

ملاحظات در باره اثر شیب بار بر ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری

محسن کاملیان^۱، کامبیز بهنیا^۲، محمدرضا لطفی زاده^۳ و ابوالفضل رستگار^۴

^۱دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

^۲دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۳دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

^۴دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه عمران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۵/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۱۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

چکیده

محققین پیشین ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری را عمدتاً با این فرض متعارف برآورد کردند که نه تنها نیروی حجمی و نیز سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی، بلکه حتی فشار تماس زیر پی، با راستای قائم زاویه‌ای یکنواخت و متناسب با ضریب افقی شتاب زلزله می‌سازند. برآستی اگر در قاب‌های خمشی دارای چند دهانه، از بادی، تکیه‌گاه غلطکی یا برخی عوامل دیگر در مکانیسم باربری افقی سازه استفاده شود و لذا شیب بارهای لرزه‌ای وارده بر کف پی‌ها متفاوت باشد، ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌ها چگونه تغییر خواهد یافت؟ مقاله‌ی حاضر بر آن است تا به این سؤال پاسخ دهد. برای این منظور ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری با بکارگیری روش خطوط مشخصه برآورد و اثر شیب بار کف پی مورد توجه قرار گرفته است. نشان داده شده است که هر قدر شیب بار کف پی کمتر باشد، ظرفیت باربری قائم پی فزون‌تر خواهد شد. همچنین این یافته‌ی محققین پیشین مورد تأکید قرار گرفته است که اثر زلزله بر هر یک از نیروی حجمی خاک و سربار، همانند اثر آن بر شیب بار کف پی، بیش از آن است که نادیده گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت باربری لرزه‌ای، پی نواری، زلزله، خطوط مشخصه، شیب بار.

مقدمه

بیشتری صورت می‌پذیرد. روش خطوط مشخصه تنش اگرچه در «دنیای تعادل خمیری» جای دارد، اما از منظر «آنالیز حدی^۵» نه حد بالای^۶ بار گسیختگی را بدست می‌دهد و نه همواره حد پایین^۷؛ اگر بتوان در نواحی پوشیده نشده از خطوط مشخصه چنان میدان تنشی را یافت که معیار گسیختگی (معمولاً موهر کولمب^۸) را نقض نکند، آن وقت می‌توان اطمینان داشت که پاسخ بدست آمده، حد پایین بار گسیختگی محسوب است.

بدیهی است که شیب بار وارده بر کف پی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری را متأثر می‌سازد. یادآور می‌شود که مراد از بار وارده بر کف پی، نیروی کل وارده بر کف پی یا همان برآیند فشار تماس کف پی است و مراد از شیب بار کف پی، زاویه‌ی نیروی کل وارده بر کف پی با راستای قائم، همچنین یادآور می‌شود که مقاله‌ی حاضر نیز چون اغلب کارهای مشابه ثبت شده در ادبیات فنی، فرض را بر تساوی زاویه‌ی میل فشار تماس کف پی نسبت به محور قائم با شیب بار وارده بر کف پی گذاشته که فرضی تقریبی اما ساده کننده است. ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری معمولاً با این فرض متعارف در ادبیات فنی ارائه شده است

بناها همه سرانجام بر روی خاک قرار می‌گیرند. بنابراین ظرفیت باربری^۱ پی‌ها یکی از مهمترین موضوعات حوزه مکانیک خاک و مهندسی پی است. بدیهی است که ظرفیت باربری لرزه‌ای^۲ پی‌ها که در هنگام وقوع زلزله^۳ موضوعیت دارد، در این میان جایگاهی خاص دارد. سارما و لسفیلیس [۱]، ریچارد و همکاران [۲]، بودهو و الکرنی [۳ و ۴]، سوپرا [۵] و کومارو راتو [۶] نشان دادند که ضرائب ظرفیت باربری پی‌ها به هنگام وقوع زلزله، در قیاس با شرایط بارگذاری استاتیکی کاهش بسیار قابل توجهی دارد.

روش خطوط مشخصه^۴ تنش (سوکولوسکی [۷]، بوکر و دیویس [۸] و اتکینسون [۹]) یکی از جذاب‌ترین و مؤثرترین روش‌های عددی است که برآورد ظرفیت باربری استاتیکی و لرزه‌ای پی‌های نواری را ممکن می‌سازد. امتیاز مهم این روش بر سایر روش‌های عددی آن است که معمولاً نه با مش‌بندی‌های متعارف و پر دردر دست به گریبان است و نه با مدل‌های رفتاری پیچیده و خاص خاک. از آنجایی که در لحظه گسیختگی، تنها میدان تنش و نه میدان کرنش، مورد نیاز است، محاسبات با سادگی و سرعت

راستای تنش اصلی بزرگ (σ_1) با محور x (θ) بازنویسی کنیم، روابط زیر بدست خواهد آمد (شکل ۲):

$$\sigma_x = p + R \cos 2\theta \quad (۳-الف)$$

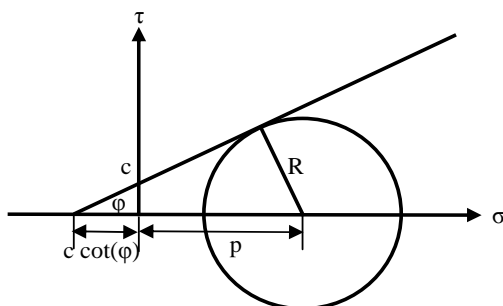
$$\sigma_y = p - R \cos 2\theta \quad (۳-ب)$$

$$\tau_{xy} = R \sin 2\theta \quad (۳-پ)$$

که در آن:

$$R = p \sin \phi + c \cos \phi \quad (۴)$$

R شعاع دایره موهر و p فاصله مرکز آن را از مبدأ مختصات نشان می‌دهند (شکل ۱).



شکل (۱): دایره موهر تنش‌ها در حالت گسیختگی

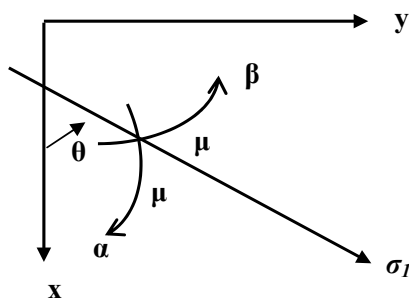
اکنون به راحتی می‌توان دستگاه معادلات تعادل (رابطه ۱) را بر حسب متغیرهای جدید p و θ به شرح زیر بازنویسی نمود (بوکر و دیویس [۸]):

$$\frac{\partial p}{\partial x} (1 + \sin \phi \cos 2\theta) + \frac{\partial p}{\partial y} \sin \phi \sin 2\theta + \quad (۵)$$

$$2R \left(-\frac{\partial \theta}{\partial x} \sin 2\theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos 2\theta \right) = \gamma \cos \varepsilon \quad (الف)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \sin \phi \sin 2\theta + \frac{\partial p}{\partial y} (1 - \sin \phi \sin 2\theta) + \quad (۵)$$

$$2R \left(+\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos 2\theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin 2\theta \right) = \gamma \sin \varepsilon \quad (ب)$$



شکل (۲): موقعیت محور تنش اصلی بزرگ (σ_1) و خطوط مشخصه مشخصه α و β در دستگاه مختصات کارتزین خطوط مشخصه نظیر دستگاه معادله (۵) را می‌توان با

که نه تنها نیروی حجمی و نیز سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی، بلکه حتی فشار تماس^۹ کف پی، با راستای قائم زاویه‌ای متناسب با ضریب شتاب زلزله (k_h)^{۱۰} و برابر $\alpha = \tan^{-1}(k_h)$ می‌سازند. اما آیا این فرض همواره صحیح است؟ اگر استفاده از سیستم بادبند در تنها بعضی دهانه‌ها، وجود تکیه‌گاه‌های غلطکی در پای برخی ستون‌ها، یا پاره‌ای عوامل دیگر باعث شود که شیب بار در زیر پی برخی ستون‌ها با زاویه‌ی α متفاوت باشد، ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی چگونه تغییر خواهد یافت؟ مقاله‌ی حاضر بر آن است تا با استفاده از روش خطوط مشخصه، پرسش اخیر را بررسی و پاسخی برای آن ارائه کند.

در ادامه این مقاله ابتدا فرمولبندی و الگوریتم حل مسأله ظرفیت باربری پی‌های نواری با استفاده از روش خطوط مشخصه شرح داده شده است. سپس ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری با استفاده از روش خطوط مشخصه تنش و بر اساس این فرض برآورد شدند که هم نیروی حجمی، هم سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی و هم شیب بار زیر پی، با راستای قائم زاویه‌ی α می‌سازند. پس از آن ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری برای حالتی برآورد گردیدند که شیب بار کف پی از زاویه‌ی α کمتر است. نهایتاً نمودارها و جداولی ارائه شدند که ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری را در حالت اخیر بدست می‌دهند.

مبانی روش خطوط مشخصه

دستگاه معادلات تعادل حاکم بر یک المان دو بعدی کرنش صفحه‌ای را می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \gamma \cos \varepsilon \quad (۱-الف)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \gamma \sin \varepsilon \quad (۱-ب)$$

γ بیانگر وزن مخصوص خاک و ε نشانگر زاویه نیروی حجمی با محور x است. رفتار خاک صلب خمیری و معیار کسینجنگی با رابطه موهر کولمب بیان می‌شود:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \quad (۲)$$

$(\sigma_x + \sigma_y + 2c \cot \phi)^2 \sin^2 \phi$
اگر تنش‌های σ_x ، σ_y و τ_{xy} را با کمک دایره موهر (شکل ۱) بر حسب پارامترهای مقاومت برشی و نیز دو پارامتر میانگین تنش‌های اصلی بزرگ و کوچک (p) و زاویه

مختصات و متغیرهای p و θ در امتداد دو منحنی مشخصه آن (OQ) و خود نقطه O که یک منحنی مشخصه β با طول قوس بی‌نهایت کوچک است) معلوم می‌باشد.

۳- ناحیه مرکب^{۱۴} (ORS) که برخی شرایط مرزی در امتداد یک منحنی مشخصه (OR) و برخی دیگر (مثلاً θ) در امتداد یک منحنی غیرمشخصه آن (مرز OS) معلوم است. به منظور حل مسأله در هر یک از نواحی سه‌گانه فوق‌الذکر، می‌توان با بکارگیری الگوریتم پیشنهادی بوکر و دیویس [۸] و به ترتیب زیر عمل کرد. نرم‌افزار SLM (کمالیان [۱۰]) که محاسبات مقاله‌ی حاضر توسط آن انجام شده، بر اساس این الگوریتم تدوین شده است:

حل ناحیه کوشی

دو نقطه مجاور A و B روی مرز معلوم OT در نظر گرفته می‌شود. نقطه P محل تلاقی دو خط مشخصه α و β است که به ترتیب از نقاط A و B عبور کرده‌اند. برای یافتن مختصات و متغیرهای p و θ در نقطه P کافی است دستگاه معادلات (۶) و (۸) را با کمک الگوریتم تفاضل محدود به ترتیب به شکل تقریبی زیر بازنویسی و با روش سعی و خطا حل کنیم:

$$y_P - y_A = \tan\left[\frac{\theta_P + \theta_A}{2} - \mu\right][x_P - x_A] \quad (9)$$

$$y_P - y_B = \tan\left[\frac{\theta_P + \theta_B}{2} + \mu\right][x_P - x_B]$$

و

$$\begin{aligned} & -\sin(2\mu) \cdot [p_P - p_A] + [R_A + R_P][\theta_P - \theta_A] = \\ & -\gamma \cdot \sin(-\varepsilon + 2\mu)[x_P - x_A] - \\ & \gamma \cdot \cos(-\varepsilon + 2\mu)[y_P - y_A] \\ & \sin(2\mu) \cdot [p_P - p_B] + [R_B + R_P][\theta_P - \theta_B] = \\ & -\gamma \cdot \sin(-\varepsilon - 2\mu)[x_P - x_B] - \\ & \gamma \cdot \cos(-\varepsilon - 2\mu)[y_P - y_B] \end{aligned} \quad (10)$$

ابتدا تخمین اولیه‌ای از متغیرهای x_P, y_P, p_P و θ_P را در دستگاه معادلات (۱۰) قرار و مقادیر جدید متغیرهای p_P و θ_P را بدست می‌آوریم. سپس این مقادیر را در دستگاه معادلات (۹) قرار داده و مقادیر جدیدی برای متغیرهای x_P و y_P می‌یابیم. این عملیات را آنقدر تکرار^{۱۵} می‌کنیم تا دقت مورد نظر حاصل آید. ادامه حرکت در راستای مرز معلوم OT و یافتن دیگر نقاط مشابه P، مرز معلوم و غیر مشخصه دیگری را نظیر O'T بدست می‌دهد که می‌تواند سرآغاز حرکت برای نقاط زیرین باشد.

روابط زیر نشان داد (بوکر و دیویس [۸]):

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta - \mu) \quad (6-الف)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta + \mu) \quad (6-ب)$$

که در آن:

$$\mu = \pi/4 - \phi/2 \quad (7)$$

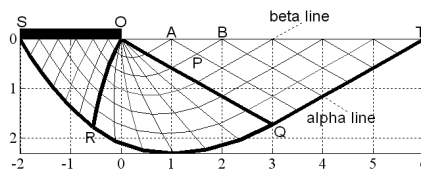
روابط (۶-الف) و (۶-ب) به ترتیب خطوط مشخصه α و β را بیان می‌دارند که به طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. اکنون به راحتی می‌توان دستگاه معادلات (۵) را که در سیستم مختصات کارترین نوشته شده، در دستگاه مختصاتی که خطوط مشخصه α و β محورهای آن را تشکیل می‌دهند، به شرح زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} & -\sin 2\mu \frac{\partial p}{\partial s_\alpha} + 2R \frac{\partial \theta}{\partial s_\alpha} + \\ & \gamma[\sin(-\varepsilon + 2\mu) \frac{\partial x}{\partial s_\alpha} + \cos(-\varepsilon + 2\mu) \frac{\partial y}{\partial s_\alpha}] = 0 \\ & \sin 2\mu \frac{\partial p}{\partial s_\beta} + 2R \frac{\partial \theta}{\partial s_\beta} + \\ & \gamma[\sin(-\varepsilon - 2\mu) \frac{\partial x}{\partial s_\beta} + \cos(-\varepsilon - 2\mu) \frac{\partial y}{\partial s_\beta}] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

عبارات $\partial/\partial s_\beta$ و $\partial/\partial s_\alpha$ به ترتیب مشتق نسبت به طول قوس را در راستای خطوط مشخصه α و β بیان می‌دارند.

الگوریتم حل مسأله با روش خطوط مشخصه

شکل (۳) تصویری شماتیک از چگونگی آرایش خطوط مشخصه زیر نیمه سمت راست یک پی صیقلی را نشان می‌دهد. نقطه (O) گوشه سمت راست و نقطه (S) مرکز پی را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، خاک زیر پی از سه ناحیه خمیری شده به شرح زیر تشکیل می‌گردد که باید به ترتیب یکی پس از دیگری حل شوند:



شکل (۳): تصویر شماتیک آرایش خطوط مشخصه زیر نیمه

سمت راست یک پی صیقلی

- ۱- ناحیه کوشی^{۱۱} (OTQ) که شرایط مرزی^{۱۲} شامل مختصات و متغیرهای p و θ در امتداد یک منحنی غیر مشخصه آن (مرز OT) معلوم است.
- ۲- ناحیه گورست^{۱۳} (OQR) که شرایط مرزی شامل

حل نواحی گورست و مرکب

نقطه O یک مرز مشخصه β با طول قوس صفر است. در اولین نقطه این مرز مشخصه که با ناحیه کوشی مشترک است، متغیرهای p و θ و در آخرین نقطه آن که با ناحیه مرکب مشترک است، متغیر θ معلوم است. ابتدا با کمک رابطه دوم دستگاه (۱۰) و با توجه به صفر بودن سمت راست تساوی، متغیر p در نقاط میانی و انتهایی این خط مرز مشخصه محاسبه می‌شود. پس از آن به ترتیب زیر عمل می‌گردد:

از گره دوم بر روی مرز مشخصه β یک خط مشخصه α و از گره دوم بر روی مرز مشخصه α (OQ) یک خط مشخصه β گذرانده می‌شود. برای یافتن مختصات و متغیرهای p و θ در محل تلاقی این دو خط مشخصه (نقطه P) از همان روش حل ناحیه کوشی استفاده می‌گردد. اکنون گره P و گره سوم بر روی مرز مشخصه α جایگزین گره‌های آغازین پیشین و عملیات مجدداً انجام می‌شود. تکرار عملیات فوق‌الذکر مختصات و متغیرهای p و θ را در امتداد دومین خط مشخصه α از ناحیه گورست بدست می‌دهد. نشانیدن این خط مشخصه α به جای مرز مشخصه α و از سرگیری عملیات فوق‌الذکر، پیشروی در امتداد مرز مشخصه β و در نتیجه حل ناحیه گورست را ممکن می‌سازد.

با حل ناحیه گورست، مختصات و متغیرهای p و θ در امتداد آخرین خط مشخصه α آن (منحنی OR) بدست می‌آید. این خط مشخصه، مرز مشخصه معلوم ناحیه مرکب است. به منظور حل ناحیه مرکب، مانند ناحیه گورست عمل می‌شود. با حل ناحیه مرکب تعیین توزیع فشار تماس زیر بخش سمت راست پی (خط OS) ممکن می‌گردد. انتگرال مؤلفه‌های قائم (σ_x) و افقی (τ_{xy}) فشار تماس در هر دو بخش سمت راست و چپ پی، مؤلفه‌های قائم (P_v) و افقی (P_h) نیروی گسیختگی وارد بر پی را بدست می‌دهد.

ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری

ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم پی نواری از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$q_v = P_v/b = 0.5 \cdot b \cdot \gamma \cdot N_\gamma + q \cdot N_q + c \cdot N_c \quad (11)$$

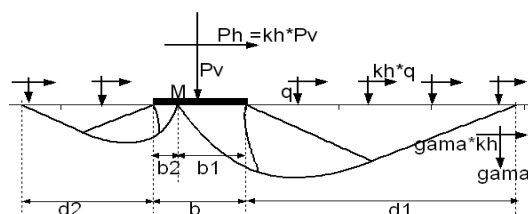
که در آنها: N_c و N_q ضرائب ظرفیت باربری هستند که با فرض صحت اصل جمع آثار قوا^{۱۴}، اثر وزن (γ) ، سربار (q) و

چسبندگی (c) را بر آن بیان می‌دارند.

شکل (۴) تصویری شماتیک از صورت مسأله را نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود، فرض بر آن است که:

- هر یک از نیروی حجمی، سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی و فشار تماس زیر پی، با راستای قائم زاویه‌ای برابر $\alpha = \tan^{-1}(k_h)$ می‌سازند. k_h ضریب شتاب افقی زلزله است.

- آرایش خطوط مشخصه زیر پی، به سبب عدم تقارن در بارگذاری، نامتقارن است. به عبارت دیگر حل مسأله از گوشه‌های سمت راست و چپ پی، به پاسخ یکسانی منتهی نمی‌شود. بنابراین بر خلاف حالت بارگذاری استاتیکی، نمی‌توان به حل نیمی از مسأله اکتفاء و پاسخ آن را در دو ضرب کرد. بدیهی است به جای حل مسأله از گوشه سمت چپ، می‌توان علامت نیروهای افقی را عکس و ضمن حل مسأله از همان گوشه سمت راست، با استفاده از اصل تقارن، میدان تنش را به سمت چپ پی منتقل کرد.



شکل (۴): تصویر شماتیک وضعیت بارگذاری لرزه‌ای پی نواری

ضریب باربری N_γ

در این حالت فرض بر آن است که محیط وزین و فاقد سربار و چسبندگی است. به منظور جلوگیری از ناپایداری عددی، مقدار سربار برابر عددی کوچک قرار داده می‌شود. به هنگام حل مسأله از گوشه سمت راست پی، شرایط مرزی را به راحتی می‌توان نشان داد (کومار و رائو [۶]) که به قرار زیر است:

زیر پی:

$$\theta_f = \frac{1}{2} [\sin^{-1}(\frac{\sin \delta}{\sin \phi}) + \delta] \quad (12)$$

سطح آزاد زمین مجاور پی:

$$\theta_{gr} = \frac{1}{2} [\pi - \sin^{-1}(\frac{\sin \delta}{\sin \phi}) + \delta] \quad (13)$$

که در آنها:

$$\delta = \tan^{-1}(k_h) \quad (14)$$

مقدار زاویه $\alpha = \tan^{-1}(k_h)$ با زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر خواهد بود.

ضریب باربری N_q

در این حالت فرض بر آن است که محیط فاقد وزن و چسبندگی و تنها دارای سربار (q) است. از آنجایی که محیط فاقد وزن و لذا معادلات دیفرانسیل تعادل از نوع همگن است، به هنگام حل مسأله از هر یک از دو گوشه سمت راست و چپ، فشار تماسی یکنواخت برای زیر پی بدست می‌آید. به همین سبب مکانیسم گسیختگی توده خاک زیر پی از نوع یک طرفه و ظرفیت باربری پی برابر کمترین مقداری است که حل مسأله از دو سوی راست و چپ بدست می‌دهد. به هنگام حل مسأله از گوشه سمت راست پی همان شرایط مرزی حالت ضریب N_γ برقرار است. برای حل مسأله به ترتیب زیر عمل می‌شود:

- ۱- مسأله از گوشه سمت راست پی حل و فشار تماس زیر پی محاسبه می‌گردد.
- ۲- مسأله از گوشه سمت چپ پی حل و فشار تماس زیر پی محاسبه می‌گردد.
- ۳- کمترین مقدار بدست آمده برای فشار تماس از میان گام‌های اول و دوم به عنوان ظرفیت باربری پی (q_v) استخراج می‌شود.

۴- ضریب N_q با کمک رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$N_q = q_v / q \quad (16)$$

شکل (۶) تغییرات N_q با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب افقی شتاب زلزله (k_h) را نشان داده است. ضرائب بدست آمده از نرم‌افزار SLM با خط ممتد و ضرائب محاسبه شده توسط کومار و رائو [۶] به صورت نقطه نمایش داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، اولاً هماهنگی بسیار خوبی میان ضرائب بدست آمده در این تحقیق با مقادیر مشابه ثبت شده در ادبیات فنی وجود دارد. ثانیاً، ضریب N_q با افزایش ضریب افقی شتاب زلزله کاهش می‌یابد و این همان رفتاری است که انتظار می‌رفت. با توجه به صفر بودن چسبندگی (c)، بیشینه مقدار زاویه $\alpha = \tan^{-1}(k_h)$ با زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر خواهد بود.

ضریب باربری N_c

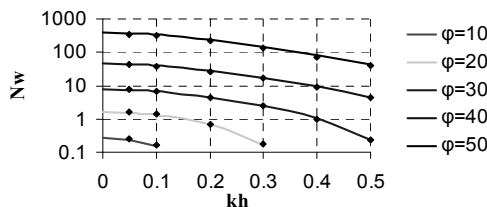
در این حالت فرض بر آن است که محیط فاقد وزن و سربار و تنها دارای چسبندگی (c) است. از آنجایی که

برای حل مسأله به ترتیب زیر عمل می‌شود:

- ۱- عددی اختیاری به عنوان پهنای محدوده خمیری شده مجاور گوشه راست پی (d_1) انتخاب می‌شود.
- ۲- مسأله از گوشه سمت راست پی حل و فشار تماس زیر پی و پهنای محدوده خمیری شده زیر پی (b_1) محاسبه می‌گردد.
- ۳- مسأله از گوشه سمت چپ پی بر اساس همان پهنای اختیاری (d_1) حل می‌شود.
- ۴- نقطه M از میان گره‌های نیمه سمت چپ پی چنان اختیار می‌شود که مقدار میانگین تنش‌های اصلی آن با میانگین تنش‌های اصلی آخرین گره نیمه سمت راست برابر باشد. در این حالت پهنای محدوده خمیری مجاور گوشه چپ برابر d_2 و پهنای محدوده خمیری زیر پی برابر b_2 اصلاح خواهد شد.
- ۵- عرض نهایی پی (b) برابر حاصل جمع پهنای دو محدوده خمیری راست و چپ زیر پی (b_1 و b_2) اختیار می‌شود.
- ۶- پس از محاسبه میانگین مؤلفه قائم فشار تماس زیر پی (q_v)، ضریب N_γ با کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_\gamma = q_v / (0.5 \cdot b \cdot \gamma) \quad (15)$$

شکل (۵): تغییرات ضریب N_γ با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب شتاب افقی زلزله (k_h)



شکل (۵) تغییرات ضریب N_γ با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب شتاب افقی زلزله (k_h) را نشان داده است. ضرائب بدست آمده از نرم‌افزار SLM با خط ممتد و ضرائب محاسبه شده توسط کومار و رائو [۶] به صورت نقطه نمایش داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، اولاً هماهنگی بسیار خوبی میان ضرائب بدست آمده در این تحقیق با مقادیر مشابه ثبت شده در ادبیات فنی وجود دارد. ثانیاً، ضریب N_γ با افزایش ضریب افقی شتاب زلزله کاهش می‌یابد و طبیعتاً این همان رفتاری است که انتظار می‌رفت. با توجه به صفر بودن چسبندگی (c)، بیشینه

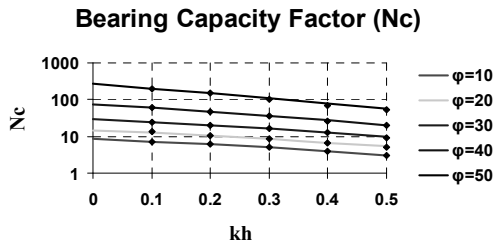
۲- مسأله از گوشه سمت چپ پی حل و فشار تماس زیر پی محاسبه می‌گردد.

۳- کمترین مقدار بدست آمده برای فشار تماس از میان گام‌های اول و دوم به عنوان ظرفیت باربری پی (q_v) استخراج می‌شود.

۴- ضریب N_c با کمک رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$N_c = q_v / c \quad (۱۹)$$

شکل (۷) تغییرات ضریب N_c با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب افقی شتاب زلزله (k_h) را نشان داده است. ضرائب بدست آمده از نرم‌افزار SLM با خط ممتد و ضرائب محاسبه شده توسط کومار و رائو [۶] به صورت نقطه نمایش داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، اولاً، هماهنگی بسیار خوبی میان ضرائب بدست آمده در این تحقیق با مقادیر مشابه ثبت شده در ادبیات فنی وجود دارد. ثانیاً، ضریب N_c با افزایش ضریب افقی شتاب زلزله کاهش می‌یابد که البته مانند حالات پیشین، همان رفتاری است که انتظار می‌رفت.



شکل (۷): تغییرات ضریب N_c با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب شتاب افقی زلزله (k_h)

اثر شیب بار بر ظرفیت باربری لرزه‌ای

ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری در بخش پیشین ارائه شد. فرض حاکم بر ضرائب یاد شده آن بود که نه تنها نیروی حجمی و نیز سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی، بلکه حتی فشار تماس زیر پی، با راستای قائم زاویه‌ای برابر $\alpha = \tan^{-1}(k_h)$ می‌سازند. در این بخش بر آن هستیم تا این حالت را بررسی کنیم که اگر شیب بار کف پی (θ_f) از زاویه α کوچک‌تر باشد، ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم چه تغییری خواهد یافت؟

به منظور بررسی مسأله کافی است که زاویه (θ_f) نظیر کف پی در رابطه (۱۲) متناسب با زاویه (θ_f) اصلاح شود. سایر شرایط مرزی مسأله ثابت باقی می‌ماند.

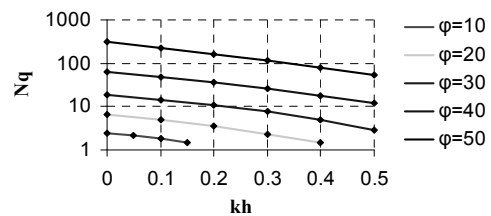
محیط فاقد وزن و لذا معادلات دیفرانسیل تعادل از نوع همگن است، به هنگام حل مسأله از هر یک از دو گوشه سمت راست و چپ، فشار تماسی یکنواخت برای زیر پی بدست می‌آید. به همین سبب مکانیسم گسیختگی توده خاک زیر پی باز از نوع یک‌طرفه و ظرفیت باربری پی برابر کمترین مقداری است که حل مسأله از دو سوی راست و چپ بدست می‌دهد. به هنگام حل مسأله از گوشه سمت راست پی شرایط مرزی به قرار زیر است:

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x} = \frac{R \cdot \sin 2\theta_f}{p + R \cdot \cos 2\theta_f} = k_h \quad (۱۷)$$

سطح آزاد زمین مجاور پی:

$$\theta_{gr} = \pi / 2 \quad (۱۸)$$

Bearing Capacity Factor (Nq)



شکل (۶): تغییرات ضریب N_q با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و ضریب شتاب افقی زلزله (k_h)

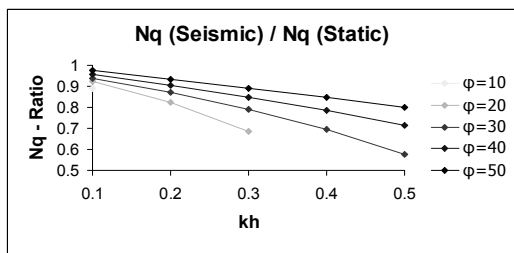
چنان‌که در رابطه (۱۷) دیده می‌شود، به سبب وجود چسبندگی (c)، زاویه محور تنش اصلی بزرگ با راستای قائم تابع مقدار میانگین تنش‌های اصلی زیر پی (p) و لذا نامعلوم است که باید با روش سعی و خطا محاسبه شود. برای حل مسأله به ترتیب گام‌های زیر برداشته می‌شود:

۱- مسأله از گوشه سمت راست پی حل و فشار تماس زیر پی محاسبه می‌گردد برای این منظور از قضیه حالات مرتبطه (بهنیا و طباطبایی، [۱۲]) استفاده می‌شود. محیط چسبنده به یک محیط دانه‌ای معادل که سرباری برابر $c \cdot \cot(\phi)$ دارد تبدیل و مسأله با فرض مقدار اولیه‌ای برای زاویه (θ_f) حل می‌شود. سپس مقدار سربار از مؤلفه قائم فشار تماس (q_v) کسر و نسبت مؤلفه‌های افقی و قائم (q_v / q_h) محاسبه می‌گردد. اگر نسبت حاصله با ضریب شتاب افقی زلزله (k_h) برابر بود، پاسخ دقیق مسأله حاصل شده است. در غیر این صورت مقدار دیگری برای θ_f اختیار و عملیات فوق‌الذکر آنقدر تکرار می‌شود تا میزان خطا به حد قابل قبول برسد.

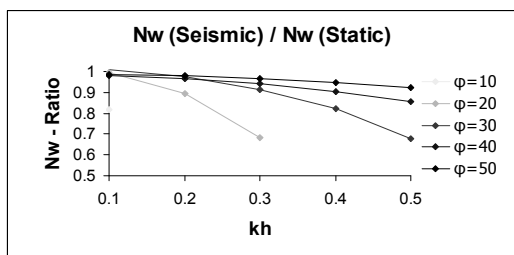
- ۱- اثر زلزله بر نیروی حجمی خاک و سربار؛
- ۲- خروج از مرکزیت فشار تماس زیر پی؛

اهمیت اثرات زلزله بر نیروی حجمی و سربار

سال‌ها است که اثر زلزله بر نیروی حجمی، سربار و اثر این دو عامل بر ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌ها در ادبیات فنی مورد تجزیه و تحلیل واقع شده است [۱ و ۶]. با این همه هنوز تصور برخی مهندسين متأسفانه چنین است که به هنگام وقوع زلزله، ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری را کافی است با اعمال ضرایب اصلاحی تمایل بار و حداکثر خروج از مرکزیت بر ظرفیت باربری استاتیکی آن (رابطه ۱) ارزیابی نمود. بر اساس این تصور، اثر زلزله بر نیروی حجمی خاک و نیز سربار مجاور پی نادیده گرفته می‌شود و تنها بر نیروی وارده از سازه ملحوظ می‌گردد. به عبارت دیگر، ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم یک پی نواری که شیب بار آن برابر صفر است، با ظرفیت باربری استاتیکی قائم آن پی یکسان فرض می‌شود؛ چه ضرایب اصلاحی شیب بار در حالت اخیر برابر واحد هستند [۱۲].

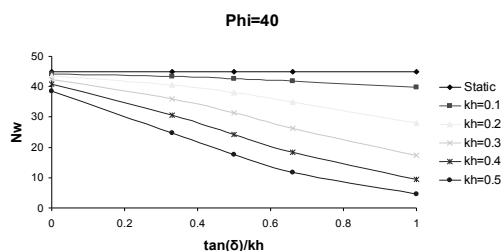


شکل (۱۰): مقایسه ضریب باربری لرزه‌ای N_q یک پی نواری دارای شیب بار صفر با مقدار نظیر آن در بارگذاری استاتیکی [۱۰]

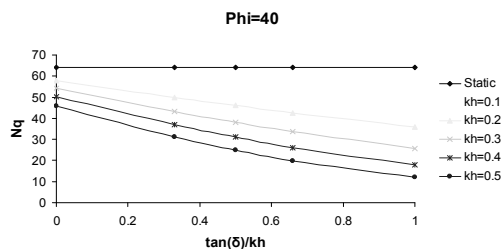


شکل (۱۱): مقایسه ضریب باربری لرزه‌ای N_w یک پی نواری دارای شیب بار صفر با مقدار نظیر آن در بارگذاری استاتیکی [۱۰]

نتایج تحقیق حاضر ضمن تأیید یافته‌های پیشین ثبت شده در ادبیات فنی تأکیدی مؤکد بر این نکته‌ی مهم است که نادیده انگاشتن اثر زلزله بر نیروی حجمی و سربار نه



شکل (۸): تغییرات ضریب N_γ با ضریب شتاب افقی زلزله (k_h) و شیب بار کف پی (δ_f) در یک خاک دارای ($\phi=40$)



شکل (۹): تغییرات ضریب N_q با ضریب شتاب افقی زلزله (k_h) و شیب بار کف پی (δ_f) در یک خاک دارای ($\phi=40$)

اشکال (۸) و (۹) به ترتیب تغییرات ضرایب N_γ و N_q با شیب بار کف پی (δ_f) را به ازاء زاویه ($\phi=40$) و ضرایب شتاب افقی (k_h) برابر $0/1$ تا $0/5$ نشان می‌دهند. نسبت $(\tan(\delta_f)/k_h)$ برابر با پنج مقدار صفر، $1/3$ ، $1/2$ ، $2/3$ و یک اختیار شده است. در حالت اخیر، مقادیر ضرایب N_γ و N_q همان‌هایی هستند که در اشکال (۶) و (۵) ارائه شدند. چنان‌که دیده می‌شود، با کاهش شیب بار کف پی، ضرایب N_γ و N_q افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر هر قدر شیب فشار تماس کمتر و راستای آن به قائم نزدیکتر باشد، ظرفیت باربری لرزه‌ای پی بزرگتر خواهد بود. طبیعتاً این همان رفتاری است که انتظار می‌رفت. چه پیشتر در ادبیات فنی [۱۱] نشان داده شده است که در حالت بارگذاری استاتیکی، هر قدر شیب فشار تماس بیشتر باشد، مقدار ظرفیت باربری قائم کوچکتر خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار ضرایب N_γ و N_q ، در همه حالات از مقادیر نظیر استاتیکی آنها کوچکتر است.

جدول (۱) مقادیر ضرایب N_γ و N_q را به ازاء پنج زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و نیز پنج ضریب شتاب افقی (k_h) و همچنین پنج شیب بار کف پی (δ_f) نمایش داده است.

بحث و بررسی

در این بخش دو موضوع مهم مورد بحث قرار می‌گیرد:

برابر صفر است. یادآور می‌شود که خروج از مرکز، موقعیت بار قائم را نسبت به مرکز پی بیان می‌دارد و با توجه به چگونگی توزیع فشار تماس زیر پی به راحتی قابل محاسبه است. در حالت بارگذاری لرزه‌ای ($k_h > 0$) آرایش خطوط مشخصه و در نتیجه توزیع فشار تماس زیر پی نامتقارن و لذا مقدار خروج از مرکز بزرگتر از صفر است. با افزایش ضریب شتاب افقی زلزله، سطح گوه‌های خمیری زیر بخش‌های راست و چپ پی (نواحی مرکب) به ترتیب افزایش و کاهش و در نتیجه مقدار خروج از مرکز بار قائم افزایش یابد. نتیجه‌ی مهمی که از این بحث حاصل می‌شود آن است که به هنگام وقوع زلزله، پی تحت تأثیر یک لنگر اضافی ناشی از اینرسی زمین نیز قرار خواهد گرفت.

نتیجه‌گیری

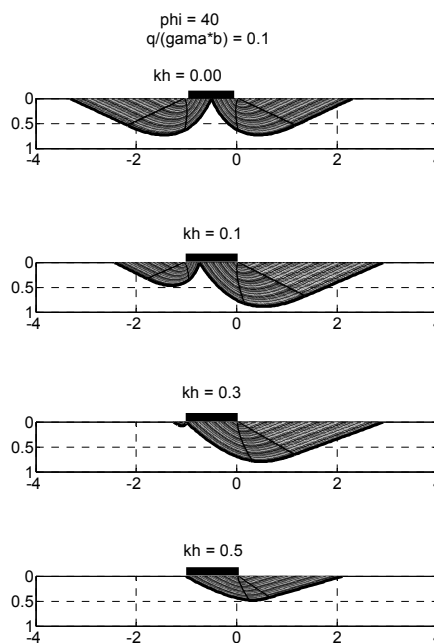
در این مقاله اثر شیب بار کف پی بر ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم پی‌های نواری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری با استفاده از روش خطوط مشخصه تنش و بر اساس این فرض متعارف برآورد شدند که نه تنها نیروی حجمی و نیز سربار وارده بر سطح آزاد مجاور پی، بلکه حتی شیب بار و بلکه فشار تماس کف پی، با راستای قائم زاویه‌ای برابر $\alpha \tan^{-1}(k_h)$ می‌سازند. پس از آن به این پرسش پاسخ داده شد که اگر شیب بار کف از زاویه‌ی (α) کوچکتر باشد، ضرائب ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم چه تغییری خواهد یافت؟ در این راستا نمودارها و جداولی ارائه شدند که ضرائب ظرفیت باربری پی‌های لرزه‌ای قائم را به صورت تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، ضریب افقی شتاب زلزله (k_h) و نیز شیب بار کف پی (θ_f) ارائه می‌دهند. بررسی نمودارها و جداول یاد شده نشان می‌دهد که اگر شیب بار کف پی از زاویه‌ی (α) کوچکتر باشد، ظرفیت باربری قائم آن به میزان قابل ملاحظه‌ای فزون‌تر خواهد شد. همچنین این یافته‌ی محققین پیشین مجدداً مورد تأکید قرار گرفت که اثر زلزله بر هر یک از دو عامل نیروی حجمی و سربار، مانند اثر آن بر شیب بار کف پی، قابل توجه و بیش از آن است که نادیده گرفته شود.

واقع‌بینانه است و نه حتی محافظه‌کارانه. اشکال (۱۰) و (۱۱) که از جدول (۱) برگرفته شدند، به ترتیب ضرائب باربری لرزه‌ای قائم N_q و N_γ نظیر یک پی نواری دارای شیب بار صفر را با مقادیر نظیر آنها در شرایط بارگذاری استاتیکی (کمالیان [۱۰]) مقایسه کرده‌اند. چنان‌که دیده می‌شود، با افزایش ضریب افقی شتاب زلزله (k_h) و نیز با کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، ضرائب باربری لرزه‌ای قائم از ضرائب باربری استاتیکی قائم فاصله بیشتری می‌یابد (حدود پنجاه درصد) و میزان کاهش آنها بیش از آن است که بتواند نادیده گرفته شود.

خروج از مرکزیت^{۱۷} بر آبند نیروهای وارد بر پی

شکل (۱۲) تغییرات آرایش خطوط مشخصه زیر یک پی را با ضریب شتاب افقی زلزله نشان می‌دهد. مشخصات مکانیکی خاک و سربار بدین شرح است:

$$\phi = 40 \quad c = 0 \quad q/(\gamma \cdot b) = 0.1$$



شکل (۱۲): اثر ضریب شتاب افقی زلزله بر آرایش خطوط مشخصه زیر پی

چنان‌که دیده می‌شود، در حالت بارگذاری استاتیکی ($k_h = 0$) آرایش خطوط مشخصه و در نتیجه توزیع فشار تماس زیر پی متقارن و لذا مقدار خروج از مرکز (e) بار قائم (P_v)

جدول (۱): تغییرات ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای قائم پی نواری با زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، ضریب افقی شتاب زلزله (k_h) و شیب بار کف پی ($\tan(\delta_p)$)

k_h	$\tan(\delta_p)/k_h$	$\phi = 10$		$\phi = 20$		$\phi = 30$		$\phi = 40$		$\phi = 50$	
		N_p	N_q	N_p	N_q	N_p	N_q	N_p	N_q	N_p	N_q
0/1	1	0.15	1.87	1.31	5.01	6.75	14.31	39.82	48.70	335.85	230.88
	0.66	0.19	2.00	1.44	5.32	7.31	15.30	41.73	52.84	359.07	257.10
	0.5	0.21	2.05	1.48	5.47	7.48	15.80	42.65	54.90	368.02	269.82
	0.33	0.21	2.11	1.52	5.62	7.61	16.30	43.37	57.01	375.07	283.02
	0	0.23	2.20	1.57	5.90	7.78	17.30	44.14	61.34	382.22	310.82
0/2	1	-	-	0.68	3.62	4.55	10.66	28.06	35.86	233.52	163.49
	0.66	-	-	0.96	4.20	5.86	12.38	34.9	42.57	298.17	202.21
	0.5	-	-	1.09	4.50	6.41	13.27	37.91	46.16	327.24	223.52
	0.33	-	-	1.23	4.75	6.89	14.18	40.47	49.94	351.84	246.58
	0	-	-	1.41	5.28	7.52	16.02	43.51	57.97	379.34	298.09
0/3	1	-	-	0.17	2.25	2.51	7.54	17.26	25.68	143.49	113.82
	0.66	-	-	0.41	3.02	4.06	9.69	26.35	33.69	224.92	157.28
	0.5	-	-	0.56	3.39	4.92	10.85	31.32	38.28	272.07	183.60
	0.33	-	-	0.73	3.74	5.77	12.06	36.03	43.27	317.10	213.51
	0	-	-	1.08	4.40	7.05	14.56	42.39	54.32	374.37	284.73
0/4	1	-	-	-	-	1.02	4.96	9.35	17.86	80.56	78.22
	0.66	-	-	-	-	2.38	7.25	18.26	26.14	158.49	121.08
	0.5	-	-	-	-	3.33	8.54	24.22	31.23	214.4	149.54
	0.33	-	-	-	-	4.39	9.91	30.64	36.97	275.70	183.64
	0	-	-	-	-	6.33	12.83	40.75	50.36	367.26	270.67
0/5	1	-	-	-	-	0.24	2.85	4.52	12.03	43.55	53.24
	0.66	-	-	-	-	1.07	5.00	11.7	19.81	107.50	92.31
	0.5	-	-	-	-	1.84	6.24	17.56	24.97	162.10	120.72
	0.33	-	-	-	-	2.86	7.60	24.83	31.07	232.21	156.77
	0	-	-	-	-	5.22	10.58	38.47	45.98	358.34	255.84

مراجع

- 1- Sarma, S.K. and Iossifelis, I. S. (1990). "Seismic bearing capacity factors of shallow strip footings." Geotechnique, Vol. 40, No. 2, PP. 265-273.
- 2- Richards, R. Elms, D.G. and Budhu, M. (1993). "Seismic bearing capacity and settlement of foundations". J. Geotech. Engng. Div., ASCE, Vol. 119, No. 4, PP. 662-674.
- 3- Budhu, M. and Al-Karni, A. (1993). "Seismic bearing capacity of soils." Geotechnique, Vol. 43, No. 1, PP. 181-187.
- 4- Budhu, M. and Al-Karni, A. (1994). "Discussion: Seismic bearing capacity of soils." Geotechnique, Vol. 44, No. 4, PP.185-188.
- 5- Soubra, A. H. (1997). "Seismic bearing capacity factors of shallow strip footing in seismic conditions." Proc. Instn. Civ. Engrs, Geotech. Engng. Vol. 125, PP. 230-241.
- 6- Kumar, J. and Mohan Rao, V.B.K. (2002). "Seismic bearing capacity factors for spread foundations.", Geotechnique Vol. 52, No. 2, PP.79-88.
- 7- Sokolovski, V.V. (1960). *Statics of soil media*. 2th. Ed. Butterworths Scientific Pub. London.
- 8- Desai, C.S. and Christian, J.T. (1977). *Numerical methods in geotechnical engineering*. Chapter 21 (Booker, J.R. and Davis, E.H.), McGraw-Hill Pub. Co. New York.
- 9- Atkinson, J.H. (1981). *Foundations and slopes (An introduction to applications of critical state soil mechanics)*. Chapter 7. McGraw hill book company. New York.
- 10- Kamalian, M. (2008), *Numerical Assessment of Friction Coefficient Effect on Seismic Bearing Capacity by the Characteristic Method*. Research Report. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES). Tehran (Submitted).
- 11- Behnia, C. and Tabatabai, A.M. (1989). *Soil Mechanics*. Vol. 2. 5th. Ed. Chapter 12, Tehran University Pub. Co., Tehran.
- 12- Behnia, C. and Tabatabai, A.M. (1988). *Soil Mechanics*. Vol. 1. 5th. Ed. Chapter 11, Tehran University Pub. Co., Tehran.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Bearing Capacity
2. Seismic Bearing Capacity
3. Earthquake
4. Characteristic Line Method
5. Limit Analysis
6. Upper Limit
7. Lower Limit
8. Mohr-Coulomb
9. Bearing Pressure
10. Horizontal Seismic Coefficient
11. Cauchy Zone
12. Boundary Conditions
13. Goursat Zone
14. Mixed Zone
15. Iteration
16. Superposition Principle
17. Eccentricity