

## بررسی عددی توان باربری پی‌های نواری هم‌جوار واقع بر ماسه

محمدعلی شکوهی قهفرخی<sup>۱</sup>، مهدی ویس‌کرمی<sup>۲\*</sup> و نادر هاتف<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

<sup>۲</sup> دانشیار بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

<sup>۳</sup> استاد بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۶/۸/۱۵، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۵)

### چکیده

توان باربری پی‌های سطحی علاوه بر پارامترهای مقاومتی خاک تابع هندسه و شرایط مرزی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین شرایط مرزی در بیان مسأله توان باربری، وجود بارگذاری محدود در اطراف پی است که از جمله آن می‌توان به توان باربری پی‌های هم‌جوار اشاره نمود. در این حالت بر خلاف حالتی که سطح بارگذاری نامحدود باشد و عملاً جمله دوم رابطه توان باربری را تحت تأثیر قرار دهد، بارگذاری یک پی مجاور با پی دیگر و با هندسه و خصوصیات مشابه در این پژوهش مورد توجه قرار داده شده است. با نگرش به تحقیقات نسبتاً محدود انجام گرفته در این باره، پژوهش حاضر به بحث عددی در این خصوص می‌پردازد و برای این منظور از روش اجزای محدود برای مدل‌سازی مسأله استفاده شده است. هدف اصلی از این مدل‌سازی یافتن فواصلی است که در آن توان باربری به مقدار بیشینه و یا به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. همچنین و در همین راستا، ضمن معرفی ضرایب اصلاحی برای توان باربری پی‌های مجاور، گراف‌هایی برای استفاده عملی از آن‌ها ارائه گردیده است. نتایج نشان‌دهنده فاصله مشخصی بین دو پی هستند که در آن، توان باربری به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** پی نواری، ماسه، توان باربری، مدل‌سازی عددی.

### ۱- مقدمه

شود که مسائل فوق را در بر خواهد داشت. در بحث پی‌های متداخل، موارد متعددی از پی ساختمان‌های مجاور یا پی سوله‌ها را می‌توان نام برد. بنابراین مطالعه تأثیر پی‌های هم‌جوار بر یکدیگر و بر خاک، اهمیت شایانی برای مهندسی عمران دارد و در نظر نگرفتن این مسأله در طراحی‌ها ممکن است موجب خسارت‌هایی شود.

ظرفیت باربری خاک، عموماً نخستین معیار در بحث طراحی ژئوتکنیکی پی‌های سطحی (و عمیق) است. در نظر گرفتن مقادیر تنش‌های وارد به خاک بیش تر از ظرفیت باربری واقعی آن، می‌تواند آسیب‌هایی جدی به سازه وارد سازد یا باعث تخریب آن شود. تئوری‌های مختلفی برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های منفرد وجود دارد. از نخستین تحقیقات می‌توان به مطالعات Prandtl (۱۹۲۰)، اشاره نمود که نتایج پژوهش‌های خود را در ارتباط با نفوذ یک جسم صلب در داخل یک مصالح نرم‌تر الاستوپلاستیک منتشر ساخت.

Terzaghi (۱۹۴۳)، با توسعه تئوری گسیختگی خمیری Prandtl، معادله ظرفیت باربری خود را ارائه داد. در مطالعات

طراحی پی‌های سطحی، باید به گونه‌ای انجام شود که منجر به گسیختگی خاک و یا نشست‌های بیش از حد نگردد. در تحلیل و یا طراحی پی‌ها، دو مسأله باید در نظر گرفته شود: ابتدا پایداری و پس از آن نشست و تغییر شکل زمین. هر دوی این مسائل از جایگاه ویژه‌ای در مهندسی ژئوتکنیک برخوردارند. در خصوص نشست خاک، بررسی تأثیرگذاری پی‌های هم‌جوار بر یکدیگر حائز اهمیت است زیرا در بسیاری موارد به علت وجود بارهای زیاد بر سازه و در دسترس نبودن مکان‌های مناسب جهت احداث سازه، مهندسیین ناچار به قراردادن پی‌ها در فاصله‌های نزدیک به یکدیگر می‌شوند. زمانی که پی‌ها در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، تداخل میان آن‌ها ممکن است موجب افزایش چشمگیر فشار وارد بر خاک، حتی بیش از توان باربری خاک شود که این افزایش فشار باعث نشست خاک در سازه‌های مجاور و یا گسیختگی زود هنگام (نسبت به یک پی منفرد) می‌شود. در حقیقت ممکن است تداخل نواحی گسیختگی در پی‌های هم‌جوار موجب تغییر رفتار بار- تغییر شکل پی‌ها نسبت به حالت پی تکی

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۷۱-۳۶۱۳۳۱۱۸

اساس روابط جدیدی برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی شالوده-های سطحی پیشنهاد نمودند. عوامل دیگری نیز بر توان باربری تأثیر دارند. به عنوان مثال تأثیر بارهای لرزه‌ای بر توان باربری Kumar (۲۰۰۱)، تأثیر ابعاد پی و زبری کف پی (Kouzer و Kumar، ۲۰۰۷؛ Kumar، ۲۰۰۹؛ جهان‌اندیش و همکاران، ۲۰۱۰)، بررسی توان باربری پی‌های حلقوی (Kumar و Ghosh، ۲۰۰۵؛ نادری و هانف، ۲۰۱۴)، تأثیر نوع قانون جریان (Michalowski، ۱۹۹۷؛ Yin و همکاران، ۲۰۰۱؛ ویس‌کرمی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ویس‌کرمی و دوستدار، ۲۰۱۶) و استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه (ملکی و توکلی، ۱۳۹۱).

علی‌رغم تحقیقات فراوان محققان در زمینه محاسبه ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی، اطلاعات محدودی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های هم‌جوار، که در مسائل شهری از اهمیت بالایی برخوردار است، وجود دارد.

Stuart (۱۹۶۲)، توان باربری پی‌های هم‌جوار واقع بر خاک دانه‌ای را به صورت تئوریک و انجام یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی کرد. وی با استفاده از روش تعادل حدی، تأثیر فاصله بین پی‌های نواری صلب بر روی ظرفیت باربری نهایی خاک‌های دانه‌ای را بررسی نمود. همچنین این محقق موفق گردید، مکانیزم گسیختگی پی‌های مجاور یکدیگر را براساس فاصله پی‌ها از یکدیگر مورد بررسی قرار دهد. در آزمایش‌ها تأثیرات فاصله بین پی‌ها بر توان باربری مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر فاصله به صورت فاکتوری به نام ضریب کارایی در رابطه توان باربری ترزاقی اعمال گردید. در یک مثال اولیه Stuart (۱۹۶۲)، تأثیر مجاورت پی‌ها را بررسی کرد و جمله سوم رابطه توان باربری را برای دو پی که بر روی ماسه قرار گرفته‌اند به صورت زیر اصلاح نمود:

$$q_u = 0.5\gamma BN_\gamma \xi_\gamma \quad (3)$$

که در آن  $\gamma$ ، وزن مخصوص خاک،  $B$  عرض پی،  $N_\gamma$  فاکتور تأثیر وزن (ضریب جمله سوم) و  $\xi_\gamma$  فاکتور تأثیر ظرفیت باربری است که برای اثر دادن مقیاسی از فاصله بر پی‌های مجاور پیشنهاد شد. مطابق با نظریه Stuart (۱۹۶۲)،  $\xi_\gamma$  تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک و فاصله پی‌ها از یکدیگر است. نتایج اولین تحقیقات نشان داد که ظرفیت باربری نهایی برای وضعیت پی‌های مجاور چند گانه عمدتاً بیشتر از ظرفیت باربری در حالت پی‌های تکی است.

Rabbaa و Selvadurai (۱۹۸۳)، با انجام یک سری آزمون-های آزمایشگاهی، توزیع تنش تماسی زیر دو پی نواری مجاور یکدیگر، که بر لایه‌ای از ماسه مترکم واقع شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. این محققان نشان دادند که با کاهش فاصله میان پی‌ها،

Terzaghi خاک زیر پی به صورت لایه‌یی نیم‌بینهایت، همگن و همسانگرد فرض شده است. همچنین سطح مشترک خاک و پی به صورت زبر در نظر گرفته شده است. این معادله تا به امروز از مقبولیت فراوانی برخوردار بوده است.

در واقع Terzaghi (۱۹۴۳)، اولین کسی بود که نظریه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی ارائه کرد. طبق نظریه ترزاقی وقتی شالوده، سطحی خوانده می‌شود که عمق مدفون آن  $D_f$  کمتر یا مساوی عرض شالوده پی باشد. ترزاقی سطح گسیختگی برشی در زیر بار نهایی یک شالوده نواری را به صورت سطح گسیختگی برش کلی در نظر گرفت. او همچنین خاک موجود در بالای سطح زیرین شالوده را با سرباری با شدت  $q = \gamma D_f$  جایگزین کرد (که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص خاک است). با استفاده از اصول تعادل، ترزاقی ظرفیت باربری نهایی را به صورت زیر ارائه کرد:

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (1)$$

که در آن  $c$ ، چسبندگی خاک  $\gamma$ ، وزن مخصوص خاک و  $N_c, N_q, N_\gamma$  ضرایب بدون بعد توان باربری، که فقط تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک هستند، می‌باشد.

رابطه تعیین ظرفیت باربری ترزاقی برای شالوده نواری، مربعی و دایره‌ای کاربرد دارد ولی این معادلات برای شالوده مستطیلی به طور مستقیم کاربرد ندارد. تئوری ظرفیت باربری ترزاقی، مقاومت برشی آن قسمت از سطح گسیختگی که در بالای سطح زیرین شالوده قرار دارد را در نظر نمی‌گیرد. همچنین این تئوری فقط برای بارهای قائم قابل استفاده است. برای در نظر گرفتن تمام موارد فوق، Meyerhof (۱۹۶۳)، رابطه ظرفیت باربری را در حالت نهایی به شکل زیر توصیه کرد:

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (2)$$

که در آن  $q$ ، تنش مؤثر قائم در تراز سطح زیرین شالوده،

$B$  عرض شالوده (قطر برای شالوده دایره)،

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$  ضرایب عمق

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$  ضرایب شیب بار

رابطه تعیین ظرفیت باربری فقط برای حالت تنش صفحه‌ای (یعنی شالوده نواری) به طور نظری به دست آمده و ضرایب شکل، عمق و شیب بار به طور تجربی به آن اعمال شده است. پس از ارائه رابطه ظرفیت باربری اصلاح شده توسط Meyerhof (۱۹۶۳)، محققان دیگری از جمله Brinch Hansen (۱۹۷۰)، (در همان سال‌ها) و دیگران (در سال‌های اخیر)، روابط ضرایب شکل، عمق و شیب بار و حتی تغییراتی در ضرایب توان باربری را ارائه و بر این

علیمردانی لواسان و قضاوی (۲۰۱۲)، با استفاده از مطالعات عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی، نسبت ظرفیت باربری را برای پی‌های مجاور دوتایی مربعی و دایره‌ای واقع بر ماسه بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر مسلح‌سازی لایه‌های خاک توسط لایه‌های ژئوگرید بر ظرفیت باربری نهایی خاک را بررسی کردند. تحلیل‌های عددی با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب انجام پذیرفت. نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج هر دو روش به یکدیگر بسیار نزدیک بودند. نتایج مطالعات، تأثیر فاصله بین پی‌ها و تأثیر مسلح‌سازی لایه‌های خاک بر ظرفیت باربری نهایی خاک را توجیه نمود.

نادری و هاتف (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل‌سازی عددی و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تأثیر فاصله پی‌های مجاور دایره‌ای و حلقوی واقع بر ماسه بر ظرفیت باربری نهایی خاک را بررسی کردند. همچنین تأثیر مسلح‌سازی لایه‌های خاک توسط ژئوگرید بر ظرفیت باربری نهایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داد که با کاهش فاصله بین پی‌های مجاور دایره‌ای و حلقوی، ظرفیت باربری نهایی خاک افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله بین پی‌های مجاور، ظرفیت باربری نهایی خاک کاهش می‌یابد. این محققان علت تغییرات توان باربری با تغییرات فاصله را این‌گونه توجیه نمودند: همچنان که فاصله مرکز به مرکز پی‌ها کاهش می‌یابد، پدیده‌ای به نام اثر بلوکی (Blocking) اتفاق می‌افتد. به دلیل این اثر، خاک بین دو پی مجاور تشکیل یک قوس معکوس می‌دهد و در حین بارگذاری، خاک به همراه پی‌ها، مانند یک سیستم یکپارچه به سمت پایین حرکت می‌کند. بنابراین با نزدیک شدن پی‌ها به یکدیگر، ناحیه قوسی شکل میان پی‌ها از بین خواهد رفت و سیستم مانند یک پی تکی با عرضی برابر با مجموع عرض سه پی سطحی منفرد خواهد گردید. تحقیقات نشان داد که با افزایش فاصله بین پی‌ها، بیشتر از چهار برابر عرض پی، رفتار شالوده به رفتار شالوده تکی نزدیک می‌شود و از تأثیر تداخل پی‌ها می‌توان چشم‌پوشی کرد.

علیمردانی لواسان و قضاوی (۲۰۱۴)، با استفاده از روش‌های عددی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، مکانیزم گسیختگی و الگوی تغییر شکل خاک زیر دو پی هم‌جوار مربعی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین این محققان، تأثیرات فاصله بین پی‌های هم‌جوار، بر توان باربری را مورد بررسی قرار دادند. در مدل‌سازی عددی، رفتار خاک الاستوپلاستیک در نظر گرفته شد. همچنین تحلیل‌ها با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب انجام پذیرفت. نتایج تحلیل‌های عددی با مکانیزم‌های گسیختگی تشکیل یافته در زیر دو پی نواری هم‌جوار ارائه شده توسط Stuart (۱۹۶۲) و Ghosh و Kumar (۲۰۰۷)، مقایسه گردید.

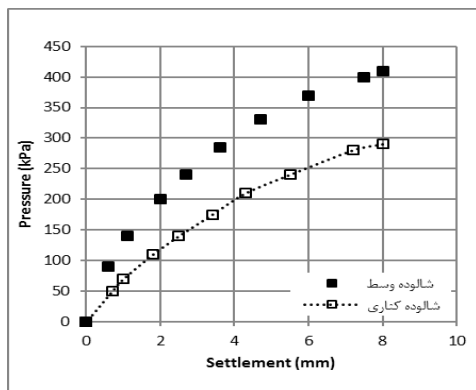
توزیع تنش تماسی زیر پی، نامتقارن می‌گردد و با افزایش فاصله، تأثیر تداخل حباب‌های تنش کاهش می‌یابد و توزیع تنش زیر پی، حالت متقارن پیدا می‌کند. همچنین با افزایش فاصله میان پی‌ها، مقادیر تنش تماسی کاهش می‌یابد.

Larbi-Cherif و Das (۱۹۸۳)، تأثیر تداخل پی‌های مجاور دوتایی را با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. Graham و همکاران (۱۹۸۴)، با استفاده از روش مشخصه‌های تنش نشان دادند که ظرفیت باربری نهایی چندین پی نواری کنار یکدیگر که بر روی ماسه قرار گرفته‌اند با کاهش فاصله بین پی‌ها افزایش می‌یابد. مطابق با کار Graham و همکاران (۱۹۸۴)، ظرفیت باربری نهایی دو پی مجاور هم با فاصله لبه به لبه  $s$ ، و عرض پی  $B$  تقریباً  $150\%$  بیش تر از ظرفیت باربری پی تک برای خاک‌های دانه‌ای با زاویه اصطکاک داخلی خاک  $35^\circ$  درجه است. Griffiths و همکاران (۲۰۰۶)، با استفاده از مدل‌سازی عددی، تغییرات ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های نواری صلب مجاور دوتایی را با تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده بررسی کردند. تحلیل‌ها در حالت کرنش مسطح، با استفاده از معیار گسیختگی-ترسکا انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی مدل نیز از تئوری Monte Carlo بهره گرفته شد. ایشان دریافتند که همسایگی دو پی تأثیر نسبتاً کمی بر ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر خاک چسبیده دارد.

Ghosh و Kumar (۲۰۰۷)، توان باربری نهایی دو پی مجاور یکدیگر را با استفاده از روش خطوط مشخصه بررسی کردند. مسأله برای دو پی نواری مجاور یکدیگر با فاصله لبه به لبه  $s$  از یکدیگر، که هر کدام از پی‌ها دارای عرض  $B$  می‌باشند، انجام گردید. فرض گردید که پی‌ها بر خاک دانه‌ای واقع گردیده‌اند و فشار سربار، بر خاک وارد می‌گردد. تحلیل‌های این محققان در حالت دو بعدی و کرنش صفحه‌ای انجام گردید.

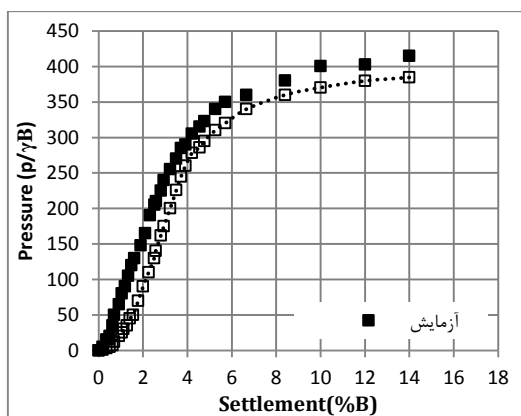
Bhoi و Kumar (۲۰۰۸)، چندین آزمون آزمایشگاهی برای بررسی (بار-تغییر شکل) پی‌های مجاور چند تایی که روی ماسه قرار گرفته‌اند انجام دادند. آن‌ها در مطالعات خود تأثیرات فاصله بین پی‌ها را بر ظرفیت باربری نهایی بررسی کردند. علاوه بر این، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی ماسه بر روی ظرفیت باربری نهایی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نتایج با تحقیقات Graham و همکاران (۱۹۸۴)، مقایسه شد که نشان دهنده بالاتر بودن جواب‌های حاصل از پژوهش ایشان بود.

Lee و Eun (۲۰۰۹)، تأثیر پی‌های نواری مجاور چندتایی که بر روی ماسه قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار دادند. برای ارزیابی اثر فاصله بر روی پی‌ها در حالات مختلف، از روش‌های عددی استفاده گردید. مطابق با نتایج به دست آمده، نسبت‌های ظرفیت باربری برای پی‌ها ارائه شد و معادله‌ای برای پی‌های مجاور چندتایی پیشنهاد شد.

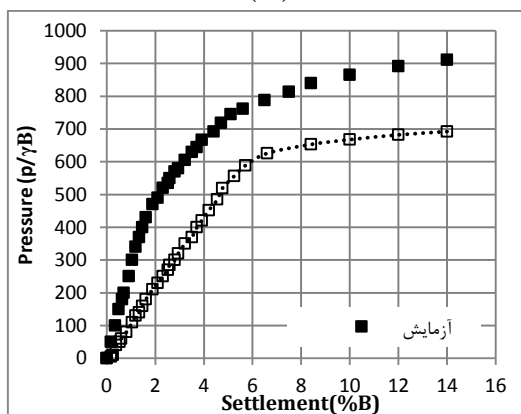


شکل ۱- مقایسه نمودار بار- جابجایی برای شالوده وسط و شالوده کناری

شکل (۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل سازی عددی را برای ماسه با  $\phi = 41.8$  (از آزمایش برش مستقیم) و  $\gamma = 16.7 \text{ kN/m}^3$  در حالت های  $s/B = 1.43$  و  $s/B = 8.57$  را نشان می دهد. همان طور که از نمودارها برمی آید، نتایج مدل سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- منحنی بارگذاری- جابجایی پی های هم جوار در دو حالت مختلف: الف)  $s/B = 8.57$  و ب)  $s/B = 1.43$

## ۲- مطالعه عددی یک برنامه آزمایشگاهی

برای صحت سنجی نتایج، شبیه سازی عددی (به کمک روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار GeoStudio Sigma/W) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

جدول (۱) خلاصه ای از ویژگی های خاک و مشخصات مدل آزمایشگاهی پی ارائه شده توسط (Kumar و Bhoi، ۲۰۰۸) را نشان می دهد. در آزمایش های فوق، تأثیر فاصله در حالت های مختلف یعنی ۱۷.۱۴ تا  $s/B = 1.43$  مورد بررسی قرار گرفته است. عمق خاک مورد استفاده در آزمایش ۶۰ سانتی متر است که در ۳۶ لایه با ضخامت یکنواخت ریخته شده و برای دستیابی به چگالی یکنواخت، هر لایه با تعداد ضربات کافی کوبیده شده است. بر اساس توضیحات ایشان، در هر لایه ابتدا ضخامت لازم برای رسیدن به وزن مخصوص مورد نظر محاسبه گردیده است و سپس با کوبش لایه ها به این ضخامت رسیده اند. جزئیات این آزمایش ها به طور مفصل توسط ایشان شرح داده شده است. آزمایش ها برای سه وزن مخصوص مختلف (یعنی  $16.2 \text{ kN/m}^3$ ،  $16.7 \text{ kN/m}^3$  و  $17.2 \text{ kN/m}^3$ ) با چگالی نسبی (به ترتیب برابر با ۰.۶۷، ۰.۷۹ و ۰.۹۰) و زاویه اصطکاک داخلی خاک متفاوت انجام شد. مدل سازی عددی به روش اجزای محدود و به کمک برنامه Sigma/W انجام گردید. برای این منظور، آن چنان که در بخش های بعدی مقاله نیز توضیح داده خواهد شد، پی های سطحی مجاور با شرایط مرزی جابجایی در زیر پی مدل گردیده اند و خاک به صورت محیطی الاستوپلاستیک ایده آل فرض گردیده است. در این مدل سازی که به روش کنترل- جابجایی (نشست) صورت پذیرفت، فرض شده است که پی های مجاور تقریباً دارای نشست یکسانی هستند و اعمال جابجایی یکسانی برای آن ها لحاظ شده است. این فرض با توجه به این موضوع که در واقعیت نیز عموماً پی ها باید به گونه ای طراحی شوند که کمترین نشست غیر یکنواخت بین آن ها به وجود آید، و همچنین توزیع نسبتاً یکنواخت بار بر روی پی های مجاور (مثل سوله ها یا پی های شبکه ای) فرضی مناسب به نظر می رسد. علاوه بر این، فرضی غیر از این به پیچیدگی استفاده از نتایج منجر می گردد و استفاده از توان باربری در نشست مشابه، به نظر کاربردی تر می رسد. برای یافتن بحرانی ترین وضعیت بارگذاری، منحنی بار- جابجایی برای شالوده وسط و شالوده کناری با استفاده از مدل سازی عددی بررسی شد. شکل (۱) مقایسه منحنی بار- جابجایی را برای این دو حالت نمایش می دهد.

همان طور که از شکل (۱) پیداست، بحرانی ترین وضعیت بارگذاری برای شالوده وسط اتفاق می افتد. بنابراین تحلیل ها برای شالوده وسط انجام پذیرفت.

کاهش می‌یابد تا جایی که پی‌ها مانند پی‌های منفرد عمل می‌نمایند.

همان‌طور که از نمودارها برمی‌آید، نتایج مدل‌سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد کاهش فاصله منجر به افزایش نشست خاک می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نشست خاک، تابعی از وزن مخصوص خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد.

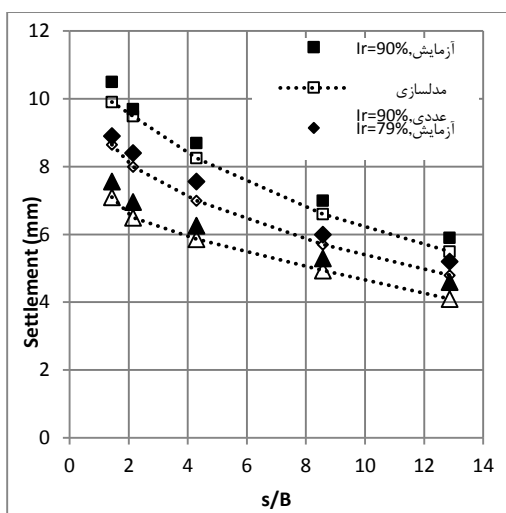
شکل (۴) نیز مقایسه روش مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی براساس نشست را نشان می‌دهد.

در ادامه، شکل (۳) نیز نمودار تغییرات نسبت فشار وارد بر پی در حالت حدی را برای فواصل مختلف بین پی‌ها نمایش می‌دهد. این نتایج بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته توسط (Bhoi و Kumar، ۲۰۰۸) برای مصالحی که پیشتر شرح آن رفت، ارائه گردیده است و مشخصات جعبه ساخت نمونه و پی‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در این نمودار  $s$ ، فاصله لبه به لبه پی‌ها از یکدیگر و  $B$  عرض پی است.

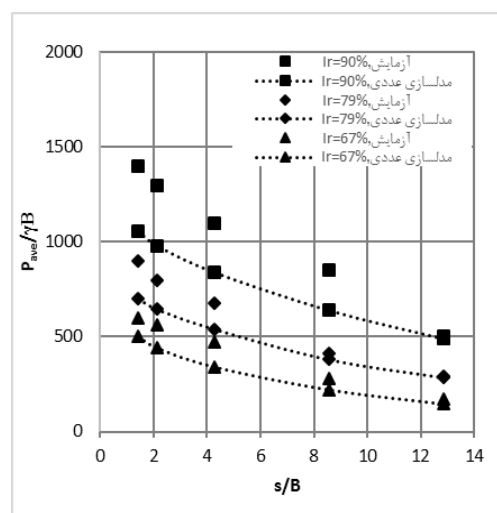
با توجه به نمودار، مقادیر نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با کاهش فاصله پی‌ها، مقادیر  $p_{ave}/\gamma B$  افزایش می‌یابد و هر چقدر فاصله پی‌ها از یکدیگر افزایش یابد، مقادیر  $p_{ave}/\gamma B$

جدول ۱- خلاصه‌ای از ویژگی‌های خاک و مشخصات مدل آزمایشگاهی پی

کمیت	نوع / مقدار
خاک	
نوع خاک	ماسه خشک ( $G_s = 2.65$ )
نحوه توزیع دانه‌بندی	$D_{10} = 0.2mm, D_{30} = 0.37mm, D_{60} = 0.75mm$
پارامترهای منحنی دانه‌بندی	$C_u = 3.75, C_c = 0.91$
طبقه‌بندی خاک	SP
مشخصات فیزیکی خاک در حالت متراکم	$I_r = 67\%, \gamma = 16.2kN/m^3, \phi = 37.4^\circ$
مشخصات فیزیکی خاک در حالت متراکم	$I_r = 79\%, \gamma = 16.7kN/m^3, \phi = 41.8^\circ$
مشخصات فیزیکی خاک در حالت بسیار متراکم	$I_r = 90\%, \gamma = 17.2kN/m^3, \phi = 44.8^\circ$
پی	
نوع پی	پی مستطیلی شکل فولادی
ابعاد جعبه آزمایش	۲متر طول، ۰/۳۷ متر عرض و ۰/۴۵ متر عمق
ابعاد پی	۰/۳۶ متر طول، ۰/۰۷ متر عرض و ۰/۰۲۵ متر ضخامت
فاصله لبه پی تا کناره‌های مخزن	۰/۴ متر



شکل ۴- مقایسه روش مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برای نمودار نشست در برابر  $s/B$

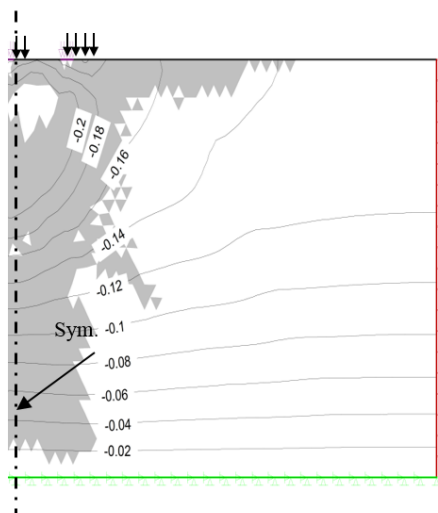


شکل ۳- مقایسه روش مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برای نمودار نسبت  $p_{ave}/\gamma B$  در مقابل  $s/B$

بر اساس شکل (۵)، در امتداد مرز بالایی مدل، سه پی با فاصله لب به لب  $s$  از یکدیگر و عرض  $B$  در نظر گرفته شد و تأثیر فاصله بر روی توان باربری را با نزدیک کردن پی‌ها به یکدیگر، با در نظر گرفتن ۶ حالت مختلف ( $s/B = 0.1, 2, 4, 8, 16$ ) بررسی گردید. از آنجا که پی‌ها بر روی سطح خاک قرار گرفته‌اند عملاً تأثیر فاصله پی‌ها صرفاً بر ترم سوم رابطه توان باربری اثر خواهد گذاشت. با توجه به این‌که وزن مخصوص بیشتر ماسه‌ها در محدوده  $15kN/m^3$  و  $17kN/m^3$  است، وزن مخصوص متوسط ماسه جهت محاسبات عددی  $16kN/m^3$  در نظر گرفته شده است. همچنین شایان ذکر است که بار حدی مستقل از خصوصیات الاستیسیته مصالح است و لذا مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده، عملاً اثر آن‌چنانی بر بار حدی محاسباتی ندارد.

#### ۴- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی

شکل (۶)، مکانیزم گسیختگی ایجاد شده را به صورت ناحیه‌ای از المان‌های تسلیم شده خاک برای مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، می‌توان علت تغییرات توان باربری را به نوعی بر اساس شکل مکانیزم گسیختگی ایجاد شده توجیه نمود. با نزدیک شدن پی‌ها به یکدیگر، مکانیزم ایجاد شده شبیه به مکانیزم گسیختگی یک پی تکی نسبتاً بزرگ با عرضی برابر با مجموع عرض‌های هر سه پی سطحی منفرد و فواصل بین آن‌ها است. در واقع خاک در نواحی بین پی‌های تک، به دلیل تنش‌های جانبی قابل توجه شبیه به یک ناحیه نسبتاً صلب عمل می‌کند و عملکرد مجموعه را به عملکرد یک پی تک بزرگ مشابه می‌سازد. این پی معادل بزرگ، دارای ظرفیت باربری کمابیش شبیه به یک پی تک با همان ابعاد است.



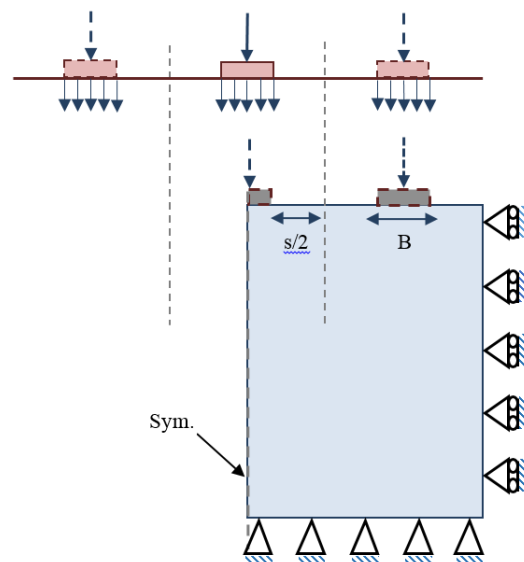
شکل ۶- گستره ناحیه پلاستیک زیر پی در لحظه گسیختگی با مدل‌سازی عددی، براساس برنامه آزمایشگاهی

#### ۳- تحلیل عددی پی‌های هم‌جوار چندتایی

برای بررسی ظرفیت باربری حدی در حالت‌های مختلف برای پی‌های نواری مجاور چند گانه از تحلیل‌های المان محدود استفاده شده است. جدول (۲) فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل به روش المان محدود را نشان می‌دهد. پی به صورت جسم صلب در نظر گرفته شده است. برای شرایط مرزی، پایین مدل در مقابل حرکت در هر دو جهت افقی و قائم محدود گردید و به اطراف مدل، محدودیت حرکت صرفاً در مقابل حرکت افقی اعمال شد. شکل (۵) هندسه مدل را نشان می‌دهد. خاطر نشان می‌شود که این شرط مرزی (جابجایی) مطابق با شرایط مرزی یک پی صلب است.

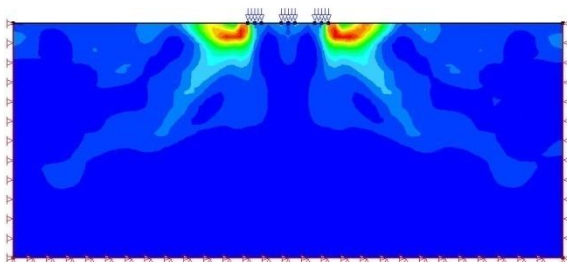
#### جدول ۲- فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل به روش المان

محدود	
ویژگی	مقدار/ فرضیات
خصوصیات ماده (خاک)	
نوع خاک	ماسه
مدل‌سازی خاک	الاستوپلاستیک، معیار گسیختگی موهر-کولمب
زاویه اصطکاک خاک	۲۰-۴۵ درجه
چسبندگی خاک	۰
مدول الاستیسیته	۱۵۰۰۰ کیلوپاسکال
نسبت پواسون	۰/۳
مدل‌سازی عددی	
ابعاد مدل المان محدود	۷۲ متر طول و ۲۸ متر عمق
نوع المان محدود	المان مثلثی با ابعاد مش ۰/۵ متر
روش تحلیل پی	کنترل- جابجایی

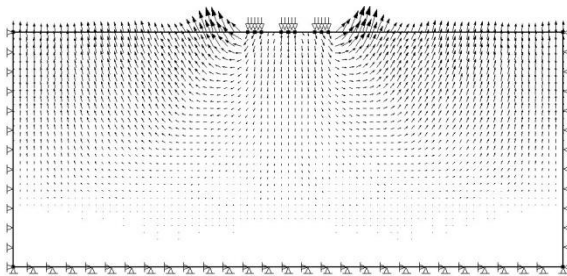


شکل ۵- هندسه مدل مورد استفاده در تحلیل اجزای محدودی چند پی مجاور به همراه شرایط مرزی اطراف مدل و زیر پی

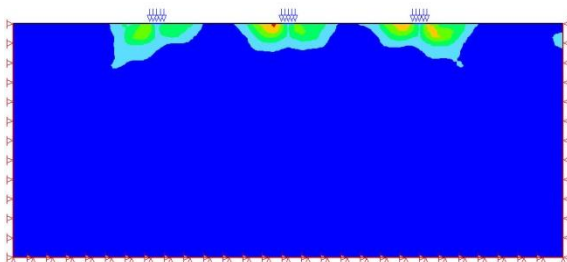
که در آن  $\gamma$ ، وزن مخصوص خاک،  $B$  عرض پی،  $N_\gamma$  فاکتور یا ضریب تأثیر عمق،  $\xi_\gamma$  فاکتور یا ضریب تأثیر ظرفیت باربری که برای تأثیر دادن فاصله بر پی‌های مجاور و  $\beta_S$  فاکتور یا ضریب تأثیر مربوط به ظرفیت باربری نهایی پی‌های مجاور چندتایی پیشنهاد شد. شکل (۸)، الگوی تغییر شکل یافته و نواحی پلاستیک زیر پی‌های هم‌جوار را برای فواصل مختلف پی‌ها از یکدیگر نمایش می‌دهد. هنگامی که فاصله پی‌ها از یکدیگر به اندازه کافی زیاد باشد، هیچ تداخلی بین پی‌ها رخ نمی‌دهد و رفتار پی‌ها به رفتار پی تکی نزدیک است.



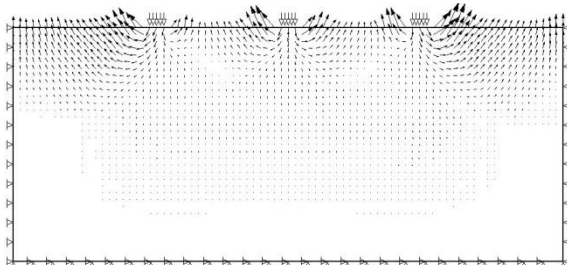
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۸- بخشی از نتایج مدل‌سازی پی‌ها: (الف) مکانیزم گسیختگی (براساس بیش‌ترین مقاومت برشی)، (ب) میدان جابجایی (با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر) برای  $s/B = 1.43$ ، (ج) مکانیزم گسیختگی (براساس بیش‌ترین مقاومت برشی)، (د) میدان جابجایی (با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر) برای  $s/B = 8.57$

با این تفاوت که به جای توزیع تنش نهایی در کل آن، تنش به صورت موضعی به بخش‌هایی از آن وارد شده است و برای حفظ تعادل بار وارده بر این پی معادل بزرگ (در حالت حدی) شدت این بارهای موضعی می‌بایست بیش از شدت تنش معادل یکنواخت وارد بر آن پی بزرگ معادل باشد. این موضوع به صورت ساده شده، علت افزایش توان باربری را با نزدیک شدن پی‌ها به یکدیگر توجیه می‌نماید.

#### ۵- نسبت ظرفیت باربری برای پی چندتایی

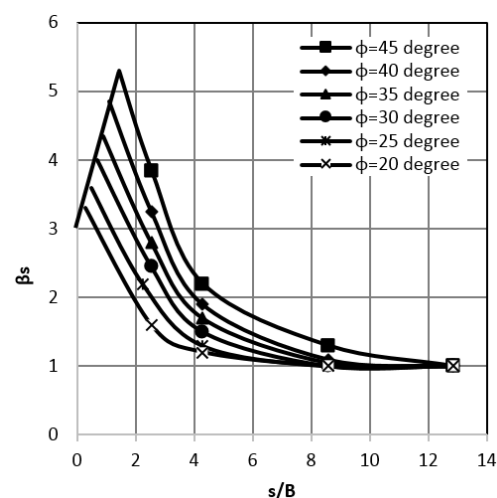
مطابق با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی، نسبت ظرفیت باربری نهایی پی‌های مجاور چندتایی به ظرفیت باربری نهایی پی تکی را با پارامتر  $\beta_S$  نمایش می‌دهیم.

$$\beta_S = q_{u \text{ multiple}} / q_{u \text{ single}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)،  $q_{u \text{ multiple}}$  مربوط به توان باربری نهایی پی‌های چندگانه در فواصل مختلف پی‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. شکل (۷) نسبت  $\beta_S$  را برای حالت‌های مختلف بر حسب پارامتر  $s/B$  نشان می‌دهد. با افزایش وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک، مقادیر  $\beta_S$  افزایش می‌یابد. همچنین با نزدیک کردن پی‌ها به یکدیگر، مقادیر  $\beta_S$  افزایش می‌یابد. این افزایش، در زوایای اصطکاک بالاتر، شدیدتر است که علت آن ایجاد ناحیه تداخلی بزرگ‌تر بین پی‌ها و تغییر بیشتر در توان باربری است.

اثر فاصله را می‌توان بر روی رابطه ظرفیت باربری وارد کرد و جمله سوم رابطه ظرفیت باربری برای پی‌های نواری چندتایی واقع بر ماسه را می‌توان به صورت زیر تصحیح نمود.

$$q_u = 0.5\gamma BN_\gamma \xi_\gamma \beta_S \quad (۵)$$



شکل ۷- تغییرات  $\beta_S$  بر حسب  $s/B$  بر اساس مدل‌سازی عددی

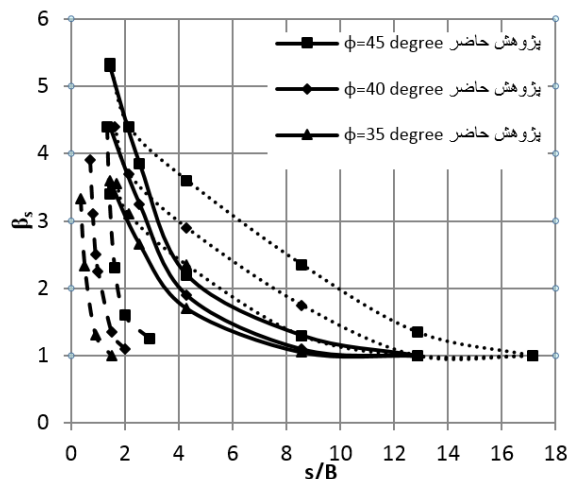
داخلی مقادیر توان باربری پی‌های مجاور افزایش می‌یابد. افزایش توان باربری برای زوایای اصطکاک داخلی بالاتر، شدیدتر است که علت آن شکل‌گیری ناحیه تداخلی بزرگ‌تر و تغییر بیشتر در توان باربری (لحظه گسیختگی) است. به عنوان نمونه در حالتی که  $s/B = 4.2$  است، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی از  $\phi = 40^\circ$  به  $\phi = 45^\circ$  مقدار توان باربری ۱/۱۵ برابر خواهد شد در حالی که برای همین مورد، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی از  $\phi = 20^\circ$  به  $\phi = 25^\circ$  مقدار توان باربری ۱/۰۸ برابر می‌شود.

با توجه به تأثیر فاصله بر نشست پی‌های هم‌جوار مشخص گردید که کاهش فاصله منجر به افزایش نشست خاک می‌گردد. به عنوان نمونه در حالتی که  $s/B = 4.2$  است، با افزایش دانسیته نسبی از  $I_r = 79\%$  به  $I_r = 90\%$  نشست ۱/۱ برابر خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نشست خاک، تابعی از وزن مخصوص خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. ولی با توجه به این که مقادیر وزن مخصوص ماسه معمولاً در حدود  $15 - 17 \text{ kN/m}^3$  است می‌توان از تأثیر وزن مخصوص ماسه بر تغییر شکل‌های زیر پی در زمان گسیختگی صرف‌نظر نمود.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به مدل‌سازی عددی اثر فاصله پی‌های نواری مجاور هم بر ظرفیت باربری پرداخته شد. از تحلیل‌های المان محدودی برای شبیه‌سازی پی‌های چند گانه با استفاده از مدل الاستوپلاستیک و معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده گردید. مدل‌سازی عددی ابتدا با نتایج آزمایشگاهی موجود در پیشینه فنی این پژوهش مقایسه شدند. سپس با بررسی عددی تأثیر فاصله مشخص شد که کاهش فاصله منجر به افزایش توان باربری می‌شود. همچنین این افزایش تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک است. در توجیه این مشاهدات از توان باربری یک پی معادل بزرگ استفاده گردید. سپس به بررسی تأثیر فاصله بر نشست پی‌های هم‌جوار پرداخته شد و مشخص گردید که کاهش فاصله منجر به افزایش نشست خاک می‌گردد.

علت تغییرات توان باربری پی‌های هم‌جوار را می‌توان بر اساس شکل مکانیزم گسیختگی ایجاد شده در زیر پی‌ها توجیه نمود. با نزدیک شدن پی‌ها به یکدیگر، مکانیزم ایجاد شده شبیه به مکانیزم گسیختگی یک پی تکی نسبتاً بزرگ با عرضی برابر با مجموع عرض‌های هر سه پی سطحی منفرد و فواصل بین آن‌ها است. در واقع خاک در نواحی بین پی‌های تکی، به دلیل تنش‌های جانبی قابل توجه شبیه به یک ناحیه نسبتاً صلب عمل می‌کند و عملکرد مجموعه را به عملکرد یک پی تک بزرگ مشابه می‌سازد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش فاصله به بیش از یک مقدار مشخص منجر به کاهش توان باربری به مقدار متناظر با پی‌های منفرد خواهد انجامید.



شکل ۹- مقایسه مقادیر  $\beta_s$  بر حسب  $s/B$  با نتایج (Graham و همکاران، ۱۹۸۴؛ Kumar و Bhoi، ۲۰۰۸)

هنگامی که فاصله پی‌ها کاهش یابد، ناحیه مقاوم مثلثی شکل، در میان پی‌ها تشکیل می‌یابد. در این حالت انتظار تغییرات نشست خاک زیر پی‌ها در مقابل نشست خاک زیر پی تکی محسوس است. زمانی که پی‌های هم‌جوار را به یکدیگر نزدیک‌تر کنیم، ناحیه مقاوم تشکیل یافته میان پی‌ها کوچک‌تر می‌گردد و مقادیر تنش‌ها در این ناحیه افزایش می‌یابد. در این حالت، گوه گسیختگی مثلثی تشکیل یافته در زیر پی‌ها کوچک‌تر خواهد شد و پدیده بلوکی شدن اتفاق می‌افتد. شکل (۹) نیز مقایسه بین مقادیر  $\beta_s$  بر حسب  $s/B$  را با نتایج نشان می‌دهد (Graham و همکاران، ۱۹۸۴؛ Bhoi و Kumar، ۲۰۰۸).

نتایج مدل‌سازی عددی حاکی از تطابق خوب بین مدل‌سازی و نتایج تست‌های آزمایشگاهی است. لذا به نظر می‌رسد که می‌توان برای مقاصد عملی از نتایج به دست آمده استفاده نمود. همچنین بر اساس تست‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی، تغییرات این ضریب برای زوایای اصطکاک بالاتر، شدیدتر است. شکل (۹) نشان می‌دهد که مقادیر  $\beta_s$  بر اساس مدل‌سازی عددی با نتایج سایر محققان هم‌پوشانی خوبی دارد.

#### ۶- تفسیر

با بررسی عددی تأثیر فاصله پی‌ها مشخص شد که با نزدیک شدن پی‌ها به یکدیگر، تداخل نواحی گسیختگی پی‌ها با یکدیگر بیشتر خواهد شد و اصطلاحاً یک ناحیه گسیختگی بسیار بزرگ‌تر در زیر پی‌ها تشکیل خواهد شد و این موضوع باعث افزایش مقادیر توان باربری می‌شود. در فاصله بحرانی که در آن، پی‌های مجاور بیشترین تأثیر را بر یکدیگر دارند مقادیر توان باربری به بیشترین مقدار خود خواهد رسید و پس از آن با کاهش فاصله مقادیر توان باربری کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک



- Analysis", *Soils and Foundations*, 1997, 37 (4), 57-64.
- Naderi E, Hataf N, "Model Testing and Numerical Investigation of Interference Effect of Closely Spaced Ring and Circular Footings on Reinforced Sand". *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42 (3), 191-200.
- Prandtl L, "Über die Härte Plastischer Körper, *Nachr. Ges.*", *Wissensch, Göttingen, Math-Phys, Klasse*, 1920, 74-85.
- Selvadurai APS, Rabbaa SAA, "Some Experimental Studies Concerning the Contact Stresses Beneath Interfering Rigid Strip Foundations Resting on a Granular Stratum", *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20 (3), 406-415.
- Stuart JG, "Interference between foundations, with special reference to surface footings in sand", *Geotechnique*, 1962, 12 (1), 15-22.
- Terzaghi K, "Theoretical Soil Mechanics", *John-Wiley and Sons*, 1943, 510 pp.
- Veiskarami M, Doostdar M, "Bearing capacity of non-associative coaxial granular materials by upper bound limit analysis and finite elements", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal* (Article in Press, DOI: 2016, 10.1080/17486025.2016.1189600).
- Veiskarami M, Kumar J, Valikhah F, "Effect of the Flow Rule on the Bearing Capacity of Strip Foundations on Sand by the Upper-Bound Limit Analysis and Slip Lines", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2014, 14 (3), 1-11.
- Yin J-H, Wang YJ, Selvadurai APS, "Influence of Nonassociativity on the Bearing Capacity of a Strip Footing", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2001, 127 (11), 985-989.
- ۷- مراجع
- ملکی م، توکلی س، "تحلیل عددی برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی براساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در خاک ماسه‌ای"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۱، ۴۲ (۲)، ۶۷-۷۵.
- Alimardani Lavasan A, Ghazavi M, "Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand", *Soils and Foundations*, 2012, 52 (1), 60-167.
- Alimardani Lavasan A, Ghazavi M, "Failure mechanism and soil deformation pattern of soil beneath interfering square footings", *Numerical Methods in Civil Engineering*, 2014, 1 (2), 48-56.
- Brinch Hansen J, "A revised and extended formula for bearing capacity", *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, 1970, 28, 5-11.
- Das BM, Larbi-Cherif S, "Bearing Capacity of Two Closely-Spaced Shallow Foundations on Sand". *Soils and Foundations*, 1983, 23 (1), 1-7.
- Graham J, Raymond GP, Suppiah A, "Bearing capacity of three closely-spaced footings on sand", *Geotechnique*, 1984, 34 (2), 173-182.
- Griffiths DV, Fenton GA, Manoharan N, "Undrained Bearing Capacity of Two-Strip Footings on Spatially Random Soil", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2006, 6 (6), 421-425.
- Jahanandish M, Habibagahi G, Veiskarami M, "Bearing capacity factor,  $N_v$ , for unsaturated soils by zel method", *Acta Geotechnica*, Springer, 2010, 5 (3), 177-188.
- Jahanandish M, Veiskarami M, Ghahramani A, "Effect of stress level on the bearing capacity factor,  $n_v$ , by zel method", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer, 2010, 14 (5), 709-723.
- Kumar J, "Seismic vertical uplift capacity of strip anchors", *Geotechnique*, 2001, 51 (3), 275-279.
- Kumar J, "The variation of  $n_v$  with footing roughness using the method of characteristics", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, 33 (2), 275-284.
- Kumar J, Bhoi MK, "Interference of multiple strip footings on sand using small scale model tests", *Geotechnical Geological Engineering*, Springer, 2008, 26 (4), 469-477.
- Kumar J, Ghosh P, "Bearing Capacity Factor  $N_v$  for Ring Footings Using the Method of Characteristics", *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42 (5), 1474-1484.
- Kumar J, Ghosh P, "Ultimate bearing capacity of two interfering rough strip footings", *International Journal of Geomechanics*, ASCE: 2007, 7 (1), 53-62.
- Kumar J, Kouzer KM, "Effect of footing roughness on bearing capacity factor  $N_v$ ", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2007, 133 (5), 502-511.
- Lee J, Eun J, "Estimation of bearing capacity for multiple footings in sand", *Computer and Geotechnics*, 2009, 36 (6), 1000-1008.
- Meyerhof GG, "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, 1963, 1, 16-26.
- Michalowski RL, "An Estimate of the Influence of the Soil Weight on the Bearing Capacity Using Limit

## EXTENDED ABSTRACT

# A Numerical Study on the Bearing Capacity of Neighboring Shallow Foundations on Sand

Mohammad Ali Shokoohi Ghahfarokhi, Mehdi Veiskarami<sup>\*</sup>, Nader Hataf

*School of Engineering, Shiraz University, Shiraz 7136133102, Iran*

**Received:** 06 November 2017; **Accepted:** 15 July 2018

---

### Keywords:

Strip footing, Sand, Bearing capacity, Numerical modeling.

---

## 1. Introduction

There are a few attempts attributed to the bearing capacity or the settlement of neighboring foundations. Such foundations are often frequently confronted in urban areas where the footings of adjacent buildings are inevitably placed close to each other. Once it happens, the interaction of the stress influenced zones of neighboring footings causes the failure to be initiated often later than that of a singular footing and this effect is sometimes called “blocking” (e.g. Stuart, 1962; Hataf and Naderi, 2014). This research is focused on the study of the bearing capacity of multiple shallow foundations. This problem represents the problem of the neighboring shallow foundations placed closely spaced over the ground surface. A numerical study by means of the finite element technique has been made and the results are first verified with an experimental study conducted by (Kumar and Bhoi, 2008) and then, a systematic analysis has been performed to present some design charts.

## 2. Methodology

### 2.1. FE modeling

To further study the effect of neighborhood on the behavior of shallow foundations, the finite element method has been utilized. An elasto-plastic finite element analysis was made with the conventional Mohr-Coulomb yield criterion. It is worth mentioning that advanced soil models could have been considered; however, they would need many soil parameters which cannot be always easily determined in practical problems.

The finite element model was first verified for a series of available data. To do so, an experimental study made by Kumar and Bhoi (2008) on three closely spaced footings was modeled. Kumar and Bhoi (2008) conducted a series of laboratory footing load tests on three small scale footings on dry sand.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Effect of spacing between footings on the bearing capacity

It is evident that, as both experimentally and numerically can be observed, the bearing capacity decreases as the distance ratio increases. In essence, it can be attributed to the increased passive force, as if the neighboring footing pressure increases the surcharge pressure and hence, the bearing capacity. This resistive effect decreases with further increase in footings distance. At reasonably long distance, the footings act as individual (singular) footings.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: ali.shokoohi70@yahoo.com (Mohammad Ali Shokoohi Ghahfarokhi), mveiskarami@gmail.com (Mehdi Veiskarami), nhataf@gmail.com (Nader Hataf).

### 3.2. Bearing capacity ratio

To further conduct this study, a series of systematic analyses were made to find the bearing capacity ratio for a system of multiple neighboring foundations.

It can be observed that the normalized bearing capacity factor,  $\beta_\gamma$ , decreases with both the distance ratio,  $s/B$  and the soil friction angle. It could have been anticipated qualitatively as the increase in the soil friction angle makes the failure mechanism larger and hence the interaction of two neighboring footings more effective even for footings located farther. There is an important note, i.e. the bearing capacity factor,  $N_\gamma$  is not a function of the footing size. In fact, this factor is the same for footings of different sizes, at least when the effect of size (or stress level), nonlinear soil models, etc. are not involved in modeling. Hence, the factor  $\beta_\gamma$  may appear at first glance to be precisely equal to unity when the footings are attached to each other (i.e. for  $s/B = 0$ ). However, this is not the case for multiple footings as it can be seen from the results. The reason is that the factor  $\beta_\gamma$  is computed as the ratio of the average bearing pressure of the central footing to a single footing. When the footings are very close to each other, the central footing will bear a rather higher average pressure than the two in either side and hence, it will fail under a higher pressure than the one corresponding to a single foundation of width equal to  $3B$ .

Fig. 1. shows the variations of the normalized bearing capacity factor,  $\beta_s = N_{\gamma m}/N_{\gamma 0}$  versus the distance ratio for a common range of soil friction angle.

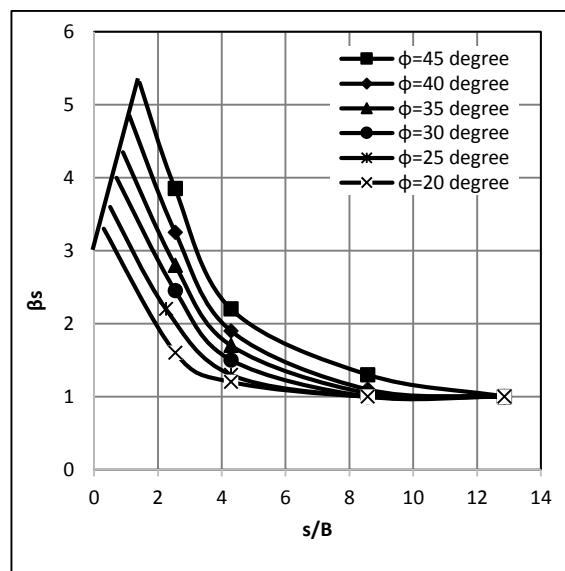


Fig. 1. Variations of  $\beta_s$  with the factor  $s/B$  for a common range of soil friction angle

## 4. Conclusions

In spite of a rather great number of efforts on the estimation of the bearing capacity of singular foundations, there are very few attempts, either numerically or experimentally, on the behavior of neighboring foundations. As it is practically an important issue, in particular in urban areas, this study has been focused on the bearing capacity of neighboring foundations on the surface of sand. An elasto-plastic displacement-controlled finite element analysis was made to first model some available laboratory footing tests and then to systematically find the effect of distance ratio on the ultimate pressure of neighboring footings. Comparisons indicate that the numerical modeling complies reasonably with experimental data. Some graphical results were also developed to show the variations of the normalized bearing capacity factor,  $\beta_s$ , for surface footings. This normalization makes it easy to estimate the bearing capacity of multiple footings based on the bearing capacity of a single footing by any arbitrary bearing capacity factor found in the literature (regardless of the method). Observations showed that there is a decreasing tendency for this ratio as the distance ratio,  $s/B$ , increases. More to the point, the influence of the distance becomes more pronounced as the friction angle increases. The reason can be attributed to the size of the failure zone formed beneath the footing and for higher friction angles, this zone grows in size and hence, the effect of the adjacent footing will become more significant, even in far distances.

## 5. References

- Kumar J, Bhoi MK, "Interference of multiple strip footings on sand using small scale model tests", *Geotechnical Geological Engineering Journal*, 2008, 26 (4), 469-477.
- Naderi E, Hataf N, "Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand", 2014, *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42 (3), 191-200.
- Stuart JG, "Interference between foundations, with special reference to surface footings in sand", *Geotechnique*, 1962, 12 (1), 15-22.