مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری پیهای سطحی واقع بر ماسه در شرایط اشباع و غیراشباع

ذوالفقار صفرزاده * و محمّد حسین امین فر ۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل ^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

(دریافت: ۹۷/۱۰/۲۲، پذیرش: ۹۸/۴/۲۳، نشر آنلاین: ۹۸/۴/۲۳)

چکیدہ

انتكا يترو

پیهای سطحی معمولاً بالاتر از تراز آب زیرزمینی واقع بوده و خاک زیر آنها در شرایط غیراشباع میباشد. بنابراین ظرفیت باربری پیهای سطحی بایستی متأثر از تنشهای موئینگی ناشی از شرایط غیراشباع خاک باشد. در این تحقیق اثر غیراشباع بودن خاک بر ظرفیت باربری پی مربعی و مستطیلی واقع بر خاک دانهای متراکم در مقیاس آزمایشگاهی در شرایط مختلف تراز آب زیرزمینی بررسی گردید. نتایج آزمایشها نشان میدهد که با پایین بردن تراز آب زیرزمینی و بهتبع آن افزایش مکش بافتی خاک ناشی از مویینگی، با تغییر مکش بافتی از ۵/۰ تا ۲۵/۵ کیلوپاسکال در ماسه مورد مطالعه، ظرفیت باربری نهایی در شرایط غیراشباع از ۲/۳ تا ۲/۳ برابر شرایط اشباع به صورت غیرخطی افزایش مییابد همچنین در مکشهای نزدیک به مکش بافتی بازبری نهایی در شرایط غیراشباع از ۲/۳ تا ۲/۳ برابر شرایط اشباع به صورت غیرخطی افزایش مییابد همچنین در مکشهای نزدیک به مکش بافتی باقیمانده و با گذر از ناحیه اشباعزدایی، آهنگ افزایش ظرفیت باربری کاهش یافته و با افزایش نسبت طول به عرض پی، نرخ افزایش ظرفیت باربری افزایش پیدا می کند.

كليدواژهها: پى سطحى، مدل آزمايشگاهى، ظرفيت باربرى، مكش بافتى، خاك غيراشباع.

۱– مقدمه

ظرفیت باربری یکی از پارامترهای کلیدی برای طراحی پی-های سطحی میباشد. روشهای مختلفی که در پیشینه منابع وجود دارند ظرفیت باربری خاک را بر اساس پارامترهای مقاومت برشی خاک اشباع تعیین میکنند. در بسیاری از نقاط کره زمین که در شرایط آب و هوایی خشک یا نیمهخشک واقع هستند خاک-های سطحی در شرایط خشک و یا غیراشباع قرار دارند با وجود این، ظرفیت باربری خاکها معمولاً با فرض شرایط کاملاً اشباع خاک و چشمپوشی از تأثیر تنشهای ناشی از مویینگی یا مکش بافتی تعیین میشوند، بنابراین منجر به طراحی غیراقتصادی خواهد شد. محققین مختلفی تحقیقاتی را بر روی ظرفیت باربری خاکهای غیراشباع انجام دادهاند.

و همکاران (۱۹۸۷) با انجام بارگذاری صفحه دایرهای و مربعی در دو نوع ماسه مشاهده کردند که ظرفیت باربری شرایط غیراشباع ۴ تا ۶ برابر بزرگتر از شرایط اشباع به دست می آید.

olloo و همکاران (۱۹۹۷) با توسعه رابطه ظرفیت باربری ترزاقی و با در نظر گرفتن چسبندگی ناشی از مکش بافتی در برآورد مقاومت برشی خاکهای غیراشباع برای طراحی روسازیهای راه نتیجه گرفتند که مکش بافتی میتواند تأثیر عمدهای بر ظرفیت باربری روسازیهای راه داشته باشد.

costa و همکاران (۲۰۰۳) با انجام بارگذاری صفحه دایرهای در محل بر روی ماسه رسدار نتیجه گرفتند که با افزایش مکش بافتی از صفر تا ۱۰ کیلوپاسکال ظرفیت باربری تقریباً ۱۰۰ درصد افزایش یافته و به دلیل تأثیر مکش بر سختی خاک، از نشست خاک کاسته میشود.

Xu (۲۰۰۴) با انجام بارگذاری صفحه مربعی در محل بر روی خاک ریزدانه منبسط شونده به این نتیجه رسید که ظرفیت باربری در حالت غیراشباع تقریباً دو برابر حالت اشباع بوده است. تحقیقات Vanapalli و Vanapalli (۲۰۰۷) نشان داد که تغییرات مکش بافتی در محدوده ۲ تا ۶ کیلوپاسکال منجر به افزایش ۴ تا ۷ برابری ظرفیت باربری ماسه غیراشباع نسبت به شرایط اشباع می شود.

^{*} نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۳۵۱۲۸۳۶-۹۱۴

آدرس ايميل: safarzadeh@iauardabil.ac.ir (ذ. صفرزاده)، aminfar@tabrizu.ac.ir (م.ح. امين فر)

Rojas و همکاران (۲۰۰۷) با انجام آزمایش بارگذاری صفحه دایرهای در محل بر روی رس با خمیری کم نتیجه گرفتند که ظرفیت بابری از ۳ تا ۶ برابر نسبت به شرایط اشباع افزایش داشته است. Schanz و همکاران، ۲۰۱۰ با انجام آزمایشهایی بر روی پی نواری واقع بر ماسه بد دانهبندی شده در مقیاس آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که ظرفیت باربری تا مرز عدد ورود هوا به صورت خطی با افزایش مکش افزایش یافته و سپس با افزایش مکش تا مکش باقی-مانده به صورت غیر خطی افزایش یافته و با گذر از مکش باقی مانده با افزایش مکش و تا رسیدن به حالت خشک ظرفیت باربری بصورت غیر خطی کاهش یافته است. در پژوهش آنها ظرفیت باربری نهایی حالت غیراشباع بین ۲ تا ۵ برابر ظرفیت باربری حالت اشباع بوده است. التویت باربری سه نوع پی مدل مربعی واقع بر ماسه غیراشباع را با افزایش مکش بافتی گزارش کردند.

Mohamed و همکاران (۲۰۱۲) با انجام بارگذاری بر روی پی مدل مربعی واقع بر خاک دانهای درشت، نشان دادند که ظرفیت باربری خاک در شرایط غیراشباع برای پی بدون عمق مدفون و با عمق مدفون بهترتیب ۵ و ۷ برابر نسبت به حالت اشباع افزایش داشته است.

Shwan و Shwan (۲۰۱۴) با انجام بارگذاری پی مدل نواری در مقیاس آزمایشگاهی واقع بر ماسه ریزدانه نتیجه گرفتند با افزایش مکش ظرفیت باربری بهصورت غیرخطی افزایش یافته و با گذر از مکش باقیمانده، ظرفیت باربری کاهش یافته است.

اسماعیل پور و اژدری (۱۳۹۰) با انجام آزمایش بارگذاری سه نوع پی مدل دایرهای واقع بر ماسه خوب دانهبندی شده متراکم نتیجه گرفتند با افزایش مکش بافتی ظرفیت باربری افزایش یافته و در شرایط غیراشباع ظرفیت باربری بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر حالت غیراشباع بوده است در ضمن با افزایش قطر پی، شدت افزایش در ظرفیت باربری بیشتر بوده است.

نیکونژاد و امام (۱۳۹۲) با بارگذاری پی نواری واقع بر خاک دانهای سست در مقیاس آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که با افزایش مکش در خاک یا یک حدی ظرفیت باربری افزوده شده ولی با افزایش بیشتر مکش و تا رسیدن به حالت خشک روند افزایش ظرفیت باربری متوقف شده است در تحقیقات آنها ظرفیت باربری در شرایط غیراشباع نسبت به حالت اشباع تقریباً سه برابر بوده است.

نظامی (۱۳۹۳) با انجام بارگذاری صفحه واقع بر خاک دانهای در تراکمهای مختلف و شرایط مختلفی رطوبتی در محیط آزمایشگاهی نتیجه گرفت در تراکمهای نسبی پایین تر از ۵۰ درصد با افزایش مکش بافتی شیب افزایش ظرفیت باربری ثابت است. و در تراکمهای بالاتر شیب افزایش ظرفیت باربری ثابت است.

ملاحظه می شود که مطالعات انجام شده صرفاً بر روی پی های مربعی، دایرهای و بعضاً نواری بوده است و در تمامی تحقیقات انجام شده، مکش بافتی خاک که ناشی از غیراشباع بودن خاک می باشد، تأثیر چشمگیری بر ظرفیت باربری نشان داده است. بر اساس نتایج تحقيقات اكثر محققان با افزايش مكش بافتى خاك، ظرفيت باربرى ابتدا به صورت غیر خطی افزایش یافته و سپس تا حدی کاهش می-یابد. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر غیراشباع بودن خاک بر ظرفیت باربری پی سطحی مربعی و مستطیلی واقع بر خاک دانهای متراکم و بررسی اثر طول پی بر ظرفیت باربری در شرایط غیراشباع پرداخته شده است. در این راستا ابتدا با استفاده از روش کاغذ صافی منحنى مشخصه آب- خاک ماسه مورد استفاده استخراج گرديد. منحنی مشخصه آب- خاک بیانگر تغییرات مکش بافتی خاک با تغییر رطوبت یا درجه اشباع آن میباشد. آزمایش بار گذاری صفحه در مقیاس آزمایشگاهی بر روی پیهای مدل به عرض ۱۰ سانتیمتر از جنس ورق فولادی به ضخامت ۲۰میلیمتر با نسبت طول به عرضهای ۱، ۲ و ۳ در شرایط مختلف رطوبتی: خشک، غیراشباع (سه وضعیت مختلف) و مستغرق در مخزنی به ابعاد طول، عرض و عمق برابر یک متر انجام گردید. مکش بافتی خاک در عمقهای مختلف مخزن به دو روش مستقیم و غیرمستقیم اندازه گیری و برآورد شد. در روش مستقیم با استفاده از مکش سنجهای نصب شده در ترازهای مختلف مخزن و در روش غیرمستقیم مکش بافتی از روی درجه اشباع نمونه های اخذ شده از ترازهای مختلف مخزن و با استفاده از منحنی مشخصه آب- خاک برآورد گردید.

۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک

آزمایشهای این تحقیق بر روی ماسهای که از منطقه قوم تپه صوفیان تهیه شده است انجام گردید. منحنی دانهبندی این ماسه در شکل (۱) نشان داده شده است. براساس روش طبقهبندی یونیفاید^۱ این خاک، یک ماسه یکنواخت یا ضعیف دانهبندی شده محسوب می شود.



سایر مشخصات فیزیکی این ماسه شامل: توده ویژه، نسبت منافذ حداکثر و حداقل براساس استاندارد^۲ استخراج شده است. پارامترهای مقاومت برشی این خاک شامل زاویه اصطکاک داخلی مؤثر ($\langle \varphi \rangle$) و چسبندگی مؤثر ($\langle z \rangle$) نیز با انجام آزمون برش مستقیم بر اساس همین استاندارد به دست آمدهاند. جدول (۱) نتایج آزمایشهای فیزیکی و مکانیکی مذکور را نشان می دهد. با توجه به این که آزمایشهای اصلی این تحقیق در وضعیت متراکم ماسه انجام گردیده است به روز پدیده اتساع در خاک مورد انتظار بوده است. زاویه اتساع خاک وابسته به عوامل متعددی از قبیل جنس و شکل ذرات، تراکم، سطح تنش اعمال شده و سطح کرنش ایجاد شده در خاک می باشد. زاویه اتساع این خاک با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی نمونههای اشباع و به شیوهای تشریح می شود به-دست آمده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک

| پارامتر | توصيف پارامتر | مقدار | استاندارد |
|----------------------|-------------------------|--------|-------------|
| Gs | توده ویژه | 7/888 | ASTM D854 |
| D ₆₀ (mm) | قطر مربوط به ۶۰٪ ریزتر | ٠/٣۵ | |
| D ₃₀ (mm) | قطر مربوط به ۳۰٪ ریزتر | ٠/٢۵ | |
| D ₁₀ (mm) | قطر مربوط به ۱۰٪ ریزتر | • /٢ • | ACTM D422 |
| Cu | ضريب يكنواختى | ۱/۷۵ | ASIM D422 |
| Cc | ضريب انحناء | ۰/۸۹ | |
| USCS | سيستم طبقهبندى متحده | SP | |
| e _{max} | حداكثر نسبت منافذ | •/YY۵ | ASTM D4254 |
| e _{min} | حداقل نسبت منافذ | ۰/۵۲۳ | ASTM D4253 |
| c'(kpa) | چسبندگی مؤثر | • | ACTM D2000 |
| $arphi'(^\circ)$ | زاویه اصطکاک داخلی مؤثر | ۳۳/۶ | ASTM D3080 |
| ψ(°) | زاويه اتساع | · ~ 14 | مطابق توضيح |
| | | | متن |

از آنجایی که متوسط نسبت منافذ خاک متراکم شده در داخل مخزن انجام آزمایشهای ظرفیت باربری که در بخشهای آتی تشریح خواهد شد حدود ۰/۶ حاصل شده بود لذا سعی گردید انجام آزمایش برش مستقیم نیز در همین نسبت منافذ انجام گردد. برای حصول آن مقدار ۵۴۵ گرم نمونه ماسه خشک شده پس از توزین در دو لایه در داخل جعبه برش مستقیم ۲۰×۲۰ به صورت یکنواخت ریخته شد و با قرار دادن کلاهک جعبه بهطور مستقیم بر سطح خاک داخل جعبه با استفاده از چکش ۵/۵ پوندی تراکم، هر لایه با سه ضربه متراکم گردید در نهایت ضخامت نمونه داخل جعبه ۳۳ میلیمتر حاصل گردید. پس از اشباعسازی نمونه و اعمال بنش نرمال، آزمایش برش مستقیم با سرعت ثابت mm/min انجام گردید. از آنجائی که اتساع خاک در سطح تنشهای کم و حالت متراکم ماسه بروز می کند بنابراین با انجام آزمایش برش

مستقیم بر روی نمونه متراکم شده به شیوه مذکور و با اعمال تنش نرمال کوچک میتوان محدوده زاویه اتساع خاک را به دست آورد. برای این منظور از روی نمودار تغییرات تغییر شکل قائم نمونه در مقابل تغییر شکل برشی آن و از رابطه (۱) میتوان زاویه اتساع را محاسبه کرد.

$$\psi = tan^{-1} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right) \tag{1}$$

که در آن $x \Lambda$ و $z \Delta$ به ترتیب تغییر شکل افقی و تغییر شکل قائم نمونه در آزمون برش مستقیم در هر لحظه دادهبرداری میباشند. شکل (۲- الف) و (۲- ب) به ترتیب تغییرات تغییر شکل قائم نمونه در مقابل تغییر شکل برشی آن و تغییرات زاویه اتساع این خاک در مقابل تغییر شکل برشی نمونه در سطح تنش کوچک ۵ کیلوپاسکال را نشان میدهد. مطابق این شکل زاویه اتساع این ماسه در محدوده صفر تا ۱۴ درجه برآورد میشود که با محدوده توصیهای صفر تا ۱۵ درجهای Bolton، ۱۹۸۶ نیز مطابقت دارد.



ب) تعییرات راویه انساع در مقابل تعییر سد

۳- مشخصات دستگاه بارگذاری

برای انجام آزمایشهای بارگذاری صفحه (پی مدل) در مقیاس آزمایشگاهی، دستگاه نشان داده شده در شکل (۳) ساخته شد. این دستگاه شامل مخزن خاک به ابعاد طول، عرض و عمق برابر یک متر، قاب نگهدارنده جک، یونیت هیدرولیک برای تأمین نیروی اعمالی جک به ظرفیت ۵ تن و سیستم جمع آوری داده

(DAS)^۲ میباشد. وجه جلویی مخزن برای انجام آزمایشهای همراه با سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)^۴ از جنس شیشه به ضخامت ۱۸ میلیمتر ساخته شده است. همچنین برای ثبت مکش بافتی خاک درون مخزن، پنج مکشسنج مینیاتوری مدل 2100f به این دستگاه الحاق گردید. در کف مخزن نیز یک شیر برای وارد کردن و یا زهکشی آب تعبیه شده است. در ضمن برای رصد کردن تراز آب درون مخزن یک پیزومتر به بدنه دستگاه متصل گردید. سایر جزئیات این دستگاه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳– دستگاه بارگذاری صفحه در مقیاس آزمایشگاهی به همراه متعلقات آن

۴- منحنی مشخصه آب- خاک^۵

منحنی نگهداشت رطوبت خاک یا منحنی مشخصه آب- خاک در ادبیات مکانیک خاکهای غیراشباع، توصیف کننده تغییرات مکش بافتی با تغییرات رطوبت و یا تغییرات درجه اشباع خاک می باشد و بسیاری از خواص خاکهای غیراشباع از جمله خواص هیدرولیکی، خواص مقاومتی و ویژگیهای شکل پذیری آنها با استفاده از همین نمودار تفسیر می گردد. برای ماسه استفاده شده در این تحقیق ابتدا دادههای این منحنی با استفاده از روش کاغذ صافی و با استفاده از کاغذ صافی Whatman NO.42 مطابق استاندارد ASTM D5298 استخراج گردید و پس از آن به روش متداول Fredlund و Xing (۱۹۹۴) در این خصوص، بهترین منحنی بر دادههای اندازه گیری شده برازش گردید. شکل (۴) منحنی مشخصه تهیه شده را نشان میدهد. در این شکل علاوه بر نقاط استخراجی از روش کاغذ صافی، نقاطی را که از طریق قرائت مکش سنجها از مخزن خاک آزمایش بار گذاری خاک برداشت شده بودند نیز وارد شده است. مطابق این شکل عدد ورود هوا (AEV)^۲ برای این خاک ۱/۲ کیلوپاسکال و مکش بافتی باقی مانده ۱۴ آن (S_r) کیلویاسکال و درجه اشباع باقی مانده (S_r) آن (ψ_r) درصد بر آورد می شوند.



- 4. Particle Image Velocimetry
- 5. SWCC



شکل ۴- منحنی مشخصه ماسه قوم تپه صوفیان

عدد ورود هوا بیانگر مقدار مکش قابل تحمل خاک است که سبب خروج خاک از حالت اشباع به حالت غیراشباع میشود و مکش باقیمانده مقدار مکشی است که افزایش بیش از آن نمی-تواند سبب کاهش درجه اشباع خاک گردد.

۵- تشریح نحوه انجام آزمایشهای ظرفیت باربری

در این بخش ابتدا نحوه آمادهسازی مخزن خاک و روش اشباعسازی و غیراشباعسازی آن تشریح خواهد شد سپس روش انجام آزمایش بارگذاری صفحه توضیح داده خواهد شد.

ابتدا لایهای از شن ریز تا متوسط به ضخامت ۱۵ سانتیمتر در کف مخزن برای ایجاد جریان آرام آب ورودی به داخل مخزن، یخش و متراکم گردید و بر روی آن یک صفحه توری ریزبافت نایلونی جهت جلوگیری از خروج ذرات ریز ماسه در حین زهکشی قرار داده شد. سپس مقدار ۴۱ کیلوگرم ماسه خشک شده در لایه-های ۲/۵ سانتیمتری به صورت یکنواخت پخش و پس از تراز كردن سطح آن، با استفاده از كوبنده ویژه (چكش تراكم) به جرم ۵/۷۵ کیلوگرم، سطح اتکای ۲۵×۲۵ سانتیمتر و ارتفاع سقوط ۰/۵ متر که به همین منظور طراحی و ساخته شده است متراکم گردید. برای ضخامت ۳۵ سانتیمتر ابتدایی پس از لایه شنی، هر لایه با ۵ ضربه در هر نقطه و با توجه به این که سطح خاک درون مخزن ۱/۰×۱/۰ متر بوده است لذا تعداد ۸۰ ضربه برای هر لایه جهت حصول تراکم زیاد، وارد گردید. اما برای حصول دانسیته متراکم و یکسان در خاک زیر پی، برای ۳۰ سانتیمتر بعدی، پس از چندین بار آزمون و خطا و اندازه گیری دانسیته از عمقها و نقاط مختلف ۳۰ سانتیمتر آخر، الگوی تراکم بدین صورت انتخاب شد که تعداد ضربات تراکم از پایین به بالا افزایش یابد. به گونهای که دو لایه ۲/۵ سانتیمتری اول پس از ۳۵ سانتیمتر زیرین، هرکدام با ۳۲ ضربه (هر نقطه با ۲ ضربه) و دو لایه دوم تا دو لایه ششم هر کدام به ترتیب با ۴۸ (هر نقطه با ۳ ضربه)، ۶۴، ۸۰، ۹۶ و ۱۱۲ ضربه متراکم گردد. برای کنترل تراکم و دانسیته در عمق ۳۰

^{6.} Filter Paper

۷. Air Entry Value

سانتی متر آخر، قالبهای کوچکی از جنس آلومینیم به قطر ۵ سانتی متر و عمق ۲/۵ سانتی متر ساخته شد و در حین پر کردن لایه ای مخزن تعداد سه قالب در هر تراز و در عمقهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی متری از سطح نهایی خاک داخل مخزن مطابق شکل (۵) قرار داده شد. این روند متراکم سازی، که با هدف ایجاد خاک متراکم یا بسیار متراکم برای حصول گسیختگی برشی عمومی در حین بارگذاری انجام شده بود با محاسبه دانسیته نسبی ایجاد شده و انجام بارگذاری و مشاهده نوع گسیختگی ایجاد شده تأیید می گردد.

پس از پرکردن مخزن، ابتدا از طریق شیر تحتانی تعبیه شده برای مخزن، گاز CO2 با دبی و فشار بسیار کم به مدت ۲ ساعت وارد مخزن گردید. بدین طریق گاز دی اکسیدکربن جایگزین هوای منفذی مابین ذرات خاک شده و سبب می شود در مرحله آبگیری، اشباعسازی آن بهراحتی صورت گیرد. در مرحله بعدی از طریق همین شیر تحتانی، جریان بسیار آرام آب به داخل مخزن برقرار گردید به گونهای که آب بتواند به طور کامل جایگزین گاز مابین ذرات خاک گردد. زمانی که تراز آب داخل مخزن در تراز سطح خاک قرار دارد خاک در وضعیت مستغرق میباشد. با انجام زهکشی از طریق شیرتحتانی، تراز آب در بدنه خاک افت کرده و درصورتی که زهکشی با دبی خروجی بسیار کم انجام گردد میتوان موقعیت تراز آب در بدنه خاک را از طریق پیزومتر تعبیه شده در بدنه مخزن مشاهده و كنترل كرد. از أنجائي كه ايجاد شرايط اشباع کامل (نه مستغرق) در این تحقیق بسیار دشوار بود به جای حالت اشباع، آزمایش در شرایط مستغرق انجام گردید. زمانی که تراز آب در سطح تراز خاک قرار دارد میتوان آزمایشهای ظرفیت باربری حالت مستغرق را انجام داد. برای ایجاد شرایط غیراشباع خاک، پس از انجام فرایند اشباع و غوطهوری به شیوه مذکور، تراز آب مخزن از طریق زهکشی آرام آن تا موقعیتهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلیمتری از سطح خاک درون مخزن پایین آورده شد.

پس از تنظیم موقعیت تراز آب، با نصب پروب مکش سنجها در پنج تراز مختلف از سطح خاک تا سطح تراز آب داخل مخزن و سپس پوشانیدن سطح خاک با صفحات نایلونی برای جلوگیری از تبخیر سطحی، مدت زمان حداقل ۲۴ ساعت برای تثبیت گیجهای اندازه گیری مکش مکش سنجها زمان لازم است. پس از گذشت این زمان می توان آزمایش باربری را برای شرایط ایجاد شده توأم با اندازه گیری مکش ایجاد شده در ترازهای مختلف از سطح خاک اندازه گیری مکش ایجاد شده در ترازهای مختلف از سطح خاک مدل ماد. شکل (۵) نحوه استقرار مکش سنجها و محل قرار گیری قالبهای نمونهبرداری را نشان می دهد. در مرحله بعدی، پی مدل عرضهای ۱، ۲ و ۳ که برای ایجاد اصطکاک و زبری کافی بین کف پی با خاک، با استفاده از کاغذ سمباده پوشش داده شده بودند به نیروسنج متصل به شفت جک اعمال نیرو وصل گردیدند.



سپس با حرکت دادن جک تا رسیدن به سطح خاک و انکا دادن میله سنسور جابهجایی سنج به سطح پی، با تنظیم نرمافزاری سیستم، بارگذاری با سرعت پایین 0.016 mm/sec (همان سرعت انجام آزمایش برش مستقیم) انجام گردید و بهطور همزمان مقدار نیروی اعمالی و مقدار نشست ایجاد شده در گامهای زمانی 500µsec از طریق سیستم جمعآوری دادهها به صورت نرمافزاری ثبت گردید. لازم به یادآوری است که برای هر آزمایش فقط ۳۰ سانتیمتر خاک رویی نسبت به آزمایش قبلی تعویض گردید و برای اطمینان از تکرارپذیری آزمایشها، همه آزمایشها در سه مرتبه انجام و متوسط سه تکرار برای هر آزمایش بهعنوان نتیجه آن آزمایش جهت انجام تحلیلها استخراج گردید. پس از انجام هر مختلف مخزن با احتیاط خارج و جرم خاک مرطوب و سپس جرم خشک خاک داخل آنها اندازه گیری گردید.

۶- استخراج خواص خاک از طریق مخزن آزمایش

پس از انجام آزمایشهای باربری تشریح شده در بخش قبل با نمونه گیری خاک از ترازهای مختلف مخزن و با استفاده از روابط کلاسیک حجمی- وزنی، مشخصات موردنیاز این خاک برای انجام تحلیلهای بعدی شامل دانسیته خشک، دانسیته مرطوب، نسبت منافذ، درصد رطوبت و درجه اشباع محاسبه و برای عمقهای مذکور، از روی اعداد سه قالب متوسط گیری گردید. از نسبت منافذ برآورد شده از طریق همین قالبها میتوان دانسیته نسبی ماسه متراکم شده در ترازهای مختلف را برآورد نمود. همچنین از درجه اشباع برآورد شده و با استفاده از منحنی مشخصه میتوان مکش بافتی متناظر با آن درجه اشباع را برآورد نمود.

بر اساس برآوردهای انجام شده درمجموع آزمایشها نسبت منافذ اندازهگیری شده در محدوده عمق ۳۰ سانتیمتر سطحی خاک مخزن ۰/۵۷ تا ۰/۶۲ حاصل گردید.

مکش بافتی خاک علاوه بر روش غیرمستقیم منحنی مشخصه، به روش مستقیم و با استفاده از پنج مکش سنج میناتوری مدل 2100F نیز اندازه گیری گردید. جدول (۲) جزئیات مربوط به عمق استقرار و مقدار مکش اندازه گیری شده را نشان می دهد. این مقادیر با توجه به بر آورد درجه اشباع عمق استقرارشان در منحنی مشخصه شکل (۵) نیز وارد شدهاند. در جدول (۲) حالت اول غیراشباع انجام آزمایش بیانگر حالتی است که تراز آب مخزن در عمق mm 100- از سطح خاک واقع باشد و به همین تر تیب حالت دوم و سوم غیراشباع به ترتیب متناظر عمق آب mm 200-و mm 500 می باشند.

جدول ۲- نتایج قرائت مکش سنجها

| | | - | - | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| ع. اشباع | حالت اول غ | وم غ. ا. | حالت د | ﻮﻡ ﻍ. ﺍ. | حالت س |
| GWT= | -100 mm | GWT=- | 300 mm | GWT=-5 | 500 mm |
| Z _T (mm) | <u>. ₩т</u> (КРа) | Z _T (mm) | <i>Ψτ</i> (KPa) | Z _T (mm) | ψ _T (KPa) |
| ۲۵ | ١/٢ | ۲۵ | ٣/٠ | ۲۵ | ۵/۰ |
| ۴۰ | ٠/٩ | ۵۰ | ۲/۶ | 1 | ۴/۲ |
| ۶. | • /Y | ١٠٠ | ۲/۲ | ۲۰۰ | ٣/٠ |
| ٨٠ | ۰/۲ | ۲۰۰ | 1/1 | ۳۰۰ | ۲/۰ |
| 1 | • | ٣٠٠ | • | ۴۰۰ | ١/١ |
| | | | | | |

Ζτ: عمق استقرار پروب مکش سنج ψτ ، مکش اندازه گیری مکش سنج

شکل (۶) پروفیل مکش بافتی ثبت شده در هرکدام از حالت-های غیراشباع از سطح خاک تا سطح تراز آب که از دادههای ثبت شده از قرائت مکش سنجها حاصل شده است را نشان میدهد. همچنین مقادیر مکش بافتی برآورد شده از درجه اشباع نمونههای استخراجی نیز در این شکل وارد شدهاند.



از آنجائی که در حالتهای مختلف انجام آزمایش باربری، مقادیر پارامترهای درجه اشباع و مکش بافتی خاک نسبت به عمق متغیر میباشند. جهت یافتن یک مقدار قابل مقایسه از پارامترهای مذکور برای پیهای مختلف، محاسبه مقدار متوسط این پارامترها در ناحیه عمق تأثیر پی (Ds) میتواند راهکار مناسبی باشد. از طرفی میدانیم که با تغییر نسبت طول به عرض پی، عمق تأثیر پی نیز تغییر میکند.

Budhu) (L/B=1) عمق تأثیر یی های مربعی (L/B=1) را حدود 1.5B تا 2B و برای یی های نواری (L/B<5) عمق این ناحیه را 3B تا 48 ذکر کرده است. Vanapalli و Mohamed (۲۰۰۷) و Zhan و Vanapalli (۲۰۱۲) برای پیهای مربعی اتخاذ عمق تأثیر 1.5B را مناسب دانستهاند به همین شیوه برای پی نواری نیز حد پایین عمق تأثیر یعنی 3B را میتوان انتخاب کرد. در خصوص شرط نواری بودن یی نیز Bolton (۱۹۸۶) برای شرایط کرنش مسطح، L/B=7 را در نظر گرفته است. با درون یابی بین L/B=1 تا L/B=7 عمق تأثير پيهاي مدل اين تحقيق برابر 1.508، 1.758 و 2.08 به ترتیب برای نسبت طول به عرض ۱، ۲ و ۳ حاصل خواهد شد. جداول (۳)، (۴)، (۵)، (۶) و (۷) نتیجه میانگین گیری وزنی پارامترهای نسبت منافذ، وزن مخصوص، درجه اشباع و مکش بافتی (بر اساس پروفیل شکل (۶)) در محدوده عمق تأثیر هرکدام از پیهای مدل را به ترتیب در حالت مستغرق، حالت غیراشباع اول، حالت غیراشباع دوم، حالت غیراشباع سوم و حالت خشک نشان میدهد. در این جدولها دانسیته نسبی خاک در محدوده تأثیر از رابطه (۲) برآورد شده است که در آن e_{avr} بیانگر مقدار متوسط گیری شدہ نسبت منافذ خاک در محدودہ عمق تأثیر می-ىاشد.

$$Dr(\%) = \frac{e_{max} - e_{avr}}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \tag{(Y)}$$

جدول ۳- متوسط پارامترها در ناحیه عمق تأثیر پی، حالت

| مستغرق (GWT=-0.00 mm) | | | | | | |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|
| پارامتر | L/B=1 Ds = 150 | L/B=2 Ds = 175 | L/B=3 Ds = 200 | | | |
| е | ٠/۵٩٠ | ٠/۵٩٢ | ۰/۵۸۹ | | | |
| $\gamma(KN/m^3)$ | ۱۹/۹ | ۱۹/۹ | ۱۹/۹ | | | |
| S(%) | 1 | ۱ | ۱ | | | |
| ψ(Kpa) | • | • | • | | | |
| Dr(%) | ٧٣ | ٧۴ | ٨٤ | | | |

Ds: عمق تأثیر پی برحسب میلیمتر

| | (diff 100 mm) | ڪير، سب ج رون / | |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| پارامتر | L/B=1 Ds = 150 | L/B=2 Ds = 175 | L/B=3 Ds = 200 |
| е | ٠/۵٨٩ | ۰/۵۹۳ | ٠/۵٩٧ |
| $\gamma(KN/m^3)$ | ١٩/٨ | ۱۹/۸ | ۱۹/۸ |
| S(%) | ۹۵/۹ | ٩٧/٠ | ٩٧/٠ |
| ψ(Kpa) | • /۶ | • /۵ | ۰/۴ |
| Dr(%) | ٧۴ | ۷۲ | ۷۱ |
| | | | |

| مق تأثير پی، حالت | در ناحیه ء | پارامترها | ۴– متوسط | مدول ا |
|-------------------|------------|------------|----------|--------|
| (GWT= | -100 mm | ر اء اما (| غايات | |

Ds: عمق تأثير پی برحسب ميلیمتر

جدول ۵- متوسط پارامترها در ناحیه عمق تأثیر پی، حالت

غيراشباع دوم (GWT=-300 mm)

| پارامتر | L/B=1 Ds = 150 | L/B=2 Ds = 175 | L/B=3 Ds = 200 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| е | ۰ <i>\</i> ∆٩١ | •/۵۸٩ | ۰/۵۹۳ |
| $\gamma(KN/m^3)$ | ۱۸/۹ | ۱۹/۰ | ۱۹/۱ |
| <i>S</i> (%) | Y 1/Y | ۲۴/۱ | ۲۵/۹ |
| ψ(Kpa) | ۲/۵ | ۲/۴ | ۲/۳ |
| Dr(%) | ۷٣ | ٧۴ | ٧٢ |

Ds: عمق تأثیر پی برحسب میلیمتر

جدول ۶- متوسط پارامترها در ناحیه عمق تأثیر پی، حالت

غيراشباع سوم (GWT=-500 mm)

| پارامتر | L/B=1 Ds = 150 | L/B=2 Ds = 175 | L/B=3 Ds = 200 |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| е | ۰/۵۹۰ | ٠/۵٩١ | • /۵۸۵ |
| $\gamma(KN/m^3)$ | 1 1/7 | ۱۷/۳ | ۱۷/۳ |
| S(%) | ۲۵/۵ | ۲۷/۳ | ۲۸/۶ |
| ψ(Kpa) | ۴/۵ | ۴/۳ | ۴/۲ |
| Dr(%) | ۷٣ | ۷۳ | ۷۵ |

Ds: عمق تأثير پی برحسب ميلیمتر

بر اساس نتایج بهدست آمده نسبت منافذ درمجموع آزمایشها و بهطور متوسط برابر ۱۸۹۹ و دانسیته نسبی متوسط برابر ۷۴ درصد میباشد. که نشانگر تراکم زیاد خاک داخل مخزن میباشد. لازم به ذکر است مقدار مکش بافتی متناظر حالت خشک (۶۰ کیلوپاسکال) مندرج در جدول (۷) از قرائت مکش سنجها به دست آمده است.

جدول ۷- متوسط پارامترها در ناحیه عمق تأثیر پی، حالت

| خ شک (GWT=-800 mm) | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|--|
| پارامتر | L/B=1 Ds = 150 | L/B=2 Ds = 175 | L/B=3 Ds = 200 | | | | |
| е | ٠/۵٨۴ | •/۵۸۳ | •/۵۸۲ | | | | |
| $\gamma(KN/m^3)$ | ۱۶/۳ | ۱۶/۳ | ۱۶/۳ | | | | |
| S(%) | • | • | | | | | |
| ψ(Kpa) | ۶. | ۶. | ۶. | | | | |
| Dr(%) | ٧۶ | ۷۵ | ٧٧ | | | | |
| | | | | | | | |

Ds : عمق تأثیر پی برحسب میلیمتر

۷- نتایج آزمایشهای بارگذاری پیها در شرایط مختلف

همانطوری که بیشتر ذکر شد برای هرکدام از شرایط آزمایش، برای اطمینان از تکراریذیری نتایج، آزمایشها در سه مرتبه انجام گردید و متوسط سه آزمون به عنوان نتیجه برای انجام تحلیلهای بعدی استخراج گردید. شکل (۷) تغییرات بار اعمال شده به پی مربعی در مقابل نشست ایجاد شده، همچنین منحنی میانگین را در شرایط مستغرق نشان میدهد. شیب کم اولیه منحنیها به دلیل تراکم سطحی خاک در گامهای ابتدایی بارگذاری و احتمال مماس نبودن کامل کف پی با خاک میباشد. از تقسیم کردن بار اعمالی به سطح پی، تنش اعمالی به سطح پی حاصل می گردد و مقدار حداکثر تنش ایجاد شده بدین طریق به-عنوان ظرفیت باربری نهایی (qult) معرفی میشود. شکل (۸) منحنی ظرفیت باربری یا تغییرات تنش اعمالی در مقابل نشست ایجاد شده پی مدل مربعی در شرایط مستغرق را با ظرفیت باربری نهایی حدود ۴۶ کیلوپاسکال نشان میدهد. همچنین فرم منحنی حاصل به سبب داشتن نقطه پیک مشخص نشانگر تراکم زیاد خاک مخزن و بروز گسیختگی برشی عمومی میباشد.



(حالت مستغرق، GWT=-0.00 mm)



شکل ۱۱- منحنیهای ظرفیت باربری پی مستطیلی با L/B=3

۸- تحلیل نتایج

برای بررسی تأثیر غیراشباع بودن خاک بر ظرفیت باربری نهایی آن، در جدول (۸) مقادیر ظرفیت باربری نهایی اشباع هر سه نوع پی مدل که تقریباً دو برابر ظرفیت باربری نهایی حالت مستغرق در نظر گرفته شده است به همراه نسبت ظرفیت باربری نهایی اندازه گیری شده غیراشباع به حالت اشباع (q_{UnSat}/q_{Sat})، همچنین نسبت ظرفیت باربری نهایی حالت خشک به حالت اشباع ارائه شده است. همان طوری که ملاحظه می شود با (q_{Drv}/q_{Sat}) تغییر وضعیت خاک از شرایط اشباع به وضعیت غیراشباع، برای هر سه نوع پی مدل ظرفیت باربری افزایش یافته است. به گونهای که برای پی مربعی ظرفیت باربری حالت غیراشباع از ۲/۵۵ تا ۳/۹۵ برابر ظرفیت باربری حالت اشباع به دست آمده است. این نسبتها برای پیهای مستطیلی در همان شرایطهای انجام آزمایش در حد یایین از ۲/۲۸ تا ۲/۶۴و در حد بالا از ۳/۹۶ تا ۴/۲۵ بوده است و این را می توان به تأثیر مکش بافتی بر رفتار خاک دانست. از طرفی با توجه به منحنی های ظرفیت باربری، با افزایش مکش بافتی شیب بخش الاستیک منحنیهای ظرفیت باربری افزوده شده و به عبارت دیگر افزایش مکش بافتی باعث افزایش سختی خاک شده است.

| دازهگیری شده | ربری نهایی ان | دیر ظرفیت با | جدول ۵- مقا |
|--------------|---------------|--------------|-------------|
|--------------|---------------|--------------|-------------|

| حالت آزمایش | L/B=1 | L/B=2 | L/B=3 |
|--|-------|-------|--------|
| حالت اشباع q _{Sat} (KPa) | ٩١ | ٨٣ | ۸۲ |
| حالت غیراشباع اول (q _{UnSat} /q _{Sat}) | ۲/۵۵ | ۲/۶۴ | ۲/۲۸ |
| حالت غیراشباع دوم (qusat/qsat) | ۳/۸۰ | ۳/۹۸ | ۳/۶۱ |
| حالت غیراشباع سوم (q _{UnSat} /q _{Sat}) | ۳/۹۵ | ۴/۲۵ | ۳/٩۶ |
| حالت خشک (q _{Dry} /q _{Sat}) | •/٨• | •/\\ | • /A 1 |





در شکل (۹) منحنی ظرفیت باربری پی مربعی در حالتهای مختلف انجام آزمایش نشان داده شده است، در این شکل مکش بافتی متناظر درج شده بر روی هر منحنی برابر متوسط مکش بافتی در عمق تأثیر پی بوده و از جداول (۳) تا (۷) استخراج شده است. شکلهای (۱۰) و (۱۱) به ترتیب منحنیهای ظرفیت باربری پی مستطیلی به عرض ۱۰۰ میلیمتر با طول نسبی L/B=2 و L/B=3



شکل ۱۰- منحنیهای ظرفیت باربری پی مستطیلی با L/B=2

شکل (۱۲) تغییرات ظرفیت باربری اندازه گیری شده هر سه نوع یے، مدل نسبت به میانگین مکش بافتی برآورد شده در عمق تأثیر پی را نشان میدهد. ملاحظه می شود که با افزایش مکش بافتی تا مکش باقیمانده، ظرفیت باربری بهصورت غیرخطی افزایش یافته است. با دقت در این شکل مشاهده می شود در ناحیه میانی مکش بافتی (مکش بافتی مابین عدد ورود هوا و مکش باقی-مانده) و با ورود به ناحیه میانی، آهنگ افزایش ظرفیت باربری نسبت به بخش اولیه دارای شدت بیشتری است و با خروج از این ناحیه آهنگ افزیش ظرفیت باربری کاهش یافته است. همچنین در مکشهای نزدیک به مکش باقیمانده با کاهش نسبت طول به عرض پی، نرخ افزایشی ظرفیت باربری با شدت بیشتری کاهش یافته است. دلیل آن را میتوان به تأثیر میانگین مکش بافتی عمق ناحیه تأثیر نسبت داد بهگونهای که در یی مربعی با عمق تأثیر کمتر، مکش بافتی متوسط در ناحیه عمق تأثیر آن (۴/۵)کیلوپاسکال) از مکش بافتی باقیمانده (۴/۰ کیلوپاسکال) نسبت به پیهای مستطیلی بیشتر عبور کرده است لذا نرخ افزایش ظرفیت باربری از حالت دوم غیراشباعسازی به حالت سوم غیراشباع سازی با افزایش طول نسبی پی نسبت به پی مربعی بیشتر بوده است. از طرف دیگر مقدار ظرفیت باربری با افزایش طول نسبی پی کاهش داشته است. برای هر سه نوع پی مدل، ظرفیت باربری نهایی حالت خشک تفاوت معنی داری با ظرفیت باربری حالت غیراشباع دارد. دلیل آن به تغییر ساختار خاک خشک نسبت به خاک غیراشباع بر می گردد. برای مکشهای مابین حالت سوم غیراشباع سازی و مکش متناظر حالت خشک که ۶۰ كيلوپاسكال برآورد شده است انتظار مىرود با افزايش مكش بافتى ظرفیت باربری روند کاهشی داشته باشد.



شکل ۱۲- تغییرات ظرفیت باربری پیها نسبت به مکش

۹- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله ظرفیت باربری پیهای مربعی و مستطیلی سطحی واقع بر روی ماسه در شرایط اشباع و غیراشباع با انجام

آزمایش بارگذاری صفحه در مقیاس آزمایشگاهی (پی مدل) مطالعه گردید. نتایج آزمایشهای این تحقیق نشان می دهد که در شرایط غیراشباع، ظرفیت باربری نهایی پی وابسته به میزان مکش بافتی خاک بوده و در خاک مورد مطالعه در پی مربعی می تواند از پیهای مستطیلی نسبت ظرفیت باربری نهایی شرایط اشباع باشد. در ظرفیت باربری نهایی اشباع در حد پایین آن بین ۲/۲۸ تا ۲/۶۴ و فرفیت باربری نهایی اشباع در حد پایین آن بین ۲/۲۸ تا ۱۶/۶ مکش بافتی، ظرفیت باربری به صورت غیرخطی افزایش یافته و بزرگتری نسبت به بخش اولیه آن است و با نزدیک شدن به مکش بافتی باقی مانده، آهنگ رشد ظرفیت باربری کاهش یافته است. در نرگتری نسبت به دلیل عدم وجود فاز سیال در داخل خاک، هرچند خاک خشک به دلیل عدم وجود فاز سیال در داخل خاک، هرچند تواند نقش افزایشی مقاومت و ظرفیت باربری خاک را ایفا کند.

۱۰- مراجع

- اسماعیل پور ۱، اژدری م، "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مکش بر روی ضریب ظرفیت باربری Nγ در خاک غیراشباع"، اولین کنفرانس ملّی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، ۱۳۹۰. نظامی ع، "مطالعه ظرفیت باربری پیهای سطحی در خاک
- درشتدانه غیراشباع با تکیه بر تبیین مکانیزم گسیختگی"، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۱۳۹۳.

نیکونژاد خ، امام س م ر، "ظرفیت باربری و نشست پیهای سطحی واقع بر خاکهای غیراشباع"، هفتمین کنگره ملّی مهندسی

عمران، زاهدان، ایران، ۱۳۹۲.

- ASTM D3080-12, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2012.
- ASTM D422-63, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 1998.
- ASTM D4253-00, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils using a vibratory table", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2006.
- ASTM D4254-00, "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2000.
- ASTM D5298-03, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2003.
- ASTM D854-10, "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2010.

- Zhun Y, Vanapalli SK, "Some aspects on numerical modeling of model footing test on saturated and unsaturated sands", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17, 2833-2850.
- Bolton MD, "The strength and dilatancy of sands", Géotechnique, 1986, 36 (1), 65-78.
- Budhu M, "Soil mechanics and foundations", 3rd Edition, John Wiley and Sons, New York, 2010.
- Costa YD, Cintra JC, Zornberg JG, "Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a lateritic soil Deposit", Geotechnical Testing Journal, 2003, 26 (2), 219-226.
- Fredlund DG, Xing A, "Equations for soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31, 521-532.
- Hansen BJ, "A revised and extended formula for bearing capacity", Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, 1970, Bulletin No. 28, 5-11.
- Kumbhokjar AS, "Numerical evaluation of terzaghi's $N\gamma$ ", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 3, 598-607.
- Meyerhof GC, "Some recent research on the bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal, 1963, 1 (1), 16-26.
- Mohammed FMO, Vanapalli SK, Saatcioglu M, "Settlement estimation of shallow footings of saturated and unsaturated sands", Proceedings of GeoCongress 2012: State of the art and practice in geotechnical engineering, ASCE, Oakland, California, USA, 2012, 2552-2561.
- Oloo SY, Fredlund DG, Gan JK-M, "Bearing capacity of unpaved roads", Canadian Geotechnical Journal, 1997 34, 398-407.
- Rojas JC, Salinas LM, Seja C, "Plate-load tests on an unsaturated lean clay", Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Proceedings in Physics, Verlag Berlin Geidelberg, 2007, 112, 445-452.
- Schanz T, Lins Y, Vanapalli SK, "Bearing capacity of strip footing on an unsaturated sand", Proc. 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, 6-8 September, 2010, 1195-1200.
- Shwan BJ, Smith CC, "Application of limit analysis in soils: numerical and experimental study of bearing capacity", 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT2014, Sydney, Australia, 2-4 July, 2014, 1757-1762.
- Steensen-Bach JO, Foged N, Steenfelt JS, "Capillary induced stresses-fact or fiction?", Nineth ECSMFE, Groundwater Effects in Geotechnical Engineering, Dublin, 1987, 83-89.
- Terzaghi K, "Theoretical soil mechanics", John Wiley and Sons, New York, 1943.
- Vanapalli SK, Mohamed FMO, "Bearing capacity of model footings in unsaturated soils", Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Proceedings in Physics, Verlag Berlin Geidelberg, 2007, 112, 483-493.
- Vanapalli SK, Sun R, Li X, "Bearing capacity of an unsaturated sand from model Footing tests", Proc. 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, 6-8 September, 2010, 1217-1222.
- Vesić AS, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1973, 99 (SM1), 45-73.
- Xu Y, "Bearing capacity of unsaturated expansive soils", Geotechnical Geolgical Engineering, 2004, 22, 611-625.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study on Bearing Capacity of Shallow Footings Based on Sand in Saturated and Unsaturated Conditions

Zolfaghar Safarzadeh^{a,*}, Mohammad Hosein Aminfar^b

^a Department of Civil Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran ^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 13 January 2019; Accepted: 15 July 2019

Keywords:

Shallow footing, Experimental model, Bearing capacity, Matric suction, Unsaturated soil.

1. Introduction

Bearing capacity is one of the key parameters for the design of shallow footings. In many parts of the planet, which are in dry or semi-arid climates, surface soils are in dry or unsaturated conditions. However, in most of the previous studies, soil bearing capacity is estimated assuming completely saturated soil condition and ignoring the effects of stresses caused by capillary or matric suction. This assumption leads to a non-economic footing design. In the present study, the effects of the degree of saturation of the soil on the bearing capacity of the square and rectangular footings based on dense granular soil have been investigated experimentally. Furthermore, the effects of the length of the shallow footing on its bearing capacity in unsaturated soil condition has been studied.

2. Methodology

2.1. Physical and Mechanical Properties of the tested soil

The experiments are carried out using GOOMTAPEH sand. The physical properties of the tested sand include: specific gravity, parameters of the sieve analysis grading curve, and the maximum and minimum void ratio determined using the procedure given by ASTM standard test methods D4254 and D4253. Mechanical properties include effective internal friction angle (φ '), effective cohesion (c'), and the dilatancy angle (ψ). These parameters are obtained by performing a direct shear test in a saturated state, presented by ASTM standard test method D3080. Table 1 shows the physical and mechanical properties of the tested sand.

| Table 1. Physical and mechanical properties of the tested soil | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|------------------|------------------|---------|--------------------|------|
| Gs | D ₆₀ (mm) | D ₃₀ (mm) | D ₁₀ (mm) | Cu | Cc | USCS | e _{max} | e _{min} | c'(kpa) | $\varphi'(^\circ)$ | ψ(°) |
| 2.636 | 0.35 | 0.25 | 0.20 | 1.75 | 0.89 | SP | 0.775 | 0.523 | 0 | 33.6 | 0~14 |

USCS : Unified Soil Classification System

2.2. Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)

In the literature of unsaturated soil mechanics, the soil-water retention curve or the soil-water characteristic curve describes the variations in matric suction with changes in moisture or degree of soil saturation. Many properties of unsaturated soils, including hydraulic properties, strength properties, and flexibility characteristics, are interpreted using the curve. For the sand used in this research, first, the curve data were extracted using Whatman No.42 filter paper-based on ASTM D5298 standard, then, according to the conventional method provided by Fredlund and Xing (1994), the best curve fitted to the measured data. Fig. 1

^{*} Corresponding Author

E-mail addresses: safarzadeh@iauardabil.ac.ir (Zolfaghar Safarzadeh), aminfar@tabrizu.ac.ir (Mohammad Hosein Aminfar).

shows the characteristic curve. According to this curve, the air entry value (AEV), residual suction (ψ_r), and the residual degree of saturation (*Sr*) are estimated 1.2 kPa, 4.0 kpa and 14%, respectively.

Fig. 1. Soil-water characteristic curve for GOOMTAPEH sand

2.3. Test Setup and Experiment Plans

Fig. 2 (a) shows the details of equipment specially designed to determine the bearing capacity of soils using model footings. This equipment has special provisions to achieve fully saturated conditions of the compacted sand layer in the test tank. The water table level in the test tank can be adjusted to the desired level using a drainage valve, and the capillary tension (i.e., matric suction) variation with respect to depth in the unsaturated soil zone below the model footing is measured using Tensiometers. Fig. 2 (b) schematically shows the arrangement of the Tensiometers and the locations of the sampling molds in the soil tank.

Fig. 2. Test setup : a) Test equipment with supplements, b) Schematic view of tensiometers and sampling molds arrangement

The plate load test was performed by using the steel plate of 10 cm width, with a length to width ratio of 1, 2 and 3 under different soil moisture conditions: dry, unsaturated (three different conditions: 1'th unsaturated state: GWT=-100mm, 2'nd unsaturated state: GWT=-300mm and 3'rd unsaturated state: GWT=-500mm) and submerged state in the soil tank with length, width and depth of 1m. Since, in different modes of tests, the values of soil saturation and matric suction are varied in depth, to find a comparable value of these parameters for different footings, the calculation of the average values of these parameters in the depth of the effective zone of footings could be a good approach.

3. Results and discussion

Based on the plate load tests which are carried out in this study, variations of the applied stress to all three footing models versus the induced settlement were plotted in submerged, unsaturated and dry conditions of the soil. For instance, Fig. 3 (a) shows the mentioned curves for square footing. In this figure, the numbers on each curve shows the average matric suction in the depth of the effective zone. Similar curves can be plotted for two other rectangular footings. Fig. 3 (b) shows the variation of measured ultimate bearing capacity of each

three footings with average matric suction measured in the effective zone of one of them. It is observed that by increasing the suction up to the residual suction, the bearing capacity increases nonlinearly and it decreases sharply as the residual suction is approached. A detailed look at Fig. 3(b) shows that, in the middle zone of the matric suction (between the AEV and the residual suction), the increasing rate of the bearing capacity is higher than the first interval. Afterwards, the increasing rate of the bearing capacity declines. Furthermore, close to the residual suction, by decreasing the aspect ratio of the footing, the increasing rate of the bearing capacity decreases. The reason for this can be attributed to the effect of the average matric suction in the effective zone of the footings. In the square footing with a smaller effective zone compared to the rectangular footings, the average matric suction in the depth of its effective zone (4.5 kPa) more passes from the residual matric suction (4.0 kPa) compared with the rectangular footings. Consequently, the rate of increase of the bearing capacity of the rectangular footing was higher than the square footing, from the second unsaturated condition to the third one. Results show that the bearing capacity reduces by increasing the relative length of the footing in unsaturated states. For each of the three footing models, the dry ultimate bearing capacity has a significant difference with the unsaturated bearing capacity. This is attributed to the difference in the structure of the dry soil compared to the unsaturated soil. In the dry soil, due to the lack of a fluid phase, although the matric suction is very high, but the matric suction cannot play an increasing role in the strength and bearing capacity of the soil.

(a) Stress vs settlement for square footing(L/B=1) (b) Ultimate bearing capacity vs matric suction **Fig. 2.** Bearing capacity curves: a) Stress vs settlement for square footing, b) Ultimate bearing capacity vs matric suction

4. Conclusions

In this research, the ultimate bearing capacity of a square and rectangular model footings on the sand was investigated under different moisture conditions: dry, unsaturated and saturated. With increasing matric suction, the bearing capacity is increased nonlinearly and this increase in the middle region of the characteristic curve has a slope higher than the first part. As the residual suction approaches, the increasing rate of bearing capacity decreases. In the dry soil, due to the lack of a fluid phase, although the matric suction is very high, but the matric suction cannot play an increasing role in the strength and bearing capacity of the soil.

Results of the performed tests showed that in unsaturated conditions, the ultimate bearing capacity of footing depends on the soil matric suction, and in square footing can be 2.55 to 3.95 times the ultimate bearing capacity of the saturated conditions. In rectangular footings due to the larger effective depth than the square footing, the increase in ultimate bearing capacity compared to square footing was less in the same water table conditions, so that the ratio of the unsaturated bearing capacity to the bearing capacity of the saturated state is between 2.28 to 2.64 at low suction and up to between 3.96 and 4.25 in high suction values.

5. References

ASTM D5298-03, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper", American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 2003.

Fredlund DG, Xing A, "Equations for soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31, 521-532.