

## تأثیر ناهمسانی مکانیکی و ناهمگونی پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها بر ظرفیت باربری دراز مدت پی‌های سطحی

رضا جمشیدی چناری\* و علی ماهی‌گیر

گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گیلان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.36.1.149

چکیده - فرایند تشکیل خاک‌های چسبیده باعث شکل‌گیری ناهمسانی و ناهمگونی در پارامترهای مقاومتی و سختی آنها می‌شود. اغلب خاک‌ها در حالت طبیعی هم ناهمسانی نسبت به مقاومت برشی و هم ناهمگونی نسبت به عمق از خود نشان می‌دهند. در این مقاله برای در نظر گرفتن اثر ناهمسانی چسبندگی خاک مدل استاندارد موهر - کلمب به حالت ناهمسان تعمیم داده شده است. از این رو با استفاده از تئوری حوزه تصادفی در ترکیب با روش تفاضل محدود و در چارچوب شبیه‌سازی‌های مونت کارلو و با در نظر گرفتن اثر خود همبستگی و همبستگی متقابل بین پارامترهای مقاومتی خاک، ظرفیت باربری پی‌های سطحی در فضای کاتوره‌ای محاسبه شده و مشاهده شد که ظرفیت باربری پی‌های سطحی با افزایش تغییرپذیری پارامترهای مقاومتی کاهش و با افزایش نسبت‌های ناهمسانی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانی مکانیکی، ناهمسانی ناهمگونی، ظرفیت باربری، پی‌های سطحی، تغییرپذیری فضای.

### The Effect of Mechanical Anisotropy and Heterogeneity of Shear Strength Parameters of Soils on Drained Bearing Capacity of Shallow Foundations

R. Jamshidi Chenari\* and A. Mahigir

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

**Abstract:** Natural formation of soil deposits causes heterogeneity and anisotropy in their strength and stiffness properties. However, most soils in their natural states exhibit some anisotropy with respect to shear strength and heterogeneity with respect to the depth. In this paper, the standard Mohr-Coulomb constitutive law is generalized to anisotropic version in order to consider the effect of cohesion anisotropy of soil. Random field theory coupled with finite difference method was utilized in Monte Carlo simulations with considering the effect of auto-correlation and cross correlation between strength parameters of soil, in order to calculate the bearing capacity of shallow foundation in a strain controlled scheme. The results showed that the bearing capacity of shallow foundation decreases with increasing in variability of strength parameters and increases with increasing in anisotropy ratio.

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Jamshidi\_reza@guilan.ac.ir

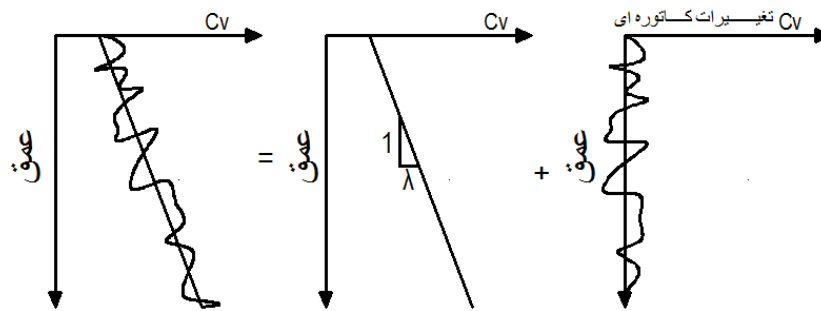
فهرست علائم

|                              |  |                                |   |
|------------------------------|--|--------------------------------|---|
| LCC                          | ماتریس پایین مثلثی حاصل از تجزیه چولسکی  | A.FH                           | درجه ناهمسانی ناهمگونی  |
| q'                           | ظرفیت باربری بدون بعد                    | A.FM                           | نسبت ناهمسانی مکانیکی   |
| t(z)                         | روند یقینی چسبندگی                       | C <sub>H</sub>                 | چسبندگی خاک در راستای افق   |
| w(z)                         | مؤلفه پسماند حول روند یقینی              | C <sub>V</sub>                 | چسبندگی خاک در راستای قائم  |
| θ <sub>H</sub>               | مقیاس نوسان در جهت افق                   | C <sub>θ</sub>                 | چسبندگی در جهت θ  |
| θ <sub>V</sub>               | مقیاس نوسان در جهت قائم                  | COV                            | ضریب تغییرات  |
| λ                            | چگالی مقاومت برشی                        | COV <sub>C<sub>V</sub></sub>   | ضریب تغییرات چسبندگی قائم   |
| μ <sub>Inc</sub>             | میانگین لگاریتم چسبندگی                  | COV <sub>q<sub>ult</sub></sub> | ضریب تغییرات ظرفیت باربری   |
| μ <sub>q<sub>ult</sub></sub> | میانگین ظرفیت باربری                     | E <sub>H</sub>                 | مدول یانگ در صفحه ته‌نشینی (صفحه افق)                                   |
| ρ <sub>AC</sub>              | ماتریس خود همبستگی                       | E <sub>V</sub>                 | مدول یانگ در جهت ته‌نشینی (صفحه قائم)                                   |
| ρ <sub>cp</sub>              | ضریب همبستگی متقابل بین پارامترهای φ و c | V <sub>VH</sub>                | ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه افق در نتیجه تنش اعمالی در صفحه قائم |
| σ <sub>Inc</sub>             | انحراف معیار لگاریتم چسبندگی             | V <sub>HV</sub>                | ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه قائم در نتیجه تنش اعمالی در صفحه افق |
| φ                            | زاویه اصطکاک داخلی خاک                   | V <sub>HH</sub>                | ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه افق در نتیجه تنش اعمالی در همان صفحه |
| φ <sub>max</sub>             | زاویه اصطکاک بیشینه                      | G'                             | بردار حوزه تصادفی همبسته متقابل   |
| φ <sub>min</sub>             | زاویه اصطکاک کمینه                       | G'φ                            | میدان تصادفی استاندارد نرمال  |

۱- مقدمه

موجود است [۱]. اکثر این تحقیقات نشانگر تأثیر قابل توجه ناهمسانی و ناهمگونی بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر رس هستند. با این وجود تلاش‌های کمی بر روی محاسبه تأثیر ناهمسانی و ناهمگونی بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های c-φ شده است. ردی و سرینواسان [۲] تأثیر ناهمسانی و ناهمگونی خاک‌های c-φ را روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در حالت φ=۰ بررسی کردند. آنها در مطالعه خود از روش خطوط مشخصه برای به‌دست آوردن ظرفیت باربری پی‌های سطحی استفاده کردند.

ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های همسان و همگون به‌صورت گسترده‌ای توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند شکل‌گیری نهشته‌های طبیعی موجب شکل‌گیری ناهمسانی و ناهمگونی در خصوصیات مقاومتی و سختی آنها می‌شود که در طراحی‌های سنتی معمولاً نادیده گرفته می‌شود. مطالعاتی بر روی محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی مستقر بر رس‌های ناهمسان و ناهمگون در شرایط زهکشی نشده φ=۰ در ادبیات فنی



شکل ۱- تغییرات شماتیک چسبندگی خاک با عمق

## ۲- ناهمگونی ذاتی خاک

فرایند شکل‌گیری خاک‌ها موجب به‌وجود آمدن ناهمگونی ذاتی در خصوصیات خاک می‌شود. تغییرات فضایی چسبندگی خاک نسبت به عمق را می‌توان به دو قسمت روند یقینی<sup>۲</sup>  $t(z)$  و مؤلفه پسماند حول روند یقینی  $w(z)$  مطابق زیر تجزیه کرد:

$$C(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

در این رابطه  $C(z)$  چسبندگی خاک،  $t(z)$  تابع روند که بیانگر میانگین متحرک چسبندگی خاک در هر نقطه است و  $w(z)$  نشان‌دهنده مؤلفه کاتوره‌ای<sup>۳</sup> حول روند یقینی است. روند یقینی دارای تغییرات معین با عمق است که در صورت خطی بودن، با چگالی مقاومت  $\lambda$  که شیب تغییرات چسبندگی خاک با عمق است شناخته می‌شود و مؤلفه پسماند بیانگر نوسان مقادیر چسبندگی در هر عمق حول مقدار میانگین چسبندگی خاک در آن نقطه است. شکل (۱) مؤلفه‌های مختلف تغییرپذیری خاک را نشان می‌دهد. بحث تکمیلی در ارتباط با مؤلفه‌های مختلف ناهمگونی ذاتی اعم از یقینی و کاتوره‌ای توسط جمشیدی و کریمیان [۶] ارائه شده است.

## ۳- ناهمسانی خاک

معیار تسلیم موهر- کلمب مقاومت خاک را به‌وسیله دو کمیت چسبندگی ( $C$ ) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) توصیف می‌کند. محققین زیادی مانند دانکن [۷] و ماین [۸] به این نتیجه رسیدند که زاویه اصطکاک داخلی خاک ناهمسانی کمی از خود

سالنکن [۳] و سالنکن و همکاران [۴] تحلیلی برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی روی خاک‌های  $c-\phi-\gamma$  با فرض تغییرات خطی چسبندگی با عمق ارائه دادند. میرهوف [۵] ظرفیت باربری پی‌های سطحی را برای خاک‌های دارای زاویه اصطکاک داخلی ناهمسان به‌وسیله روش سنتی ترزاقی به‌دست آورد. وی در فرضیات خود از دو مقدار حدی برای زاویه اصطکاک داخلی در نواحی بیرونی و یک مقدار معادل برای زاویه اصطکاک داخلی در ناحیه شعاعی برشی استفاده کرد.

هدف از این مطالعه نشان دادن تأثیر ناهمسانی چسبندگی خاک، ناهمگنی فضایی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و همچنین همبستگی متقابل<sup>۱</sup> بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در حالت زهکشی شده است. به‌همین منظور چسبندگی خاک به‌عنوان یک متغیر با توزیع لگاریتم- نرمال و زاویه اصطکاک داخلی خاک به‌عنوان یک متغیر با توزیع کران‌دار در فضا فرض شده‌اند. انتخاب توزیع لوگ نرمال به این دلیل است که چسبندگی خاک کمیتی مثبت است و همچنین رابطه آن با توزیع نرمال بسیار ساده است [۶]. نسبت ناهمسانی چسبندگی خاک که با  $C_H/C_V$  مشخص می‌شود با تعمیم مدل همسان موهر- کلمب به حالت ناهمسان در محاسبات لحاظ شده و همچنین برای انجام تحلیل‌ها از برنامه‌نویسی FISH در محیط نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  به‌روشن تفاضل محدود تصادفی استفاده شد.

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_1 &= \alpha_1\Delta\epsilon_1 + \alpha_2\Delta\epsilon_2 + \alpha_3\Delta\epsilon_3 \\ \Delta\sigma_2 &= \alpha_1\Delta\epsilon_1 + \alpha_2\Delta\epsilon_2 + \alpha_3\Delta\epsilon_3 \\ \Delta\sigma_3 &= \alpha_1\Delta\epsilon_1 + \alpha_2\Delta\epsilon_2 + \alpha_3\Delta\epsilon_3\end{aligned}\quad (5)$$

که ضرایب  $\alpha$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{1}{1 - 2\nu_{HV} \nu_{HV} - 2\nu_{HV} \nu_{VH} \nu_{HH} - \nu_{HH} \nu_{HH}} \\ \alpha_2 &= \alpha_1 (1 - \nu_{VH} \nu_{HV}) E_H \\ \alpha_3 &= \alpha_1 \nu_{VH} (1 + \nu_{HH}) E_H \\ \alpha_4 &= \alpha_1 (\nu_{HH} + \nu_{VH} \nu_{HV}) E_H \\ \alpha_5 &= \alpha_1 (1 - \nu_{HH} \nu_{HH}) E_V\end{aligned}\quad (6)$$

$E_V$ : مدول یانگ در جهت ته‌نشینی (صفحه قائم)

$E_H$ : مدول یانگ در صفحه ته‌نشینی (صفحه افق)

$\nu_{VH}$ : ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه افق در نتیجه

تنش اعمالی در صفحه قائم

$\nu_{HV}$ : ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه قائم در نتیجه

تنش اعمالی در صفحه افق

$\nu_{HH}$ : ضریب پواسون متناظر با کرنش در صفحه افق در نتیجه

تنش اعمالی در همان صفحه

پوش تسلیم برای معیار اصلاح شده موهر - کلمب در صفحه

( $\sigma_1, \sigma_3$ ) در شکل (۲) نشان داده شده است.

پوش گسیختگی موهر - کلمب اصلاح شده از نقطه A تا B

به وسیله تابع تسلیم زیر تعریف می‌شود:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2C_\theta \sqrt{N_\phi} \quad (7)$$

که داریم:

$$N_\phi = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (8)$$

به وسیله تابع تسلیم کششی به شکل: C و B تا از نقطه:

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (9)$$

که  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $\sigma^t$  مقاومت کششی و  $C_\theta$

چسبندگی در جهتی که با افق زاویه  $\theta$  می‌سازد است و از رابطه

زیر به دست می‌آید:

$$C_\theta = C_H + (C_V - C_H) \sin^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} + \theta \right) \quad (10)$$

که  $\theta$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

نشان می‌دهد و در رس‌ها کاملاً مستقل از جهت بارگذاری است. از طرف دیگر مقاومت برشی زهکشی نشده و چسبندگی به جهت بارگذاری و نوع آزمایش انجام شده برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی کاملاً وابسته هستند. بنابراین در تحقیق حاضر اثر ناهمسانی فقط برای چسبندگی لحاظ شده و فرض می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی مقدار ثابتی در تمام جهات و نقاط محیط خاک داشته باشد. از سال ۱۹۴۰ تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری ناهمسانی چسبندگی خاک انجام شد. کاساگرانده و کاریلو [۹] پیشنهاد کردند که چسبندگی در هر جهت در صفحه افق - قائم می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$C_i = C_H + (C_V - C_H) \sin^2 i \quad (2)$$

در این رابطه  $C_H$  و  $C_V$  به ترتیب چسبندگی در صفحات افقی و

قائم هستند و  $C_i$  نشانگر چسبندگی در جهت  $i$  است که  $i$  میزان

انحنا جهت اصلی حداکثر نسبت به صفحه افق را نشان می‌دهد.

نسبت  $C_H/C_V$  که نسبت ناهمسانی مکانیکی، A.F.M نامیده

می‌شود بنا به فرض لو [۱۰] برای یک خاک مشخص ثابت

در نظر گرفته می‌شود. پوش گسیختگی متناظر با معیار تسلیم

اصلاح شده موهر - کلمب از دو تابع تسلیم تشکیل شده است

که مشتمل بر قانون جریان برشی همراه<sup>۴</sup> و قانون جریان کششی

ناهمراه<sup>۵</sup> است. در فرمولاسیون تفاضل محدود در این مدل

تنش‌های اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به کار برده می‌شوند. با فرض

شرایط هندسی کرنش صفحه، تنش خارج از صفحه  $\sigma_{zz}$ ،

به عنوان یکی از تنش‌های اصلی در نظر گرفته می‌شود. تنش‌ها و

جهات اصلی با استفاده از مؤلفه‌های تانسور تنش محاسبه شده

و به صورت زیر مرتب می‌شوند:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (3)$$

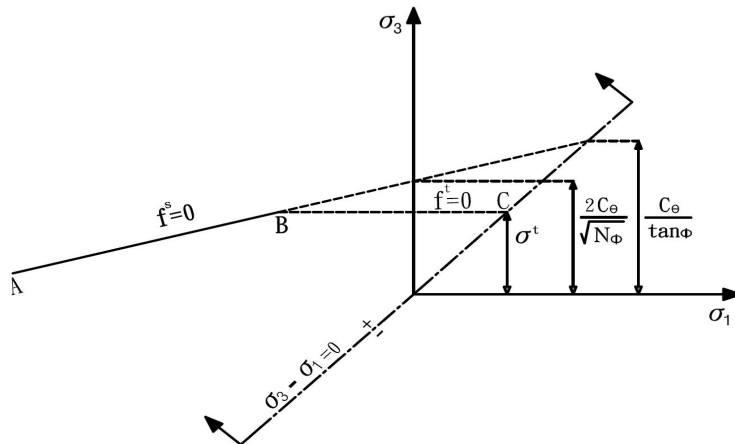
نمو کرنش‌های اصلی  $\Delta\epsilon_1$ ،  $\Delta\epsilon_2$  و  $\Delta\epsilon_3$  به شکل زیر تجزیه

می‌شوند:

$$\Delta\epsilon_i = \Delta\epsilon_i^e + \Delta\epsilon_i^p \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

که بالا نویس e و p به ترتیب اشاره به بخش الاستیک و پلاستیک

دارد. قانون هوک در حالت تنش‌های اصلی برابر است با:



شکل ۲- پوش گسیختگی متناظر با معیار تسلیم اصلاح شده موهر- کلمب

روش چولسکی تجزیه شده و با ضرب ماتریس پایین مثلثی حاصل در هریک از بردارهای غیرخود همبسته تولید شده تبدیل به حوزه‌های تصادفی خود همبسته می‌شوند:

$$\rho_{AC}(x, y) = \exp \left\{ -\sqrt{\left( \frac{\Delta x}{\theta_H} \right)^2 + \left( \frac{\Delta y}{\theta_V} \right)^2} \right\} \quad (12)$$

در این رابطه  $\theta_H$  و  $\theta_V$  به ترتیب مقیاس نوسان در جهات افق و قائم و  $\Delta x$  و  $\Delta y$  به ترتیب فاصله در راستای افقی و عمودی هستند. مقیاس نوسان پارامتری است که میزان خود همبستگی بین پارامترهای خاک را بیان می‌کند، به طوری که به ازای مقادیر زیاد مقیاس نوسان حوزه نرم و دارای تغییرات کم و به ازای مقادیر کم آن حوزه زبر و دارای گرادیان بالا می‌شود [۱۱]. مطالعات موجود نشان می‌دهد که در نتیجه فرایند ته‌نشینی خاک‌ها میزان خود همبستگی بین پارامترها در جهت افق بسیار بیشتر از راستای قائم است. مقدار  $\theta_V$  به طور کلی بین ۰/۵ و ۲ متر است در حالی که  $\theta_H$  مقادیری بین ۱۰ تا ۳۰ متر دارد [۱۲]. نسبت مقیاس نوسان در جهت افق به قائم که در این مطالعه با A.FH نشان داده می‌شود، درجه ناهمسانی ناهمگونی نامیده می‌شود و برای خاک رس مقادیری چون ۹ [۱۳]، ۱۰ [۱۴] و ۱۳ [۱۵] برای آن گزارش شده است.

به منظور اعمال همبستگی متقابل بین پارامترهای مقاومت برشی ( $c$  و  $\phi$ ) از تجزیه چولسکی ماتریس همبستگی متقابل و

$$\theta = \gamma \Delta \tan^{-1} \left( \frac{\gamma \tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \right) \quad (11)$$

#### ۴- تولید میدان تصادفی همبسته در شرایط زهکشی شده

به منظور واقعی سازی پارامترهای مقاومت برشی خاک از تئوری حوزه تصادفی استفاده می‌شود. بر اساس این تئوری مقادیر پارامتر مورد نظر در هر نقطه (مرکز نواحی در شبکه بندی تفاضلات محدود) به صورت همبسته با سایر نقاط مجاور تحت عنوان خود همبستگی تولید شده و سپس همبستگی بین پارامترهای مختلف تحت عنوان همبستگی متقابل بررسی می‌شود. روش کار به این صورت است که ابتدا بردارهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به صورت بردارهای گوسی استاندارد غیر خود همبسته ( $\epsilon_c, \phi$ ) تولید می‌شود. ساختار همبستگی یکی از خصوصیات مهم میدان تصادفی است. واضح است وقتی مقادیر یک پارامتر در نقاط مجاور شبیه هم باشند در مقایسه با حالتی که غیر مرتبط هستند با یکدیگر همبسته تر هستند. در این مطالعه از تابع همبستگی نمایی مارکوین ناهمسان برای در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای مقاومت برشی استفاده شده است.

به منظور اعمال خود همبستگی به هر یک پارامترهای مقاومتی، ماتریس خود همبستگی  $\rho_{AC}$  مربوط به هر پارامتر به

## ۵- محاسبه ظرفیت باربری پی

طراحی یک پی دو حالت حدی را در بر می‌گیرد؛ (۱) حالت حدی خدمت‌پذیری، که معمولاً به شکل نشست نامتقارن یا نشست بیشینه مجاز تفسیر می‌شود، (۲) حالت حدی نهایی، که با بیشینه بار قابل اعمال بر پی قبل از وقوع گسیختگی از نوع ظرفیت باربری مرتبط است. در این مطالعه برای تعیین ظرفیت باربری از تفسیر دوم استفاده شده و تأثیر ناهمسانی و ناهمگونی چسبندگی بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی به‌روشن عددی تفاضل محدود و با کمک نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. شالوده نواری با اعمال سرعت ثابت رو به پایین به‌صورت قائم داخل خاک زیر خود فرو می‌رود. مقدار نمو سرعت  $2/5 \times 10^{-5} \text{ m/step}$  در نظر گرفته شده است که با میزان کل جابه‌جایی مورد نیاز برای گسیختگی خاک زیر پی تقسیم بر تعداد مراحل مورد نیاز برابر است. مسأله مورد بررسی یک پی نواری به عرض ۵/۰ با کف زیر متر در حالت کرنش سطح که روی یک خاک چسبنده و اصطکاکی واقع شده است، است. مطابق شکل (۳) لایه خاک مورد نظر دارای ۳ متر عرض و یک متر عمق است که شامل ۳۴۱ گره و ۳۰۰ المان مربعی به عرض ۱۰ سانتی‌متر است.

## ۶- ظرفیت باربری در حالت یقینی

در حالت یقینی تغییرات چسبندگی خاک مطابق رابطه (۱۶) به‌صورت خطی فرض شده و مقدار زاویه اصطکاک نیز در تمام محیط ثابت فرض شده است.  $C_V$  مقدار چسبندگی قائم در سطح زمین (عمق  $z=0$ ) و  $\lambda$  نرخ تغییرات چسبندگی قائم با عمق است [۳]:

$$C_V = C_{V_0} + \lambda z \quad (17)$$

مقادیر بدون بعد ظرفیت باربری به‌صورت  $q' = q / C_V$  تعریف شده و به‌کمک برنامه‌نویسی FISH در محیط برنامه FLAC محاسبه شده است. مقادیر پارامترهای ورودی مطابق جدول (۱) است و در این جدول B و  $\gamma$  به‌ترتیب عرض پی و وزن واحد حجم خاک هستند. در محاسبات صورت گرفته

ضرب آن در بردار خود همبسته مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) بهره گرفته شد:

$$\rho_{CC} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{c\phi} \\ \rho_{c\phi} & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

در این ماتریس  $\rho_{c\phi}$  ضریب همبستگی متقابل بین پارامترهای  $c$  و  $\phi$  است.

$$\mathbf{G}' = \mathbf{L}_{CC} \mathbf{G} \quad (14)$$

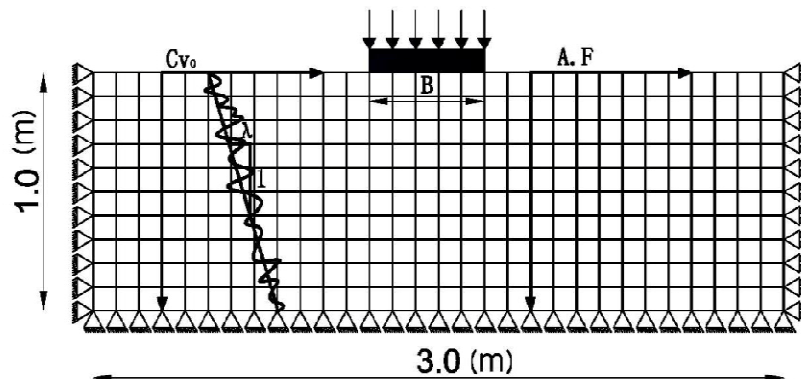
که در آن بردار تصادفی خود همبسته و  $\mathbf{L}_{CC}$  ماتریس پایین مثلثی حاصل از تجزیه چولسکی ماتریس همبستگی متقابل و  $\mathbf{G}'$  بردار حوزه تصادفی همبسته متقابل است. در نتیجه حوزه تصادفی برای پارامتر چسبندگی با میانگین و انحراف معیار مشخص و با فرض توزیع لگاریتم نرمال از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$c = \exp(\sigma_{\ln c} \cdot G'_c + \mu_{\ln c}) + \lambda_c \cdot z \quad (15)$$

که در رابطه بالا  $\mu_{\ln c}$  میانگین لگاریتم چسبندگی،  $\sigma_{\ln c}$  انحراف معیار لگاریتم چسبندگی و نیز  $\lambda_c$  چگالی مقاومت یا نرخ تغییرات چسبندگی با عمق است. در عمل به‌جای استفاده از انحراف معیار از یک ضریب تغییرات بدون بعد (COV) استفاده می‌شود که از تقسیم میانگین بر انحراف معیار به‌دست می‌آید. از آنجا که زاویه اصطکاک داخلی خاک هر مقداری را نمی‌تواند اختیار کند، فرض می‌شود زاویه اصطکاک داخلی خاک دارای حد بالا و پایین باشد. معمولاً از توزیع بتا برای متغیرهایی که محدود هستند استفاده می‌شود. شبیه‌سازی میدان تصادفی دارای توزیع بتا از لحاظ عددی مشکل و زمان‌بر است. با توجه به این مشکلات از یک توزیع کراندار برای  $\phi$  استفاده می‌شود به‌طوری که توزیع بتا را شبیه‌سازی کند و یک رابطه ساده‌ای با میدان تصادفی استاندارد نرمال،  $G'_\phi$ ، مطابق زیر داشته باشد:

$$\phi(x) = \phi_{\min} + \frac{1}{\gamma} (\phi_{\max} - \phi_{\min}) \left\{ 1 + \tanh\left(\frac{s \cdot G'_\phi}{\gamma \pi}\right) \right\} \quad (16)$$

که  $\phi_{\min}$  و  $\phi_{\max}$  به‌ترتیب زاویه اصطکاک کمینه و بیشینه  $s$  و یک ضریبی است که تغییرات زاویه اصطکاک را بین دو حد بالا و پایین تعیین می‌کند.



شکل ۳- المان بندی مورد استفاده در تحلیل ظرفیت باربری شالوده

جدول ۱- مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فرض شده در تحلیل های یقینی

| مقادیر در نظر گرفته شده      | کمیت ها                 |
|------------------------------|-------------------------|
| ۱۰                           | $\varphi^\circ$         |
| ۲۰                           | $G = \gamma B / C_{H0}$ |
| ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲               | $A.F_M = C_H / C_V$     |
| ۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ | $v = \lambda B / C_H$   |

جدول ۲- مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای فرض شده در حالت کاتوره ای

| مقادیر در نظر گرفته شده | کمیت ها                       |
|-------------------------|-------------------------------|
| ۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵     | $COV_{C_V} = COV_\varphi$     |
| ۲۵                      | $\mu_c$ (kPa)                 |
| ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲          | $A.F_M = C_H / C_V$           |
| ۰/۵، ۱                  | $\theta_v$ (m)                |
| ۱، ۵، ۱۰                | $A.F_H = \theta_H / \theta_v$ |
| ۰، -۱                   | $\rho_{c\varphi}$             |
| ۲۵                      | $\phi_{max}^\circ$            |
| ۵                       | $\phi_{min}^\circ$            |

مقاومت برشی زهکشی شده به عنوان پارامترهای ناهمگون کاتوره ای در نظر گرفته شدند. مدول سختی با فرض در نظر گرفتن نسبت ثابت  $300 E/C$  به صورت کاملاً همبسته با چسبندگی در نظر گرفته شد. تأثیر پارامترهایی چون  $COV_{C_V}$ ،  $A.F_H$ ،  $\theta_v$  و  $\rho_{c\varphi}$  روی ظرفیت باربری پی های سطحی با اتخاذ مقادیری مطابق جدول (۲) بررسی شد. به ازای هر ترکیبی از مقادیر  $COV_{C_V}$ ،  $A.F_M$ ،  $\theta_v$ ،  $A.F_H$  و  $\rho_{c\varphi}$  شبیه سازی مونت کارلو شامل  $5000$  واقعی سازی از

ضرایب پواسون در صفحات افق و قائم ( $V_{HH}$ ،  $V_{VH}$  و  $V_{HV}$ ) در تمامی المان ها ثابت در نظر گرفته شده اند.

## ۷- ظرفیت باربری کاتوره ای

محاسبه ظرفیت باربری شالوده سطحی قرار گرفته بر روی یک نهشته طبیعی دارای ناهمگونی کاتوره ای در حالت زهکشی شده به وسیله یک برنامه FISH که ترکیبی از روش تفاضل محدود و تئوری حوزه تصادفی است انجام گرفته است. پارامترهای

جدول ۳- مقایسه بین مقادیر  $N_c$  در حالت همسان و همگن ( $AF_M = 1$ ،  $v = 0$  و  $G = 0$ )

| مقادیر $N_c$         |                      | روش به کار گرفته شده     | محققین              |
|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|
| $\varphi = 20^\circ$ | $\varphi = 10^\circ$ |                          |                     |
| ۱۷/۰۰                | ۹/۳۰                 | تعادل حدی                | ترزاقی*             |
| ۱۴/۵۰                | ۸/۰۰                 | روش خطوط مشخصه تنش       | * میرهوف            |
| ۱۷/۰۰                | ۹/۳۰                 | روش مشخصه                | ردی و سرینواسان [۲] |
| ۱۴/۸۴                | ۸/۳۵                 | روش تحلیل حدی (حد بالا)  | سالنکون [۱۶]        |
| ۱۴/۸۰                | ۸/۳۴                 | روش تحلیل حدی (حد پایین) | چن [۱۷]             |
| ۱۴/۸۳                | ۸/۳۴                 | روش تحلیل حدی (حد بالا)  | ردی و راثو [۱۸]     |
| ۱۴/۹۴                | ۸/۵۲                 | روش تفاضل محدود          | مطالعه کنونی        |

\* ردی و سرینواسان [۲]

آوردند. کار این دو محقق به عنوان بسط و توسعه کار چن [۱۷] محسوب می شود و فرضیات به کار گرفته شده در ارتباط با ناهمسانی و ناهمگونی چسبندگی مشابه فرضیات به کار رفته در این مطالعه است. همان طور که در شکل (۴) مشخص شده است با افزایش  $A.F.M$  و  $v$  ظرفیت باربری افزایش یافته است. به ازای یک  $A.F.M$  ثابت، افزایش  $v$  در واقع بیانگر افزایش چگالی مقاومت ( $\lambda$ ) است. بنابراین می توان این طور استدلال کرد که با افزایش  $\lambda$  ظرفیت باربری نیز افزایش می یابد. همچنین تأثیر  $\lambda$  بر روی ظرفیت باربری با افزایش  $A.F.M$  افزایش می یابد. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با آنچه ردی و راثو [۱۸] ارائه داده اند نمایانگر همخوانی بسیار خوب نتایج است.

علاوه بر این در شکل (۵) تأثیر  $COV_{Cv}$  به عنوان پارامتر کاتوره ای بر روی ظرفیت باربری کاتوره ای پی سطحی نشان داده شده است. در شکل (۵- الف) چسبندگی در جهت قائم ( $C_v$ ) و زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\varphi$ ) کاملاً مستقل از هم لحاظ شده اند ( $\rho = 0$ )، در حالی که در شکل (۵- ب) این دو پارامتر به صورت کاملاً همبسته منفی در نظر گرفته شدند ( $\rho = -1$ ).

مطابق شکل (۵) افزایش ضریب تغییرات چسبندگی قائم،  $COV_{Cv}$  موجب کاهش میانگین ظرفیت باربری پی های سطحی می شود. در واقع افزایش ضریب تغییرات چسبندگی قائم موجب افزایش احتمال شکل گیری نواحی با مقدار چسبندگی ضعیف تر در لایه های زیرین پی می شود و در نتیجه با کوتاه تر شدن طول مسیر گسیختگی میانگین ظرفیت

پارامترهای مقاومت برشی انجام شد و سپس ظرفیت باربری متناظر با هر یک از شبیه سازی ها محاسبه و در نهایت میانگین آنها ( $\mu_{ult}$ ) و ضریب تغییرات ظرفیت باربری ( $COV_{ult}$ )، به دست آورده شد.

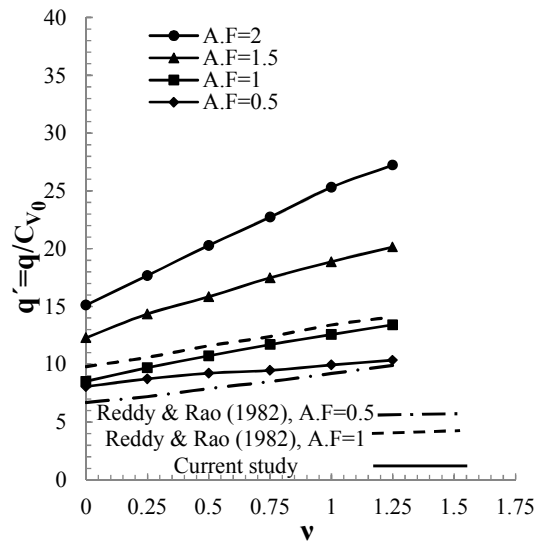
## ۸- تحلیل نتایج

در حالت یقینی برای سنجش میزان اعتبار نتایج، بین نتایج به دست آمده از تحلیل های عددی حاضر و نتایج دیگران مقایسه صورت گرفته است. جهت صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل های عددی، ظرفیت باربری در حالت کاملاً همسان و همگن ( $AF_M = 1$  و  $v = 0$ ) محاسبه شده و با نتایج حاصله از چندین روش و روابط ظرفیت باربری رایج مقایسه شد. به همین منظور و به جهت سادگی محاسبات خاک بدون وزن در نظر گرفته شده ( $G = 0$ ) و تحت این فرض رابطه ظرفیت باربری به صورت  $q = C_v \cdot N_c$  خلاصه می شود و مقادیر  $N_c$  برای خاک مورد نظر به دست می آید.

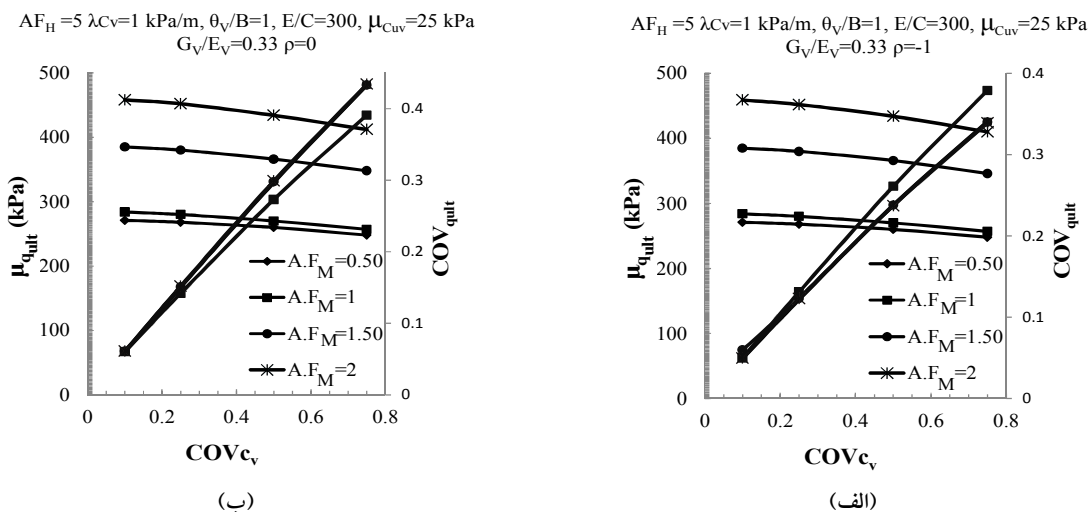
جدول (۳) مقایسه ای بین مقادیر به دست آمده  $N_c$  از روش عددی تفاضل محدود استفاده شده در این مقاله با مقادیر  $N_c$  به دست آمده توسط دیگر محققین، که از روش های گوناگون نظیر تعادل حدی یا تحلیل حدی استفاده کرده اند، را نشان می دهد.

ردی و راثو [۱۸] با به کارگیری مکانیزم گسیختگی پراتل و با استفاده از تحلیل حدی (حد بالا)، ظرفیت باربری پی های سطحی را بر روی خاک های ناهمگون و ناهمسان به دست





شکل ۴- تغییرات  $q'$  به‌ازای مقادیر  $A.F_M$  در زاویه اصطکاک  $10^\circ$  درجه

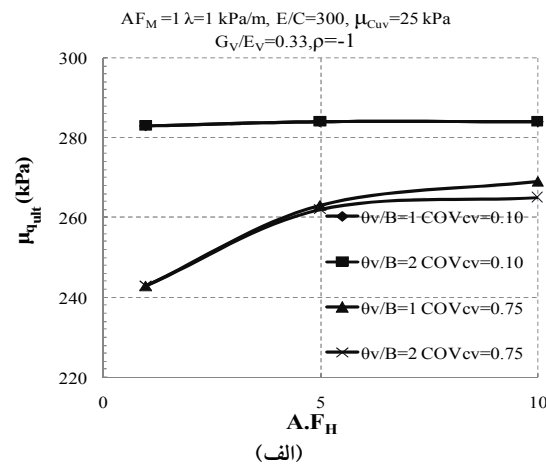
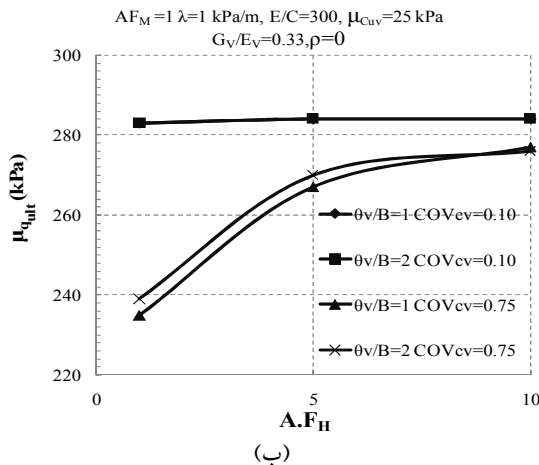


شکل ۵- تأثیر ضریب تغییرات چسبندگی بر روی میانگین ظرفیت باربری پی‌های سطحی: (الف)  $\rho_\phi = 0$  و (ب)  $\rho_\phi = -1$

باربری ظرفیت باربری پی‌های سطحی است. فنتون و گریفیس [۱۹] با مطالعه بر روی ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر محیط خاکی ناهمگون سعی بر تشریح اثر طول همبستگی یا مقیاس نوسان بر ظرفیت باربری کردند. در شرایطی که فضای مسأله همگن باشد مسیر گسیختگی از یک لگاریتم- اسپیرال<sup>۷</sup> تبعیت خواهد کرد. با زیاد شدن فاصله همبستگی و نزدیک شدن آن به بی‌نهایت فیزیکی شرایطی اتفاق می‌افتد که در هر

باربری کاهش می‌یابد. علاوه بر این افزایش ضریب تغییرات چسبندگی قائم موجب افزایش پراکندگی مقادیر ظرفیت باربری محاسبه شده و در نتیجه افزایش ضریب تغییرات آن در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته می‌شود که این مسأله در شکل (۵) در دو حالت  $\rho = 0$  و  $\rho = -1$  کاملاً مشهود است.

شکل (۶) نشانگر تأثیر نسبت ناهمسانی ناهمگونی ( $A.F_H$ ) در دو حالت غیرهمبسته ( $\rho = 0$ ) و کاملاً همبسته منفی ( $\rho = -1$ )



شکل ۶- تأثیر ناهمسانی ناهمگونی بر روی میانگین ظرفیت باربری پی‌های سطحی در دو حالت: (الف)  $\rho_{cp}=0$  و (ب)  $\rho_{cp}=-1$

موهر- کلمب استاندارد به حالت ناهمسان تبدیل شد و نتایج هم در حالت یقینی و هم در حالت کاتوره‌ای حاکی از نقش چشمگیر ناهمسانی مکانیکی چسبندگی در افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی دارد. ناهمگونی فضایی پارامترهای مقاومت برشی خاک به کمک تئوری فضای تصادفی در ترکیب با روش تفاضل محدود و اثر آن بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی در چارچوب شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو بررسی و نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل توجه میانگین ظرفیت باربری با افزایش تغییرپذیری فضایی پارامترهای مقاومتی است. این بدان معنی است که نادیده گرفتن اثرات ناهمگونی پارامترهای مقاومت برشی خاک منجر به طراحی نادرست و غیرمطمئن می‌شود. علاوه بر آن اثر ناهمسانی ناهمگونی،  $A.F_H$  بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی بررسی و نتایج حاکی از اثر افزایشی این نوع ناهمسانی بر ظرفیت باربری کاتوره‌ای پی‌های سطحی است. بزرگ شدن نسبت ناهمسانی ناهمگونی منجر به تبدیل تحلیل‌های کاتوره‌ای به تحلیل‌های یقینی و محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی در شرایط همگن که از یک سطح لگاریتم اسپیرال تبعیت می‌کند می‌شود.

واقعی‌سازی فضای مسأله همگن بوده و لیکن مقدار واقعی‌سازی از یک شبیه‌سازی به شبیه‌سازی دیگر متفاوت خواهد بود. بنابراین به‌صورت میانگین جواب مسأله قابل پیش‌بینی است. فتون و گریفیس [۱۹] اظهار داشتند که میانگین ظرفیت باربری در شرایطی که  $\theta_v/B=1$  باشد کمینه است. با این استدلال در تحقیق حاضر شرایط  $\theta_v/B=1$  و  $A.F_H=1$  فائدتاً بایستی متناظر با مقدار کمینه برای میانگین ظرفیت باربری باشد. با بالا رفتن نسبت ناهمسانی ناهمگونی،  $A.F_H$ ، به سمت بزرگ شدن فاصله همبستگی پیش رفته و باید انتظار داشت که ظرفیت باربری اندکی افزایش یابد. با نگاهی به بخش‌های مختلف شکل (۶) این روند تأیید می‌شود. بنابراین نسبت ناهمسانی ناهمگونی هر چند اندک ولی نقش افزایشی بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی دارد.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثر ناهمسانی و ناهمگونی فضایی پارامترهای مقاومت برشی خاک بر روی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در حالت زهکشی شده پرداخته شد. بدین منظور جهت بررسی اثر ناهمسانی مکانیکی چسبندگی خاک،  $A.F_M$ ، مدل

1. cross correlation
2. deterministic
3. stochastic
4. associated shear flow rule
5. non-associated flow rule
6. beta distribution
7. logarithm-spiral

## مراجع

1. Reddy, A. S., and Srinivasan, R. J., "Bearing Capacity of Footings on Layered Clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93(SM2), pp. 83-99, 1967.
2. Reddy, A. S., and Srinivasan, R. J., "Bearing Capacity of Footings on Anisotropic Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96(SM6), pp. 1967-1986, 1970.
3. Salencon, J., "Bearing Capacity of a Footing on  $\phi=0$  Soil with Linearly Varying Shear Strength", *Geotechnique*, Vol. 24, No. 3, pp. 443-446, 1974a.
4. Salencon, J., Florentin, P., and Gabriel, Y., "Capacite Portante Globalendune Foundation Sur un Sol Nonhomogene", *Geotechnique*, Vol. 26, No. 2, pp. 351-370, 1976.
5. Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity of Anisotropic Cohesionless Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 592-595, 1978.
6. جمشیدی چناری، ر. و کریمیان، ا. "واقعی سازی مقاومت برشی زهکشی نشده در نهشته‌های طبیعی به کمک تئوری میدان تصادفی"، *مجله علمی- پژوهشی روش‌های عددی در مهندسی*، سال ۳۰، شماره ۲، ص ۲۱-۴۳، ۱۳۹۰.
7. Duncan, J. M., and Seed, H. B., "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 92(SM5), pp. 21-50, 1966.
8. Mayne, P. W., "Stress Anisotropy Effects on Clay Strength", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 111, pp. 356-66, 1985.
9. Casagrande, A., and Carrillo, N., "Shear Failure on Anisotropic Materials", *Journal of Boston Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 74-87, 1944.
10. Lo, K. Y., "Stability of Slopes in Anisotropic Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 31(SM4), pp. 85-106, 1965.
11. Griffiths, D. V., and Fenton, G. A., "Bearing Capacity of Spatially Random Soil, the Undrained Clay Prandtl Problem Revisited", *Geotechnique*, Vol. 51, No. 4, pp. 351-359, 2001.
12. Cherubini, C., "Reliability Evaluation of Shallow Foundation Bearing Capacity on  $c', \phi'$  Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 1, pp. 264-269, 2000.
13. Vanmarcke, E., "Reliability of Earth Slopes", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. 11, pp. 1247-1265, 1971.
14. Soulie, M., Montes, P., and Silvestri, V., "Modeling Spatial Variability of Soil Parameters", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 617-630, 1990.
15. Phoon, K. K., and Kulhawy, F. H., "Characterization of Geotechnical Variability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 612-624, 1999.
16. Salencon, J., Discussion on the paper "The Effect of Increasing Depth on the Bearing Capacity of Clays by Davis and Booker", *Geotechnique*, Vol. 24, No. 3, pp. 449-451, 1974b.
17. Chen, W. F., *Limit Analysis and Soil Plasticity*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1975.
18. Reddy, A. S., and Venkatakrishna Rao, K. N., "Bearing Capacity of Strip Footing on  $c-\phi$  Soils Exhibiting Anisotropy and Nonhomogeneity in Cohesion", *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 1, pp. 49-60, 1982.
19. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V., "Bearing Capacity Prediction of Spatially Random  $c - \phi$  Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 54-65, 2003.