



اثر مؤلفه قائم شتاب زلزله بر ضرایب ظرفیت باربری پی‌های نواری

فرج ا... عسکری، پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

سید محمد مهدی دریا باری، گروه مهندسی عمران - ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احمد حسنی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران - زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

Ahmadhassani_68@yahoo.com

چکیده

با توجه با لرزه‌خیزی کشور ایران و حاکم بودن مؤلفه قائم لرزه‌ای ناشی از زلزله در طراحی سازه‌ها در اغلب موارد بالطبع لازم است که درک صحیحی از رفتار پی‌ها در هنگام اعمال مؤلفه قائم لرزه‌ای علاوه بر نیروهای استاتیکی صورت گیرد. در دو دهه اخیر مسئله ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این مقاله تأثیر مؤلفه قائم شتاب زلزله بر روی ضرایب ظرفیت باربری پی‌ها (N_c ، N_q و N_γ) به کمک روش خطوط مشخصه تنش مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش از ترکیب معادلات دیفرانسیل تعادل تنش با معیار گسیختگی موهر-کولمب، دستگاهی از معادلات خمیری به دست می‌آید که با حل آن به روش خطوط مشخصه، تنش‌های ایجاد شده در توده خاک زیر سطح پی و مجاور آن در حالت حدی محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در نظر گرفتن توأم ضرایب مؤلفه‌های قائم k_v و افقی k_h شتاب زلزله باعث کاهش ضرایب ظرفیت باربری پی‌ها می‌گردد، لیکن در صورت در نظر نگرفتن مؤلفه افقی شتاب زلزله، افزایش شتاب قائم تأثیری در ضریب N_c نخواهد داشت. همچنین با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که استفاده از اصل جمع آثار قوا جهت تعیین ظرفیت باربری لرزه‌ای خاک با افزایش ضرایب k_v و k_h کاهش ϕ دارای حاشیه امنیت کمتری در طراحی می‌باشد

کلمات کلیدی: روش خطوط مشخصه، شتاب قائم، ظرفیت باربری.



Effect of the vertical component of the earthquake acceleration on the seismic bearing capacity factors of strip footings

Faradjollah Askari, Department of Geotechnical Engineering., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Mohammad Mehdi Daryabari, Department of Geotechnical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Ali Hassani (Corresponding author), International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, I. R. of Iran

Ahmadhassani_68@yahoo.com

Abstract

In this paper, the effect of the the vertical component of the earthquake acceleration on the seismic bearing capacity factors (i.e. N_q , N_c and N_γ) are investigated by employing the method of stress characteristics. By mixing the differential equations of stress equilibrium and the Moher-coulomb failure criterion, a system of plastic equilibrium equations is obtained. The generated stresses in the soil mass under the foot surface and next to it in limit state is calculated by solving plastic equilibrium equation system with the method of characteristics. Results show that, the effect of the vertical component of the earthquake acceleration in absence of horizontal component will cause reduction of the bearing capacity factors N_q , N_γ ; because having no effect on N_c . The effect of the vertical component of the earthquake acceleration associated with horizontal component will cause reduction resonance on the seismic bearing capacity factors. Using the principle of superposition to obtain of the ultimate bearing pressure of the footing can be a safety.

Keywords: *Characteristic line Method, Seismic vertical acceleration, Strip footing.*

**۱- مقدمه**

بررسی‌های نظری و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ظرفیت باربری پی‌ها در زمان وقوع زلزله می‌تواند به شدت کاهش یابد. بدین ترتیب پی سازه‌هایی نظیر برج‌ها، پل‌ها، دیوارهای حائل، سدها و دیگر انواع سازه‌ها در صورت عدم طراحی مقاوم در برابر زلزله و نادیده گرفتن کاهش ظرفیت باربری می‌توانند در زمان وقوع زلزله بسیار آسیب‌پذیر باشند. این مسئله در ارتباط با سازه‌های مهم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود و نیاز به انجام مطالعات دقیق در ارتباط با تعیین ظرفیت باربری لرزه‌ای پی آن‌ها یک ضرورت است. تعیین ظرفیت باربری پی‌ها عمدتاً در قالب روش‌های حدی انجام می‌پذیرد. این روش‌ها به سه گروه اصلی ذیل تقسیم می‌شوند:

۱- تعادل حدی

۲- تحلیل حدی

۳- خطوط مشخصه

در روش تعادل حدی پس از در نظر گرفتن یک مکانیسم گسیختگی فرضی در توده خاک، بار حدی به کمک حل تمام یا تعدادی از معادلات تعادل برای مکانیسم مزبور به دست می‌آید. مقدار حداکثر بار حدی با تغییر مکانیسم گسیختگی و بهینه‌سازی آن به دست می‌آید. در روش تحلیل حدی حدود بالا و پایین بار حدی (بار گسیختگی) با استفاده از قضایای حدی تعیین می‌گردد. در روش خطوط مشخصه، از ترکیب معادله سطح خمیری خاک با معادلات تعادل، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل هذلولی به دست می‌آید که به معادلات تعادل خمیری موسوم هستند. حل این معادلات بر مبنای شرایط مرزی مسئله، وضعیت تنش‌ها را در توده خاک مشخص می‌کند. در این روش نیازی به فرض شکل سطح گسیختگی نیست [۱]. ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌ها توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. ریچارد و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۲] و بوده و الکارنی در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ [۳] این مسئله را با استفاده از روش تعادل حدی بررسی کرده‌اند. کاربرد

روش آنالیز حدی در حل این مسئله منحصر به روش مرز بالا بوده و از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده در این زمینه می‌توان به نتایج ارائه‌شده توسط دورمپو پکر در سال ۱۹۹۵ [۴]، سوبرا در سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹ [۵ و ۶]، زو در سال ۲۰۰۰ [۷] و عسکری و فرزانه در سال ۲۰۰۳ [۸] اشاره نمود. روش خطوط مشخصه نیز توسط کومار و موهان راثو در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ [۹ و ۱۰]، دریا باری در سال ۱۳۸۵ [۱۱]، کزکن و کازابلانکا ۲۰۱۶ [۱۲] برای حل این مسئله بکار گرفته شده است. در غالب تحقیقات فوق‌الذکر، کاهش ظرفیت باربری پی‌ها تحت اثر مؤلفه افقی نیروی زلزله مطالعه و اثر مؤلفه قائم نیروی زلزله بر ظرفیت باربری مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله بر مبنای روش خطوط مشخصه تنش، الگوریتمی ارائه می‌شود که با استفاده از آن، تأثیر مؤلفه قائم شتاب زلزله و همچنین اثر توأم آن با مؤلفه افقی شتاب زلزله قابل بررسی است. با به‌کارگیری این الگوریتم، اثر اعمال نیروی زلزله بر توده خاک، سربار و پی به صورت شبه استاتیکی بر ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش خطوط مشخصه

در لحظه‌ی آغاز جریان پلاستیک شرایط تسلیم و تعادل در ناحیه‌ی آغاز گسیختگی برقرار است. در غالب مسائل کلاسیک مکانیک خاک، رفتار خمیری خاک با معیار تسلیم موهر- کولمب بیان می‌شود. ترکیب معیار مذکور با معادلات تعادل، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل تعادل پلاستیک را در آن منطقه به دست می‌دهد. با اضافه شدن شرایط مرزی تنش، از این معادلات دیفرانسیل برای به دست آوردن تنش‌ها در زیر پی‌ها و یا پشت دیوار حائل در لحظه آغاز جریان پلاستیک استفاده می‌شود. به منظور راحتی در حل مسائل مشخص، این دسته معادلات را به مؤلفه‌های منحنی الخطی تبدیل می‌کنند که جهت آن‌ها در هر نقطه در ناحیه تسلیم با جهت‌های گسیختگی یا سطح لغزش



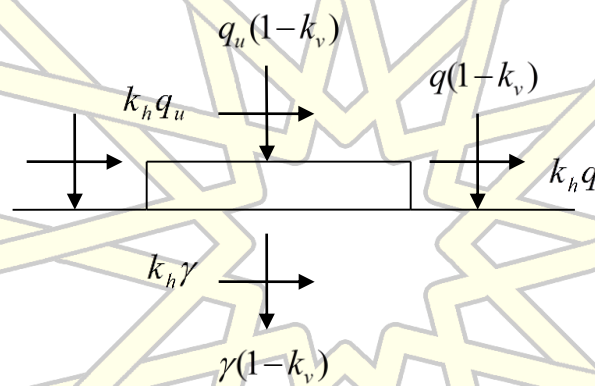
۲- در لحظه گسیختگی توده خاک از معیار گسیختگی موهر- کولمب پیروی می‌کند.

۳- اصل جمع آثار قوا معتبر بوده و ظرفیت باربری پی را می‌توان با توجه به ضرایب ظرفیت باربری ($N\gamma$ و Nc) طبق رابطه ترزاقی [۱۳] ۱۹۴۳ تعیین کرد.

۴- وضعیت کرنش مسطح بر حل مسئله حاکم است.

۵- اثر مؤلفه‌های قائم و افقی نیروی زلزله در توده خاک به صورت نیروهای شبه استاتیکی و به ترتیب برابر با $k_v\gamma$ و $k_h\gamma$ در نظر گرفته شده است.

۶- سربار با شدت یکنواخت $q(1-k_v)$ به صورت قائم و k_hq به صورت افقی بر روی سطح خاک مجاور پی وارد می‌شود.



شکل (۱): مدل پی در حل مسئله ظرفیت باربری

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیلی بالا به روش خطوط مشخصه، می‌توانیم تنش‌های موجود در هر نقطه درون توده خاک را به دست آوریم.

مبانی اساسی و اولیه روش خطوط مشخصه توسط سوکولوفسکی در سال ۱۹۶۰ تبیین شده است. در این روش با انتخاب متغیرهای مناسب و تبدیل دستگاه مختصات دکارتی به دستگاه مختصات منحنی الخط، معادلات اولیه به معادلات ساده‌تر تبدیل می‌شود. مشخصه‌ها در این معادلات تبدیل یافته تشکیل دودسته منحنی را می‌دهند که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان محورهای مختصات طبیعی

انطباق می‌یابد. این جهت‌های لغزش تحت عنوان خطوط لغزش و شبکه‌ی ایجادشده به نام میدان خط لغزش نامیده می‌شوند.

۳- روش پیشنهادی

در شکل (۱) مدل پی در نظر گرفته شده نشان داده شده است. فرضیات مورد استفاده عبارت‌اند از:

۱- محیط خاک همگن و همسان بوده و به‌وسیله پارامترهای c (چسبندگی)، ϕ (زاویه اصطکاک داخلی) و γ (وزن مخصوص خاک) تعریف می‌گردد.

۳-۱- حل معادلات تعادل در توده خاک

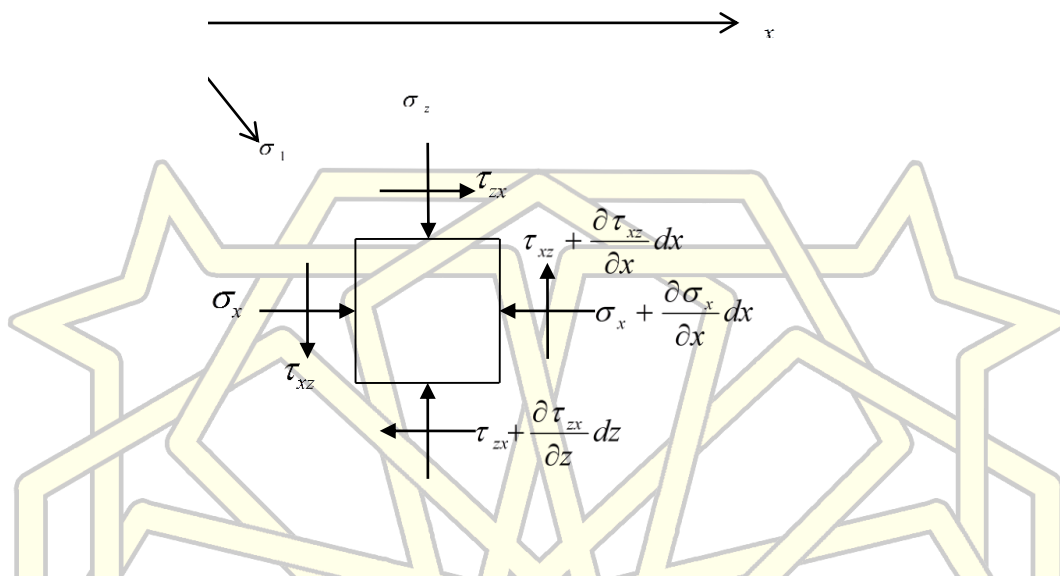
در شکل (۲) المان کوچکی از توده خاک که تحت اثر شتاب‌های افقی و قائم ناشی از زلزله قرار گرفته نشان داده شده است. با نوشتن تعادل نیروها در دو جهت قائم و افقی، معادلات تعادل خاک مطابق روابط ۱ و ۲ به دست خواهند آمد:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = k_h \gamma \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = (1-k_v) \gamma \end{array} \right. \quad (2)$$



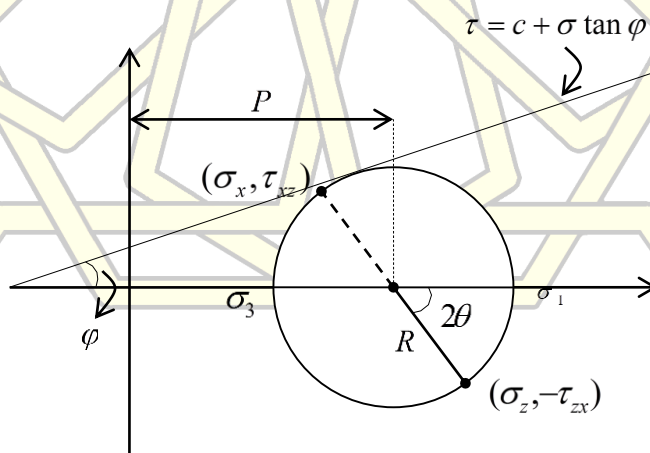
(نه لزوماً عمود بر هم) بکار برد. از هر نقطه یک منحنی از هر دسته عبور می کند.



شکل (۲): وضعیت تنش درون توده خاک

با قبول معیار گسیختگی موهر- کولمب و با توجه به شکل (۳)، می توان نوشت:

$$\begin{aligned} (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{zx}^2 &= \\ (\sigma_z + \sigma_x + 2c \cot \varphi)^2 \sin^2 \varphi & \end{aligned} \quad (3)$$



شکل (۳): دایره موهر وضعیت تنش درون توده خاک



بدین ترتیب، تنش‌های وارد بر هر المان خاک در ناحیه خمیری و در شرایط کرنش مسطح به صورت روابط ۴ تا ۶ تعریف می‌گردد:

$$\sigma_z = P + R \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_x = P - R \cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = R \sin 2\theta \quad (6)$$

در روابط بالا θ زاویه بین تنش اصلی بزرگ‌تر و محور قائم می‌باشد (شکل ۱). P فاصله مرکز دایره موهر از محور قائم $\left(P = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)$ و R شعاع دایره موهر $\left(R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)$ می‌باشند که طبق رابطه ۷ به هم مرتبط می‌شوند:

$$R = P \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (7)$$

با جایگذاری روابط بالا در معادلات تعادل (روابط ۱ و ۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial p}{\partial x} (1 - \sin \varphi \cos 2\theta) + \frac{\partial \theta}{\partial x} (2R \sin 2\theta) + \frac{\partial p}{\partial z} (\sin \varphi \sin 2\theta) + \frac{\partial \theta}{\partial z} (2R \cos 2\theta) = k_h \gamma \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} (\sin \varphi \sin 2\theta) + \frac{\partial \theta}{\partial x} (2R \cos 2\theta) + \frac{\partial p}{\partial z} (1 + \sin \varphi \cos 2\theta) - \frac{\partial \theta}{\partial z} (2R \sin 2\theta) = (1 - k_v) \gamma \quad (9)$$

با کاربرد روش خطوط مشخصه، دستگاه معادلات اولیه که معادلاتی با مشتقات جزئی هستند (معادلات ۸ و ۹) به دستگاهی از معادلات با تعداد بیشتر (۴ معادله)، لیکن از نوع معمولی تبدیل می‌شوند. دو معادله از معادلات دستگاه جدید، معرف معادلات دودسته خطوط مشخصه هستند که خطوط α و β نامیده می‌شوند. معادلات این خطوط عبارت‌اند از:

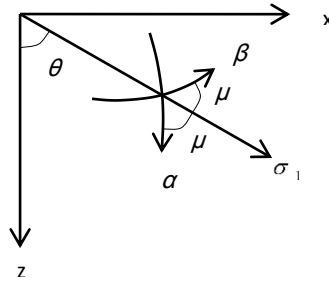
$$(10) \text{ مشخصه } \alpha \text{ (یا مشخصه } (\theta - \mu))$$

$$dx = \tan(\theta - \mu) dz$$

$$(11) \text{ مشخصه } \beta \text{ (یا مشخصه } (\theta + \mu))$$

$$dx = \tan(\theta + \mu) dz$$

در روابط بالا $\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ می‌باشد. این خطوط به‌طور شماتیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل (۴): خطوط مشخصه α و β

معادلات تعادل (روابط ۸ و ۹) در امتداد خطوط α و β به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

در طول خط مشخصه α یا $(\theta - \mu)$:

(۱۲)

$$dP - \frac{2R}{\cos \phi} d\theta = \left[-\frac{k_h \gamma \cos(\theta + \mu)}{\cos(\theta - \mu) \cos \phi} + \frac{(1 - k_v) \gamma \sin(\theta + \mu)}{\cos(\theta - \mu) \cos \phi} \right] dz$$

در طول خط مشخصه β یا $(\theta + \mu)$:

(۱۳)

$$dP + \frac{2R}{\cos \phi} d\theta = \left[\frac{k_h \gamma \cos(\theta - \mu)}{\cos(\theta + \mu) \cos \phi} - \frac{(1 - k_v) \gamma \sin(\theta - \mu)}{\cos(\theta + \mu) \cos \phi} \right] dz$$

با استفاده از معادلات روابط ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ می‌توان مقادیر تنش را در شبکه خطوط مشخصه با استفاده از روش تفاضل محدود به دست آورد.

است که در آن خطوط مشخصه تنش با معلوم بودن شرایط مرزی خط مشخصه R_1R_3 که از حل ناحیه کوشی به دست آمده و لبه پی (نقطه R_1) که نقطه‌ای منفرد است تعیین می‌گردند. ناحیه سوم ($R_1R_4R_5$) نیز موسوم به ناحیه مرکب است که در آن خطوط مشخصه تنش با معلوم بودن شرایط مرزی خط مشخصه R_1R_4 که از حل ناحیه گورسات به دست آمده و خط غیرمشخصه R_1R_5 که همان سطح زیر پی است به دست می‌آیند. پس از حل ناحیه مرکب با تعیین

۳-۲- تعیین نقاط شبکه مشخصه‌های تنش در توده

خاک

همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، جهت تعیین نقاط شبکه مشخصه تنش در توده خاک زیر سطح پی، سه ناحیه مختلف با شرایط مرزی متفاوت در نظر گرفته می‌شود. ناحیه اول ($R_1R_2R_3$) موسوم به ناحیه کوشی است که در آن خطوط مشخصه تنش با معلوم بودن شرایط مرزی در سطح زمین مجاور پی (خط غیرمشخصه R_1R_2) به دست می‌آیند. ناحیه دوم ($R_1R_3R_4$) موسوم به ناحیه گورسات

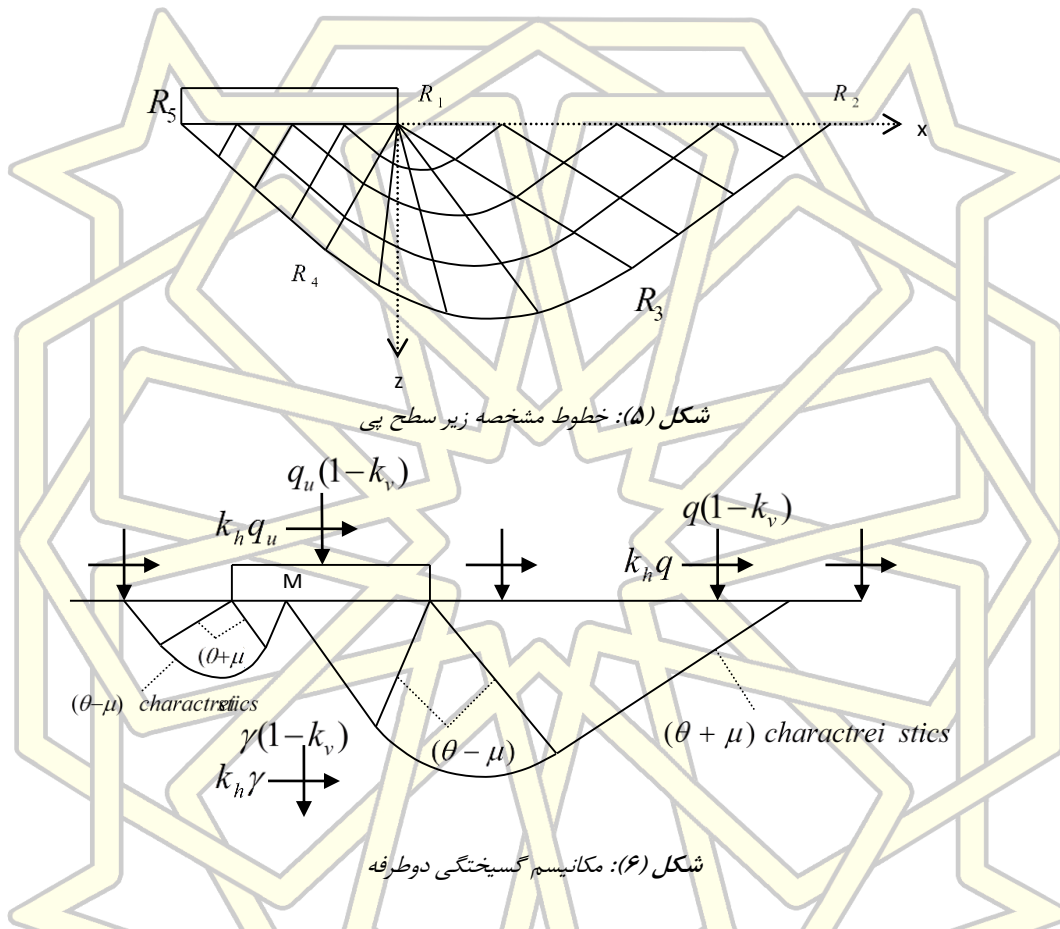


پی گسترش یافته و با عبور از نواحی کوشی، گورسات و مرکب به تدریج به زیر پی می‌رسند. این دودسته از خطوط در نقطه M واقع در زیر سطح پی که نقطه تقاطع دو ناحیه پلاستیک بوده و دارای فشار یکسان از هر دو طرف است به هم می‌رسند.

P و θ برای نقاط واقع در زیر سطح پی می‌توان ظرفیت باربری پی را به دست آورد.

۳-۳- توزیع فشار زیر سطح پی

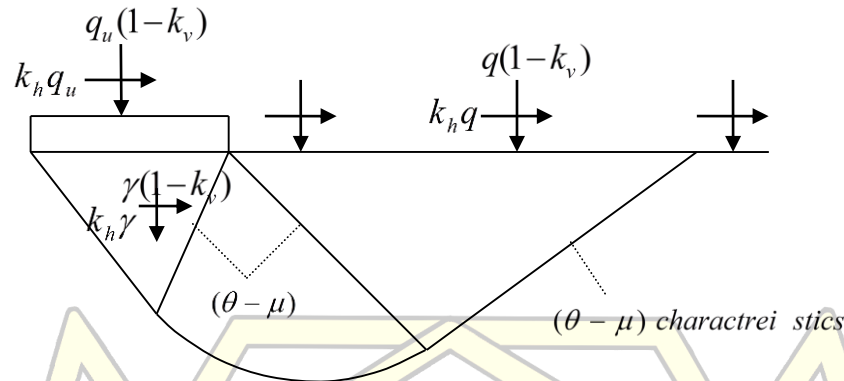
با توجه به شکل (۶) با معلوم بودن شرایط مرزی در هر دو طرف پی، خطوط مشخصه به‌طور هم‌زمان از هر دو طرف



که در آن B عرض پی، q سربار، c چسبندگی و γ وزن مخصوص خاک است و q_{ult} مؤلفه قائم ظرفیت باربری است که با استفاده از روش خطوط مشخصه به دست می‌آید.

هندسه الگوی گسیختگی با افزایش k_h و k_v تغییر می‌کند، به‌نحوی که با افزایش k_h و k_v نقطه M (محل تقاطع دو ناحیه پلاستیک) در زیر پی به تدریج به سوی لبه سمت چپ پی حرکت کرده و مکانیسم گسیختگی از حالت دوطرفه به حالت یک‌طرفه تبدیل خواهد شد (شکل ۷). ظرفیت باربری عموماً به‌صورت ترکیب خطی سه ضریب N_c ، N_q و N_γ به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$q_{ult} = c N_c + q N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \quad (14)$$



شکل (۷): مکانیسم گسیختگی یک طرفه

۴- مقایسه نتایج عددی به دست آمده با سایر

محققین

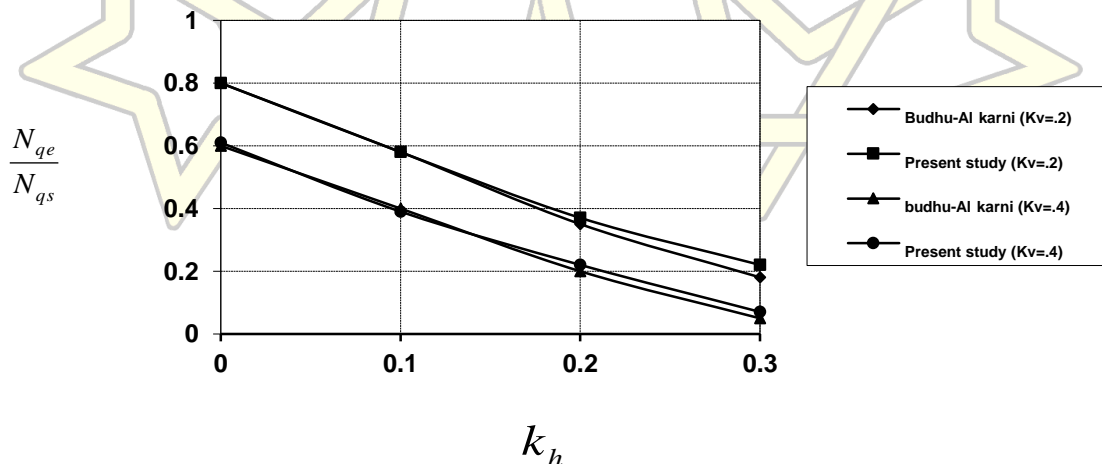
در اشکال ۸ و ۹ مقایسه‌ای بین نتایج ارائه شده توسط بودهوهمکاران (به روش تعادل حدی) [۲] و تحقیق حاضر (به روش خطوط مشخصه) برای حالت $\varphi = 30^\circ$ انجام شده است. هماهنگی نسبتاً خوبی بین

نتایج ارائه شده برای تغییرات $\frac{N_{qe}}{N_{qs}}$ و $\frac{N_{\gamma e}}{N_{\gamma s}}$ (اندیس

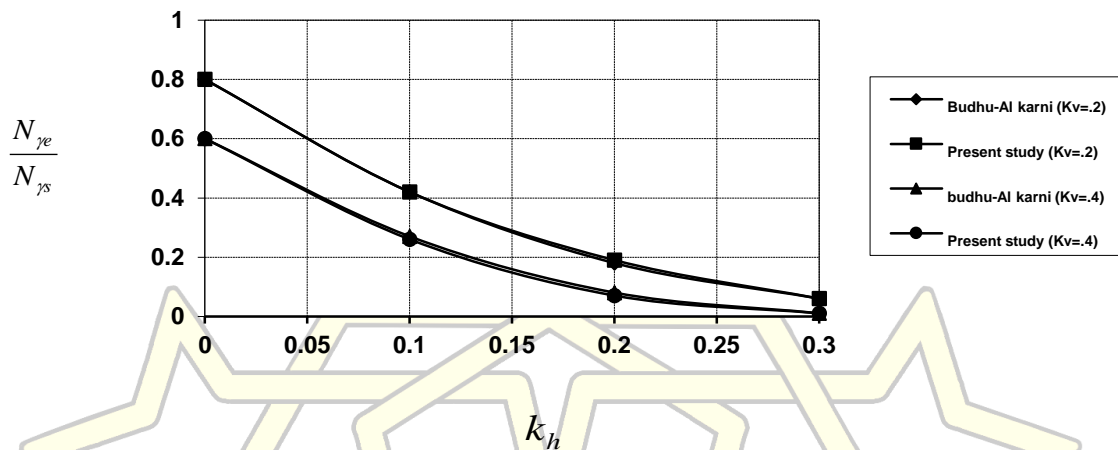
e حالت لرزه‌ای و اندیس s حالت استاتیکی را نشان می‌دهد) مشاهده می‌شود. به نحوی که حداکثر

اختلاف بین نتایج در حدود ۲٪ است.

به منظور محاسبه ضرایب ظرفیت باربری، سه آنالیز جداگانه انجام می‌شود. برای یافتن N_c مقادیر سربار q وزن مخصوص γ را صفر در نظر می‌گیریم. برای محاسبه N_q چسبندگی c وزن مخصوص γ صفر فرض می‌شوند و سرانجام جهت محاسبه N_γ سربار q و چسبندگی c صفر فرض می‌گردند.



شکل (۸): اثر k_h و k_v بر $\frac{N_{qe}}{N_{qs}}$ برای حالت $\varphi = 30^\circ$



شکل (۹): اثر k_h و k_v بر $\frac{N_{\gamma e}}{N_{\gamma s}}$ برای حالت $\varphi = 30^\circ$

k_h و k_v حاکی از کاهش در هر سه ضریب N_{γ} ، N_q و N_c است. نرخ کاهش N_c (نسبت تغییرات N_c به تغییرات k_v یا

$\frac{\Delta N_{\gamma}}{\Delta k_v}$) برای یک زاویه اصطکاک داخلی خاص تقریباً ثابت

است. برای $\varphi=20^\circ$ در حدود $1/35$ ، و برای $\varphi=40^\circ$ در حدود

۵۶ می‌باشد. نرخ کاهش N_q نیز نظیر N_c تابع زاویه اصطکاک

داخلی خاک بوده و میزان آن برای $\varphi=20^\circ$ در حدود $6/25$ ، و

برای $\varphi=40^\circ$ در حدود 58 می‌باشد. نرخ کاهش N_c در حالت

$k_h \neq 0$ نظیر ضرایب N_c و N_q تابع زاویه اصطکاک داخلی

خاک بوده و برای $\varphi=20^\circ$ در حدود $5/4$ ، و برای $\varphi=40^\circ$ در

حدود 29 می‌باشد. در $k_h=0$ ، تغییرات k_v اثری بر N_c ندارد.

با توجه به نتایج در حالت $\varphi=20^\circ$ ، نرخ کاهش کمتری

نسبت به ضرایب N_q و N_c داشته و در حالت $\varphi=40^\circ$ ، نرخ

کاهش کمتری در مقایسه با سایر ضرایب دارد.

۵- بررسی اثر عوامل مختلف بر ضرایب باربری و

ظرفیت باربری نهایی پی

در این قسمت اثر پارامترهای مختلف بر ضرایب باربری و

ظرفیت باربری نهایی پی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج

تحقیق حاضر در قالب نمودارهایی کاربردی ارائه شده‌اند.

۵-۱- بررسی تأثیر شتاب قائم و افقی زلزله بر

ضرایب ظرفیت باربری

اشکال (۱۰) تا (۱۵) تأثیر مؤلفه قائم شتاب زلزله و اثر توأم

آن را با مؤلفه افقی بر ضرایب ظرفیت باربری برای حالات

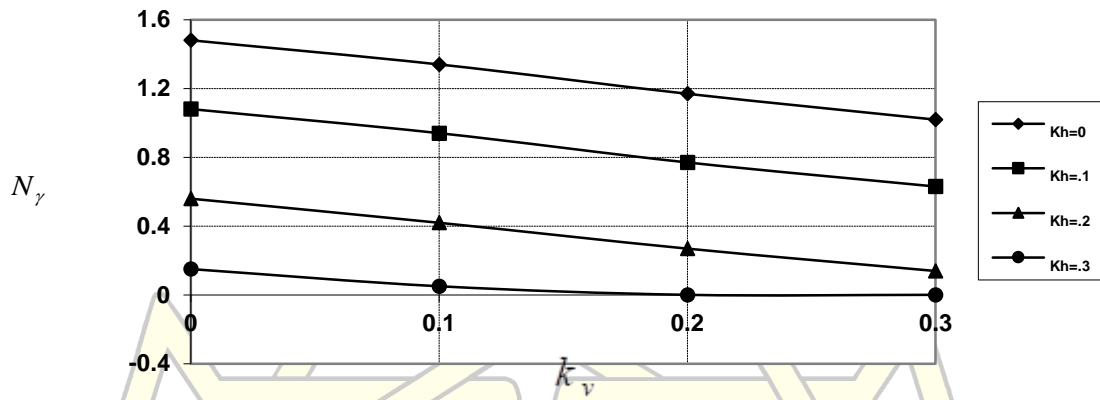
مختلف نشان می‌دهند. این اشکال برای مقادیر k_h و k_v برابر

با $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0$ و φ برابر با 20° و 40° درجه ارائه شده

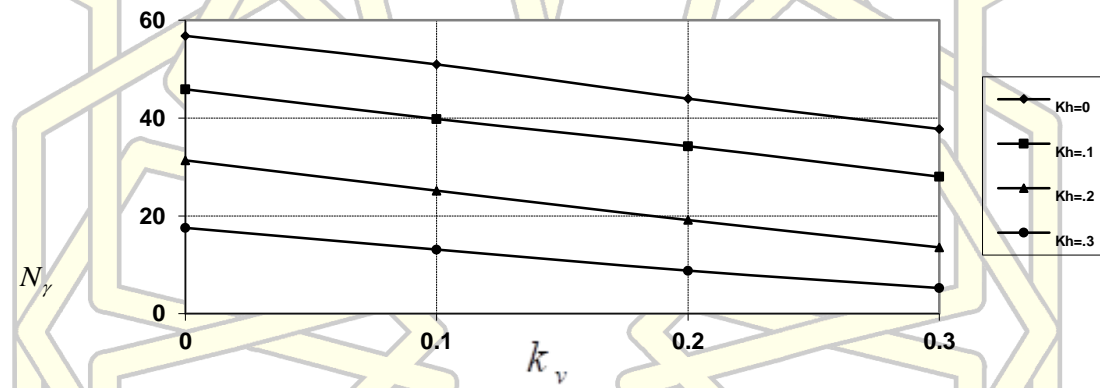
است. افزایش k_v زمانی که $k_h=0$ است باعث کاهش ضرایب

N_c و N_q شده لیکن بر ضریب N_c بی‌تأثیر است، اما اثر توأم

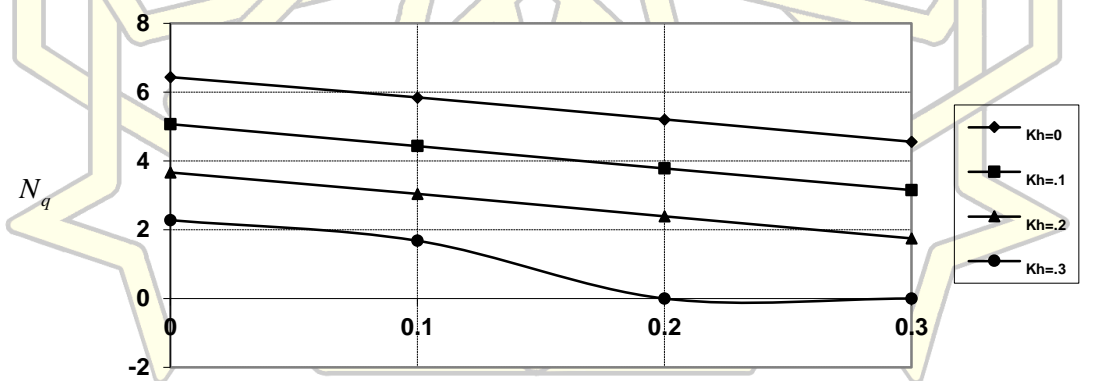
تأثیرات k_h و k_v بر ضرایب باربری پی را به گونه‌ای



شکل (۱۰): اثر k_h و k_v بر N_γ برای حالت $\varphi = 20^\circ$



شکل (۱۱): اثر k_h و k_v بر N_γ برای حالت $\varphi = 40^\circ$



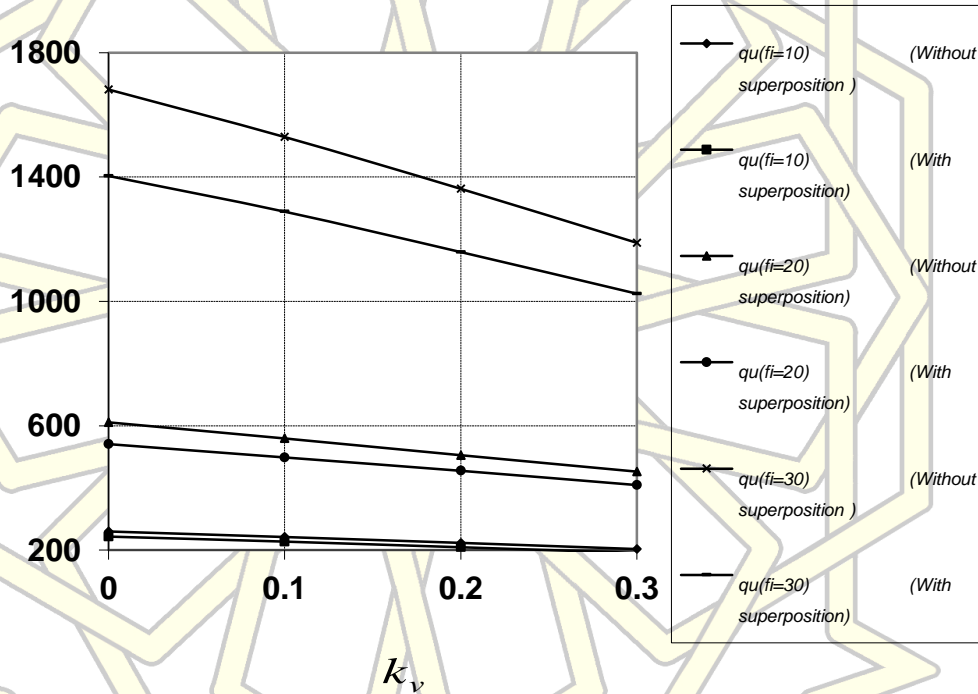
شکل (۱۲): اثر k_h و k_v بر N_q برای حالت $\varphi = 20^\circ$



۵-۲- بررسی جمع آثار قوا جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی پی

در شکل (۱۶) مقایسه‌ای بین حالت کاربرد جمع آثار قوا و عدم کاربرد آن جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی در حالت $c = 20 \text{ kpa}$ ، $q = 50 \text{ kpa}$ ، $\gamma = 20 \text{ kpa}$ ، $B = 3 \text{ m}$ و $k_v = 0.1$ برای مقادیر k_v برابر با 0.1 ، 0.2 و 0.3 و ϕ برابر با 10° ، 20° و 30° درجه صورت گرفته است. ملاحظه می‌شود که کاربرد جمع آثار قوا ظرفیت باربری نهایی را به دست می‌دهد. میزان درصد

اختلاف برای حالت $\phi = 30^\circ$ از 17% برای $k_v = 0$ تا 14% برای $k_v = 0.3$ تغییر می‌کند. این میزان برای حالت $\phi = 20^\circ$ از 11% تا 10% و برای حالت $\phi = 10^\circ$ از 7% تا 6% تغییر کرده است. بدین ترتیب میزان در صد اختلاف پاسخ‌های به‌دست‌آمده از جمع آثار قوا با پاسخ‌های به‌دست‌آمده بدون استفاده از این اصل، با کاهش ϕ و افزایش k_v به حداقل می‌رسد، به عبارت دیگر میزان محافظه‌کارانه بودن پاسخ‌های به‌دست‌آمده از جمع آثار قوا با افزایش ϕ و کاهش k_v ، بیشتر می‌شود.



شکل (۱۶): مقایسه q_{ult} به‌دست‌آمده در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن جمع آثار قوا

$$(B = 3 \text{ m} \text{ و } c = 20 \text{ kpa} , q = 50 \text{ kpa} , \gamma = 20 \text{ kpa})$$



۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر مؤلفه قائم شتاب زلزله بر ضرایب ظرفیت باربری پی‌ها با کمک روش خطوط مشخصه تنش مورد مطالعه قرار گرفته و اثر توأم مؤلفه قائم با مؤلفه افقی بررسی شده است. جهت تعیین ضرایب ظرفیت باربری با استفاده از جمع آثار قوا و انجام سه آنالیز جداگانه، مقادیر N_c ، N_q ، N_γ برای حالت‌های k_h و k_v برابر با ۰، ۰/۱، ۰، ۰/۲ و ۰/۳ و ϕ برابر با ۲۰ و ۴۰ محاسبه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مؤلفه قائم شتاب زلزله زمانی که $k_h = 0$ است منجر به کاهش ضرایب N_q و N_c شده اما بر روی ضریب N_c بی‌تأثیر است. اثر مؤلفه قائم

شتاب زلزله توأم با مؤلفه افقی آن باعث کاهش ضریب N_c و کاهش بیشتر در ضرایب N_q و N_c می‌گردد. با افزایش ϕ ، k_v و k_h ، بیشترین نرخ کاهش در N_c و N_q و کمترین نرخ کاهش در N_c دیده می‌شود. استفاده از اصل جمع آثار قوا جهت تعیین ظرفیت باربری در جهت اطمینان می‌باشد، لیکن با افزایش ضرایب k_h و k_v و کاهش ϕ این حاشیه امنیت کمتر می‌گردد. در ادامه نیز پیشنهاد می‌گردد به منظور مطالعات آتی، تأثیر مؤلفه‌ی قائم زلزله بر روی ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر بستر خاک مسلح مورد مطالعه قرار گیرد.

۷- مراجع

- ۱- میر ابوطالبی. (۱۳۸۴). "ظرفیت باربری لرزه‌ای شالوده‌های سطحی با در نظر گرفتن اینرسی توده خاک" نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹ شماره ۳، صفحه ۳۱۹ تا ۳۲۷.
2. Richards R., Glms D. G. and Badhu M., (1993), "Seismic Bearing Capacity ad Settlement of Foundations", *Geotech. Engrg. Div., Am. Soc. Civ. Engrs.*, 1993, 119 No. 4, 662-674.
3. Budhu, M. and Al-Karni, A. (1993), "Seismic Bearing Capacity of Soils", *Geotechnique*, Vol. 43, No. 1, pp 181-187.
4. Dormieux, L and Pecker, A. (1995), "Seismic Bearing Capacity of Foundation on Cohesionless Soil", *J. Geotech. Engrs.*, ASCE 121 (3), pp 300-303.
5. Soubra, A.H. (1997), "Seismic Bearing Capacity of Sallow Strip Footings in Seismic Conditions" *Proc. Ins. th. Civ. Engrg, London*, 125 (94), pp 230-241.
6. Soubra, A.H (1999), "Upper Bound Solution for Bearing Capacity of Foundations", *J. Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp 59-68.
7. Zhu, D. (2000), "The Least Upper-Bound Solution for Bearing Capacity Factor", *Soils and Foundations*, Vol 40, No. 1, pp 123-129.
8. Askari, F, and Farzaneh O. (2003), "Upper-Bound Solution for Seismic Bearing Capacity of shallow Foundation near Slopes", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 8, pp 697-702.
9. Kumar, J and V. B. K. Mohan Rao (2002), "Seismic Bearing Capacity Factors for Spread Foundation", *Geotechnique*, Vol. 52, No. 2. pp 79-88.
10. Kumar, j & V. B. K. Mohan Rao (2003), "Seismic Bearing Capacity of Foundation on Slopes", *Geotechnique*, Vol. 53, No 3 pp 347-361.
- ۱۱- دریا باری (۱۳۸۵)، "تعیین ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های نواری با استفاده از روش خطوط مشخصه" رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
12. Cascone, E., & Casablanca, O. (2016), "Static and seismic bearing capacity of shallow strip footings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 204-223.