



## بررسی اثر لایه نازک بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر خاک ماسه ای

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

۱-دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

### کلمات کلیدی:

لایه نازک

ظرفیت باربری نهایی

پی نواری

سختی

مدل فیزیکی

**خلاصه:** پی‌های سطحی همانند فونداسیون‌های نواری، به میزان 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. با توجه به تحقیقات بسیار محدودی که در خصوص اثر لایه نازک بر ظرفیت باربری نهایی پی انجام شده است، به نظر می‌رسد که می‌توان با تحقیقات بیشتر، اثر این لایه را مشهودتر درک کرد. در این تحقیق تأثیر وجود لایه نازک ضعیف و قوی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری بر بستر ماسه‌ای، به وسیله مدل فیزیکی کوچک مقیاس سیستم خاک-فونداسیون بررسی می‌شود. آزمایش‌های مدل فیزیکی در مخزن فولادی با طول ۱۰۰ cm، ارتفاع ۷۰ cm و عرض ۷۰ cm انجام شده است. بررسی‌ها با تغییر جنس، ضخامت و عمق قرارگیری لایه نازک انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد لایه نازک ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک-فونداسیون می‌شود و لایه نازک قوی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک-فونداسیون می‌شود. لایه ضعیف در عمق بحرانی B/۱۲، بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی را به میزان ۴۰ درصد داشته است و در عمق B/۶ تأثیری نداشته است. لایه قوی نیز برای حالتی که این لایه دقیقاً زیر فونداسیون قرار دارد، بیشترین افزایش ظرفیت باربری نهایی را به میزان ۷۶ درصد داشته است. لایه قوی نیز در عمق تقریباً B/۴ 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.

### ۱- مقدمه

فونداسیون بخش مهمی از هر سازه است و پی‌های سطحی همانند فونداسیون‌های نواری، به میزان 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 آن که به نظر می‌رسد تأثیر ناچیزی داشته باشد، اساساً می‌تواند بر رفتار خاک-فونداسیون و دیگر سیستم‌های ژئوتکنیکی، مؤثر باشد [۱]. ترزاقی این عوارض را «جزئیات زمین‌شناسی کوچک» نامید و اظهار داشت که این عوارض می‌تواند تأثیرهای پتانسیلی

عظیمی<sup>۲</sup> بر ایمنی سدها داشته باشد [۲].

ترزاقی 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 متداول نیز بی‌نهایت مشکل است» [۳]. در پیشینه تحقیق، مطالعه ظرفیت باربری نهایی خاک دو لایه (به عنوان مثال قرارگیری خاک قوی بر روی خاک ضعیف و یا بر عکس) نسبتاً انجام شده است [۴-۷] و همچنین مطالعه بر روی خاک سه لایه صورت گرفته است [۸ و ۴]. ولی در خصوص تأثیر وجود لایه نازک، مطالعات بسیار اندکی انجام شده است.

والور و همکاران، ظرفیت باربری نهایی و مکانیزم گسیختگی پی نواری بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک سست افقی را بررسی نمودند. مطابق

### 1 Minor Geologic Details

### 2 Enormous Potential Effects

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abagherzadehkh@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



کوچک مقیاس سیستم خاک- فونداسیون بررسی می‌گردد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- طراحی و ساخت دستگاه آزمایش

مسئله سیستم خاک- فونداسیون پی نواری به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است. مسئله مذکور در شرایط کرنش مسطح بررسی می‌شود و فونداسیون نواری 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 ماسه بستر از ماسه سیلیسی شکسته با دانسیته نسبی متوسط و با طبقه‌بندی  $SP$  استفاده شده است. جنس لایه نازک از مصالح با 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 ۲).

آزمایش‌های مدل فیزیکی در مخزن فولادی با طول ۱۰۰ cm، ارتفاع ۷۰ cm و عرض ۷۰ cm انجام شده است. برای رسیدن به شرایط کرنش مسطح، نسبت طول به عرض پی نواری ۱۰ در نظر گرفته شده و از طرفی تغییر شکل‌های جلو و عقب مخزن توسط سخت کننده‌هایی به صفر محدود گردیده 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. همچنین برای مشاهده و آماده‌سازی نمونه‌ها، وجه جلویی مخزن از شیشه نشکن به ضخامت ۱۰ mm انتخاب گردید. برای آشکارسازی بصری تغییر مکان‌ها در اعماق مختلف، ذرات ماسه رنگی در ردیف‌های افقی و با دقت در لایه‌های ماسه و در تماس با ورقه شیشه‌ای، قرار داده شده‌اند.

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

فونداسیون صلب مدل به وسیله ورق فولادی به عرض ۷ cm و طول تقریباً ۷۰ cm مدل‌سازی گردید. به منظور رسیدن به شرایط کرنش مسطح، طول فونداسیون تقریباً به اندازه عرض مخزن ساخته شده است. با توجه به نمودارهای حباب تنش (منحنی‌های هم‌تنش) بر اساس نظریه بوسینسک، در عمقی حدود  $B/3.85$  (عرض فونداسیون) و فاصله از مرکز پی حدود  $B/5.1$  از هر طرف پی، تنش قائم به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد و چنانچه این معیار ۵٪ تنش قائم در نظر گرفته شود، فواصل مذکور حدود  $B/5.5$  و  $B/2.2$

تحقیق مذکور، در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک از مقدار بحرانی  $B/4$  (عرض فونداسیون)، تجاوز نکند، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر مکانیسم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی فونداسیون مؤثر باشد و در مواردی می‌تواند باعث کاهش تا ۸۰ درصدی ظرفیت باربری شود [۱].

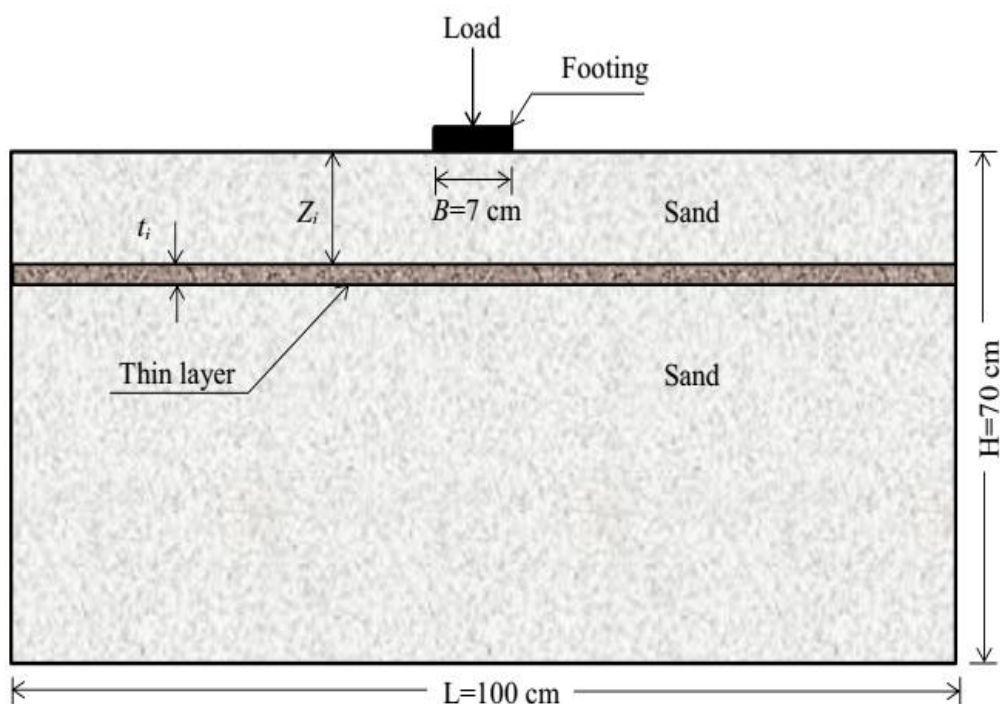
زیکارلی و همکاران، با آزمایش‌های سانتریفیوژ، رفتار پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق برای بستر ماسه‌ای و لایه ضعیف ساخته شده از پودر تالک، در صورتی که عمق قرارگیری لایه ضعیف نازک از مقدار بحرانی  $B/4$  (عرض فونداسیون)، تجاوز نکند، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر مکانیسم گسیختگی و ظرفیت باربری نهایی فونداسیون مؤثر باشد و به طور کلی این مقدار، بستگی به نسبت زوایای مقاومت برشی ماسه و مصالح تشکیل دهنده لایه ضعیف ( $\phi'_{1p} / \phi'_{2p}$ ) دارد [۹].

اودا و وین، 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 ۳۰ cm ارتفاع، استفاده شده بود. مطابق تحقیق مذکور، لایه ضعیف با عمق قرارگیری تا  $B/5$  (عرض فونداسیون) می‌تواند بر ظرفیت باربری نهایی مؤثر باشد [۱۰].

عسکری و همکاران، با انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک مقیاس، رفتار پی دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک را بررسی نمودند. مطابق این تحقیق برای بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف ساخته شده از پودر رس، لایه ضعیف در عمق بحرانی  $B/1$  (عرض فونداسیون)، بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای و سختی سیستم خاک- فونداسیون داشته است و برای حالتی که از لایه نازک قوی استفاده شده باشد، این لایه برای حالتی که دقیقاً زیر فونداسیون باشد بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای و سختی سیستم خاک- فونداسیون داشته است [۱۱].

پولس 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 [۱۲].

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 و به طور مشخص از پی نواری استفاده نشده است. بنابراین در این تحقیق، تأثیر وجود لایه نازک افقی بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری بر بستر ماسه‌ای با دانسیته نسبی متوسط، به وسیله مدل فیزیکی



شکل ۱. شکل کلی مسئله مورد بررسی

Fig. 1. Scheme of the problem

جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی ماسه در آزمایش‌های مدل

Table 1. Properties of sand used in the model tests

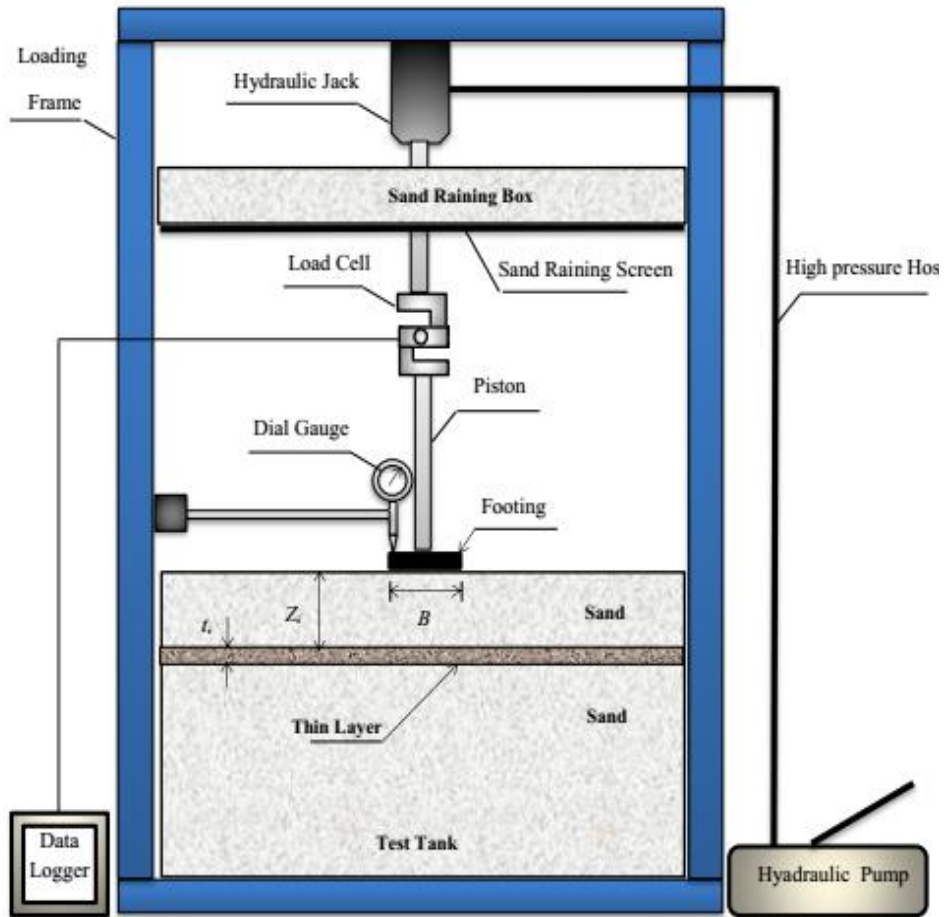
مقدار	خصوصیت
۲/۳۸	حداکثر اندازه دانه، $D_{max}$ (mm)
۱/۴۵	اندازه متناظر با ۶۰ درصد ریزتر، $D_{60}$
۱/۲۵	اندازه متوسط دانه، $D_{50}$ (mm)
۰/۹	اندازه متناظر با ۳۰ درصد ریزتر، $D_{30}$
۰/۶۷	اندازه مؤثر، $D_{10}$ (mm)
۲/۱۶	ضریب یکنواختی، $C_u$
۰/۸۳	ضریب خمیدگی، $C_c$
۲/۶۶	چگالی ویژه، $G_s$
۱۹/۸۵	وزن مخصوص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

خواهد بود [۱۳]. بنابراین با توجه به عمق و طول انتخاب شده برای مخزن فولادی، به ترتیب  $B/3$  و  $10B$ ، مرزهای مخزن هیچ‌گونه تاثیر منفی بر پاسخ مدل فیزیکی نخواهد داشت.

بار به وسیله جک هیدرولیکی دستی و با سرعت  $1 \text{ mm/min}$  به فونداسیون منتقل می‌شود. بار اعمالی از طریق جک هیدرولیکی، به کمک لودسل نصب شده به پیستون جک و با ظرفیت  $50 \text{ kN}$  ثبت می‌گردد. برای ثبت نشست‌های پی، از گیج عقب‌راهی با دقت  $0.01 \text{ mm}$  استفاده شده است.

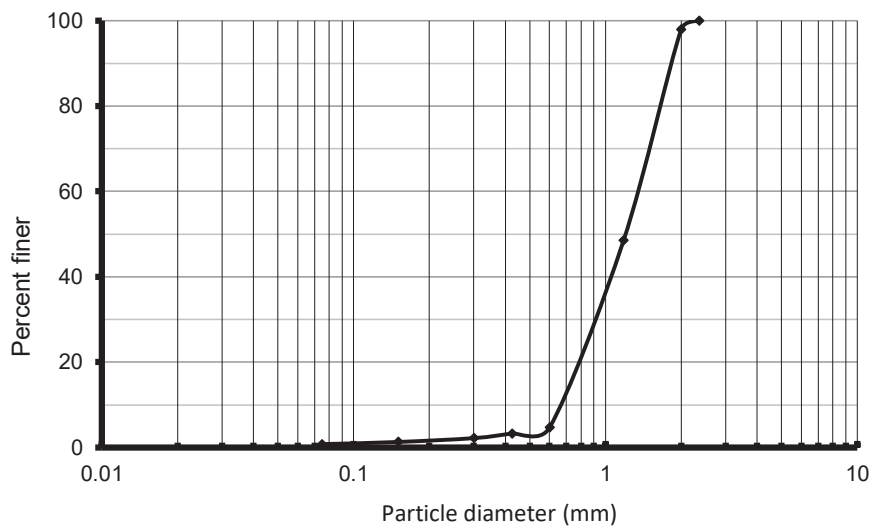
## ۲-۳- خصوصیات ماسه بستر

ماسه بستر، از کارخانجات تولید ماسه سیلیسی استان همدان، با سیلیس حدود ۹۸ درصد، تأمین شده است. ماسه در شرایط خشک شده 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 به روش بارش خشک، از ارتفاع سقوط یکسان ریخته می‌شود. برخی از مشخصات فیزیکی ماسه در



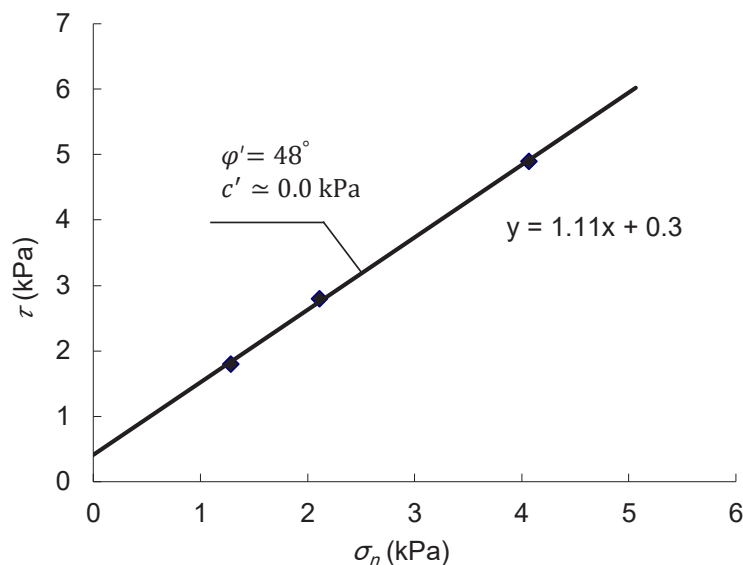
شکل ۲. نمایی از مدل فیزیکی ساخته شده

Fig. 2. Section view of the physical model



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه

Fig. 3. Particle-size distribution curve for sand



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

Fig. 4. Results of direct shear test on sand bed at low effective stresses ( $1 \text{ kPa} < \sigma_v < 4 \text{ kPa}$ )

شده است. مشخصات فیزیکی مصالح ضعیف در جدول ۲ 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.

#### جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح ضعیف در آزمایش‌های مدل

Table 2. Physical properties of weak layer used in the model tests

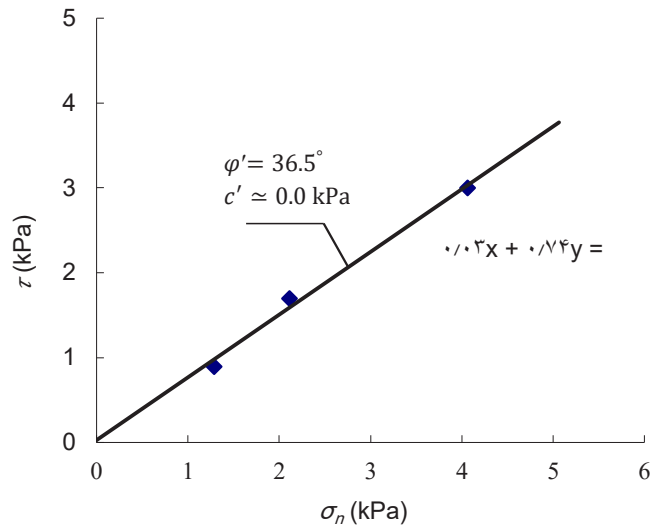
مقدار	خصوصیت
۲/۶۸	چگالی ویژه، $G_s$
۱۲/۱	وزن مخصوص، $(\text{kN/m}^3)$
۲۶	حد روانی، (%)
۱۸	حد خمیری، (%)
۸	نشانه خمیری، (%)
CL	طبقه‌بندی خاک، (USCS)
۵/۵	درصد رطوبت، (%)

دانسیته نسبی،  $D_r$ ، مطابق استانداردهای شماره ASTM D 4253-00 و ASTM D 4254-00 (ASTM, 2004a, 2004b) تعیین شده است [۱۴ و ۱۵]. از آنجا که نسبت  $B/d_{50}$  بزرگ‌تر از ۵۰ است؛ لذا مطابق توصیه بسیاری از محققان (به عنوان مثال بولتون و لاو، تیلور، توپوساوا و همکاران)، اثر اندازه ذرات را می‌توان ناچیز در نظر گرفت [۱۶-۱۸]. با توجه به جنس سیلیسی ماسه و کم بودن سطح تنش‌ها در مدل فیزیکی موجود، خرد شدن ذرات ماسه بسیار ناچیز است.

پارامترهای مقاومت برشی ماسه، به وسیله هفت آزمایش برش مستقیم، تعیین شده است. پارامترهای مقاومت برشی ماسه، تابعی از سطح تنش نرمال است. قابل ذکر است که سطح تنش در توده خاک مدل کوچک مقیاس برای عمق مؤثر، کمتر از حدود  $4 \text{ kPa}$  است. نتیجه آزمایش برش مستقیم متناظر با سطح تنش مدل ( $1 \text{ kPa} < \sigma_v < 4 \text{ kPa}$ ) در شکل ۴ ارائه شده است.

#### ۲-۴- خصوصیات لایه ضعیف

برای لایه ضعیف از مصالح با خصوصیات مقاومت برشی کمتر نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. در این تحقیق برای لایه ضعیف از پودر خاک رس CL با دانسیته بسیار کم، استفاده شده است. پودر خاک رس مصرفی با رطوبت طبیعی ۵/۵ درصد در تمامی آزمایش‌ها، به صورت ثابت استفاده



شکل ۵. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی لایه ضعیف، با سطح تنش مؤثر کم ( $1 \text{ kPa} < \sigma_v < 4 \text{ kPa}$ )

Fig. 5. Results of direct shear test on weak layer at low effective stresses ( $1 \text{ kPa} < \sigma_v < 4 \text{ kPa}$ )

قابل ذکر است پارامترهای مقاومت برشی ماسه آسفالت به وسیله آزمایش سه محوری انجام شده است. نتایج آزمایش سه محوری متناظر با سطح تنش مدل در شکل ۶ ارائه شده است. شایان ذکر است برای ثابت بودن مقاومت برشی لایه قوی، تمامی آزمایش‌های مدل دارای لایه قوی آسفالتی، در دمای محیط ۲۸ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

#### ۲-۶- 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 حدود ۴۰ mm به روش بارش اجرا شده است. برای آشکارسازی بصری تغییر مکان‌ها در اعماق مختلف، ذرات ماسه رنگی در ردیف‌های افقی و با دقت در لایه‌های ماسه و در تماس با جداره شیشه‌ای، قرار داده می‌شوند. 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 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 ۱ mm/min به فونداسیون مدل اعمال می‌شود. سپس توسط گیج عقربه‌ای، نشست فونداسیون مدل با

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 شکل ۵ 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.

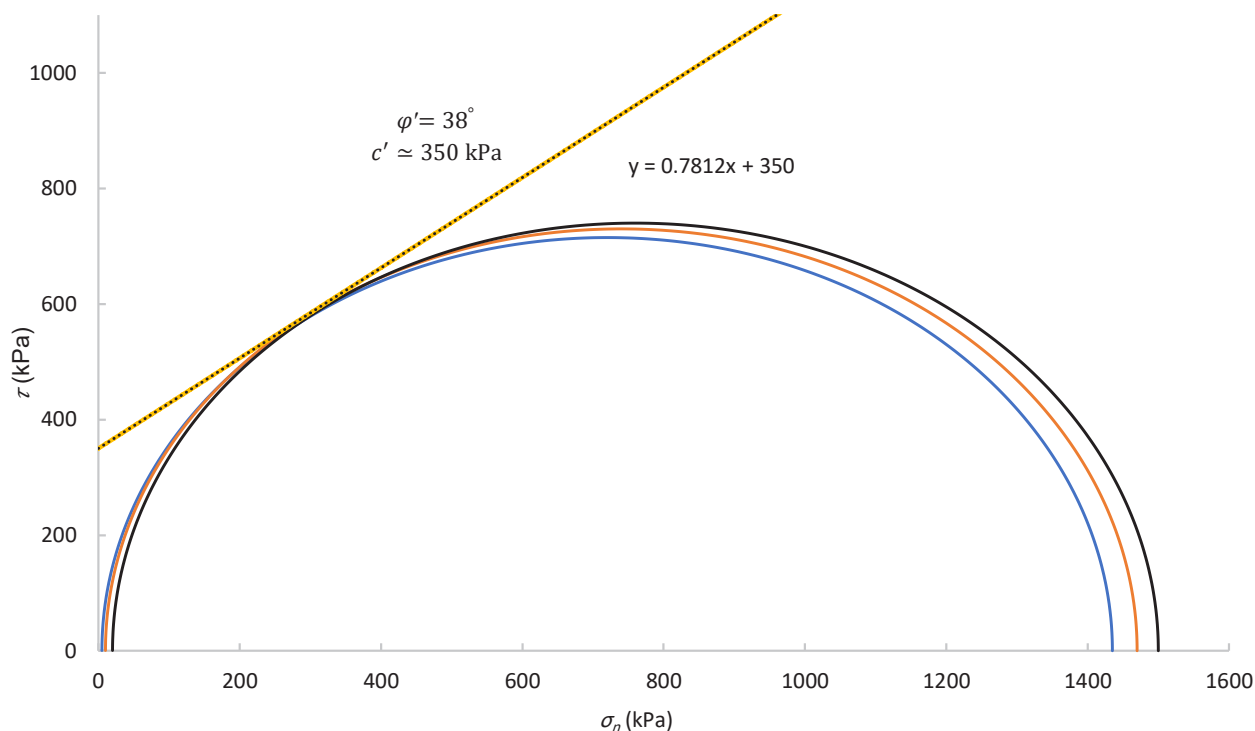
#### ۲-۵- خصوصیات لایه قوی

برای لایه قوی از مصالح با خصوصیات مقاومت برشی بیشتر نسبت به ماسه بستر استفاده شده است. در این تحقیق برای لایه قوی از مخلوط ماسه آسفالت گرم (بتن آسفالتی ریزدانه) استفاده شده است. خصوصیات مصالح قوی در جدول ۳ ارائه شده است.

#### جدول ۳. خصوصیات مصالح قوی

Table 3. Engineering properties of strong layer used in the model tests

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



شکل ۶. نتایج آزمایش سه محوری بر روی لایه قوی

Fig. 6. Results of triaxial shear test on strong layer at low effective stresses ( $1 \text{ kPa} < \sigma_v < 4 \text{ kPa}$ )

جدول ۴. برنامه آزمایش‌های مدل

Table 4. Model test program

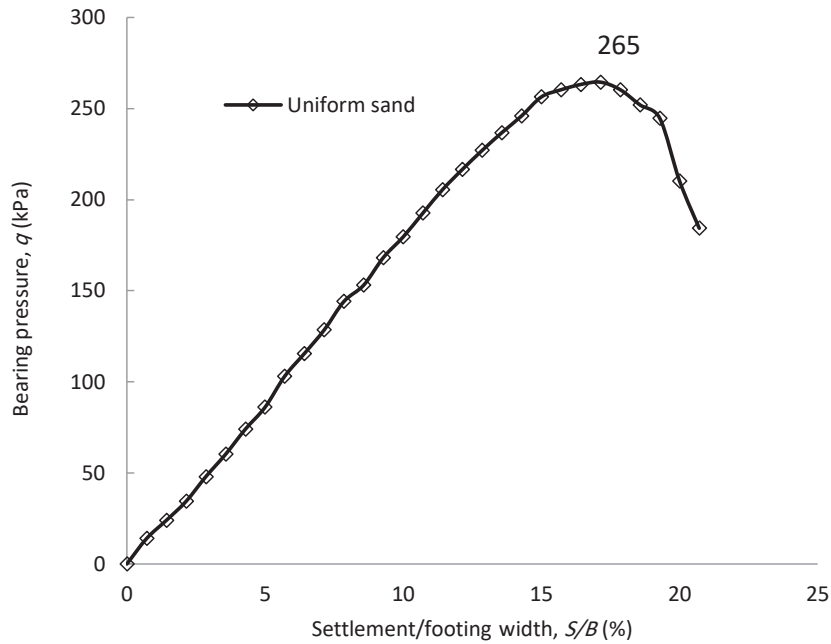
پارامترهای متغیر	پارامترهای ثابت	نوع آزمایش
-----	$D_r = 41\%, D_f/B =$	ماسه همگن (بدون لایه نازک)
$Z_i/B=0, 0.6, 1.2, 2.4,$ $3.6$	$D_r = 41\%, D_f/B =$ $0$	ماسه دارای لایه ضعیف
$Z_i/B=0, 0.6, 1.2, 2.4$ $t_i/B=0.1, 0.2$	$D_r = 41\%, D_f/B =$ $0$	ماسه دارای لایه قوی

آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. سه سری آزمایش انجام شده است. ابتدا رفتار فونداسیون نواری واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت بررسی شده است. سپس در سری‌های دوم و سوم رفتار فونداسیون نواری واقع بر بستر ماسه‌ای، دارای لایه ضعیف و قوی در ضخامت‌ها و عمق‌های متفاوت بررسی شده است.

دقت  $0.1/0.1 \text{ mm}$  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 شماتیک ۱) و مقادیر



شکل ۷. منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت

Fig.7. Pressure-settlement curve of strip footing on uniform sand

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- 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.

$$q_u = 0.5\gamma BN_\gamma \quad (1)$$

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

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

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

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

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

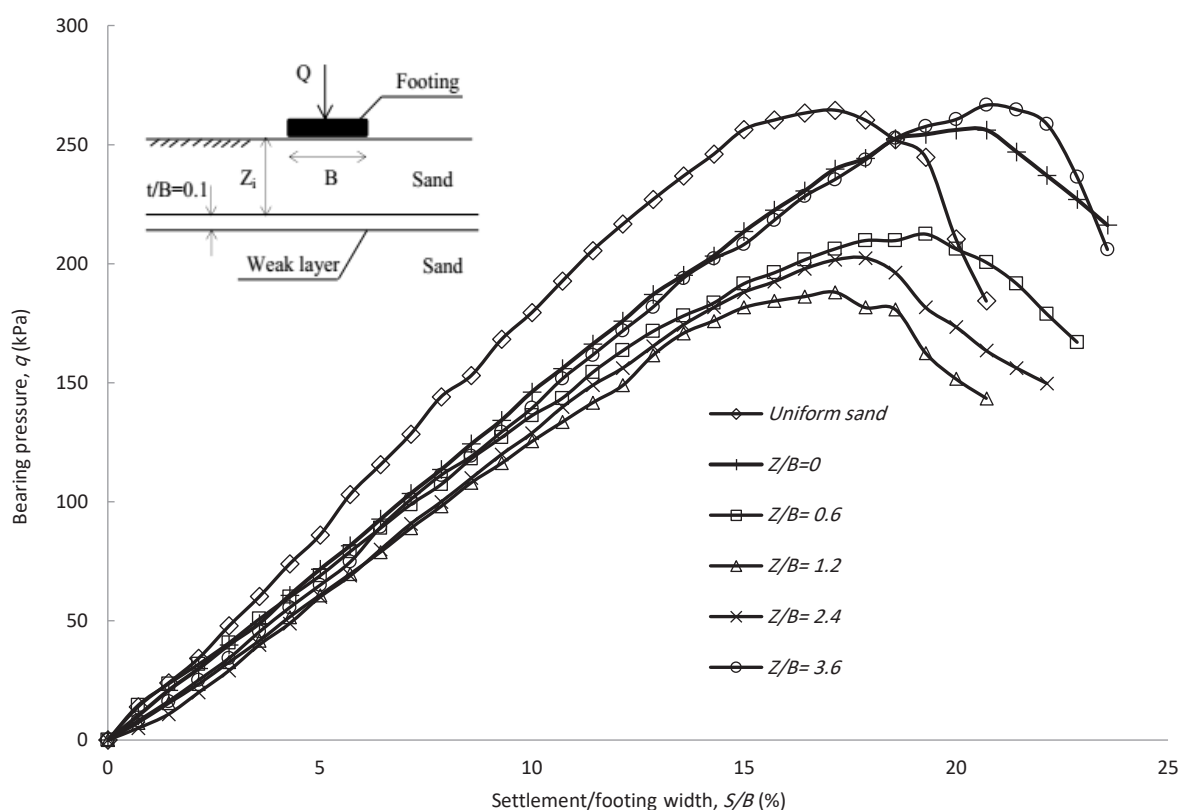
منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای یکنواخت در شکل ۷ نمایش داده شده است. مطابق شکل، مقدار ظرفیت باربری نهایی ۲۶۵ kPa و مقدار نشست متناظر با نقطه اوج ۱۲ mm و مقدار نشست نسبی ( $S/B$ ، %) ۱۷ درصد به دست آمده است؛ وجود نقطه اوج در منحنی فشار- نشست، بیانگر گسیختگی برشی از نوع کلی است. برای مقایسه و صحت‌سنجی مدل، مقادیر ظرفیت باربری نهایی با روش‌های تحلیلی محققان مختلف (روابط (۱) تا (۵)) برای زاویه اصطکاک داخلی متناظر با سطح تنش مدل محاسبه و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی از چسبندگی ناچیز ماسه صرف نظر شده است. مطابق نتایج، مقادیر محاسباتی با روش‌های میرهوف، وسیک و مارتین [۲۱-۱۹] با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد. با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، انتخاب زاویه اصطکاک داخلی متناظر با سطح تنش مؤثر



جدول ۵. مقایسه ظرفیت باربری نهایی پی نواری مدل با روابط تحلیلی محققان مختلف

Table 5. Comparison of ultimate bearing capacity of strip footing with analytical relationships of various investigators

Martin (2005)	Vesic (1973)	Meyerhof (1963)	اویه حداکثر مقاومت برشی (درجه)
۴۴۱	۴۹۶	۵۲۷	$N_\gamma$
۲۴۱	۲۷۱	۲۸۸	$q_u$ (kPa)

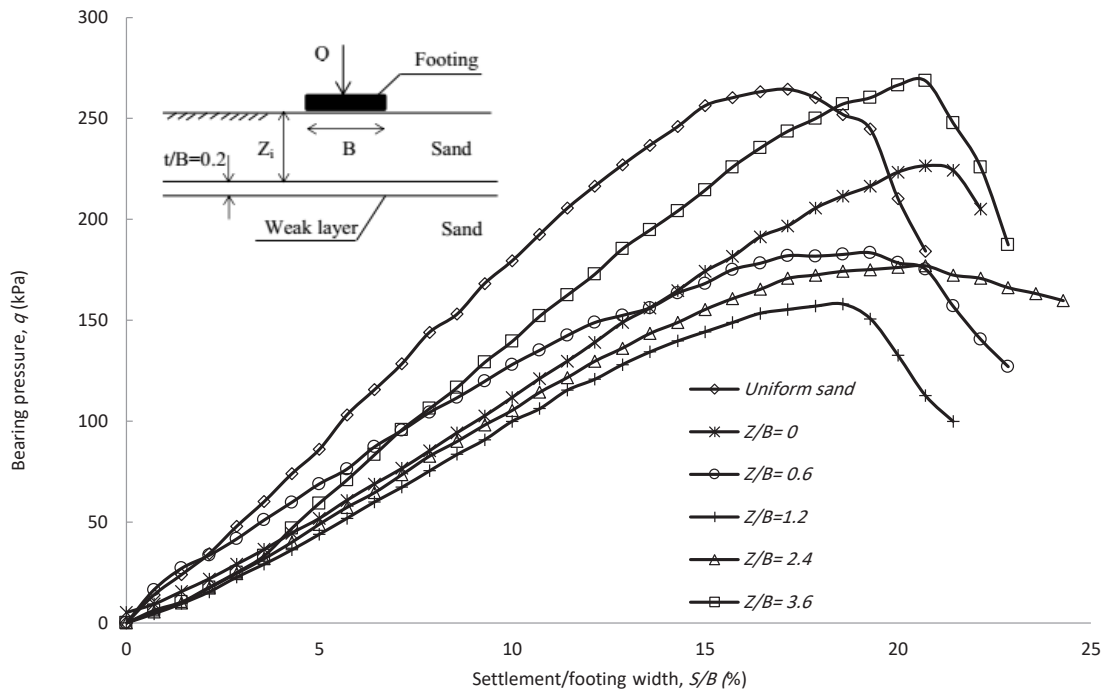


شکل ۸. منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای حاوی لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.1$

Fig. 8. Pressure-settlement curve of strip footing on sand with a weak layer for  $t/B=0.1$

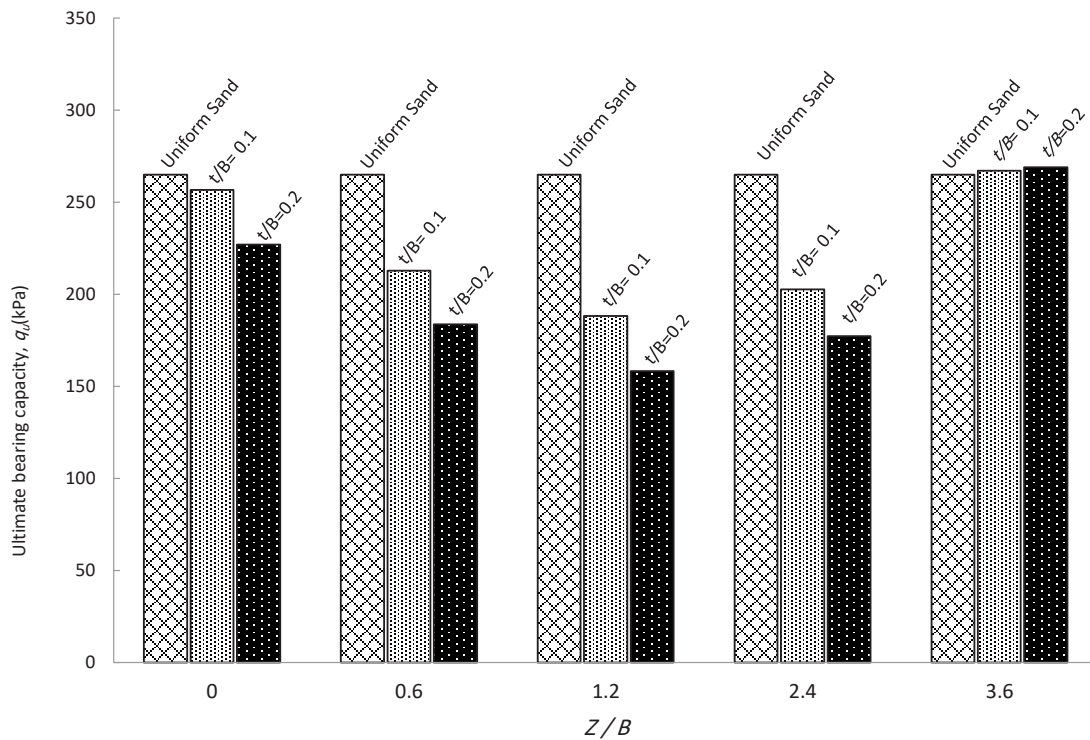
مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه شده‌اند. بدیهی است تأثیر لایه ضعیف با ضخامت بیشتر، مشهودتر است. بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی در عمق بحرانی  $1/2B$  و به میزان ۴۰ درصد (از  $265 \text{ kPa}$  به  $158 \text{ kPa}$ ) رخ داده است. برای هر دو حالت ( $t/B=0.1$ ،  $0.2$ )، لایه ضعیف در عمق  $3.6B$  تأثیری نداشته است. مطابق شکل ۱۲، عمق سطوح گسیختگی ( $D$ ) تقریباً برابر با عرض پی ( $B$ )

۴-۲ رفتار پی نواری واقع بر ماسه یکنواخت دارای لایه نازک ضعیف منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.1$  و  $t/B=0.2$  به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است. مطابق شکل، وجود نقطه اوج در منحنی فشار- نشست، بیانگر گسیختگی برشی کلی است. مطابق این شکل‌ها، وجود لایه ضعیف باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک- فونداسیون شده است.



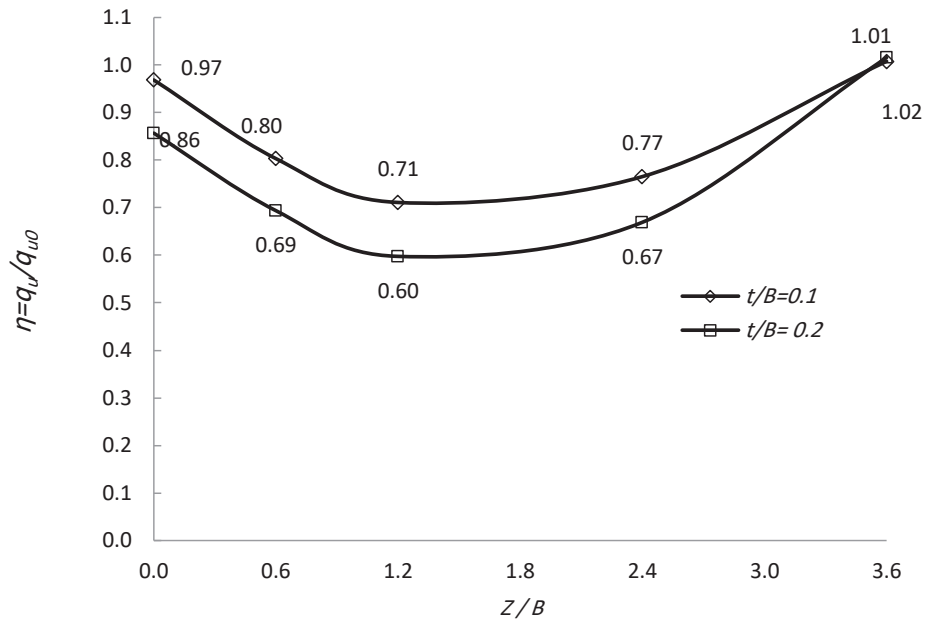
شکل ۹. منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای حاوی لایه ضعیف با ضخامت  $t/B=0.2$

Fig. 9. Pressure-settlement curve of strip footing on sand with a weak layer for  $t/B=0.2$



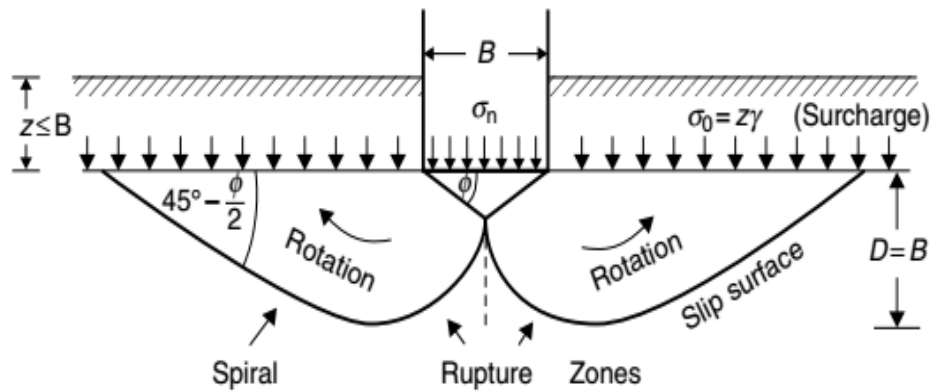
شکل ۱۰. مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف بستر ماسه‌ای دارای لایه ضعیف

Fig.10. Comparison of the ultimate bearing capacity of strip foundation resting on the sandy soil with a weak layer for different states1.



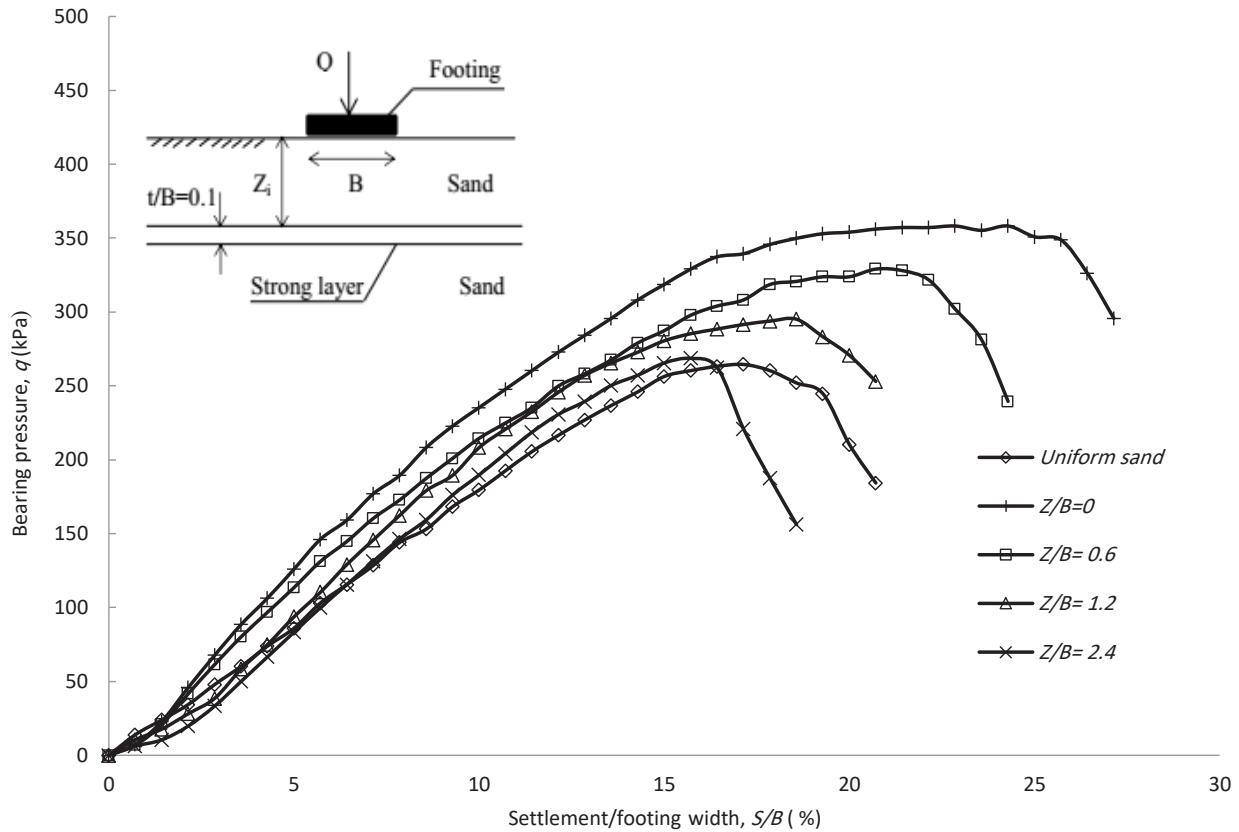
شکل ۱۱. مقایسه مقادیر بی بعد شده ظرفیت باربری نهایی  $\eta = qu/qu_0$  نسبت به عمق بی بعد شده لایه ضعیف  $Z/B$

Fig.11. Comparison of normalized ultimate bearing capacity  $qu/qu_0$  against normalized depth of the weak layer  $Z/B$



شکل ۱۲. هندسه سطوح گسیختگی بر مبنای روابط ظرفیت باربری ترزاچی [۲۲]

Fig.12. Geometry of failure surface for Terzaghi's bearing capacity formulas



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

Fig. 13. Pressure-settlement curve of strip footing on sand with a strong layer for  $t/B=0.1$

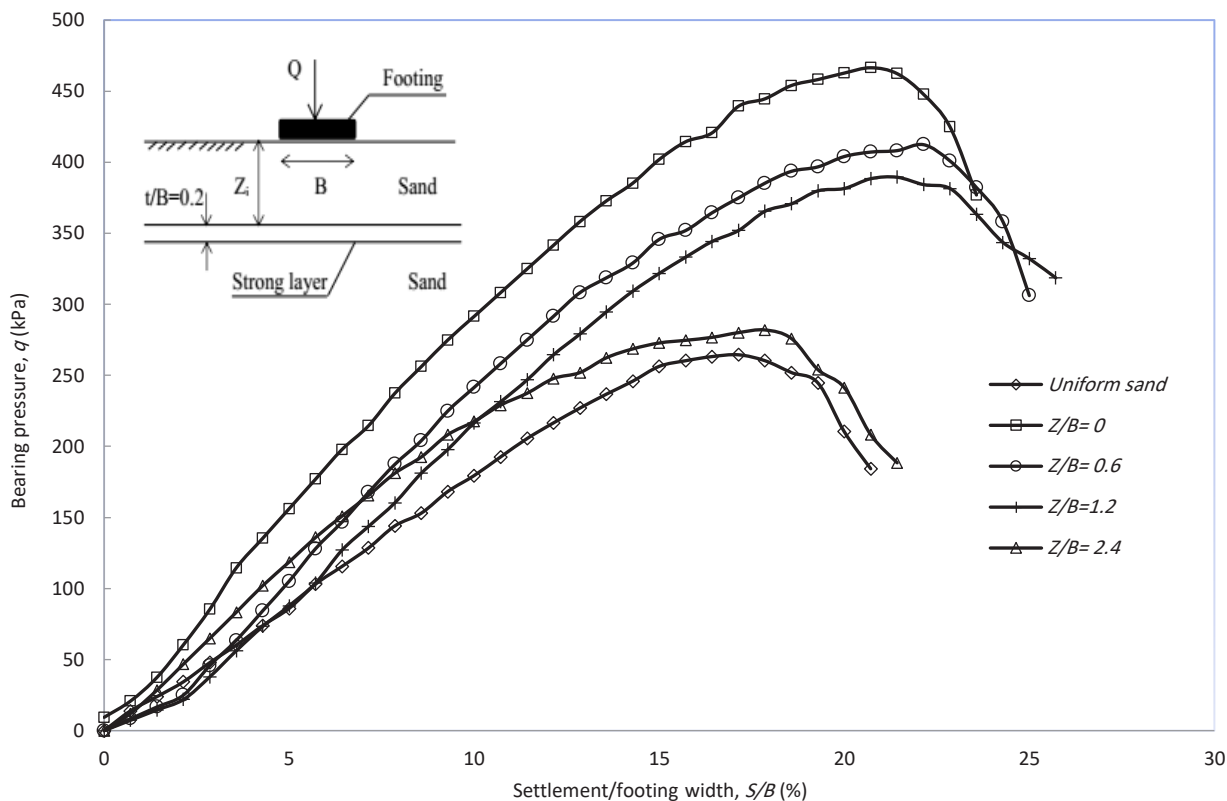
نتایج فوق نشان دهنده تأثیر وجود لایه نازک ضعیف بر ظرفیت باربری نهایی فونداسیون و سختی سیستم خاک- فونداسیون دارد. میزان این تأثیر به طور کلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه ضعیف و ماسه بستر و ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.

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

منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی با ضخامت  $t/B=0.1$  و  $t/B=0.2$ ، به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است. مطابق شکل، وجود نقطه اوج در منحنی فشار- نشست، بیانگر گسیختگی برشی کلی است. مطابق این شکل‌ها، وجود لایه قوی از جنس بتن آسفالتی ریزدانه که دارای چسبندگی زیادی است، همانند لایه تسلیح شده عمل می‌کند و باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی و سختی سیستم خاک- فونداسیون شده است. دلیل اصلی افزایش ظرفیت باربری نهایی پی

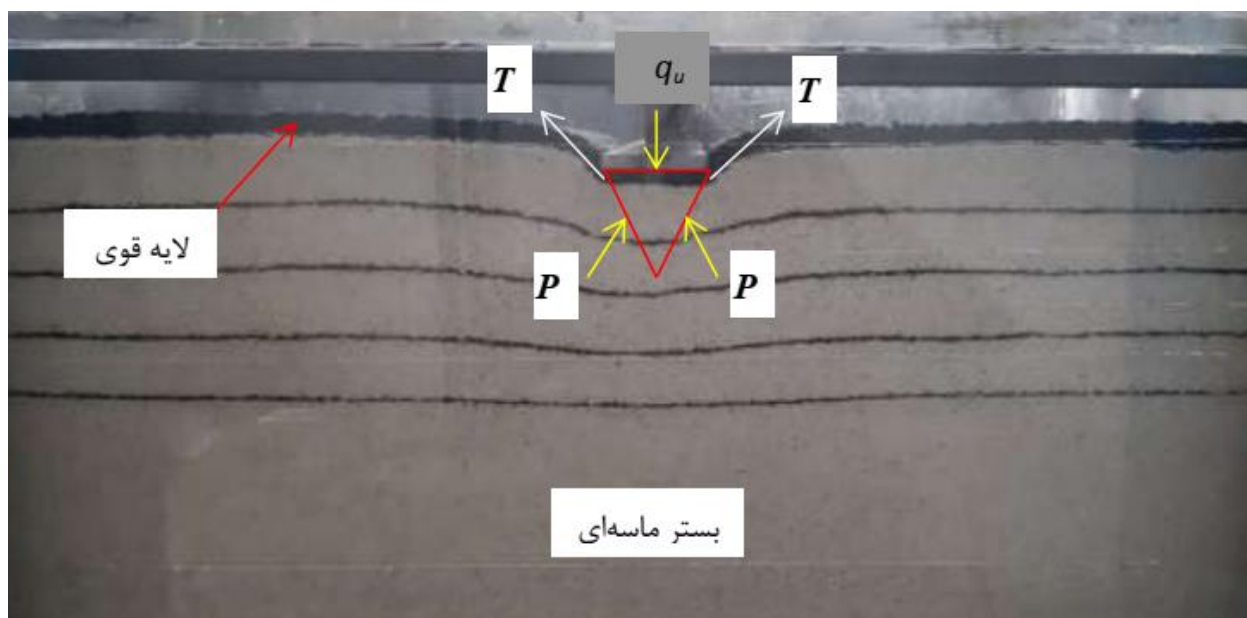
است و از آنجایی که لایه نازک در عمق بحرانی در حدود  $1/2B$  بر سطوح گسیختگی مماس شده است، لذا بیشترین کاهش در ظرفیت باربری نهایی را ایجاد کرده است. همچنین مطابق تئوری بوسینسک از آنجایی که کاهش فشار قائم زیر فونداسیون نواری به میزان ۱۰ درصد، در عمق حدود  $3/6B$  ایجاد می‌شود، لذا لایه نازک در این عمق عملاً تأثیری بر ظرفیت باربری نهایی پی نداشته است.

مطابق شکل‌های ۸ و ۹ سختی سیستم خاک- فونداسیون تا قبل از نقطه اوج که به صورت  $\Delta q/\Delta s$  تعریف می‌شود، با وجود لایه ضعیف کمتر از حالت خاک همگن است. نشست متناظر با نقطه اوج منحنی‌ها، با وجود لایه ضعیف بیشتر از خاک همگن است. (برای خاک همگن  $12 \text{ mm}$  و با وجود لایه ضعیف بین  $12 \text{ mm}$  تا  $15 \text{ mm}$  متغیر است). لازم به ذکر است که پارامتر  $\Delta q/\Delta s$  به نوعی مدول سکانتی در منحنی‌های فشار- نشست است که بر اساس شیب خط سکانتی تعریف می‌شود.



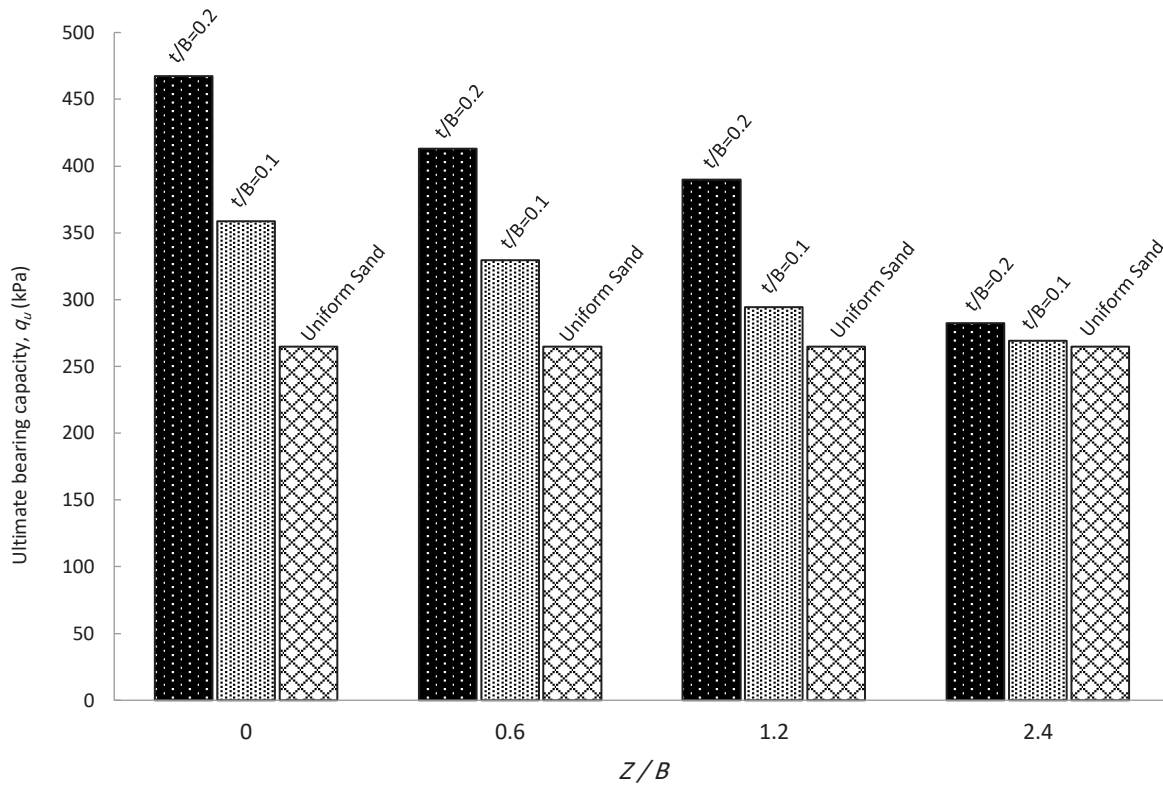
شکل ۱۴. منحنی فشار- نشست پی نواری واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی با ضخامت  $t/B=0.2$

Fig. 14. Pressure-settlement curve of strip footing on sand with a strong layer for  $t/B=0.2$



شکل ۱۵. مکانیزم افزایش ظرفیت باربری با حضور لایه قوی (برای حالت  $Z=0$  و  $B=0.2$ )

Fig. 15. Mechanism of increasing ultimate bearing capacity with the presence of a strong layer



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف بستر ماسه‌ای دارای لایه قوی

Fig. 16. Comparison of the ultimate bearing capacity of strip foundation resting on the sandy soil with a strong layer for different states

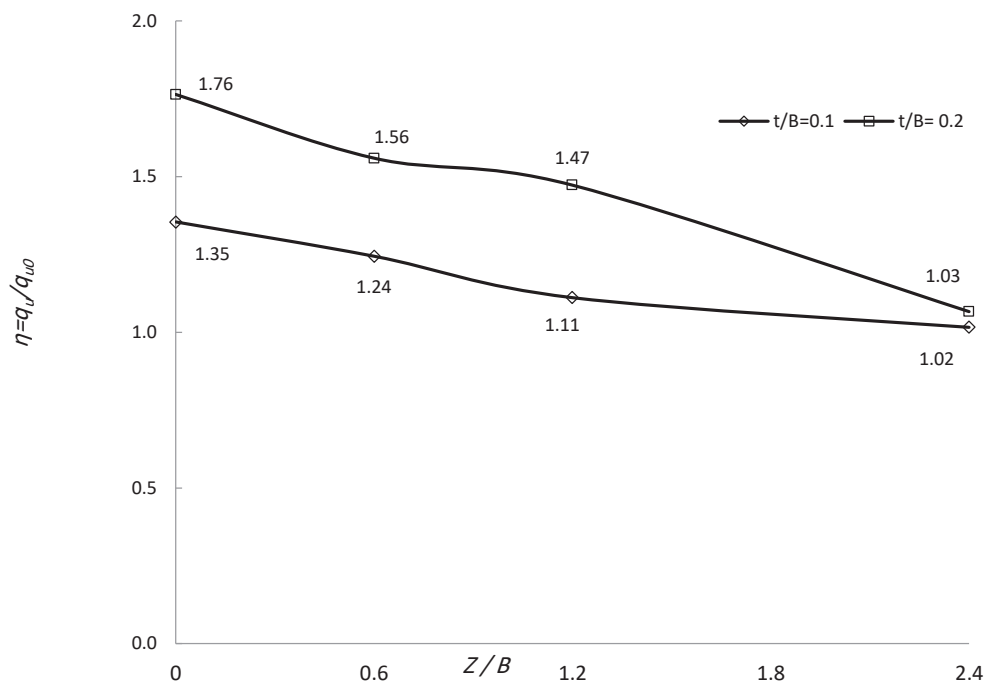
نتایج فوق نشان‌دهنده تأثیر وجود لایه نازک قوی بر ظرفیت باربری نهایی فونداسیون و سختی سیستم خاک-فونداسیون دارد. میزان این تأثیر به‌طور کلی بستگی به اختلاف مقاومت برشی بین لایه قوی و ماسه بستر، ضخامت و عمق قرارگیری لایه قوی دارد.

#### ۴-۴- مقایسه نتایج پی نواری با پی دایره‌ای

در این بخش مقایسه نتایج تأثیر لایه نازک بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری با پی دایره‌ای که توسط نویسندگان این مقاله انجام شده است، ارائه می‌گردد [۱۱]. مقایسه نتایج در حالت بی‌بعد ( $\eta = q_{II}/q_{III}$ ) در شکل ۱۸ نشان داده شده است. قابل ذکر است که روند کلی نتایج هر دو پی مشابه هم بوده است. لیکن بیشترین تأثیر لایه نازک قوی بر افزایش ظرفیت باربری نهایی پی دایره‌ای برای حالتی که لایه قوی دقیقاً زیر پی باشد و ضخامت آن  $0/2$  عرض پی باشد، حدود ۸۷ درصد بیشتر از پی نواری به دست آمده است (۳۲۹

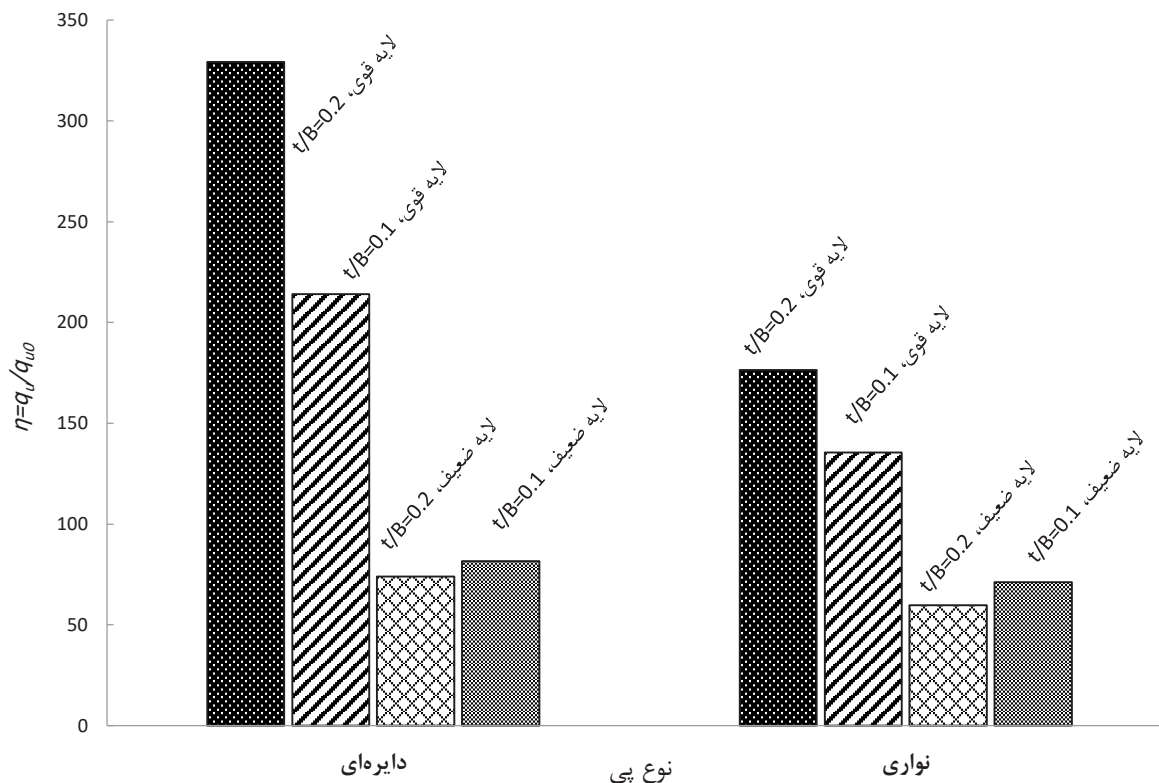
نواری با حضور لایه قوی در موقعیت‌های نزدیک به سطح پی، ایجاد تغییر شکل‌های زیاد در لایه‌های فوقانی است که باعث ایجاد نیروی کششی بیشتر در لایه قوی شده و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی می‌شود (مطابق شکل ۱۵). مقادیر ظرفیت باربری نهایی برای حالت‌های مختلف در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مقایسه شده‌اند. بدیهی است تأثیر لایه قوی با ضخامت بیشتر، مشهودتر است. بیشترین افزایش ظرفیت باربری نهایی برای حالتی است که لایه قوی دقیقاً زیر فونداسیون ( $Z/B=0$ ) قرار گرفته باشد که برای ضخامت  $t/B=0/2$  و به میزان ۷۶ درصد (از  $265 \text{ kPa}$  به  $467 \text{ kPa}$ ) رخ داده است. برای هر دو لایه قوی ( $t/B=0/1, 0/2$ )، لایه قوی تقریباً در عمق  $2/4B$  تأثیری نداشته است.

مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ سختی سیستم خاک-فونداسیون تا قبل از نقطه اوج که به‌صورت  $\Delta q/\Delta s$  تعریف می‌شود، با وجود لایه قوی، بیشتر از حالت خاک همگن است.



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی  $\eta = q_u / q_{u0}$  نسبت به عمق بی‌بعد شده لایه قوی Z/B

Fig. 17. Comparison of normalized ultimate bearing capacity  $q_u / q_{u0}$  against normalized depth of the strong layer Z/B



شکل ۱۸. مقایسه مقادیر بی‌بعد شده ظرفیت باربری نهایی ( $\eta = q_u / q_{u0}$ ) برای پی دایره‌ای و نواری برای حالت‌های حداکثری

Fig. 18. Comparison of normalized ultimate bearing capacity ( $\eta = q_u / q_{u0}$ ) For circular and strip foundations for maximum states

درصد برای پی دایره‌ای و ۱۷۶ درصد برای پی نواری). همچنین بیشترین تأثیر لایه ضعیف بر کاهش ظرفیت باربری نهایی پی نواری برای حالتی که لایه ضعیف در عمق بحرانی  $1/2B$  و با ضخامت  $0/2$  عرض پی باشد، حدود ۵۴ درصد بیشتر از پی دایره‌ای به دست آمده است (۴۰ درصد کاهش برای پی نواری و ۲۶ درصد کاهش برای پی دایره‌ای). دلیل اصلی افزایش ظرفیت باربری نهایی با وجود لایه قوی، می‌تواند مشابه عملکرد لایه مذکور همانند لایه تسلیح باشد و تأثیر بیشتر آن در حالت پی دایره‌ای، به دلیل اندرکنش مساحت بیشتری از لایه قوی در مدل است. در واقع به نسبت مساحت پی، در حالت پی دایره‌ای، مساحت بیشتری از لایه قوی نسبت به مساحت پی، وارد اندرکنش با خاک بستر می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

رفتار فونداسیون نواری واقع بر بستر ماسه‌ای دارای لایه نازک ضعیف و قوی، به وسیله آزمایش‌های مدل کوچک مقیاس بررسی شده است. هدف از این مطالعه، تعیین تأثیر ضخامت، عمق قرارگیری و نوع لایه نازک افقی (ضعیف یا قوی) بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری است. بر اساس تحقیقات، نتیجه‌گیری‌های اصلی زیر را می‌توان ارائه نمود:

- وجود لایه ضعیف، باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی فونداسیون و سختی سیستم خاک- فونداسیون شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه ضعیف دارد.

- بیشترین کاهش ظرفیت باربری نهایی در عمق بحرانی  $1/2B$  و به میزان ۴۰ درصد (از  $265 \text{ kPa}$  به  $158 \text{ kPa}$ ) رخ داده است. برای هر دو لایه ضعیف با ضخامت‌های  $0/1$ ،  $0/2$ ،  $t/B=0/1$ ، لایه ضعیف در عمق  $3/6B$  بدون تأثیر بوده است.

- وجود لایه قوی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی فونداسیون و سختی سیستم خاک- فونداسیون شده است. میزان این تأثیر بستگی به ضخامت و عمق قرارگیری لایه قوی دارد.

- بیشترین افزایش ظرفیت باربری نهایی برای حالتی است که لایه قوی دقیقاً زیر فونداسیون ( $Z/B=0$ ) قرار گرفته باشد که برای ضخامت  $t/B=0/1$ ، به میزان ۷۶ درصد (از  $265 \text{ kPa}$  به  $467 \text{ kPa}$ ) رخ داده است.

- برای هر دو لایه قوی ( $0/1$ ،  $0/2$ )،  $t/B=0/1$ ، لایه ضعیف در عمق تقریباً  $2/4B$  بدون تأثیر بوده است.

- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی محققان مختلف، نشان دهنده انتخاب صحیح زاویه مقاومت برشی متناظر با سطح تنش مؤثر

در مدل فیزیکی بوده است.

- از دیگر نتایج این تحقیق این است که مهندس ژئوتکنیک به هنگام تحقیقات صحرایی، هرگز نباید از جزئیات کوچک زمین‌شناسی همانند لایه‌های نازک غافل بماند. قابل ذکر است که به دلیل تأثیر مقیاس، نتایج حاصل از آزمایش‌های کوچک مقیاس قابل استفاده در مسائل واقعی نیست. یکی از راهکارهای کم کردن اثر مقیاس، انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی کوچک مقیاس در سطح تنش‌های زیاد است. از طرفی هدف اصلی این تحقیق، پیش‌بینی روند کلی رفتار پی نواری با حضور لایه نازک و کمی کردن تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج ظرفیت باربری نهایی آن بوده است.

## ۶- فهرست علائم

$B$	عرض فونداسیون، cm
$c'$	چسبندگی، kPa
$C_c$	ضریب خمیدگی
$C_u$	ضریب یکنواختی
$D_{max}$	حداکثر اندازه دانه، mm
$D_r$	دانسیته نسبی
$D_f$	عمق مدفون فونداسیون، m
$D_{10}$	اندازه مؤثر، mm
$D_{30}$	قطر متناظر با ۳۰ درصد، mm
$D_{50}$	اندازه متوسط دانه، mm
$D_{60}$	قطر متناظر با ۶۰ درصد، mm
$G_s$	چگالی ویژه
$H$	ارتفاع مخزن مدل فیزیکی، cm
$L$	طول مخزن مدل فیزیکی، cm
$N_r, N_q$	ضرایب ظرفیت باربری
$P$	نیروی مقاوم ایجاد شده بر روی سطح گوه گسیختگی
$q$	فشار باربری، kPa
$q_u$	فشار باربری ماسه دارای لایه نازک، kPa



Civil Engineering, 14(7) (2016) 467-477.

- [6] K.M.H. Ismail Ibrahim, Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay, HBRC journal, 12(1) (2016) 71-77.
- [7] E. Uncuoglu, The bearing capacity of square footings on a sand layer overlying clay, Geomechanics and Engineering, 9(3) (2015) 287-311.
- [8] P. Maheshwari, M. Viladkar, Strip footings on a three layer soil system: theory of elasticity approach, International Journal of Geotechnical Engineering, 1(1) (2007) 47-59.
- [9] M. Ziccarelli, C. Valore, S.R. Muscolino, V. Fioravante, Centrifuge tests on strip footings on sand with a weak layer, Geotechnical Research, 4(1) (2017) 47-64.
- [10] M. Oda, S. Win, Ultimate bearing capacity tests on sand with clay layer, Journal of Geotechnical Engineering, 116(12) (1990) 1902-1906.
- [11] M. Askari, A.B. Khalkhali, M. Makarchian, N. Ganjian, The bearing capacity of circular footings on sand with thin layer: An experimental study, Geomechanics and Engineering, 27(2) (2021) 123-130.
- [12] H.G. Poulos, Pile behavior—Consequences of geological and construction imperfections, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131(5) (2005) 538-563.
- [13] V. Murthy, 12 of of K of, in: Geotechnical Engineering, CRC Press, 2002, pp. 409-409.
- [14] D. ASTM, 4253-00, 2006, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [15] D. ASTM, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, in, West Conshohocken PA., 2006.
- [16] M. Bolton, C. Lau, Scale effects in the bearing capacity of granular soils, in: Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations. 12, 1989, pp. 895-898.
- [17] R. Taylor, Centrifuges in modelling: principles and scale effects, in: Geotechnical centrifuge technology,

فشار باربری ماسه یکنواخت، kPa  $q_{u0}$

نشست فونداسیون، mm  $S$

نیروی کششی در لایه قوی  $T$

ضخامت لایه نازک، mm  $t_i$

عمق قرارگیری لایه نازک، mm  $Z_i$

وزن مخصوص،  $\text{kN/m}^3$   $\gamma$

وزن مخصوص خشک،  $\text{kN/m}^3$   $\gamma_d$

وزن مخصوص خشک حداکثر،  $\text{kN/m}^3$   $\gamma_{dmax}$

وزن مخصوص خشک حداقل،  $\text{kN/m}^3$   $\gamma_{dmin}$

زاویه اصطکاک داخلی، درجه  $\phi$

تنش برشی، kPa  $\tau$

تنش نرمال، kPa  $\sigma_n$

تنش قائم، kPa  $\sigma_v$

نسبت  $q_u$  به  $q_{u0}$   $\eta$

نسبت تغییرات فشار باربری به تغییرات نشست  $\Delta q/\Delta s$

## منابع

- [1] C. Valore, M. Ziccarelli, S.R. Muscolino, The bearing capacity of footings on sand with a weak layer, Geotechnical Research, 4(1) (2017) 12-29.
- [2] K. Terzaghi, Effect of minor geologic details on the safety of dams, Amer. Inst. Min. and Met. Engrs. Tech. Publ., 215 (1929) 31-44.
- [3] K.v. Terzaghi, The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear, in: First international conference on soil Mechanics, 1936, 1936, pp. 54-59.
- [4] A. Gupta, R.K. Dutta, R. Shrivastava, V.N. Khatri, Ultimate bearing capacity of square/rectangular footing on layered soil, Indian Geotechnical Journal, 47(3) (2017) 303-313.
- [5] M. Haghbin, Bearing capacity of strip footings resting on granular soil overlying soft clay, International Journal of

- [20] G.G. Meyerhof, Some recent research on the bearing capacity of foundations, Canadian geotechnical journal, 1(1) (1963) 16-26.
- [21] A.S. Vesić, Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99(1) (1973) 45-73.
- [22] B. Bodo, C. Jones, Introduction to soil mechanics, John Wiley & Sons, 2013.
- CRC Press, 2018, pp. 19-33.
- [18] Y. Toyosawa, K. Itoh, N. Kikkawa, J.-J. Yang, F. Liu, Influence of model footing diameter and embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity tests, Soils and foundations, 53(2) (2013) 349-356.
- [19] C. Martin, Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics, Proc. IACMAG. Turin, (2005) 441-450.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Askari, A. Bagherzadeh Khalkhali, M. Makarchian, N. Ganjian, Evaluation of the Thin Layer Effect on the Ultimate Bearing Capacity of Strip Foundation on Sand, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2681-2698.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20657.7490

