



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری

ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک غیراشباع با در نظر گرفتن توزیع مکش در عمق

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

دانشجو:

فرشته اکبری

تابستان ۹۸

صلى الله عليه وسلم

تقدیم بہ مہربان فرشتگانی کہ:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربہ های یکتا و
زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست

بیشکر و سپاس از

استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده که از محضر پر فیض تدریستان، بهره‌برده‌ام و بدون مساعدت ایشان انجام رساله ممکن نبود.

چکیده

طراحی شالوده بر اساس ظرفیت باربری خاک انجام می‌شود. از آنجایی که بیشتر شالوده‌ها بالای تراز آب زیرزمینی احداث می‌شوند، خاک زیر شالوده در حالت غیراشباع قرار دارد. در خاک‌های غیراشباع، ظرفیت باربری تحت تاثیر مکش در خاک است. وجود مکش حتی در مقادیر کم می‌تواند منجر به افزایش چند برابری ظرفیت باربری خاک غیراشباع در مقایسه با خاک اشباع گردد. چندین رابطه برای تعیین ظرفیت باربری خاک غیراشباع ارائه شده است که اکثرا با فرض توزیع ثابت مکش در عمق خاک و فرض دو خطی بودن پوش مقاومت برشی هستند. در حالی که در بسیاری از موارد توزیع مکش در خاک ثابت نیست. همچنین این روابط در درجه اشباع ماندگار خاک کارآئی مناسبی ندارند. در این رساله ظرفیت باربری خاک غیراشباع زیر شالوده تحت بارگذاری عمودی با استفاده از روش تعادل حدی محاسبه می‌گردد. در اینجا توزیع مکش در عمق خاک به صورت متغیر در نظر گرفته شده و رابطه به دست آمده قابل کاربرد در کلیه نواحی غیراشباع از جمله ناحیه ماندگار می‌باشد. مکانیزم گسیختگی خاک به صورت مارپیچ لگاریتمی بوده و فرض می‌گردد اصل برهم‌نهی قابل اعمال به مولفه‌های ظرفیت باربری است. همچنین در این رساله، زاویه گوه فعال خاک زیر پی نیز در حالت غیراشباع بررسی گشته و رابطه آن تعیین می‌شود. ضرائب ظرفیت باربری ناشی از مکش متغیر در حالت خاک دولایه نیز تعیین می‌شوند. نتایج محاسبات با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی محققان قبلی مقایسه می‌گردد. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ارائه شده مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: ظرفیت باربری، پی، خاک غیراشباع، مکش، تعادل حدی، خاک دولایه.

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی تحقیق و هدف از انجام آن ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۲-۱- طرح مسئله ۲

۳-۱- نوآوری های تحقیق ۳

۴-۱- فرضیات تحقیق ۳

۵-۱- روش تحقیق ۴

۶-۱- ساختار مطالب ۴

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع ۵

۱-۲- مقدمه ۶

۲-۲- تعریف خاک غیراشباع ۶

۳-۲- مقاومت برشی خاک غیراشباع ۷

۴-۲- مطالعات تئوری انجام شده جهت تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر خاک غیراشباع ۸

۵-۲- مطالعات تحلیلی انجام شده بر روی ظرفیت باربری خاک غیراشباع دو لایه ۱۱

۶-۲- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی ظرفیت باربری خاک غیراشباع ۱۴

۷-۲- مطالعات انجام شده بر روی خاک دو لایه ۲۸

۱-۷-۲- شالوده روی ماسه لایه بندی شده ۲۸

۲-۷-۲- شالوده روی رس لایه بندی شده ۲۹

۸-۲- نتیجه گیری ۳۰

فصل سوم: بررسی زاویه فعال خاک غیراشباع در حالت توزیع متغیر کش ۳۱

۱-۳- مقدمه ۳۲

۲-۳- محاسبات ۳۲

۱-۲-۳- تعیین نیروهای ایجاد شده ناشی از چسبندگی ذاتی ۳۴

۳۵	۳-۲-۲- تعیین نیروهای ناشی از وزن خاک و سربار
۳۸	۳-۲-۳- نیروهای ایجاد شده در اثر مکش بافتی
۴۰	۳-۲-۴- تعادل گوه‌های خاک
۴۶	فصل چهارم: ارائه رابطه ظرفیت باربری پی واقع بر یک لایه خاک غیر اشباع
۴۷	۴-۱- مقدمه
۴۷	۴-۲- فرض مکانیزم گسیختگی پراندل در خاک
۴۸	۴-۲-۱- ظرفیت باربری در اثر توزیع ثابت مکش در خاک
۴۸	۴-۲-۱-۱- تعیین نیروی برآیند
۵۱	۴-۲-۱-۲- تعادل گوه فعال
۵۳	۴-۲-۲- ظرفیت باربری خاک غیر اشباع در حالت توزیع خطی مکش
۵۳	۴-۲-۲-۱- تعیین نیروی برآیند
۵۵	۴-۲-۲-۲- تعادل گوه فعال
۵۸	۴-۲-۳- ظرفیت باربری خاک غیر اشباع در حالت توزیع غیر خطی مکش
۵۸	۴-۲-۳-۱- تعیین نیروی برآیند
۵۹	۴-۲-۳-۲- تعادل گوه فعال
۶۱	۴-۲-۴- بررسی ظرفیت باربری در ناحیه ماندگار غیر اشباع
۶۲	۴-۳- مقایسه نتایج با تحقیقات آزمایشگاهی
۶۷	۴-۴- فرض مکانیزم گسیختگی به صورت اسپیرال لگاریتمی پیوسته
۶۸	۴-۴-۱- ظرفیت باربری خاک غیر اشباع با مکش ثابت
۶۸	۴-۴-۱-۱- تعیین نیروی برآیند
۶۹	۴-۴-۱-۲- تعادل گوه فعال
۷۰	۴-۴-۱-۳- ارزیابی زاویه گوه فعال
۷۱	۴-۴-۱-۴- تعیین ضریب ظرفیت باربری در اثر سربار
۷۲	۴-۴-۱-۵- ارزیابی زاویه گوه فعال
۷۲	۴-۴-۲- ظرفیت باربری خاک غیر اشباع در حالت توزیع خطی
۷۲	۴-۴-۲-۱- تعیین نیروی برآیند
۷۳	۴-۴-۲-۲- تعادل گوه فعال

۷۵	۴-۳- ظرفیت باربری خاک غیراشباع با توزیع غیرخطی مکش
۷۵	۴-۳-۱- تعیین نیروی برآیند
۷۶	۴-۳-۲- تعادل گوه فعال
۷۸	۴-۴- ظرفیت باربری خاک غیراشباع در ناحیه ماندگار
۷۹	۴-۵- مقایسه بین روش ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی
۸۲	۴-۶- نتیجه گیری
۸۳	فصل پنجم: ظرفیت باربری پی واقع بر خاک دولایه غیراشباع
۸۴	۵-۱- مقدمه
۸۴	۵-۲- محاسبات
۸۴	۵-۲-۱- سیستم خاک دولایه با تغییرات ثابت چسبندگی در هر لایه
۸۸	۵-۲-۲- لایه خاک با تغییرات خطی مکش واقع بر لایه خاک نامحدود با مکش ثابت
۸۹	۵-۲-۳- تعیین ظرفیت باربری خاک دولایه با تغییرات خطی مکش در هر لایه
۹۲	۵-۳- مقایسه نتایج ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی
۹۴	۵-۴- ظرفیت باربری خاک دولایه ریزدانه غیراشباع
۹۴	۵-۴-۱- ظرفیت باربری خاک دو لایه با فرض مکش ثابت در هر لایه
۹۶	۵-۴-۲- مقایسه مدل ارائه شده با نتایج محققین دیگر
۱۰۰	۵-۴-۳- ظرفیت باربری برای لایه‌ای با تغییرات خطی مکش واقع بر لایه‌ای با مکش ثابت
۱۰۳	۵-۴-۴- ظرفیت باربری خاک دولایه با تغییرات خطی مکش
۱۰۷	۵-۵- نتیجه گیری
۱۰۸	فصل ششم: نتایج و تحقیقات آتی
۱۰۹	۶-۱- نتیجه گیری و کاربرد
۱۱۱	مراجع
۱۱۵	پیوست

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: منحنی درجه اشباع - مکش بافتی برای یک محیط متخلخل فرضی ۶
- شکل ۲-۲: مقایسه ظرفیت باربری خاک غیراشباع [15] ۱۰
- شکل ۳-۲: ضریب ظرفیت باربری نسبت به عمق لایه بالایی H_1 به عرض پی B . الف) ضریب Nc ب) ضریب $N\gamma$ [17] ۱۲
- شکل ۴-۲: ظرفیت باربری کل خاک دولایه نسبت به عمق لایه خاک بالایی H_1 ، به عرض پی [17] ۱۲
- شکل ۵-۲: دایره لغزش تحلیل ظرفیت باربری [18] ۱۴
- شکل ۶-۲: رابطه بین تنش اعمالی به نشست برای مدل پی با ابعاد $100mm \times 100mm$ [10] ۱۵
- شکل ۷-۲: محاسبه تنش میانگین زیر پی [10] ۱۵
- شکل ۸-۲: منحنی مشخصه به دست آمده از دو روش مستقیم و یک روش تقریبی [10] ۱۶
- شکل ۹-۲: مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی برای پی با ابعاد $100mm \times 100mm$ [10] ۱۷
- شکل ۱۰-۲: رابطه بین پارامتر انطباق ظرفیت باربری، Ψ ، و شاخص خمیری I_p [10] ۱۷
- شکل ۱۱-۲: ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای پی با ابعاد $150mm \times 150mm$ [20] ۱۸
- شکل ۱۲-۲: نتایج آزمایش مدل پی در خاک ریزدانه به ازای مقادیر مختلف مکش بافتی [22] ۱۹
- شکل ۱۳-۲: منحنی مشخصه آب-خاک ماسه هوستون [23] ۲۰
- شکل ۱۴-۲: مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی ۲۱
- شکل ۱۵-۲: نمایی از دستگاه ظرفیت باربری خاک غیراشباع [24] ۲۲
- شکل ۱۶-۲: منحنی مشخصه آب - خاک ماسه استفاده شده [24] ۲۲
- شکل ۱۸-۲: زاویه گوه فعال ماسه غیراشباع در درجه اشباع ۲۵ درصد [24] ۲۴
- شکل ۱۹-۲: تغییرات مکش در عمق خاک ۲۵
- شکل ۲۰-۲: نتایج آزمایشات UC [25] ۲۶
- شکل ۲۱-۲: ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده توسط اوه و ونابلی [25] ۲۶
- شکل ۲۳-۲: ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده توسط روجاس و همکاران [28] ۲۸
- شکل ۲۴-۲: تغییرات $\frac{C_a}{C_{u(1)}}$ طبق نظر مایرهوف و هانا [29] ۳۰
- شکل ۱-۳: مکانیزم گسیختگی برشی کلی خاک زیر پی ۳۲
- شکل ۲-۳: دیاگرام گوه‌ها. الف) تعادل ناحیه برش شعاعی و گوه مقاوم. ب) تعادل گوه فعال ۳۳

شکل ۳-۳: توزیع خطی مکش در عمق خاک	۳۳
شکل ۴-۳: نیروهای ناشی از چسبندگی	۳۴
شکل ۵-۳: تعیین مولفه‌های نیروی نرمال برآیند	۳۷
شکل ۶-۳: تغییرات α نسبت به مکش به ازای الف) وزن مخصوص خاک. ب) عرض پی. ج) زاویه اصطکاک خاک	۴۴
شکل ۷-۳: مقایسه زاویه گوه فعال محاسبه شده در حالت مکش متغیر و حالت اشباع	۴۵
شکل ۱-۴: مکانیزم گسیختگی فرض شده	۴۷
شکل ۲-۴: نیروهای موثر بر گوه الاستیک ناشی از مکش بافتی	۴۸
شکل ۳-۴: پوش مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع در حالت تنش نرمال صفر	۴۹
شکل ۴-۴: دیاگرام آزاد گوه YZIF ناشی از مکش بافتی	۵۰
شکل ۵-۴: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش ثابت، سربار و وزن مخصوص نسبت به زاویه اصطکاک	۵۳
شکل ۶-۴: تغییرات خطی مکش بافتی	۵۴
شکل ۷-۴: ایده‌آل سازی تغییرات چسبندگی ناشی از توزیع خطی مکش بافتی در عمق خاک	۵۴
شکل ۸-۴: تغییرات ضریب ظرفیت باربری ناشی از توزیع خطی مکش نسبت به زاویه اصطکاک خاک در ترازهای مختلف آب زیرزمینی	۵۷
شکل ۹-۴: ایده‌آل سازی تغییرات چسبندگی ناشی از توزیع غیرخطی مکش در عمق	۵۸
شکل ۱۰-۴: تغییرات ضریب ظرفیت باربری ناشی از توزیع غیرخطی مکش نسبت به زاویه اصطکاک خاک در ترازهای مختلف آب زیرزمینی	۶۱
شکل ۱۱-۴: مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی	۶۳
شکل ۱۲-۴: تغییرات ظرفیت باربری نسبت به چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک خاک غیراشباع	۶۴
شکل ۱۳-۴: تغییرات ظرفیت باربری نسبت به مقدار مکش در سطح زمین	۶۵
شکل ۱۴-۴: تغییرات ظرفیت باربری نسبت به تراز آب زیرزمینی	۶۵
شکل ۱۵-۴: مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ظرفیت باربری خاک ریزدانه غیراشباع	۶۶
شکل ۱۶-۴: تغییرات ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی	۶۶
شکل ۱۷-۴: مکانیزم گسیختگی فرض شده	۶۷
شکل ۱۸-۴: دیاگرام آزاد گوه YZG ناشی از مکش بافتی	۶۸
شکل ۱۹-۴: تعادل گوه فعال	۷۰
شکل ۲۰-۴: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش ثابت و سربار نسبت به زاویه اصطکاک داخلی با فرض اسپیرال لگاریتمی پیوسته	۷۲

- شکل ۴-۲۱: تغییرات هیدروستاتیک مکش بافتی ۷۳
- شکل ۴-۲۲: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در حالت مکش خطی با فرض منحنی گسیختگی اسپیرال لگاریتمی ۷۵
- شکل ۴-۲۳: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در اثر توزیع غیرخطی مکش نسبت به زاویه لسطکاک و تراز آب زیرزمینی با فرض منحنی گسیختگی اسپیرال لگاریتمی ۷۸
- شکل ۴-۲۵: مقایسه بین نتایج اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ظرفیت باربری ۸۰
- شکل ۴-۲۶: تغییرات ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی ۸۱
- شکل ۴-۲۷: مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به مکش بافتی ۸۱
- شکل ۵-۱: مکانیزم گسیختگی فرض شده در خاک دولایه ۸۵
- شکل ۵-۲: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش ثابت در هر لایه، به ازای زوایای اصطکاک مختلف ۸۸
- شکل ۵-۳: تغییرات چسبندگی ناشی از مکش نسبت به عمق ۸۸
- شکل ۵-۴: تغییرات چسبندگی ناشی از مکش نسبت به عمق ۹۰
- شکل ۵-۵: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش خطی در هر دو لایه و $m = n$ ۹۱
- شکل ۵-۶: مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده خاک ریزدانه غیراشباع ۹۲
- شکل ۵-۷: مقایسه ضریب ظرفیت باربری ناشی از مکش ۹۳
- شکل ۵-۸: مکانیزم گسیختگی فرض شده در روش اولو و همکاران [17] ۹۴
- تصویر ۵-۹: سطح گسیختگی خاک دولایه ریزدانه ۹۵
- شکل ۵-۱۰: مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته شده در روش [35] Chen & Davidson ۹۷
- شکل ۵-۱۱: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش ثابت ۱۰۰
- شکل ۵-۱۲: تغییرات چسبندگی ناشی از مکش نسبت به عمق ۱۰۰
- شکل ۵-۱۳: تغییرات ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش، زمانی که توزیع مکش در لایه اول خطی و در لایه دوم ثابت باشد ۱۰۳
- شکل ۵-۱۴: تغییرات چسبندگی ناشی از مکش در عمق ۱۰۳
- شکل ۵-۱۵: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش، زمانی که توزیع مکش در لایه اول ثابت و در لایه دوم خطی باشد ۱۰۶
- شکل ۵-۱۶: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش خطی در هر دو لایه $m = 3n$ ۱۰۶

فهرست جداول

جدول ۱-۲: خواص خاک آزمایش شده [20]	۱۸
جدول ۲-۲: خواص ماسه هوستون [23]	۲۰
جدول ۳-۲: خواص خاک استفاده شده در تحلیل [25]	۲۵
جدول ۴-۲: خواص خاک آزمایش شده [28] و مقادیر ظرفیت باربری	۲۷
جدول ۱-۳: محدوده مقادیر در نظر گرفته شده برای تحلیل	۴۳
جدول ۱-۵: مقادیر ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش ثابت $(Ns)_{u-u}$	۹۸
جدول ۲-۵: ضرائب ظرفیت باربری در اثر مکش $(Ns)l-u$ ، در حالتی که توزیع مکش در لایه بالایی خطی و در لایه پایینی یکنواخت است.	۱۰۲
جدول ۳-۵: مقدار ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش زمانی که توزیع مکش در لایه اول ثابت و در لایه دوم خطی باشد	۱۰۵
جدول ۱: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش در حالتی که توزیع مکش در لایه بالایی خطی و در لایه پایینی ثابت است	۱۱۵
جدول ۲: ضریب ظرفیت باربری در اثر مکش خطی در هر دو لایه	۱۱۸

فهرست علائم و اختصارات

a	مکش مربوط به مکش نظیر ورود هوا
A_a	مساحتی از حفره که توسط هوا اشغال شده است.
A_{tw}	مساحت کل آب در اشباع ۱۰۰ درصد
AEV	مقدار مکش متناظر با ورود هوا
B	عرض پی
b_1	پارامتر انطباق
b_2	پارامتر انطباق
C	ثابت نسبیت
C_{AEV}	مقاومت برشی در مکش نظیر ورود هوا
C_r	مقدار مکش متناظر با محتوای حجمی آب ماندگار θ_r
$C_{u(sat)}$	مقاومت برشی زهکشی نشده اشباع
$C_{u(unsat)}$	مقاومت برشی زهکشی نشده غیراشباع
CW	مقدار آب ثابت
C_0	مقاومت برشی زهکشی نشده در مکش بافتی صفر
c'	چسبندگی موثر
c''	چسبندگی موثر اصلاح شده
D_f	عمق مدفون پی
e	نسبت تخلخل
$E_{s(sat)}$	مدول الاستیسیتة ماسه اشباع
$E_{s(unsat)}$	مدول الاستیسیتة ماسه غیراشباع
E_{unsat}	مدول الاستیسیتة تحت شرایط غیراشباع
ESA	روش تنش موثر
F_c	ضریب عمق
F_q	ضریب عمق
F_γ	ضریب عمق
G_s	وزن مخصوص
I_p	شاخص خمیری
L	طول پی
m	پارامتر خاک مربوط به محتوای حجمی آب ماندگار
N_c	پارامتر ظرفیت باربری در اثر چسبندگی

N_{CW}	ضریب ظرفیت باربری نسبت به مقدار آب ثابت
N_q	پارامتر ظرفیت باربری در اثر سربار
N_γ	پارامتر ظرفیت باربری در اثر وزن واحد
p	پارامتر انطباق
P_a	فشار اتمسفر
P_p	فشار مقاوم
PSF	گسیختگی برشی پانچ
q	فشار سربار
q_{app}	فشار پی
$q_{c(sat)}$	مقاومت متوسط مخروط ماسه اشباع
$q_{c(unsat)}$	مقاومت متوسط مخروط ماسه غیراشباع
q_u	ظرفیت باربری نهایی
$q_{u(unsat)}$	مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک غیراشباع
$q_{ult(unsat)}$	ظرفیت باربری نهایی برای خاک غیراشباع
r	شعاع سطح لغزش
S	درجه اشباع
s	مکش
S_e	درجه اشباع موثر
S_e	مقدار مکش در انتقال بین حالت اشباع و غیراشباع
S_r	درجه اشباع ماندگار
SWCC	منحنی مشخصه آب-خاک
SWRC	منحنی حفظ آب-خاک
$\tan \phi'$	زاویه مقاومت اصطکاکی در اثر مکش بافتی
TSA	روش تنش کل
u_a	فشار هوای حفره‌ای
u_w	فشار آب حفره‌ای
$(u_a - u_w)_{AVR}$	مکش بافتی میانگین
$(u_a - u_w)_b$	مقدار مکش متناظر با ورود هوا
$(u_a - u_w)_f$	مکش بافتی نمونه در زمان گسیختگی
$(u_a - u_w)_r$	مقدار مکش متناظر با محتوای حجمی آب ماندگار θ_r
UFG	خاک ریزدانه غیراشباع
w	میزان آب وزنی

σ	تنش نرمال کل
σ_n	تنش نرمال کل
τ_{unscd}	مقاومت برشی خاک غیراشباع
τ_{us}	مولفه مقاومت برشی به علت مکش
θ	محتوای حجمی آب
θ_e	محتوای حجمی آب موثر
θ_r	محتوای حجمی آب در شرایط ماندگار
θ_s	محتوای حجمی آب اشباع
θ_w	محتوای حجمی آب
Θ	محتوای حجمی آب نرمالیزه شده
ρ_d	چگالی خشک خاک
γ	وزن واحد
ψ	مکش کل خاک
Ψ	پارامتر انطباق ظرفیت باربری
ϕ'	زاویه مقاومت اصطکاکی
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی موثر اصلاح شده
K	پارامتر انطباق
ξ_c	ضریب شکل در اثر چسبندگی
ξ_{CW}	ضریب شکل نسبت به شرایط مقدار آب ثابت
ξ_q	ضریب شکل در اثر سربار
ξ_γ	ضریب شکل در اثر وزن واحد
μ	پارامتر انطباق
ν	پارامتر انطباق
δ	نشست

فصل اول: معرفی تحقیق و هدف از انجام آن

۱-۱- مقدمه

با توجه به اینکه سفره آب زیرزمینی نواحی خشک و نیمه خشک در عمق زیاد است، تنش شالوده‌های سطحی در ناحیه بالای سطح آب زیرزمینی توزیع می‌شود که در این ناحیه فشار آب حفره‌ای نسبت به فشار اتمسفر منفی است و خاک به صورت غیراشباع عمل می‌نماید. در حالتی که خاک‌های این نواحی اشباع نشوند طراحی بهینه شالوده‌ها در نواحی خشک و نیمه خشک بایستی بر اساس مکانیک خاک غیراشباع انجام شود تا از حداکثر مقاومت خاک استفاده شود.

ظرفیت باربری و نشست دو خاصیت کلیدی لازم در طراحی شالوده‌ها به شمار می‌روند. ظرفیت باربری و مدول الاستیسیته خاک غیراشباع عموماً در عمل با فرض حالت اشباع خاک به دست می‌آیند، در صورتی که در قسمت عمده مدت زمان بهره‌برداری از شالوده‌ها حالت غیراشباع حاکم است. با توجه به اینکه استفاده از روش‌های خاک اشباع در مسائل مربوط به خاک غیراشباع منجر به طراحی غیراقتصادی پروژه می‌گردد در این رساله ظرفیت باربری خاک غیراشباع به صورتی که ساده و قابل استفاده توسط مهندسين ژئوتکنیک باشد، بررسی شده و روابط آن تعیین گردد.

۱-۲- طرح مسئله

هدف از انجام این رساله تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر خاک غیراشباع است، اما از طرفی توزیع مکش در خاک بستگی به عواملی نظیر دانه‌بندی خاک و تخلخل خاک دارد که موجب می‌شود توزیع مکش در خاک ثابت نباشد. در بیشتر تحقیقات انجام شده، جهت تعیین بار نهایی پی، فرض مکش ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین روابط ارائه شده در ناحیه غیراشباع ماندگار قابل استفاده نیستند. بنابراین در این رساله ابتدا رفتار پی با فرض توزیع ثابت مکش و سپس توزیع خطی و غیرخطی مکش در خاک بررسی می‌گردد و رابطه ظرفیت باربری با فرم ساده‌ای ارائه خواهد شد که قابل استفاده برای مهندسين ژئوتکنیک باشد.

به دلیل اینکه ممکن است خاک زیر پی همگن نباشد، رفتار خاک دولایه غیراشباع با در نظر گرفتن توزیع متغیر مکش در عمق نیاز به بررسی دارد و ضرائب ظرفیت باربری بایستی تعیین گردند.

۱-۳- نوآوری‌های تحقیق

در این رساله رفتار پی واقع بر خاک غیراشباع با توزیع غیرخطی مکش برای اولین بار به صورت تحلیلی بررسی شده و رابطه ظرفیت باربری پی ارائه می‌گردد. زاویه گوه فعال خاک غیراشباع زیر پی با در نظر گرفتن توزیع خطی مکش در خاک بررسی می‌شود. بار نهایی پی واقع بر خاک دولایه غیراشباع با فرض پروفیل‌های مختلف توزیع مکش تعیین شده و ضرائب ظرفیت باربری در قالب جدول و نمودار ارائه می‌شوند.

۱-۴- فرضیات تحقیق

در این رساله فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

(۱) طول پی به اندازه کافی از عرض پی بزرگتر بوده بنابراین شرایط کرنش مسطح برقرار است.

(۲) خاک زیر پی در هر لایه بدون وزن، همگن و ایزوتروپ است.

(۳) اصل برهم‌نهی قابل اعمال به مولفه‌های ظرفیت باربری می‌باشد.

(۴) مکانیزم گسیختگی برشی کلی برای خاک لایه‌ای برقرار است.

(۵) از تنش برشی در فصل مشترک لایه‌های خاک صرف‌نظر می‌شود.

(۶) در خاک دولایه، شکل مارپیچ لگاریتمی توسط پارامترهای برشی هر دو لایه کنترل می‌گردد.

۱-۵- روش تحقیق

در این رساله در ابتدا با استفاده از روش تعادل حدی، زاویه گوه فعال خاک غیراشباع با توزیع خطی مکش تعیین می‌شود، بدین منظور تعادل لنگر و تعادل نیروها در جهت x و y نوشته می‌شود، در قسمت بعد رابطه ظرفیت باربری پی واقع بر خاک غیراشباع در حالت تک‌لایه و دولایه با توزیع مختلف مکش نوشته می‌شود و ضرائب ظرفیت باربری ارائه می‌گردند. در اینجا نیز از روش تعادل حدی جهت تعیین بار نهایی استفاده می‌شود و در ادامه نتایج ارائه شده با نتایج نیمه تجربی و تجربی تحقیقات پیشین مقایسه می‌گردد.

۱-۶- ساختار مطالب

پس از بیان اهداف و ضرورت تحقیق در این فصل، در فصل دوم به آشنایی مقدماتی با خاک غیراشباع و مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه ظرفیت باربری خاک غیراشباع پرداخته می‌شود. در فصل سوم، مقدار زاویه گوه فعال خاک در حالت مکش خطی بررسی و تحلیل می‌شود. در فصل چهارم به تعیین ظرفیت باربری خاک غیراشباع در حالت‌های مختلف توزیع مکش پرداخته می‌شود. ضرائب ظرفیت باربری در اثر مکش بر اساس نمودار تغییر مکش در خاک، تعیین شده و نمودار آنها رسم می‌گردد. فصل پنجم به بررسی ظرفیت باربری خاک دولایه می‌پردازد. فصل ششم نتیجه‌گیری از مطالب مطرح شده بوده و در انتها منابع و مراجع استفاده شده ذکر گردیده است.

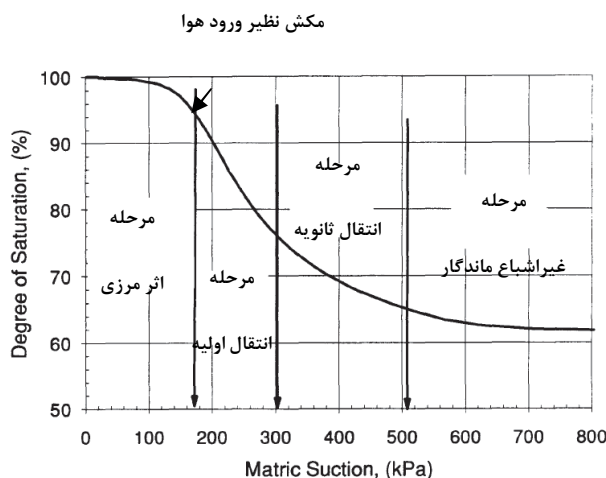
فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱- مقدمه

در این فصل تعریف خاک غیراشباع و تحقیقاتی که بر روی ظرفیت باربری پی واقع بر خاک غیراشباع انجام شده، آورده شده است.

۲-۲- تعریف خاک غیراشباع

معمولا خاک غیراشباع از سه فاز جامد (ذرات خاک)، فاز سیال و فاز گاز تشکیل می‌شود. در این خاک نیروی مکش در فصل مشترک ذره-آب-هوا نقش مهمی بازی می‌کند. معمولا این نیرو با خشک شدن پیوسته خاک افزایش می‌یابد و با مرطوب شدن آن روند رو به کاهش خواهد داشت. رابطه بین مکش و مقدار آب موجود در خاک را منحنی مشخصه آب-خاک^۱ (SWCC) می‌نامند. مقدار آب می‌تواند بر حسب درصد رطوبت w ، محتوای حجمی آب θ ، یا درجه اشباع S_r اندازه‌گیری شود. مطابق شکل ۱-۲ در منحنی مشخصه آب-خاک سه قسمت وجود دارد: مرحله اثر مرزی^۲، مرحله انتقال^۳ (شامل مراحل انتقال اولیه و ثانویه) و مرحله غیراشباع ماندگار^۴.



شکل ۱-۲: منحنی درجه اشباع - مکش بافتی برای یک محیط متخلخل فرضی

¹ Soil-Water Characteristic Curve

² Boundary effect stage

³ Transition stage

⁴ Residual stage of unsaturation

۲-۳- مقاومت برشی خاک غیراشباع

تعیین آزمایشگاهی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی گران و پیچیده دارد و از طرفی زمان‌بر نیز هست. به این دلیل طی دهه گذشته محققان بسیاری روش‌های نیمه تجربی را برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع ارائه داده‌اند. در اکثر این روش‌ها از پارامترهای مقاومت برشی خاک اشباع c' ، ϕ' ، داده‌های منحنی مشخصه و همچنین از پارامتر انطباق استفاده می‌شود.

از مکش متناظر با ورود هوا تا شرایط ماندگار آن، مقاومت برشی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. مقاومت برشی خاک‌هایی نظیر ماسه‌ها، سیلت‌ها و بعضی از رس‌ها بعد از حد مشخصی از مکش افت می‌کند. می‌توان فرض کرد که این افت در مقاومت برشی نزدیک مکش ماندگار شروع می‌شود. بعضی خاک‌ها می‌توانند مقاومت برشی نسبتاً ثابتی را در محدوده بزرگی از مکش از خود نشان دهند.

مقاومت برشی خاک غیراشباع بعد از شروع حالت ماندگار ممکن است نسبتاً ثابت باشد و یا کاهش یا افزایش یابد. تحقیقاتی آزمایشگاهی وجود دارد که نشان می‌دهد مقاومت برشی کاهش می‌یابد [1,2]. خاک‌هایی مانند شن و ماسه مقاومت برشی آنها در مقادیر کم مکش ممکن است کاهش یابد. نتایج دونالد^۵ [2] افت در مقاومت برشی بعد از مقدار مکش ۱۵-۱۰ کیلوپاسکال برای چهار ماسه مختلف مورد آزمایش را نشان می‌دهد. برای خاک‌هایی که درصد ریزدانه بیشتری دارند، مقاومت برشی تنها در مقادیر بالای مکش افت می‌کند. اسکاریو و جوکا^۶ [1] مشاهده نمودند که مقاومت برشی برای ماسه رس‌دار تا مکش ۱ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و برای مکش ۱ تا ۴ مگاپاسکال مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

خاک‌های ویژه‌ای مانند رس‌های با پلاستیسیته بالا، ممکن است حالت غیراشباع ماندگار مشخصی نداشته باشند. مقاومت برشی چنین خاک‌هایی حتی در مقادیر نسبتاً بالای مکش افزایش می‌یابد. اسکاریو و جوکا

⁵Donald

⁶Escario & Juca

[1] افزایش مقاومت برشی رس قرمز گوادالیکس^۷ را در مکش بالای ۱۰ مگاپاسکال گزارش داده‌اند. حالت ماندگار خاک‌های با پلاستیسیته بالا تنها زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار آب در خاک نزدیک صفر باشد [3].

۲-۴- مطالعات تئوری انجام شده جهت تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر خاک غیراشباع

چندین محقق به بررسی ظرفیت باربری خاک‌های غیراشباع پرداخته‌اند [4-8]. تمام این مطالعات نشان از اثر قابل توجه مکش بافتی بر ظرفیت باربری خاک‌های غیراشباع دارند.

ترزاقی^۸ در سال ۱۹۴۳ [9] رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک همگن و در معرض بارگذاری عمودی ارائه نمود.

$$q_u = c'N_c + qN_q + 0.5B\gamma N_\gamma \quad (۱-۲)$$

که q_u ظرفیت باربری نهایی (kPa)، q فشار سربار (kPa)، c' چسبندگی موثر (kPa)، N_c ، N_q ، N_γ ، پارامترهای ظرفیت باربری به ترتیب در اثر چسبندگی، سربار و وزن واحد، γ وزن واحد خاک (kN / m^3) و B عرض پی (m) است.

رابطه ۱-۲ را می‌توان اصلاح نمود تا ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک‌های غیراشباع را با احتساب اثر مقاومت برشی به علت وجود مکش محاسبه کند [10]:

$$q_u = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] N_c + 0.5B\gamma N_\gamma \quad (۲-۲)$$

که u_a فشار هوای حفره‌ای، u_w فشار آب حفره‌ای و $\tan \phi^b$ اثر مکش بر مقاومت برشی است. وناپلی^۹ و همکارانش [3] رابطه‌ای برای $\tan \phi^b$ ، به صورت $\tan \phi^b = S^\kappa \tan \phi'$ پیشنهاد دادند که S درجه اشباع

⁷Guadalix red clay

⁸ Terzaghi

است. ترم $S^{\kappa} \tan \phi'$ تغییرات غیرخطی مقاومت برشی خاک غیراشباع را با استفاده از پارامتر انطباق κ نشان می‌دهد. همچنین وناپلی و محمد [10] ضرائب شکل وسیک را در رابطه ظرفیت باربری لحاظ نموده و معادله ۳-۲ را پیشنهاد دادند.

$$q_u = [c' + (u_a - u_w) S^{\Psi} \tan \phi'] N_c \xi_c + 0.5 B \gamma N_{\gamma} \xi_{\gamma} \quad (3-2)$$

که Ψ پارامتر انطباق ظرفیت باربری و ξ_c ، ξ_{γ} ضرائب شکل وسیک^{۱۰} [11] هستند.

رابطه ۳-۲ را می‌توان با احتساب مکش نظیر ورود هوا به صورت رابطه ۴-۲ نوشت [10]. طبق رابطه زیر، در مکش‌های کوچکتر از مکش متناظر با ورود هوا، اثر مکش بافتی بر ظرفیت باربری برابر $(u_a - u_w)_b (\tan \phi' - S^{\Psi} \tan \phi')$ است.

$$q_u = [c' + (u_a - u_w)_b (1 - S^{\Psi}) \tan \phi' + (u_a - u_w)_{AVR} S^{\Psi} \tan \phi'] \times N_c \left[1.0 + \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \left(\frac{B}{L} \right) \right] + 0.5 B \gamma N_{\gamma} \left[1.0 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right) \right] \quad (4-2)$$

که $(u_a - u_w)_{AVR}$ مقدار مکش میانگین فرض شده در خاک و L طول پی است. ضرائب ظرفیت باربری در اثر چسبندگی، N_c ، سربار N_q و وزن واحد N_{γ} توسط محققین مختلف به دست آمده است [9,12,11,13]. ضرائب N_c و N_q بدست آمده از بیشتر محققین تقریباً یکسان هستند. می‌توان این ضرائب را از روش ترزاقی [9] محاسبه کرد اما موافقت عمومی نسبت به ضریب ظرفیت باربری N_{γ} وجود ندارد. مقادیر پیشنهاد شده N_{γ} توسط محققین مختلف با هم متفاوت است [9,12,11]. برای تعیین

⁹Vanapalli et al.

¹⁰ Vesic

ضرائب ظرفیت باربری از روش‌های عددی نیز کمک گرفته شده، برای مثال کامبھوکجار^{۱۱} [13] مطالعات گسترده‌ای انجام داده و مقدار N_γ را بر اساس تحلیل عددی پیشنهاد داد.

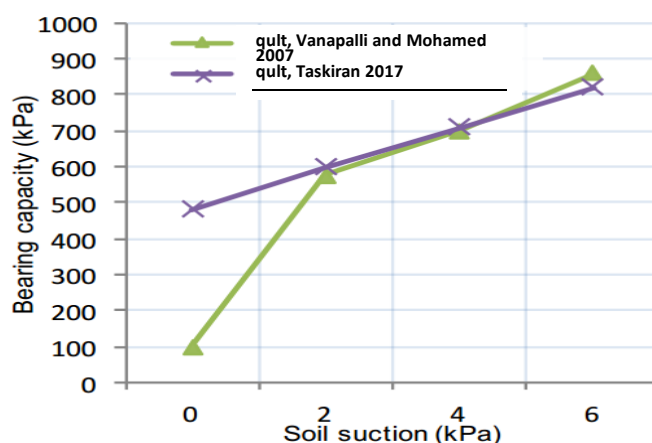
تسکیران^{۱۲} [15] روشی تحلیلی جهت تعیین ظرفیت باربری خاک غیراشباع ارائه نمود. به این منظور چسبندگی کل خاک به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$c_{Total} = c' + \tan \phi' (u_a - u_w)_b + P_{at} \ln \left[\frac{(u_a - u_w) + P_{at}}{P_{at}} \right] \quad (5-2)$$

با فرض مکش ثابت در خاک، ظرفیت باربری کل به صورت رابطه زیر پیشنهاد گردید [15].

$$q_u = \left[c' + \tan \phi' (u_a - u_w)_b + P_{at} \ln \left[\frac{(u_a - u_w) + P_{at}}{P_{at}} \right] \right] N_c \varepsilon_c + 0.5 B \gamma N_\gamma \varepsilon_\gamma \quad (6-2)$$

که ε_c و ε_γ به ترتیب ضرایب شکل میرهوف در اثر چسبندگی و وزن مخصوص هستند. شکل ۲-۲ مقایسه رابطه ارائه شده توسط تسکیران [15] و وناپلی و محمد [16] را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: مقایسه ظرفیت باربری خاک غیراشباع [۱۵]

¹¹ Kumbhokjar

¹² Taskiran