‌شود، تا یک مقدار به منزله‌ی مقدار قطعی به‌دست آید.

۳. مراحل ۱ و ۲، صدها و هزاران بار به‌عنوان شبیه‌سازی مونت‌کارلو تکرار می‌شوند تا به همگرایی لازم برسد.

۴. درنهایت، منحنی توزیع احتمالاتی (PDF)[۱۰] و منحنی تجمعی[۱۱] مربوط به آن (CDF) جهت تمامی ظرفیت باربری‌های به‌دست‌آمده با سطح قابلیت اطمینان ۹۰٪ تا ۹۵٪ رسم می‌شود و توزیع مربوط به آن به‌دست می‌آید.

با تعیین سطح قابلیت اطمینان داده‌های ورودی و به‌دست‌آوردن توزیع مربوط به آن به روش ذکرشده، می‌توان ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده‌ی نواری را با قابلیت اعتماد معین به‌دست آورد.

۳.۵. تعیین توزیع احتمالاتی ورودی و ضریب تغییرات پارامترها

نتایج پژوهش‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که توزیع آماری پارامترهای ورودی مسئله (C، φ، γ) به‌صورت توزیع نرمال است. از سوی دیگر، ضریب تغییرات پارامترها در توزیع احتمالاتی تابع هدف مؤثر است. در جدول ۲، مقدار تعیین‌شده جهت ضریب تغییرات پارامترهای ورودی نشان داده شده است.[۳،۹،۱۳و۱۴]

با توجه به مقادیر کمینه و بیشینه‌ی تعیین‌شده توسط پژوهشگران، مقدار متوسط این حدود نیز به‌عنوان یک شاخص دیگر آنالیز جهت همگرایی پاسخ انتخاب شده است.

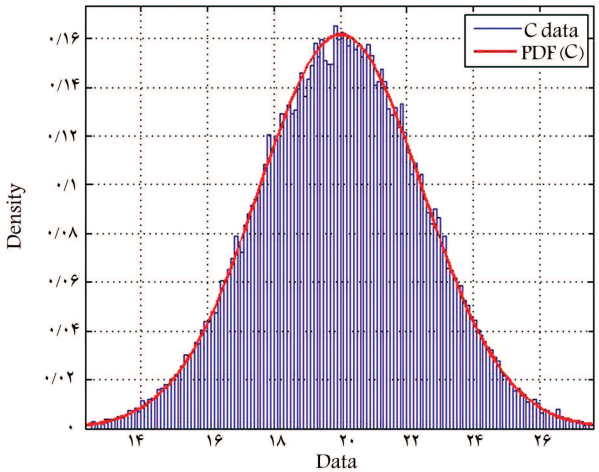
۴.۵. آنالیز حساسیت داده‌های ورودی

برای تعیین تعداد داده‌های ورودی و نیز قطع تابع توزیع تولیدشده برای پارامترهای ورودی در هر مرحله، جهت بالابردن سطح اطمینان، یک آنالیز حساسیت صورت می‌پذیرد. برای این منظور، با تعداد ورودی ۱۰۰ تا یک میلیون در ۵ مرحله با ضریب ۱۰ برابر، که هر بار در دو سطح اطمینان ۶۵٪ و ۹۵٪ قطع می‌شوند، آنالیز انجام شده است (در مجموع ۱۰ مرحله). این روند با استفاده از یک نرم‌افزار که در محیط برنامه‌نویسی متلب[۱۲] نگارش یافته است، صورت می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که تعداد داده‌های ورودی یک‌صد هزار با میزان سطح اطمینان ۹۵٪ جهت آنالیز احتمالاتی مسئله مناسب است (شکل ۱).

جدول ۲. ضریب تغییرات پارامترهای C، φ و γ.[۳،۹،۱۳و۱۴]

پارامتر	واحد	ضریب تغییرات		
		حد پایین	حد متوسط	حد بالا
C	kPa	۲۰	۳۵	۵۰
φ	Deg	۵	۱۰	۱۵
γ	kN/m^3	۱	۵	۱۰



شکل ۱. نتیجه آنالیز حساسیت داده‌های ورودی.

۵.۵. تعیین ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده‌ی نواری

با تعیین ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، تعداد داده‌های ورودی و سطح اطمینان آنالیز، شبیه‌سازی مونت‌کارلو جهت هر حالت از ترکیب پارامترها با ضریب تغییرات پایین، متوسط و بالا انجام می‌گیرد (در مجموع ۵۶۰ حالت). برای این منظور، یک برنامه‌ی کامپیوتری توسط نرم‌افزار متلب نگارش یافته و از طریق روش تخمین نقطه کنترل شده است.

پس از تکرار برنامه در هر حالت، تابع توزیع احتمال، میانگین ظرفیت باربری احتمالاتی، ضریب تغییرات ظرفیت باربری و ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده‌ی نواری با قابلیت اعتماد ۹۰٪ و ۹۵٪ به‌دست می‌آید.

با تعیین ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده‌ی نواری با قابلیت اطمینان ۹۰٪ و ۹۵٪، ضریب اطمینان احتمالاتی نیز در دو سطح اعتماد یادشده در هر حالت از ترکیب پارامترها و در هر یک از حدود ضریب تغییرات پارامترهای ورودی به‌دست می‌آید.

۶. بررسی نتایج

پس از آنالیز و جمع‌آوری خروجی‌های برنامه، تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ورودی مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری بررسی می‌شود. لازم به یادآوری است که ضریب اطمینان شالوده در حالت قطعی طبق توصیه‌ی آیین‌نامه، ۳٫۰۰ در نظر گرفته شده است.[۱۵]

۱.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان با افزایش پارامتر

پس از بررسی تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان، این نتایج با افزایش هر یک از پارامترها مشاهده شده است:

۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ضریب اطمینان کوچک‌تری جهت ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به‌دست آمده است.

۲. افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، که ناشی از تغییرپذیری ذاتی پارامتر است، باعث کاهش ضریب اطمینان شده است.

در ادامه، تأثیر هر یک از پارامترها به‌صورت جداگانه بررسی شده است.

۱.۱.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان با افزایش C

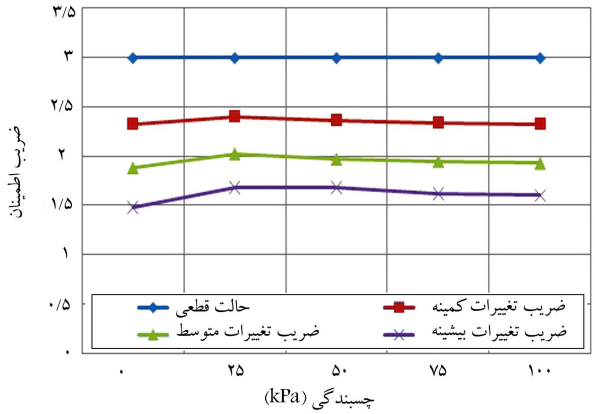
در این حالت، ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در دو سطح اطمینان ۹۰٪ و ۹۵٪ با افزایش پارامتر چسبندگی بررسی و پارامترهای φ و γ ثابت فرض شده‌اند. در این حالت، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. افزایش مقدار پارامتر چسبندگی تأثیر به‌سزایی در مقدار ضریب اطمینان نداشته است.

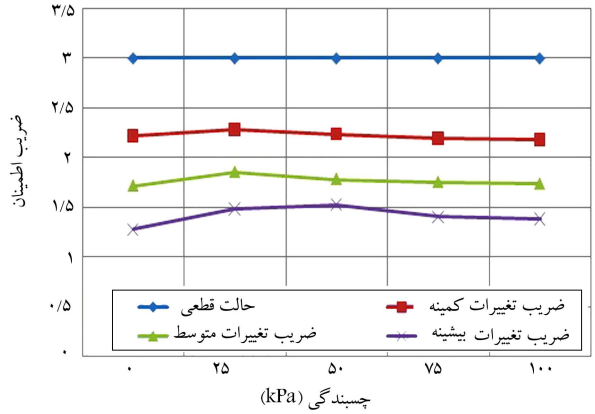
۲. ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت سطح اعتماد ۹۵٪، عدد کوچک‌تری را نشان داده است (شکل‌های ۲ و ۳ نمایانگر این نتایج هستند).

۲.۱.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان با افزایش φ

در این حالت ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در دو سطح اطمینان ۹۰٪ و ۹۵٪ با افزایش پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک زیر شالوده بررسی و پارامترهای چسبندگی و چگالی نیز ثابت فرض شده‌اند (شکل های ۴ و ۵). در این حالت، این نتایج مشاهده شده است:



شکل ۲. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۰٪ با افزایش چسبندگی.



شکل ۳. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۵٪ با افزایش چسبندگی.

۱. افزایش مقدار پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در مقادیر پایین تأثیر به‌سزایی در ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری نداشته، ولی در مقادیر بالا باعث کاهش شدید ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری شده است. این اثر در ضرایب ظرفیت باربری شالوده‌ها نیز قابل مشاهده است. با افزایش مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، ضرایب ظرفیت باربری شالوده به‌خصوص N_γ افزایش یافته است.

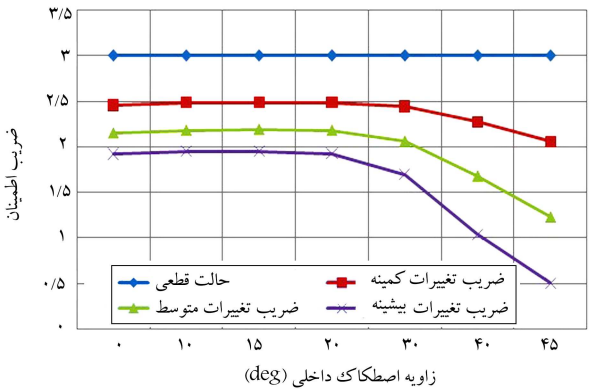
۲. ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت سطح اعتماد ۹۵٪ عدد کوچک‌تری را نشان داده است، هر چند این تفاوت قابل توجه نیست.

۳.۱.۶. تأثیر ضریب تغییرات بر ضریب اطمینان با افزایش γ

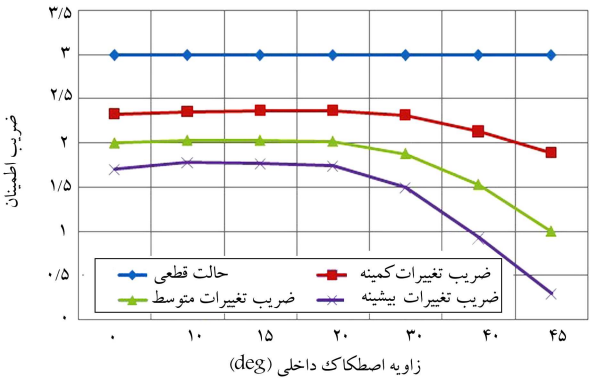
برای این حالت نیز مانند دو حالت قبل عمل شده است. ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در دو سطح اطمینان ۹۰٪ و ۹۵٪ با افزایش پارامتر γ خاک زیر شالوده بررسی و پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نیز ثابت فرض شده است. در این حالت، این نتایج مشاهده شده است:

۱. افزایش مقدار پارامتر چگالی خاک تأثیر به‌سزایی بر روی مقدار ضریب اطمینان نداشته است.

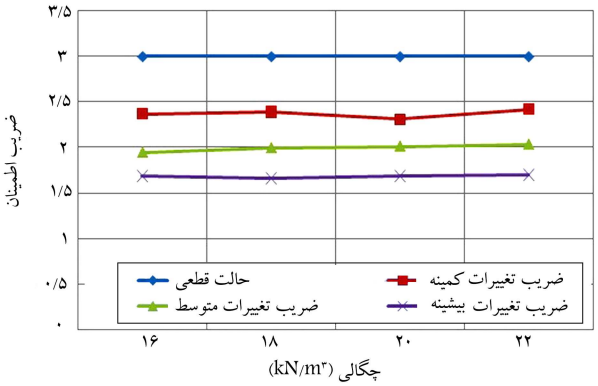
۲. ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت سطح اعتماد ۹۵٪ عدد کوچک‌تری را نشان داده است، هر چند این تفاوت قابل توجه نیست (شکل‌های ۶ و ۷).



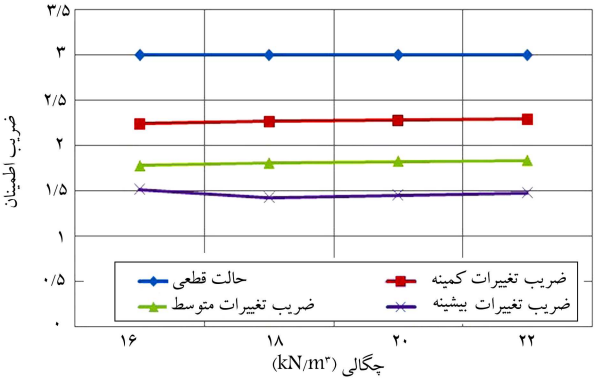
شکل ۴. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۰٪ با افزایش میزان φ.



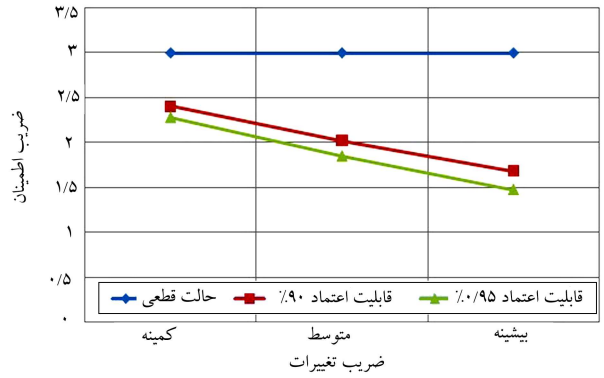
شکل ۵. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۵٪ با افزایش میزان φ.



شکل ۶. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۰٪ با افزایش میزان γ.



شکل ۷. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۵٪ با افزایش میزان γ.



شکل ۸. تغییرات ضریب اطمینان با قابلیت اعتماد ۹۰٪ و ۹۵٪ در مقایسه با حالت قطعی.

۴.۱.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان در یک حالت از ترکیب پارامترها

در این حالت تأثیر عدم قطعیت در ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در یک حالت از ترکیب پارامترها (C، φ و γ ثابت و ضریب تغییرات متغیر) بررسی شده است. در این حالت، این نتایج مشاهده شده است:

۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ضریب اطمینان کوچک‌تری جهت ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری به‌دست آمده است.

۲. افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، که ناشی از تغییرپذیری ذاتی پارامترهاست، باعث کاهش ضریب اطمینان شده است.

۳. ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت سطح اعتماد ۹۵٪ عدد کوچک‌تری را نشان داده است، هر چند این تفاوت قابل توجه نیست.

در شکل ۸، پس از رگرسیون تمام حالات، این امر نشان داده شده است.

۲.۶. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش پارامتر

ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری نیز مؤثر است. جهت بررسی در هر حالت، دو پارامتر دیگر ثابت فرض شده‌اند.

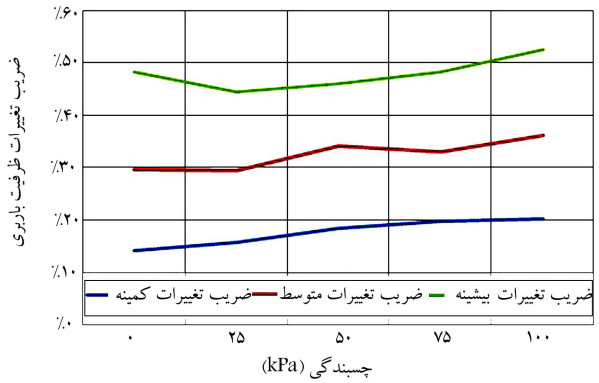
۱.۲.۶. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش C

در این حالت، تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با افزایش چسبندگی خاک زیر شالوده با ثابت‌بودن φ و γ بررسی (شکل ۹) و این نتایج حاصل شده است:

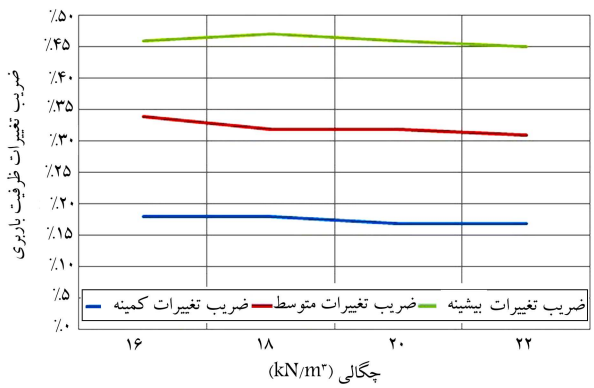
۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری، دارای ضریب تغییرات و عدم قطعیت است.

۲. با افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده افزایش یافته است.

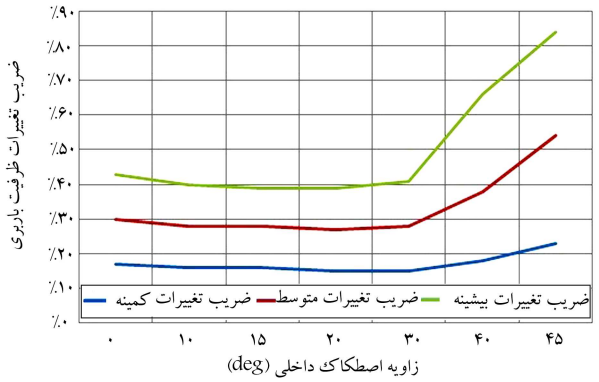
۳. افزایش چسبندگی خاک باعث افزایش جزئی ضریب تغییرات ظرفیت باربری شده است.



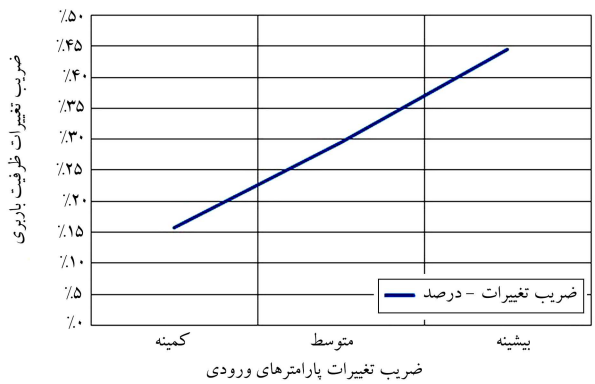
شکل ۹. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش C.



شکل ۱۱. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش γ.



شکل ۱۰. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش φ.



شکل ۱۲. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری در یک حالت از ترکیب پارامترها.

۲.۲.۶. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش φ

در این حالت، تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک زیر شالوده و با ثابت‌بودن C و γ بررسی (شکل ۱۰) و این نتایج مشاهده شده است:

۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری دارای ضریب تغییرات و عدم قطعیت است.

۲. افزایش ضریب تغییرات پارامترها باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شده است.

۳. افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شده و این افزایش در مقادیر بالا بسیار بیشتر است.

۳.۲.۶. تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری با افزایش γ

در این حالت، تأثیر ضریب تغییرات پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با افزایش γ خاک زیر شالوده بررسی (شکل ۱۱) C و φ ثابت فرض شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری دارای ضریب تغییرات و عدم قطعیت است.

۲. با افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده نیز افزایش یافته است. این افزایش ضریب تغییرات مؤثرتر از تأثیر پارامترهای C و φ بوده است.

۳. افزایش چگالی خاک باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شده است.

۴.۲.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب تغییرات ظرفیت باربری در یک حالت از ترکیب پارامترها

در این حالت تأثیر عدم قطعیت در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در یک حالت از ترکیب پارامترها بررسی (شکل ۱۲) و این نتایج مشاهده شده است:

۱. با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری دارای ضریب تغییرات و عدم قطعیت است.

۲. افزایش ضریب تغییرات پارامترها باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شده است.

۳.۶. تأثیر ضریب تغییرات در ضریب اطمینان در حالت کلی

در حالت کلی می‌توان مشاهده کرد که افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی باعث کاهش ضریب اطمینان می‌شود. همچنین افزایش مقادیر پارامترهای C و γ تأثیر به‌سزایی در مقدار ضریب اطمینان نخواهد داشت و با افزایش مقدار پارامتر φ، ضریب اطمینان ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری افزایش می‌یابد. به علاوه ضریب

اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت سطح اعتماد ۹۵٪ عدد کوچک‌تری را نشان می‌دهد.

۴.۶. حالت کلی تأثیر عدم قطعیت پارامترها در ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری

درحالت کلی مشاهده می‌شود با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی، ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری دارای ضریب تغییرات و عدم قطعیت است.

افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی، باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری می‌شود. همچنین افزایش مقدار پارامترها، باعث افزایش مقدار ضریب تغییرات ظرفیت باربری در شالوده خواهد شد. هر چند این میزان افزایش به جز در مورد پارامتر φ محسوس نیست.

۵.۶. حالات خاص

در حالاتی که مقادیر پارامترها بزرگ است، در ضریب تغییرات بالا، مقادیر ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری بسیار بزرگ است. به همین ترتیب مقدار ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده بزرگ خواهد بود و مقدار ضریب اطمینان شالوده‌ی نواری در حالت احتمالاتی، عدد کوچک‌تری را نشان می‌دهد. این حالات می‌تواند ناشی از دو محرک باشد:

۱. بزرگ‌بودن مقادیر پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری یعنی چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چگالی خاک زیر شالوده است. بالابودن مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک باعث افزایش فزاینده‌ی ضرایب ظرفیت باربری شالوده می‌شود، که این امر خود باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شالوده خواهد شد.

۲. بالابودن مقادیر ضریب تغییرات پارامترها، که ناشی از عدم قطعیت بالای پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری به خصوص چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است، باعث گستردگی عدم قطعیت ظرفیت باربری نهایی شالوده و نهایتاً افزایش ضریب تغییرات می‌شود.

درنهایت، مجموع عوامل یادشده باعث افزایش ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری در حالت احتمالاتی در شالوده و نیز کاهش شدید ضریب اطمینان احتمالاتی به نسبت حالت قطعی خواهد شد.

۷. نتیجه‌گیری

فرضیات به‌کارگرفته در تعیین مدلی جهت محاسبه‌ی ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری از یک سو و ماهیت غیرهمگن خاک و عدم قطعیت پارامترهای آن حتی در محدوده‌ی کوچکی از ناحیه‌ی مورد بررسی از سوی دیگر، زمینه‌ی عدم قطعیت ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری و ضریب اطمینان مربوط به آن را فراهم می‌کند. از طرفی روش‌های قابلیت اعتماد به‌عنوان روش‌هایی که عدم قطعیت پارامترهای ورودی مسئله و برایند آنها را در نظر می‌گیرند، به‌عنوان ابزار مناسبی برای رفع این مشکل به حساب می‌آیند.

در این نوشتار با درنظرگرفتن عدم قطعیت جهت پارامترهای مؤثر در ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری (C، φ و γ) و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، اقدام به تعیین ظرفیت باربری احتمالاتی شالوده و بررسی تأثیر ضریب تغییرات پارامترهای ورودی در ضریب اطمینان آن شده است. نتایج آنالیز نشان‌دهنده‌ی آن است که ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با درنظرگرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر دارای توزیع احتمالاتی است و افزایش این عدم قطعیت باعث افزایش ضریب تغییرات ظرفیت باربری شالوده می‌شود.

در ادامه، با درنظرگرفتن قابلیت اعتماد ۹۰٪ و ۹۵٪ ضریب اطمینان احتمالاتی شالوده‌ی نواری کوچک‌تر از ضریب اطمینان قطعی است و می‌توان نسبت به احتمال وقوع ضرایب اطمینان مختلف قضاوت و احتمال گسیختگی را در هر حالت بررسی کرد.

بنابراین، لزوم رویکرد مهندسی به تحلیل‌های احتمالاتی جهت رسیدن به طرح ایمن و بهینه مشخص می‌شود و می‌توان با استفاده از این روش، ضریب اطمینان کوچک‌تر و با قابلیت اطمینان بالاتری را جهت ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری استفاده کرد که باعث افزایش اعتماد به محاسبات سازه و کاهش هزینه‌ها می‌شود.

منابع (References)

1. Johari, A., Zerangsani, F. and Parvaz, M.H. "Reliability assessment of soil shear strength using the jointed distribution method", 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran (2011).
2. Cherubini, C. and Vesia, G., *Reliability Approach for the Side Resistance of Piles by Means of the Total Stress Analysis (α Method)*, NRC, ISBN 470125, Italy (2008).
3. Baecher, G.B. and Christian, J.T., *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons, West Sussex PO19 8SQ, England (2003).

پانوشت‌ها

1. jointed distribution method (JDM)
2. load & resistance factor design (LRFD)
3. point estimate method (PEM)
4. first order second moment method (FOSM)
5. the hasofer-lind approach (FORM)
6. stochastic finite elements method (SFEM)
7. monte carlo simulation method
8. Terzaghi K.
9. Meyerhof G.G
10. probabilistic distribution function (PDF)
11. cumulative frequency distribution (CDF)
12. MATLAB

4. Soubra, A.H. and Youssef Abdel Massih, D.S. "Probabilistic analysis and design at the ultimate limit state of obliquely loaded strip footing", *Geotechnic*, **60**(4), pp. 275-285 (2010).

5. Soubra, A.H. and Mao, N. "Probabilistic analysis of obliquely loaded strip foundations", *Japanese Geotechnical Journal*, **52**(3), pp. 524-538 (2012).

6. Shahin, M.A. and Cheung, E.M., *Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Strip Footings*, Vogt, Schuppener, Straub & Bräu, ISBN 9783-939230-01-4 (2011).

7. Phoon, K.K., *Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering,* Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN (2008).

8. Lee, I.K., White, W. and Ingles, O.G., *Geotechnical Engineering,* Boston, Pitman (1983).

9. Lacasse, S. and Nadim, F. "Uncertainties in characterizing soil properties", Uncertainty in the Geologic Environment, ASCE, pp. 49-75 (1996).

10. Dos, B.M., *Shallow Foundations-Bearing Capacity and Settlement*, Taylor and Francis Group, London (2009).

11. Milovic, D.M. "Comparison between the calculated and experimental values of the ultimate bearing capacity", *6th ICSMFE*, **2**, pp. 142-144 (1965).

12. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design, Fifth Edition*, McGrow Hill Inc., Newyork, ISBN 0-07-912247-7 (1997).

13. Look, B., *Handbook of Geotechnical Investigations and Design Tables*, Taylor and Francis Group, P.O. Box 447, 2300 AK Leiden, The Netherlands, ISBN 978-0-415-43038-8 (2007).

14. Cherubini, C. and Orr, T.L.L. "Considerations on the applicability of semi-probabilistic Bayesian methods to geotechnical design", Nazionale di Geotechnica, Parma, Associatione Geotecnica Italiana, pp. 421-426 (1999).

15. *The 7th issue of the National Building Regulations*, The Foundations, INBR, ISBN 978-964-7588-71-3, Iran (1388).