

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر لایه نازک افقی بر ظرفیت باربری پی دایره‌ای در خاک ماسه‌ای

مرتضی عسکری<sup>۱</sup>، احد باقرزاده خلخالی<sup>۲</sup>، مسعود مکارچیان<sup>۳\*</sup>، نوید گنجیان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۵/۳، بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۶/۲۷

### چکیده

لایه‌های نازک موجود در زمین، علی‌رغم آن‌که به‌نظر می‌رسد، تأثیر ناچیزی داشته باشند، اساساً می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر ظرفیت باربری پی داشته باشند. در این تحقیق، تأثیر وجود لایه نازک ضعیف و قوی بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای بر بستر ماسه‌ای، به‌وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک-شالوده بررسی می‌شود. آزمایش‌های مدل فیزیکی در مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، انجام شده است. شالوده دایره‌ای به‌صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد، یعنی عمق مدفون صفر است. بررسی‌ها با تغییر جنس، ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که لایه نازک ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک-شالوده می‌شود و لایه نازک قوی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک-شالوده می‌شود. میزان این تأثیر تابعی از ضخامت، عمق قرارگیری و جنس مصالح لایه نازک دارد. مطابق نتایج، لایه ضعیف در عمق بحرانی 1B (B قطر فونداسیون است) بیش‌ترین کاهش ظرفیت باربری نهایی را به‌میزان ۲۶ درصد داشته است (از 183kPa به 135kPa) و در عمق 2B تأثیری نداشته است. لایه قوی نیز برای حالتی که این لایه دقیقاً زیر فونداسیون قرار دارد، بیش‌ترین افزایش ظرفیت باربری نهایی را به‌میزان ۳۲۹ درصد داشته است (از 183kPa به 603kPa) و در عمق تقریباً ۱/۲۵B بدون تأثیر بوده است. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل آزمایشگاهی بستر ماسه‌ای یکنواخت، با نتایج تحلیلی محققان مختلف مقایسه شده که نشان از انطباق زیاد نتایج دارد.

**کلیدواژه‌ها:** لایه نازک ضعیف، لایه نازک قوی، ظرفیت باربری نهایی، سختی، مدل فیزیکی.

### ۱- مقدمه

تأثیر ناچیزی داشته باشد، اساساً می‌تواند بر رفتار خاک-شالوده و دیگر سیستم‌های ژئوتکنیکی، مؤثر باشند (Valore و همکاران، ۲۰۱۷). ترزاقی این عوارض را «جزئیات زمین‌شناسی کوچک<sup>۱</sup>» نامید و اظهار داشت که این عوارض می‌تواند اثرات پتانسیلی عظیمی<sup>۲</sup> بر ایمنی سدها داشته باشد (Terzaghi، ۱۹۲۹). Terzaghi در اولین کنفرانس بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی پی در سال ۱۹۳۶ بیان می‌کند «زمین در حالت طبیعی هرگز یکنواخت نبوده ... خصوصیات آن برای برخورد نظری دقیق، بسیار پیچیده بوده ... حتی راه‌حل تقریبی ریاضی بعضی از مسائل

فونداسیون بخش مهمی از هر سازه است و پی‌های سطحی همانند فونداسیون‌های دایره‌ای، به‌میزان گسترده‌ای برای انتقال بارهای روسازه به خاک‌های باربر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در موارد زیادی جنس زمین زیر پی، یکنواخت نبوده و ممکن است دارای لایه‌های نازک باشند که معمولاً در مطالعات ژئوتکنیک آشکار نمی‌شوند.

جزئیات کوچک موجود در زمین از قبیل لایه‌های ضعیف نازک، باندهای برشی و سطوح لغزش علی‌رغم آن‌که به‌نظر می‌رسد

2. Enormous potential effects

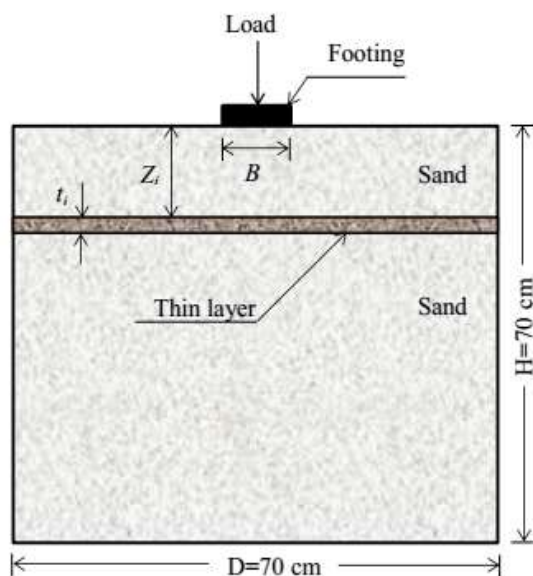
1. Minor geologic details

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۸۱۴۸۱۳۵

آدرس ایمیل: asgari.morteza@yahoo.com (م. عسکری)، a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (ا. باقرزاده خلخالی)، makarchian@yahoo.com

(م. مکارچیان)، navidganjian@yahoo.com (ن. گنجیان).

شده است. مسئله مذکور در شرایط تقارن محوری بررسی می‌شود و شالوده دایره‌ای به صورت صلب بوده و بر روی سطح بستر قرار می‌گیرد، یعنی عمق مدفون صفر در نظر گرفته می‌شود. خاک بستر شامل دو نوع مصالح است: بستر ماسه‌ای و یک لایه نازک با ضخامت  $t$ . برای بستر ماسه‌ای، از ماسه سیلیسی شکسته و با طبقه‌بندی SP استفاده شده است. جنس لایه نازک از مصالح خصوصیات مقاومتی متفاوت (قوی و ضعیف) نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس طراحی و ساخته شده است (شکل ۱).



شکل ۱- شکل کلی مسئله مورد بررسی

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مخزن آزمایش، فونداسیون و سیستم بارگذاری

برای دستیابی به شرایط تقارن محوری، آزمایش‌های مدل به وسیله مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۷۰ cm و ارتفاع ۷۰ cm، انجام شده است. برای رسیدن به دانسیته مورد نظر، جعبه بارش در قسمت بالایی چهارچوب بارگذاری طراحی و ساخته شده است و ماسه از ارتفاع ثابت ۶۰ سانتی‌متر تخلیه شده است. فونداسیون صلب مدل به وسیله ورق فولادی به قطر ۸ cm و ضخامت ۱ cm، مدل‌سازی گردید. با توجه به نمودارهای حباب تنش (منحنی‌های هم‌تنش) بر اساس نظریه بوسینسک<sup>۵</sup>، در عمقی حدود 4R و فاصله از مرکز پی حدود 2R از هر طرف پی، تنش قائم به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد و چنانچه این معیار را ۵٪ تنش قائم نیز در نظر گرفته شود، فواصل مذکور حدود 5.5R و 2.5R خواهد بود (Murthy, ۲۰۰۲). بنابراین عمق و شعاع مخزن

متداول نیز بی‌نهایت مشکل است.

در پیشینه تحقیق، مطالعه ظرفیت باربری نهایی خاک دو لایه (به‌عنوان مثال قرارگیری خاک قوی بر روی خاک ضعیف و یا برعکس) نسبتاً انجام شده است و همچنین مطالعه بر روی خاک سه‌لایه صورت گرفته است؛ ولی در خصوص تأثیر وجود لایه نازک، مطالعات بسیار اندکی انجام شده است.

Valore و همکاران (۲۰۱۷) ظرفیت باربری نهایی و مکانیزم گسیختگی پی نواری بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک سست افقی را بررسی نمودند. مطابق تحقیق مذکور، در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک از مقدار بحرانی 4B (عرض فونداسیون)، تجاوز نکند، می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی شالوده مؤثر باشد و در مواردی می‌تواند باعث کاهش تا ۸۰ درصدی ظرفیت باربری شود.

Zicarelli و همکاران (۲۰۱۷) با آزمایش‌های سانتریفیوژ<sup>۳</sup> پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای، دارای لایه ضعیف را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق برای بستر ماسه‌ای و لایه ضعیف ساخته‌شده از پودر تالک<sup>۴</sup>، در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک از مقدار بحرانی 4B (عرض فونداسیون)، تجاوز نکند، می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی شالوده مؤثر باشد و به‌طور کلی این مقدار، بستگی به نسبت زوایای مقاومت برشی ماسه و مصالح تشکیل‌دهنده لایه ضعیف دارد.  $(\phi'_{1p}/\phi'_{2p})$

Win و Oda (۱۹۹۰)، ظرفیت باربری نهایی پی واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه رسی اشباع را بررسی نمودند. در تحقیق مذکور از مخزن شیشه‌ای به ابعاد داخلی ۴۰ cm طول، ۶ cm عرض و ارتفاع ۳۰ cm، استفاده شده بود. مطابق تحقیق مذکور، لایه ضعیف با عمق قرارگیری تا 5B (عرض فونداسیون) می‌تواند بر ظرفیت باربری نهایی مؤثر باشد.

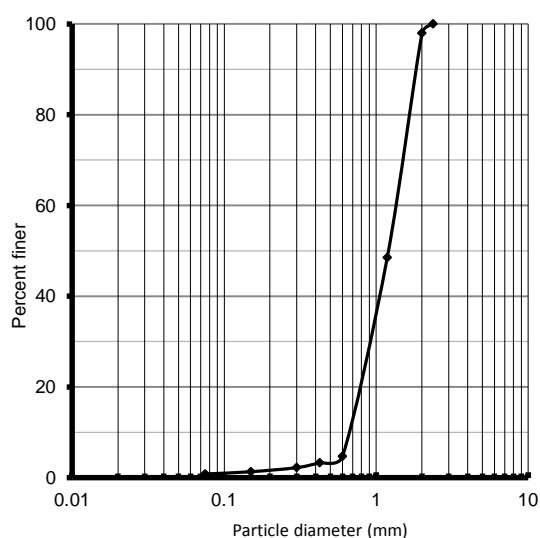
Poulos (۲۰۰۵) در کنفرانس یادواره ترزاقی، به تأثیر رگه رسی بر ظرفیت و سختی شمع تکی اشاره دارد که وجود رگه رسی باعث کاهش سختی و ظرفیت باربری شمع می‌گردد. مطابق پیشینه تحقیق فوق، مشخص است که در خصوص تأثیر وجود لایه نازک، مطالعات بسیار اندکی انجام شده است. مخصوصاً اثر لایه نازک قوی بررسی نشده است؛ همچنین تاکنون تأثیر لایه نازک بر ظرفیت باربری پی دایره‌ای بررسی نشده است. بنابراین در این تحقیق، تأثیر وجود لایه نازک افقی بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای بر بستر ماسه‌ای به وسیله مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس سیستم خاک- شالوده بررسی می‌گردد. مسئله سیستم خاک- شالوده پی دایره‌ای به صورت شماتیک در شکل (۱) نمایش داده

5. Boussinesq

3. Centrifuge

4. Talc

تعیین شده است. از آنجاکه نسبت  $B/d_{50}$  بزرگتر از ۵۰ است؛ لذا مطابق توصیه بسیاری از محققان به عنوان مثال (Lau و Bolton، ۱۹۸۹؛ Taylor، ۱۹۹۵؛ Toyosawa و همکاران، ۲۰۱۳)، اثر اندازه ذرات را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. با توجه به جنس سیلیسی ماسه و کم بودن سطح تنش‌ها در مدل فیزیکی موجود، خرد شدن ذرات ماسه بسیار ناچیز است.



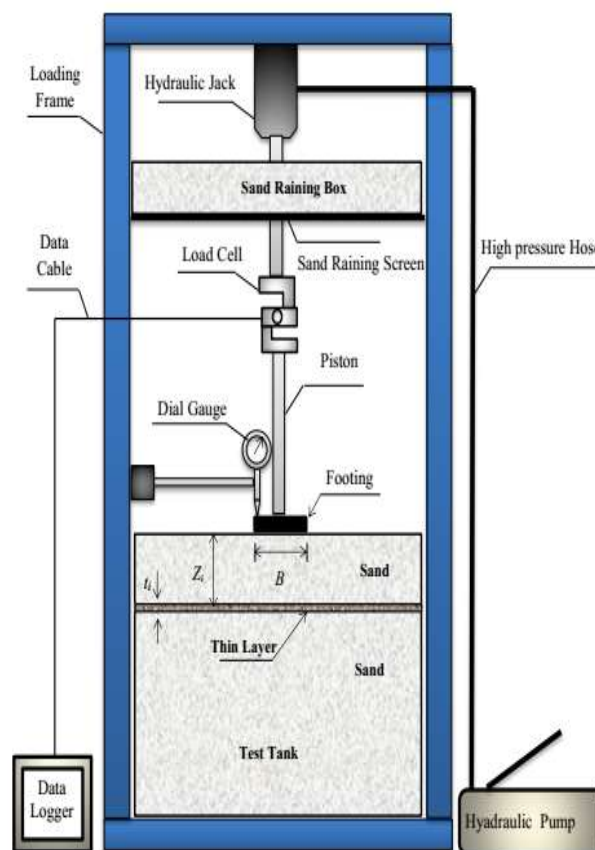
شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی ماسه در آزمایش‌های مدل

مقدار	خصوصیت
۲/۳۸	حداکثر اندازه دانه، $D_{max}$ (mm)
۱/۴۵	اندازه متناظر با ۶۰ درصد ریزتر، $D_{60}$ (mm)
۱/۲۵	اندازه متوسط دانه، $D_{50}$ (mm)
۰/۹	اندازه متناظر با ۳۰ درصد ریزتر، $D_{30}$ (mm)
۰/۶۷	اندازه مؤثر، $D_{10}$ (mm)
۲/۱۶	ضریب یکنواختی، $C_u$
۰/۸۳	ضریب خمیدگی، $C_c$
۲/۶۶	چگالی ویژه، $G_s$
۱۹/۸۵	وزن مخصوص خشک حداکثر، $\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
۱۳/۷۳	وزن مخصوص خشک حداقل، $\gamma_{dmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )
۱۵/۷۱	وزن مخصوص خشک، $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
۴۱	دانسیته نسبی، $D_r$ (%)
SP	طبقه‌بندی خاک، (USCS)

پارامترهای مقاومت برشی ماسه، به‌وسیله هفت آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. نتایج آزمایش‌ها بر روی ماسه، در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. پارامترهای مقاومت برشی ماسه، تابعی از سطح تنش نرمال است که خلاصه نتایج در

استوانه‌ای، به‌ترتیب 8.75R و 17.5R (از هر طرف) است و مرزهای مخزن هیچ‌گونه تأثیر منفی بر پاسخ ندارد. بار به‌وسیله جک هیدرولیکی دستی و با سرعت ۱ mm/min به فونداسیون منتقل می‌شود. بار اعمالی از طریق جک هیدرولیکی، به کمک لودسل<sup>۶</sup> نصب‌شده به پیستون جک و با ظرفیت 50 kN ثبت می‌گردد. برای ثبت نشست‌های پی، از گیج عقربه‌ای با دقت ۰/۰۱ mm استفاده شده است.

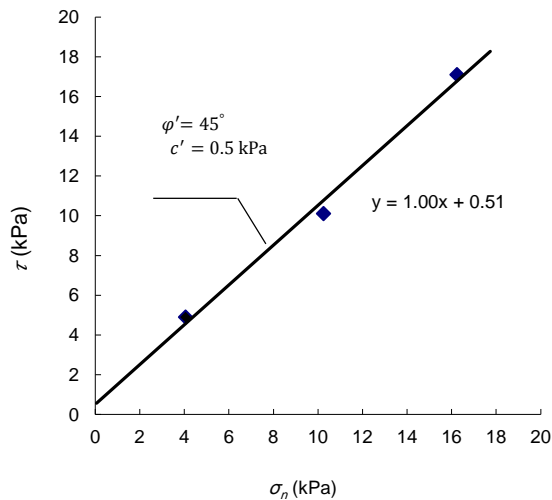


شکل ۲- نمایی از مدل فیزیکی ساخته‌شده

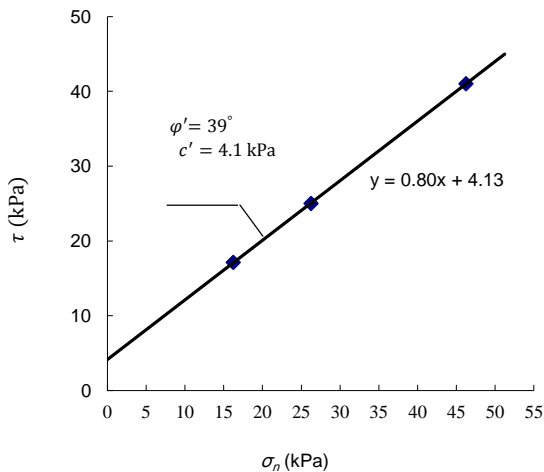
## ۲-۲- خصوصیات ماسه بستر

ماسه بستر، از کارخانه‌های تولید ماسه سیلیسی استان همدان تأمین شده است. ماسه در شرایط خشک‌شده در هوا استفاده شده است. مطابق طبقه‌بندی یکنواخت، ماسه بدانه‌بندی شده (SP) توصیف می‌گردد. منحنی دانه‌بندی در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای دستیابی به دانسیته نسبی یکسان در آزمایش‌ها، ماسه به‌روش بارش خشک، از ارتفاع سقوط یکسان ریخته می‌شود. برخی از مشخصات فیزیکی ماسه در جدول (۱) نمایش داده شده است. دانسیته نسبی،  $D_r$ ، مطابق استانداردهای شماره ASTM D 4253-00 و ASTM D 4254-00 (ASTM, 2004a, 2004b)

6. Load cell



شکل ۵- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه بستر، با سطح تنش مؤثر متوسط ( $4\text{kPa} < \sigma_v < 16\text{kPa}$ )



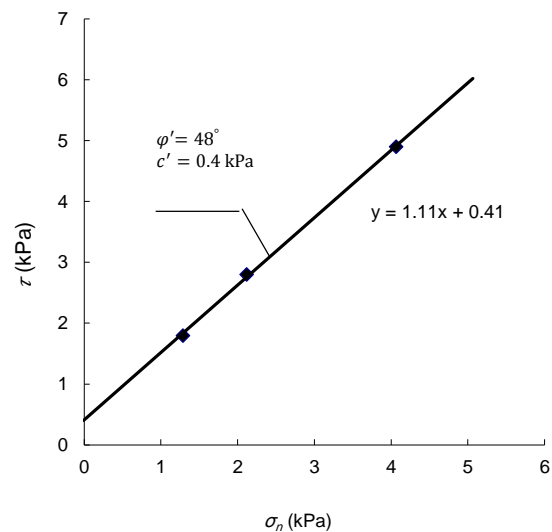
شکل ۶- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه بستر، با سطح تنش مؤثر زیاد ( $16\text{kPa} < \sigma_v < 46\text{kPa}$ )

### جدول ۳- خصوصیات فیزیکی مصالح ضعیف در آزمایش‌های

مدل	
مقدار	خصوصیت
۲/۶۸	چگالی ویژه، $G_s$
۱۲/۱	وزن مخصوص، ( $\text{kN/m}^3$ )
۲۶	حد روانی، (%)
۱۸	حد خمیری، (%)
۸	نشانه خمیری، (%)
CL	طبقه‌بندی خاک، (USCS)
۵/۵	درصد رطوبت، (%)

نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت برشی مصالح لایه ضعیف تابعی از سطح تنش مؤثر نیست، نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل ( $1\text{kPa} < \sigma_v < 4\text{kPa}$ ) در

جدول (۲) نمایش داده شده است. شایان‌ذکر است با توجه به مقادیر ناچیز چسبندگی ماسه، در محاسبات ظرفیت باربری از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. همچنین بر اساس مطالعه محققان مختلف از جمله Valore و همکاران (۲۰۱۷)، در صورتی که سطح تنش نرمال حدود 1-2 kPa باشد، زاویه مقاومت برشی حداکثر ممکن است از ۶۰ درجه نیز تجاوز کند. قابل توجه است که برای مدل فیزیکی مطالعه حاضر، سطح تنش نرمال در توده خاک مدل کوچک‌مقیاس برای عمق مؤثر، کم‌تر از حدود 4 kPa است.



شکل ۴- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه بستر، با سطح تنش مؤثر کم ( $1\text{kPa} < \sigma_v < 4\text{kPa}$ )

### جدول ۲- پارامترهای مقاومت برشی ماسه

ردیف	سطح تنش نرمال (kPa)	چسبندگی (kPa)	زاویه مقاومت برشی حداکثر (درجه)
۱	۱-۴	۰/۴	۴۸
۲	۴-۱۶	۰/۵	۴۵
۳	۱۶-۴۶	۴/۱	۳۹

### ۲-۳- خصوصیات لایه ضعیف

برای مصالح لایه ضعیف از پودر خاک رس GL با دانسیته بسیار کم، استفاده شده است. خاک رس مصرفی با رطوبت طبیعی ۵/۵ درصد در تمامی آزمایش‌ها، به صورت ثابت استفاده شده است. مشخصات فیزیکی مصالح ضعیف در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به کم بودن رطوبت پودر خاک رس، فشار آب حفره‌ای و در نتیجه اضافه فشار آب حفره‌ای در آزمایش‌ها وجود نخواهد داشت. پارامترهای مقاومت برشی خاک رس، به وسیله هفت آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است.

مورد نیاز اجرا شده‌اند. فونداسیون مدل در موقعیت مشخصی بر روی سطح ماسه قرار داده می‌شود. در نهایت بار به وسیله جک هیدرولیکی دستی با سرعت  $1\text{mm/min}$  به فونداسیون مدل اعمال می‌شود. سپس توسط گیج عقربه‌ای، نشست فونداسیون مدل با دقت  $0.1\text{mm}$  اندازه‌گیری می‌شود. در تعدادی از موارد، برای اطمینان از نتایج، آزمایش‌ها تکرار شده‌اند. شکل (۱) پیکربندی کلی مدل را نشان می‌دهد.

### ۳- پارامترها و برنامه آزمایشگاهی

پارامترهای متغیر در آزمایش‌ها (مطابق با شکل (۱)) و مقادیر آن‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. سه سری آزمایش انجام شده است. ابتدا رفتار فونداسیون دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت بررسی شده است. سپس در سری‌های دوم و سوم رفتار فونداسیون دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای، دارای لایه ضعیف و قوی در ضخامت‌ها و عمق‌های متفاوت بررسی شده است.

#### جدول ۵- برنامه آزمایش‌های مدل

نوع آزمایش	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغیر
ماسه همگن	$D_r = 41\%$ , $D_f/B = 0$	-----
ماسه همگن دارای لایه ضعیف	$D_r = 41\%$ , $D_f/B = 0$	$Z_i/B = 0, 0.5, 1, 2$ $t_i/B = 0.1, 0.2$
ماسه همگن دارای لایه قوی	$D_r = 41\%$ , $D_f/B = 0$	$Z_i/B = 0, 0.5, 1, 2$ $t_i/B = 0.1, 0.2$

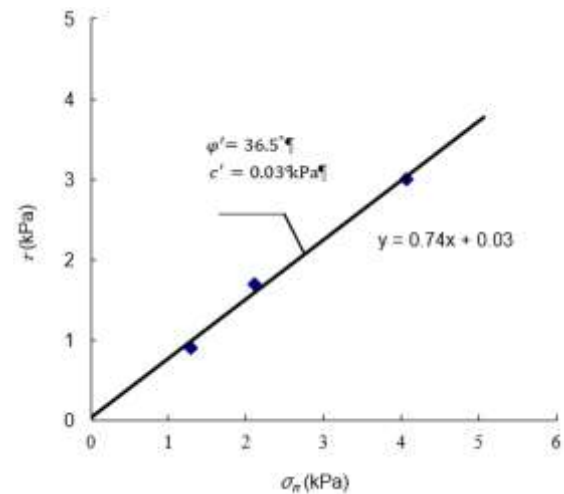
### ۴- نتایج و بحث

منحنی‌های فشار- نشست برای فونداسیون مدل‌ها به دست آمده است. در این منحنی‌ها، نشست فونداسیون (S) بر حسب عرض پی (B) به صورت نسبت  $(S/B, \%)$  ارائه شده است.

#### ۴-۱- رفتار پی دایره‌ای واقع بر ماسه یکنواخت

منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت در شکل (۸) نمایش داده شده است. مطابق شکل، مقدار ظرفیت باربری نهایی  $183\text{kPa}$  و مقدار نشست متناظر با نقطه اوج  $7/5\text{mm}$  و مقدار نشست نسبی  $(S/B, \%)$   $9/4$  درصد به دست آمده است. برای مقایسه و صحت‌سنجی مدل، مقادیر ظرفیت باربری نهایی با روش‌های تحلیلی محققان مختلف (معادلات (۱) تا (۵)) برای زاویه اصطکاک داخلی متناظر با سطح تنش مدل محاسبه و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است. برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی از چسبندگی ماسه صرف‌نظر شده است.

شکل (۷) ارائه شده است. قابل ذکر است با عنایت به این‌که رطوبت خاک رس بسیار کم بوده و در واقع خاک اشباع نیست، لذا چسبندگی آن مشابه خاک‌های دانه‌ای، تقریباً صفر به دست آمده است.



شکل ۷- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی لایه ضعیف، با سطح تنش مؤثر کم ( $1\text{kPa} < \sigma_v < 4\text{kPa}$ )

### ۴-۲- خصوصیات لایه قوی

برای مصالح لایه قوی از مخلوط ماسه آسفالت گرم (بتن آسفالتی ریزدانه) استفاده شده است. خصوصیات مصالح قوی در جدول (۴) ارائه شده است. قابل ذکر است پارامترهای مقاومت برشی ماسه آسفالت به وسیله آزمایش سه‌محوری انجام شده است و برای ثابت بودن مقاومت برشی لایه قوی، تمامی آزمایش‌های مدل دارای لایه قوی آسفالتی، در دمای محیط  $28$  درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

#### جدول ۴- خصوصیات مصالح قوی

مقدار	خصوصیت
۱۹/۱۲	وزن مخصوص، $(\text{kN/m}^3)$
۱۴۶۰	مقاومت فشاری محدود نشده، $(\text{kPa})$
۳۸	زاویه اصطکاک داخلی، $(\text{درجه})$
۳۵۰	چسبندگی، $(\text{kPa})$

### ۴-۲- روند انجام آزمایش‌ها

در شروع آزمایش، جعبه دستگاه بارش، در بالای مخزن آزمایش و در ارتفاع مشخص نصب می‌شود و سپس ماسه در لایه‌های با ضخامت  $40\text{mm}$  به روش بارش اجرا شده است. کنترل دانسیته ماسه بارشی، با قرار دادن قوطی‌هایی با حجم مشخص در نقاط مختلف مخزن صورت گرفته است. لایه‌های نازک ضعیف و قوی با استفاده از شابلون‌های ساده در عمق‌ها و ضخامت‌های مشخص اجرا شده‌اند و لایه‌های بعدی ماسه تا رسیدن به سطح

(۹) و (۱۰) نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها، وجود لایه ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری و سختی سیستم خاک-شالوده شده است. مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مقایسه شده‌اند. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها در جدول (۷) ارائه شده است. بدیهی است تأثیر لایه ضعیف با ضخامت بیشتر، مشهودتر است. بیش‌ترین کاهش ظرفیت باربری در عمق بحرانی 1B و به میزان ۲۶ درصد (از  $t/B=0.1$ ) رخ داده است. برای هر دو حالت (135kPa به 183kPa)، لایه ضعیف در عمق  $2B$  تأثیری نداشته است.

$$q_u = 0.3\gamma B N_\gamma \quad (1)$$

$$N_q = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad (2)$$

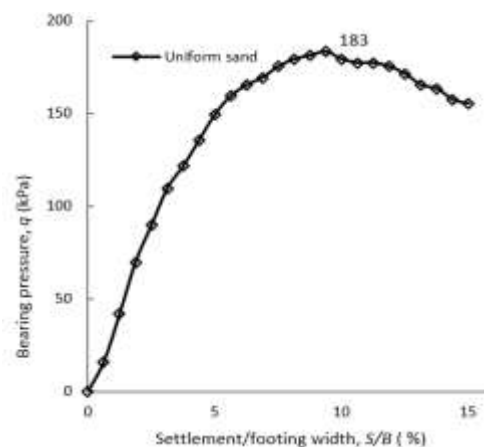
$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan 1.4\phi \quad (\text{Meyerhof, 1963}) \quad (3)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (\text{Vesic, 1973}) \quad (4)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan 1.32\phi \quad (\text{Martin, 2005}) \quad (5)$$

جدول ۶- مقایسه ظرفیت باربری پی دایره‌ای مدل با روابط تحلیلی محققان مختلف

Martin, (۲۰۰۵)	Vesic, (۱۹۷۳)	Meyerhof, (۱۹۶۳)	زاویه حداکثر مقاومت برشی (درجه)
۴۴۱	۴۹۶	۵۲۷	$N_\gamma$
۱۶۵	۱۸۶	۱۹۷	$q_u$ (kPa)

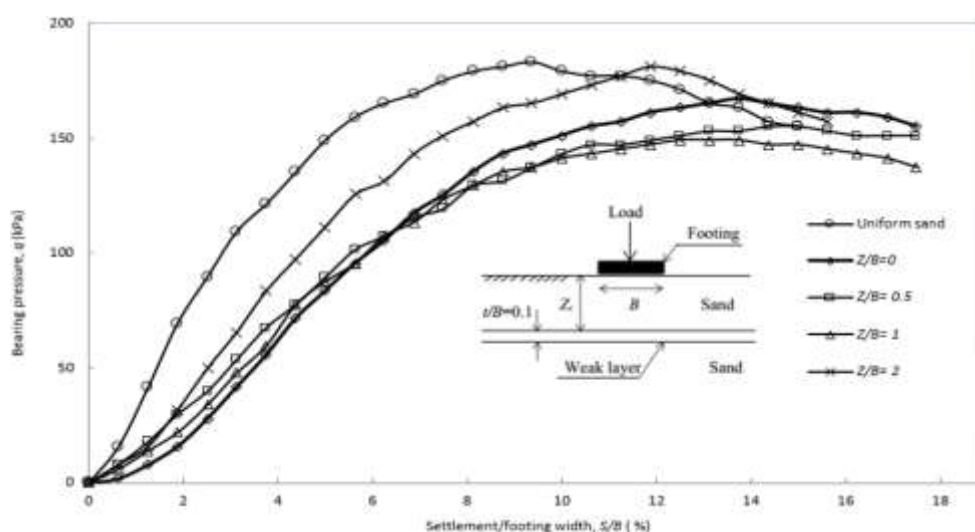


شکل ۸- منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت

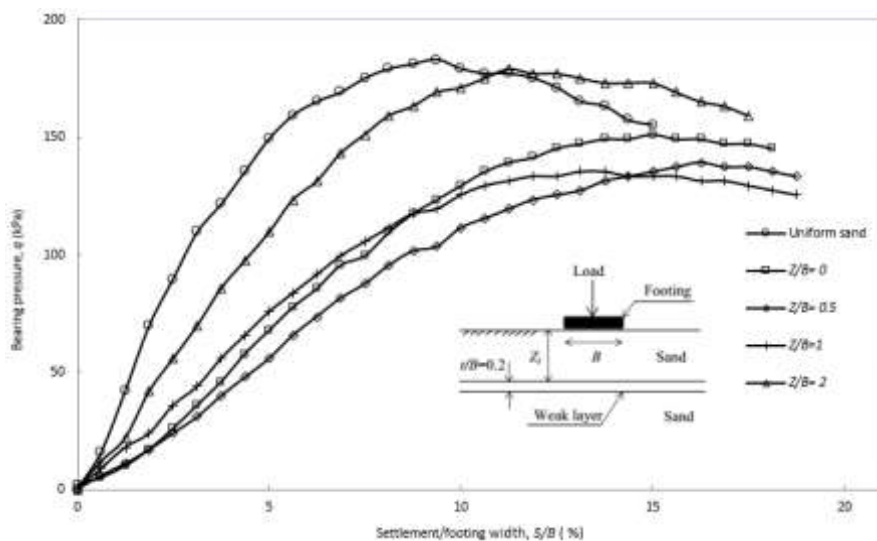
مطابق نتایج، مقادیر محاسباتی با روش‌های میرهوف<sup>۷</sup> (۱۹۶۳)، وسیک<sup>۸</sup> (۱۹۷۳) و مارتین<sup>۹</sup> (۲۰۰۵) با نتایج آزمایشگاهی آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد. با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، انتخاب زاویه اصطکاک داخلی متناظر با سطح تنش مؤثر واقعی در مدل کوچک مقیاس تأیید می‌شود. به عبارت دیگر نتایج روش‌های تحلیلی با زاویه اصطکاک داخلی ۴۸ درجه، با نتایج مدل آزمایشگاهی بیشتر تطابق دارد.

۴-۲- رفتار پی دایره‌ای واقع بر ماسه یکنواخت دارای لایه نازک ضعیف

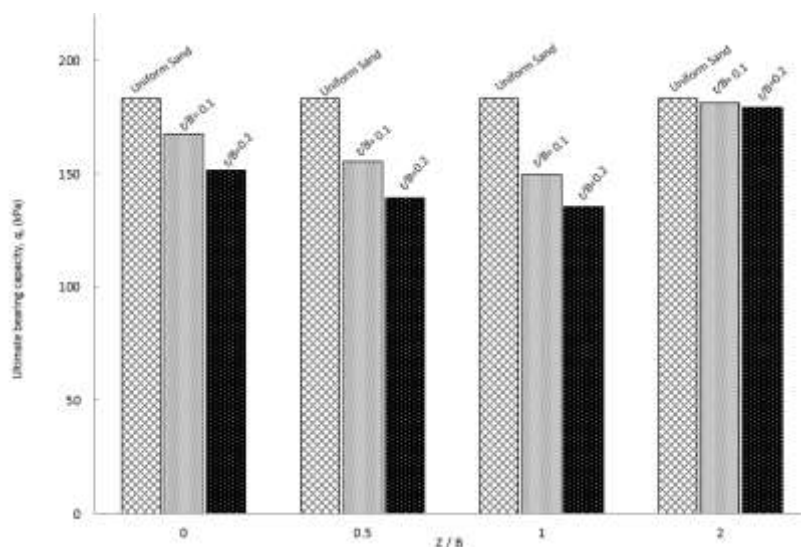
منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.1$  و  $t/B=0.2$  به ترتیب در شکل‌های



شکل ۹- منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.1$



شکل ۱۰- منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.2$



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف

(۱۴) نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها، وجود لایه قوی باعث افزایش ظرفیت باربری و سختی سیستم خاک- شالوده شده است. مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مقایسه شده‌اند. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها در جدول (۸) ارائه شده است. بدیهی است تأثیر لایه قوی با ضخامت بیشتر، مشهودتر است. بیش‌ترین افزایش ظرفیت باربری برای حالتی است که لایه قوی دقیقاً زیر فونداسیون ( $Z/B=0$ ) قرار گرفته باشد که برای ضخامت  $t/B=0.2$  و به‌میزان ۳۲۹ درصد (از ۱۸۳ kPa به ۶۰۳ kPa) رخ داده است. برای هر دو لایه قوی ( $t/B=0.1, 0.2$ )، لایه قوی تقریباً در عمق  $1.25B$  تأثیری نداشته است.

مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) سختی سیستم خاک- شالوده تا قبل از نقطه اوج که به‌صورت  $\Delta q/\Delta s$  تعریف می‌شود، با وجود لایه ضعیف کم‌تر از حالت خاک همگن است. نتایج فوق نشان‌دهنده تأثیر وجود لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری فونداسیون و سختی سیستم خاک- شالوده دارد. میزان این تأثیر به‌طور کلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه ضعیف و ماسه بستر و ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.

### ۳-۴- رفتار پی دایره‌ای واقع بر ماسه یکنواخت دارای لایه نازک قوی

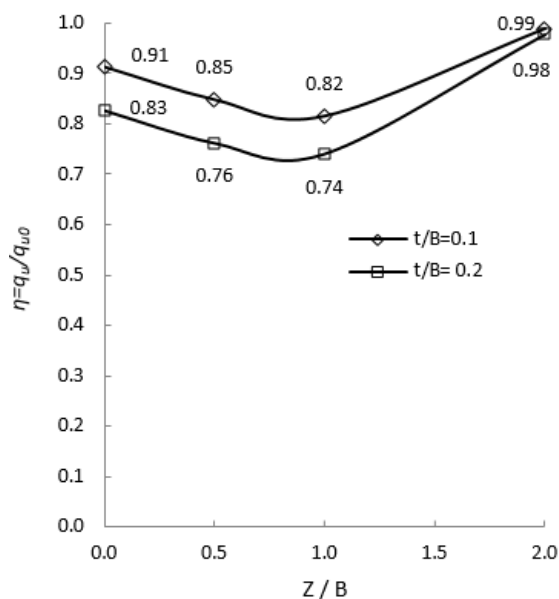
منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی با ضخامت  $t/B=0.1$  و  $t/B=0.2$ ، به‌ترتیب در شکل‌های (۱۳) و

جدول ۷- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری و ظرفیت باربری بی بعد

$q_u/q_{u0}$	$q_u$ (kPa)	$Z_i/B$	$t_i/B$	نوع آزمایش
--	۱۸۳	--	---	بستر ماسه‌ای همگن
۰/۹۱	۱۶۷	۰		بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف
۰/۸۵	۱۵۵	۰/۵		
۰/۸۲	۱۴۹	۱		
۰/۹۹	۱۸۱	۲		بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف
۰/۸۳	۱۵۱	۰		
۰/۷۶	۱۳۹	۰/۵		
۰/۷۴	۱۳۵	۱		بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف
۰/۹۸	۱۷۹	۲		

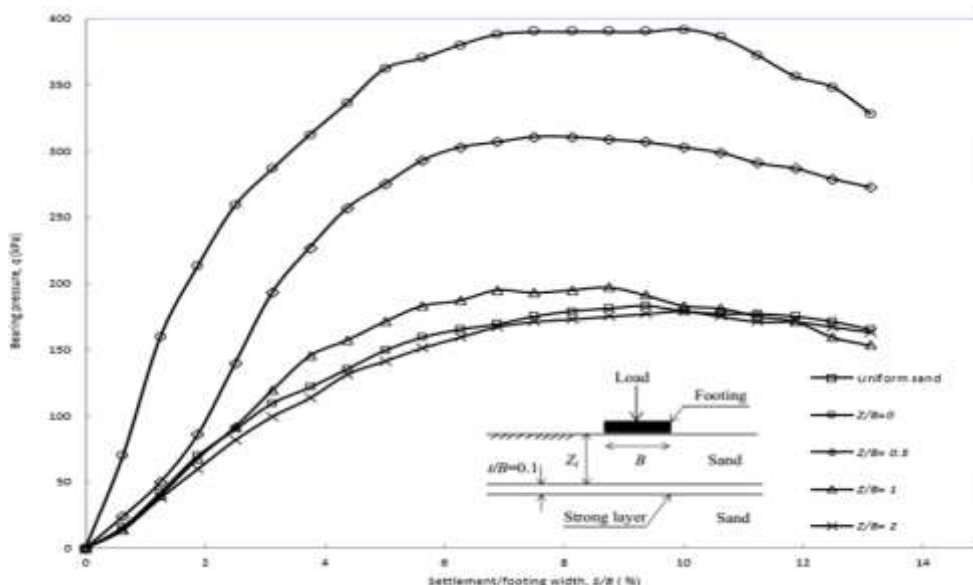
جدول ۸- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری و ظرفیت باربری بی بعد

$q_u/q_{u0}$	$q_u$ (kPa)	$Z_i/B$	$t_i/B$	نوع آزمایش
--	۱۸۳	--	---	بستر ماسه‌ای همگن
۲/۱۴	۳۹۲	۰		بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی
۱/۷	۳۱۱	۰/۵		
۱/۰۸	۱۹۷	۱		
۰/۹۸	۱۷۹	۲		بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی
۳/۲۹	۶۰۳	۰		
۲/۱۱	۳۸۶	۰/۵		
۱/۱۳	۲۰۷	۱		بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی
۰/۹۹	۱۸۱	۲		



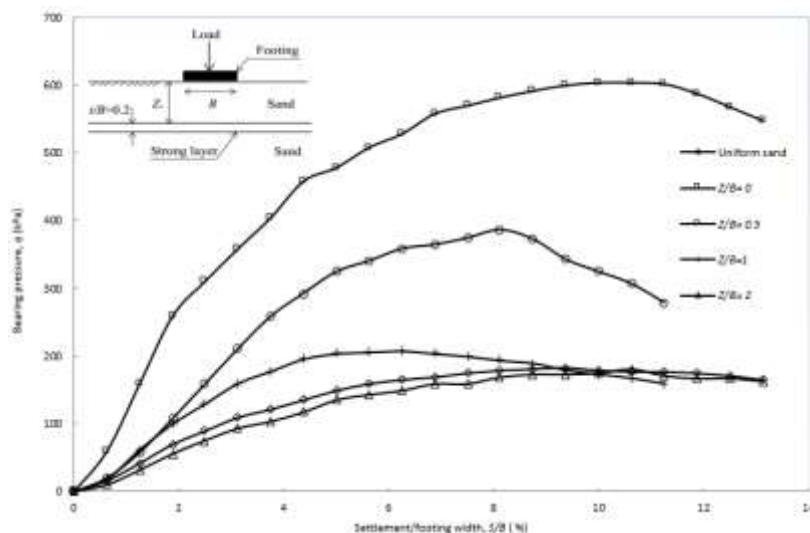
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر بی بعد شده ظرفیت باربری  $\eta = q_u/q_{u0}$  نسبت به عمق بی بعد شده لایه ضعیف  $Z/B$

مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴) سختی سیستم خاک- شالوده تا قبل از نقطه اوج که به صورت  $\Delta q/\Delta s$  تعریف می‌شود، با وجود لایه قوی، بیشتر از حالت خاک همگن است. نتایج فوق، نشان‌دهنده تأثیر وجود لایه نازک قوی بر ظرفیت باربری فونداسیون و سختی سیستم خاک- شالوده دارد. میزان این تأثیر به‌طور کلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه قوی و ماسه بستر، ضخامت و عمق قرارگیری لایه قوی دارد.

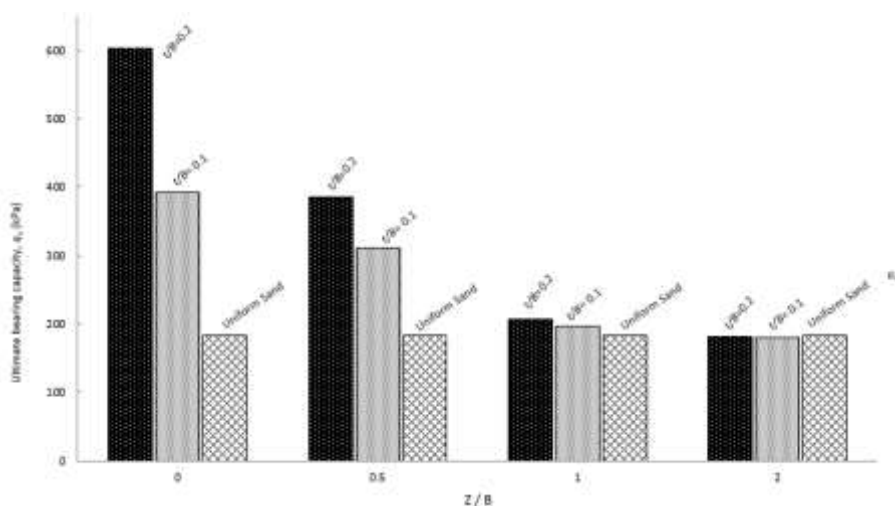


شکل ۱۳- منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی با ضخامت  $t/B=0.1$





شکل ۱۴- منحنی فشار- نشست پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی با ضخامت  $t/B=0.2$



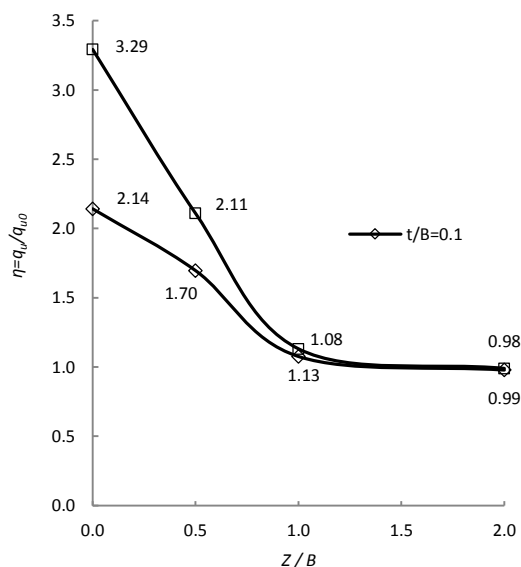
شکل ۱۵- مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی

نسبت به عمق بی‌بعد شده لایه قوی  $Z/B$

### ۵- نتیجه‌گیری

رفتار فونداسیون دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف و قوی، به وسیله آزمایش‌های مدل کوچک مقیاس بررسی شده است. بر اساس تحقیقات، نتیجه‌گیری‌های اصلی زیر را می‌توان ارائه نمود:

- وجود لایه ضعیف، باعث کاهش ظرفیت باربری فونداسیون و سختی سیستم خاک- فونداسیون شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.
- بیش‌ترین کاهش ظرفیت باربری در عمق بحرانی  $1B$  و به میزان ۲۶ درصد (از ۱۸۳ kPa به ۱۳۵ kPa) رخ داده است.
- برای هر دو لایه ضعیف با ضخامت‌های  $t/B=0.1, 0.2$ ، لایه ضعیف در عمق  $2B$  بدون تأثیر بوده است.
- وجود لایه قوی باعث افزایش ظرفیت باربری فونداسیون و



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر بی‌بعد شده ظرفیت باربری  $\eta=q_u/q_{u0}$

- Murthy VNS, "Geotechnical Engineering", Taylor & Francis Inc., 2002.
- Oda M, Win S, "Ultimate bearing capacity tests on sand with clay layer", Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116 (12), 1902-1906.
- Poulos HG, "Pile behavior- consequences of geological and construction imperfections", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (5), 538-563.
- Taylor RN, "Centrifuges in modelling: principles and scale effects", In Geotechnical Centrifuge Technology (Taylor RN, (ed.)), Blackie Academic and Professional, London, UK, 1995, 19-33.
- Terzaghi K, "In geology and engineering for dams and reservoirs", American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication 215, 31-44, 1929, Reprinted in Terzaghi, K. From Theory to Practice in Soil Mechanics: Selection from the writings of Karl Terzaghi. Wiley, Hoboken, N.J, USA, 1960, 119-132.
- Terzaghi K, Presidential Address. Proceedings, 1<sup>st</sup> International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass, 1936, 3, 13-18.
- Toyosawa Y, Itoh K, Kikkawa N, Yang JJ, Liu F, "Influence of model footing diameter embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity test", Soils and Foundations, 2013, 53 (2), 349-356.
- Ziccarelli M, Valore C, Muscolino SR, Fioravante V, "Centrifuge tests on the strip footings on sand with a weak layer", Geotechnical Research, 2017, 4 (1), 47-64.
- Valore C, Ziccarelli M, Muscolino SR, "The bearing capacity of footings on sand with a weak layer", Geotechnical Research, 2017, 4 (1), 12-29.
- Vesic AS, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Journal of American society of civil engineers, 1973, 99 (SM1), 45-73.

سختی سیستم خاک-فونداسیون شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه قوی دارد.

- بیشترین افزایش ظرفیت باربری برای حالتی است که لایه قوی دقیقاً زیر فونداسیون ( $Z/B=0$ ) قرار گرفته باشد که برای ضخامت  $t/B=0.2$ ، به میزان ۳۲۹ درصد (از 183 kPa به 603 kPa) رخ داده است.
- برای هر دو لایه قوی ( $t/B=0.1, 0.2$ )، لایه ضعیف در عمق تقریباً  $1.25B$  بدون تأثیر بوده است.
- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی محققان مختلف، نشان‌دهنده انتخاب صحیح زاویه مقاومت برشی متناظر با سطح تنش کم بوده است.
- از دیگر اهداف این تحقیق این است که مهندس ژئوتکنیک به‌هنگام تحقیقات صحرایی، هرگز نبایستی از جزئیات کوچک زمین‌شناسی همانند لایه‌های نازک غافل بماند.

#### ۶- مراجع

- American Society of Testing and Materials, D 3080-04, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", West Conshohocken, PA, 2010.
- American Society of Testing and Materials, D 854-05, "Standard test method for specific gravity of soils solids by water pycnometer", West Conshohocken, PA, 2005.
- American Society of Testing and Materials, D 2216-05, "Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", West Conshohocken, PA, 2005.
- American Society of Testing and Materials, D 2487, "Standard practice for classification of soils for engineering purpose (Unified soil classification system)", West Conshohocken, PA, 2006.
- American Society of Testing and Materials, D 4254-00, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", West Conshohocken, PA, 2004b.
- American Society of Testing and Materials, D 4253-00, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", West Conshohocken, PA, 2004a.
- Bolton MD, Lau CK, "Scale effects in the bearing capacity of granular soils", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 1989, 2, 895-898.
- Das, BM, "Principles of foundation engineering", Eighth Edition, PWS Publishing Company, Pacific Grove, USA, 2016, 946.
- Martin CM, "Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics", Proceedings of the 1<sup>th</sup> International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Turin, Italy, 2005, 4, 441-450.
- Meyerhof GG, "Some Recent Research on the bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal, 1963, 1 (1), 16-26.

## EXTENDED ABSTRACT

# Experimental Study of the Horizontal Thin Layer Effect on the Bearing Capacity of Circular Footings Resting on Sand

Morteza Askari<sup>a</sup>, Ahad Bagherzadeh Khalkhali<sup>a</sup>, Masoud Makarchian<sup>b,\*</sup>, Navid Ganjian<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 24 July 2020; Review: 09 July 2021; Accepted: 18 September 2021

### Keywords:

Weak thin layer, Strong thin layer, Ultimate bearing capacity, Stiffness, Physical model.

## 1. Introduction

In general, despite their seeming insignificance, there are some details in the ground that have significant effects on soil-foundation system behavior such as slip surfaces, shear bands, and thin layers (Valor et al. 2017). Terzaghi (1929) termed “these features minor geologic details and pointed out their enormous potential effects on the safety of dams”. In the literature review very little study has been performed on the effects of a thin layer (Valor et al. 2017, Ziccarelli et al. 2017, Oda and Win, 1990)

In the present paper, the influences of the horizontal thin layer on the ultimate bearing capacity of the circular foundation resting on the sandy bed were studied by implicating a small-scale physical model for the soil-foundation system. The problem of the soil- circular footing system is schematically illustrated in Fig. 1. The problem is investigated under the axisymmetric condition, and the circular foundation is rigid. This foundation rests on the ground surface, on the other hand, the initial depth of embedment is nil. The studies were performed by the material type, thickness, and depth of the thin layer variation. For the bed sand, crushed uniform silica sand (SP) with medium density was used. For the thin layer, materials with different strength properties (strong and weak) in comparison with the sandy bed were used.

For the weak layer, the clay powder with CL classification was used. Clay with a natural moisture content of 5.5% and a very low density of 12.1 kN/m<sup>3</sup> was used consistently in all of the experiments.

For the strong layer, a fine-grained asphalt mixture with an unconfined compressive strength of 1460 kPa and unit weight 19.12 kN/m<sup>3</sup> was used.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental method

To perform the tests, a small-scale experimental model was designed and built (Fig. 2). At the test beginning, the sand raining screen device was located directly above the test box. Then the following the sand was deposited in the 4 cm thick layers by using the raining method. During sand raining, the sand density was controlled by placing the cans of specified volume in different locations of the box. The weak and strong thin layers were applied using simple templates at the specified depths and thicknesses and the subsequent sand layers were applied to the required level and were followed by placing the foundation model at a specific location on the surface of the sandy bed. Finally, the vertical pressure is transferred to the foundation model by manual hydraulic jack at a constant rate equals to 1mm/min. Then the vertical settlement was measured by dial gauge with a precision of 0.01 mm.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: asgari.morteza@yahoo.com (Morteza Askari), a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (Ahad Bagherzadeh Khalkhali), makarchian@yahoo.com (Masoud Makarchian), navidganjian@yahoo.com (Navid Ganjian).

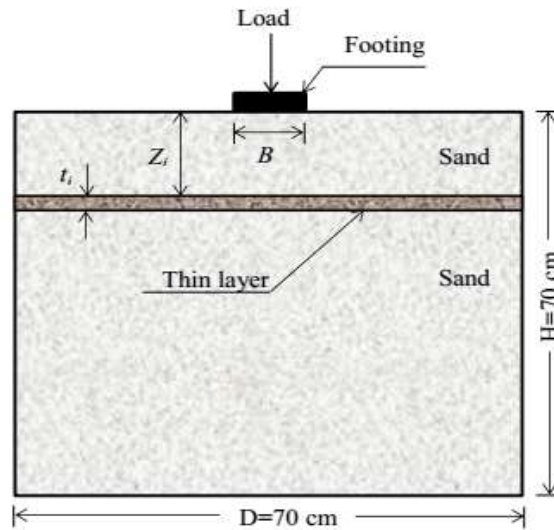


Fig. 1. Scheme of the problem

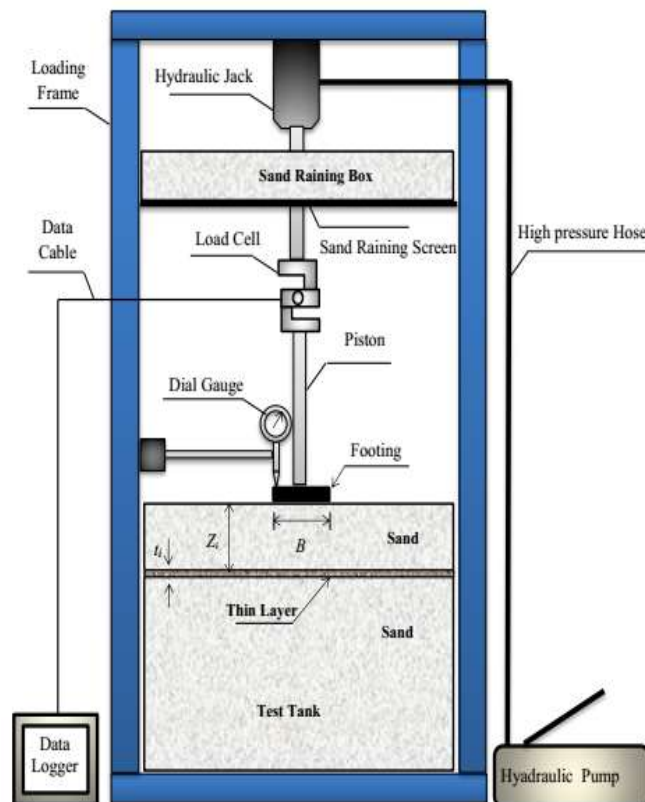


Fig 2. Section view of the physical model

## 2.2. Experimental parameters and program

The variable parameters used in the experiments (in accordance with the schematic Fig. 1) and their values are shown in Table 1. Three series of tests have been carried out. First, the behavior of the circular footing resting on a uniform sand bed is investigated. Then, in the second and third series, the behavior of the circular foundation resting on the sandy bed with a weak or strong layer at different thicknesses and depths was investigated.

**Table 1.** Model test program

Type of test	Constant parameters	Variable parameters
Uniform sand	$D_r = 41\%, D_f/B = 0$	-----
Uniform sand with weak layer	$D_r = 41\%, D_f/B = 0$	$Z_i/B=0, 0.5, 1, 2$ $t_i/B=0.1, 0.2$
Uniform sand with strong layer	$D_r = 41\%, D_f/B = 0$	$Z_i/B=0, 0.5, 1, 2$ $t_i/B=0.1, 0.2$

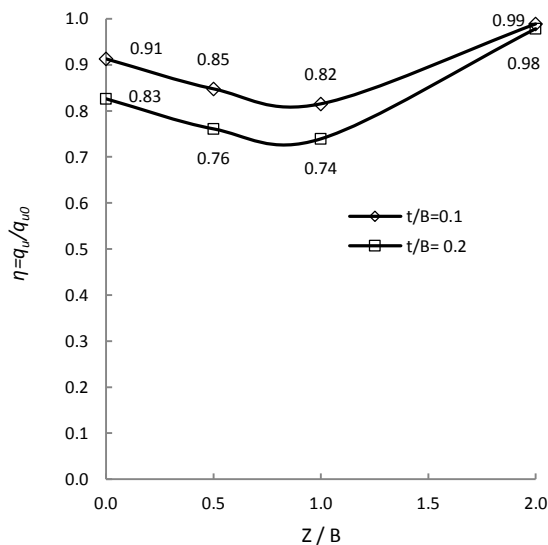
### 3. Results and discussion

#### 3.1. Behavior of the circular foundation resting on sandy soil with a weak thin layer

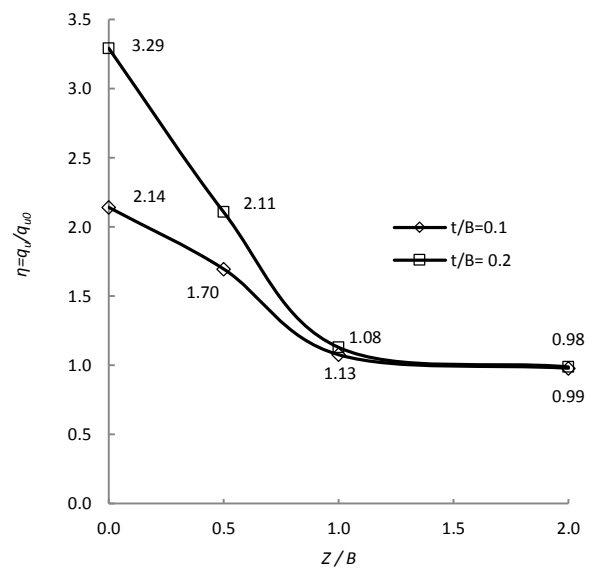
Foundation bearing pressure-settlement curves were obtained from the results of the testing model Results indicate that the weak thin layer decreases both the ultimate bearing capacity and stiffness of the soil-foundation system. The values of the ultimate bearing capacity for different states are compared in Figure 3. Obviously, the effect of a thicker layer is more evident.

#### 3.2. Behavior of the circular foundation resting on sandy soil with a strong thin layer

Bearing pressure-settlement curves of circular foundation resting on the sandy bed with a strong thin layer indicate that the strong thin layer increases both the ultimate bearing capacity and stiffness of the soil-foundation system. The values of the ultimate bearing capacity for different states are compared in Figure 4. Obviously, the effect of a thicker layer is more evident.



**Fig. 3.** Comparison of normalized ultimate bearing capacity  $q_u/q_{u0}$  against normalized depth of the weak layer  $Z/B$



**Fig.4.** Comparison of normalized ultimate bearing capacity  $q_u/q_{u0}$  against normalized depth of the strong layer  $Z/B$

### 4. Conclusions

Based on the experiment results, the horizontal weak thin layer decreases both the ultimate bearing capacity and stiffness of the soil-foundation system. The extent of this effect depends on the thickness and depth of the weak thin layer. The horizontal strong thin layer increases both the ultimate bearing capacity and stiffness of the soil-foundation system. The extent of this effect depends on the thickness and depth of the strong thin layer. Another result of this study can be expressed so that the geotechnical engineers should never neglect the small geological details such as thin layers during the site investigation.

## 5. References

- Oda M, Win S, "Ultimate bearing capacity tests on sand with clay layer", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1902, 116 (12), 1906, 1990.
- Terzaghi K, "In geology and engineering for dams and reservoirs", American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication, 1929, 215, 31-44. Reprinted in Terzaghi, K. *From Theory to Practice in Soil Mechanics: Selection from the writings of Karl Terzaghi*. Wiley, Hoboken, N.J, USA, 119-132, 1960.
- Ziccarelli M, Valore C, Muscolino SR, Fioravante V, "Centrifuge tests on the strip footings on sand with a weak layer", *Geotechnical Research*, 2017, 4 (1), 47-64.
- Valore C, Ziccarelli M, Muscolino SR, "The bearing capacity of footings on sand with a weak layer", *Geotechnical Research*, 2017, 4 (1), 12-29.