

بررسی اثر شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی ماسه‌یی محدب در پلان در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن‌ها

داود اذان* (کارشناس ارشد)

مجتبی جهان‌اندیش (دانشیار)

ارسلان قهرمانی (استاد)

بخش مهندسی راه و ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۲، ص. ۵۵-۴۷

ظرفیت باربری پی‌های محدود واقع بر شیروانی‌های خاکی محدب موضوعی سه بعدی است که فرض دوبعدی آن نمی‌تواند جواب‌های دقیقی را ارائه کند. بنابراین به منظور اینکه بتوان نتایجی کاربردی و قابل استفاده برای مهندسان در محاسبه ظرفیت باربری پی‌های واقع بر سطح شیروانی خاکی محدب به دست آورد، از یک نرم‌افزار اجزاء محدود قوی به نام آباکوس، که قابلیت به‌کاربردن مدل جامع خاکی موهر کلمب را در حالت سه بعدی داشته باشد، برای به‌دست‌آوردن اثر انحناء شیروانی‌های خاکی محدب در پلان در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن استفاده شده است. چون نتایج برای خاک‌های رسی و ماسه‌یی متفاوت است، لذا در این نوشتار فقط به نتایج حاصل برای خاک‌های ماسه‌یی پرداخته شده و اثر سایر پارامترها نیز علاوه بر اثر انحناء بررسی شده است. نتایج حاکی از این مطلب است که با افزایش شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی محدب ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، که این نتایج به‌صورت نمودارهای کاربردی برای استفاده‌ی مهندسان نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، شیروانی‌های خاکی محدب، اجزاء محدود، شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی.

۱. مقدمه

وقتی که بر پی بار وارد می‌شود، وضعیت تنش در همسایگی کف آن به‌تدریج از حالت کشسان به خمیری تغییر می‌کند. جریان خمیری از گوشه‌ی پی شروع می‌شود و با افزایش بار، ناحیه‌ی خمیری در سطحی منحنی گسترش می‌یابد، تا اینکه کاملاً خاک زیر پی را دربرگیرد. به میزان بار در این مرحله ظرفیت باربری نهایی خاک گفته می‌شود. بررسی ظرفیت باربری پی‌ها همواره یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. در مهندسی ژئوتکنیک تلاش‌های زیادی برای

$$q_{ult} = c.N_c + q.N_q + \gamma.B.N_\gamma \quad (1)$$

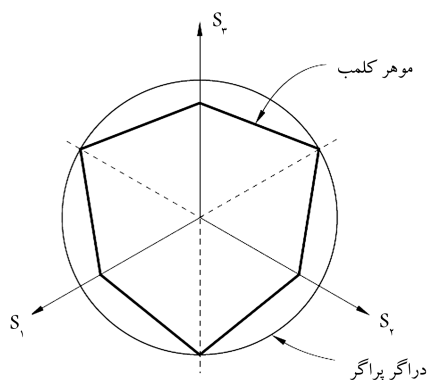
به‌دست‌آوردن ظرفیت باربری در حالت دوبعدی انجام شده است. به نظر می‌رسد که مطالعات بررسی ظرفیت باربری در حالت دوبعدی به درجه‌ی کفایت برای حالت بارگذاری ساده و خاک‌های معمولی رسیده است. با در نظر گرفتن این موضوع که پی‌های واقعی معمولاً نواری نیستند و به‌طور مشخص سطح لغزش سه‌بعدی دارند، لازم است که شرایط واقعی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری در نظر گرفته شود.

همچنین همواره پی‌ها واقع بر یک سطح کاملاً افقی نیستند، گاهی اوقات ممکن است شرایط الزام کند تا پی را بر روی سطح شیب‌دار بسازیم. بنابراین باید کاهش ظرفیت باربری پی برای طراحی بهینه در نظر گرفته شود. امروزه محاسبه‌ی ظرفیت

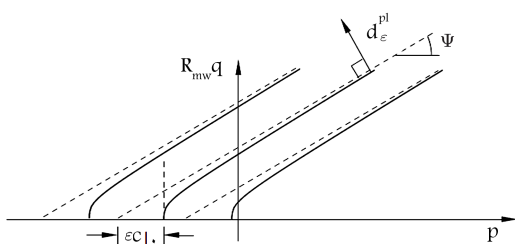
* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۶

azan_davood@yahoo.com
jahanand@shiraz.ac.ir
ghahrama@shiraz.ac.ir



شکل ۱. مدل موهر کلمب در صفحه‌ی انحرافی.



شکل ۲. گروه توابع پتانسیل جریان در صفحه‌ی $p - q$.

بسیار کمی به تنش میانی دارد، ولی با این حال مدل موهر کلمب برای بیشتر کار بردها به اندازه‌ی کافی صحیح در نظر گرفته می‌شود. این مدل گسیختگی زاویه‌هایی در صفحه‌ی تنش انحرافی دارد (شکل ۱).

مدل جامع خاکی که در حال حاضر توصیف می‌شود، گسترشی از مدل کلاسیک موهر کلمب است. این مدل یک مدل کشسان‌خمیری است که دارای یک تابع گسیختگی به شکل موهر کلمب است. این تابع گسیختگی می‌تواند شامل یک نرم‌شوندگی یا سخت‌شوندگی باشد. به هر حال مدل دارای یک پتانسیل جریان است که شکل هذلولی در صفحه‌ی تنش $p - q$ دارد، که این پتانسیل جریان هیچ‌گونه گوشه‌یی در فضای تنش انحرافی ندارد (شکل ۲). این پتانسیل جریان کاملاً نرم است، بنابراین توصیف یگانه‌یی از جهت جریان خمیری ارائه می‌دهد.^[۱۳]

۳. صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس، نتایج حاصل از نتایج عددی مطالعه‌ی کنونی را با معادلات ظرفیت باربری ترزاقی، هانسن، میرهوف و وسیک برای پی واقع بر سطح صاف و همچنین نرم‌افزارهای پلاکسیس سه‌بعدی و میداس ژئوتکنیک برای پی واقع بر سطح شیب‌دار محدب و معادلات کلاسیک هانسن و وسیک برای پی واقع بر سطح شیب دار صاف مقایسه می‌کنیم. در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از پی واقع بر سطح صاف را با نتایج حاصل از فرمول‌های کلاسیک مقایسه می‌کنیم، سپس با ارائه‌ی یک مثال خاص از شیروانی دارای انحناء نتایج حاصل از سایر نرم‌افزارهای سه‌بعدی ژئوتکنیکی (پلاکسیس سه‌بعدی و میداس ژئوتکنیک) را با نتایج این مطالعه مقایسه می‌کنیم و در پایان این بخش نتایج حاصل از این مطالعه را با فرمول‌های کلاسیک پی واقع بر سطح شیب‌دار صاف برای یک حالت خاص مقایسه می‌کنیم.

در پژوهش مذکور در سال ۱۹۶۳،^[۴] فرمولی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی نواری قرار گرفته بر روی سطح شیب دار ارائه شد، که این معادله تغییر کمی نسبت به معادله‌ی ترزاقی داشت. اگر چه تعدادی پژوهش با در نظر گرفتن شکل واقعی پی (برخلاف حالت کرنش صفحه‌یی که پی را به صورت نواری فرض می‌کند) واقع بر سطح صاف وجود دارد، ولی تعداد کمی پژوهش در باره‌ی پی واقع بر سطح شیب‌دار در حالت سه‌بعدی وجود دارد. چند مورد از این پژوهش‌ها در ادامه ذکر شده است. در مطالعه‌ی در سال ۱۹۸۳ اثر سه‌بعدی پی واقع بر سطح شیب‌دار در نظر گرفته شد، ولی تمرکز ایشان بر روی پایداری این‌گونه شیب‌ها در حالت سه‌بعدی با بار وارد بر آن بوده است.^[۶] در مطالعه‌ی دیگری با عنوان «بررسی سه‌بعدی شیب‌ها با بارگذاری محلی» بیشتر به بررسی پایداری شیب‌ها، نه بررسی روشی برای تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر سطح شیب‌دار پرداخته شده است.^[۷] همچنین در سال ۱۹۹۰ در پژوهش دیگری از روش قطعات برای تعیین ظرفیت باربری یک پی سه‌بعدی واقع بر روی سطح شیب‌دار استفاده شده است.^[۸] برخی پژوهشگران (۱۹۹۸) نیز از تئوری تسلیم برای تعیین ظرفیت باربری یک پی مستطیلی سطحی قرار گرفته بر سطح شیب‌دار استفاده کرده‌اند.^[۹]

همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۲) از روش کینماتیکی آنالیز حدی برای رسیدن به نتیجه‌ی مرز بالا و نیز از نرم‌افزار فلاک سه‌بعدی برای مسئله‌ی تعیین ظرفیت باربری نهایی پی واقع بر سطح شیب‌دار در حالت سه‌بعدی استفاده شده است.^[۱۰] پژوهشگران دیگری (۲۰۰۴) هم از روش المان‌های مجزا برای به‌دست‌آوردن ظرفیت باربری پی‌ها در مجاورت سطح شیب‌دار استفاده کرده و توده‌ی خاک زیر پی را به صورت قطعات صلب مجزایی در نظر گرفته‌اند، که با فنرهای کشسان خمیری وینکلر به یکدیگر متصل شده‌اند.^[۱۱]

یگانه پژوهشی که در رابطه با ظرفیت باربری پی‌های واقع بر سطح شیب‌دار دارای انحناء تاکنون انجام شده است، در سال ۲۰۰۸ با عنوان «تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب‌های محدب خاکی در نمای پلان» بوده است.^[۱۲] همان‌طور که از عنوان پژوهش مذکور نیز مشخص است، تمرکز آن بر روی بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی محدب در پلان است و در آن از تئوری حد بالا برای تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب‌های محدب در پلان استفاده شده است.

۲. مدل گسیختگی موهر کلمب

مدل مقاومتی موهر کلمب به‌صورت گسترده‌یی برای کاربرد در مسائل ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. در واقع تعداد زیادی از محاسبات طراحی هنوز هم با استفاده از مدل مقاومتی موهر کلمب انجام می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که تنش برشی در زمان گسیختگی تابعی از تنش نرمال در همان حالت است که این موضوع را می‌توان با استفاده از ترسیم‌کردن دایره‌ی موهر برای تنش در حالت گسیختگی بر اساس نرم‌های تنش اصلی بیشینه و کمینه نشان داد. خط گسیختگی موهر کلمب بهترین خط مستقیمی است که بر دایره‌های موهر مماس می‌شود. بنابراین مدل موهر کلمب را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۲ نوشت:

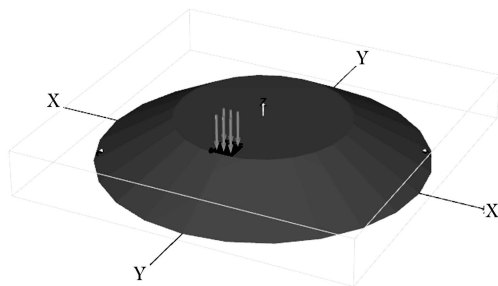
$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (2)$$

که در آن، τ تنش برشی، σ تنش نرمال، c چسبندگی خاک، و φ زاویه‌ی اصطکاک است.

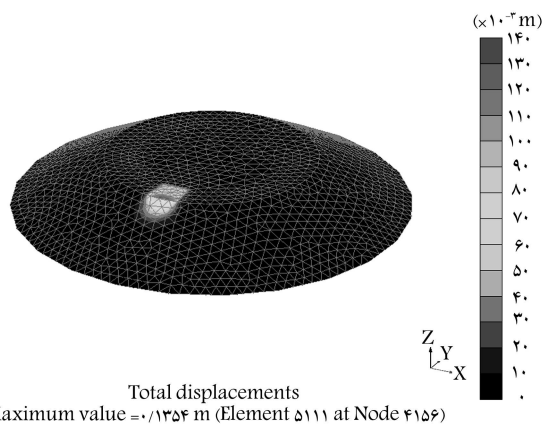
برخلاف معیار دراگر پراگر، مدل موهر کلمب فرض می‌کند که گسیختگی مستقل از مقدار تنش اصلی میانی است. گسیختگی مصالح ژئوتکنیکی معمولاً وابستگی

جدول ۲. مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده برای خاک‌های ذکر شده در جدول ۱.

Soil No.	روش محاسبه‌ی ظرفیت باربری بر حسب کیلوپاسکال				
	ترزاقی	میرهوف	هانسن	وسیک	مطالعه‌ی کنونی
۱	۴۹۰	۴۱۰	۴۰۵	۴۱۴	۴۴۲
۲	۹۷۳	۸۰۷	۸۰۸	۸۱۸	۸۱۳
۳	۱۹۲۷	۱۶۱۰	۱۶۱۳	۱۶۲۳	۱۵۷۷
۴	۳۸۳۴	۳۲۱۷	۳۲۲۴	۳۲۳۴	۳۰۵۶
۵	۳۱۰	۲۷۵	۱۹۳	۲۶۵	۴۲۶
۶	۱۰۱۵	۱۲۴۹	۶۸۵	۹۰۱	۱۲۱۲
۷	۲۳۳۹	۴۱۹۹	۱۸۸۶	۲۴۳۳	۳۱۳۵
۸	۱۲۷۸۰	۲۲۰۳۵	۷۲۴۷	۹۳۲۰	۱۱۳۱۳



شکل ۴. مدل اولیه‌ی ساخته شده در نرم افزار پلاکسیس سه بعدی.



شکل ۵. کانتورهای جابه‌جایی برای مدل سه بعدی در پلاکسیس سه بعدی.

اعمال بار در شکل ۵ نشان داده شده است. کانتورهای نشان داده شده مربوط به جابه‌جایی کلی در هنگام گسیختگی است. همان‌طور که نشان داده شده است، جابه‌جایی در زیر پی به سمت شیب است. همچنین مقطعی بر محور تقارن شیروانی عبوری از مرکز پی در شکل ۶ زده شده است، که وضعیت جابه‌جایی کلی در زیر پی را در هنگام گسیختگی خاک توسط کانتورها نشان می‌دهد. منحنی بارگذاری به جابه‌جایی قائم برای یک نقطه در مرکز پی در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به نمودار می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت باربری حاصل از نرم‌افزار پلاکسیس سه بعدی تقریباً برابر با ۸۰۰ کیلوپاسکال است، در حالی که نتایج حاصل برای نرم‌افزار آباکوس برابر با ۱۷۵۷ کیلوپاسکال است، یعنی در حدود ۵۰٪ تفاوت بین نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس و نرم‌افزار پلاکسیس سه بعدی وجود دارد. این

۱.۳. مدل واقع بر سطح صاف

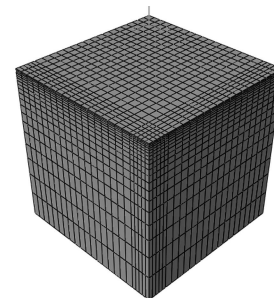
مدل مورد استفاده برای تعیین ظرفیت باربری در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک چهارم مدل و پی با در نظر گرفتن تقارن این مدل در دو جهت و در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب مدل شده است. مشخصات انواع خاک به کار گرفته شده در جدول ۱ ذکر شده است. مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده از این مطالعه و سایر معادلات برای خاک‌های ذکر شده در جدول ۲ ارائه شده است. با مشاهده‌ی جدول ۲ می‌توان استدلال کرد که نتایج به دست آمده از این مطالعه هم‌خوانی نزدیکی با نتایج کلاسیک دارد. بنابراین برای پی قرار گرفته شده بر روی سطح صاف میزان ظرفیت باربری به دست آمده توسط نرم‌افزار آباکوس، مقادیر صحیحی است.

۲.۳. مدل واقع بر شیروانی محدب در پلان

از یک شیروانی خاکی با ارتفاع ۲۰ متر، زاویه‌ی شیب ۳۰ درجه و شعاع انحناء ۲۰ متر در این مطالعه استفاده شده است. پی مربعی دارای ضلع ۵ متر و در فاصله‌ی ۰٫۵ متری نسبت به لبه‌ی شیب قرار گرفته است (شکل ۴). زاویه‌ی اصطکاک خاک ماسه‌ی به کار رفته برای شیروانی خاکی ۳۷ درجه، زاویه‌ی اتساع خاک ۷ درجه، چسبندگی خاک ۵ کیلوپاسکال و وزن مخصوص آن برابر ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب است. ابتدا این آنالیز را توسط نرم‌افزار پلاکسیس سه بعدی و سپس توسط نرم‌افزار میداس ژئوتکنیک انجام شده است.

۱.۲.۳. انجام آنالیز توسط نرم‌افزار پلاکسیس سه بعدی

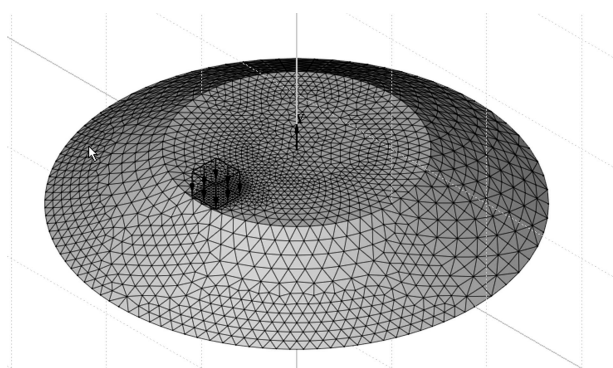
نمای سه بعدی مدل برای انجام آنالیز در شکل ۴ نشان داده شده است. بار وارد شده توسط بردارهای رو به پایین در شکل ۴ و مدل پس از آنالیز و



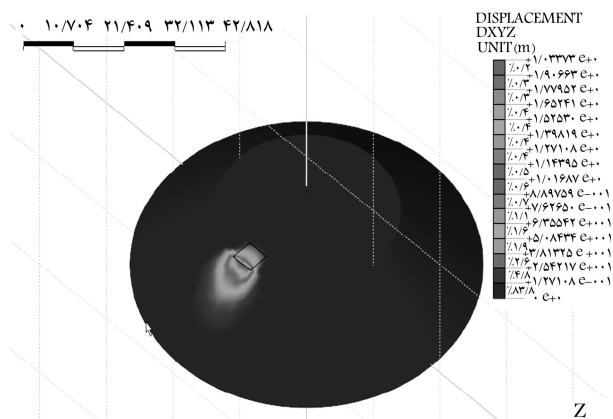
شکل ۳. مدل به کار گرفته شده برای بررسی ظرفیت باربری پی سطحی واقع بر سطح صاف (یک چهارم پی مدل شده است).

جدول ۱. خاک‌های به کار گرفته شده برای مقایسه‌ی ظرفیت باربری پی واقع بر سطح صاف.

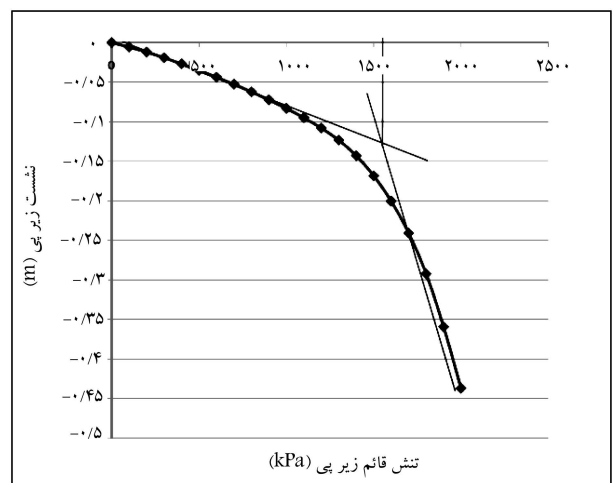
Soil No.	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)
۱	۵۰	۵	۱۹
۲	۱۰۰	۵	۱۹
۳	۲۰۰	۵	۱۹
۴	۴۰۰	۵	۱۹
۵	۵	۲۰	۲
۶	۵	۳۰	۲
۷	۵	۳۷	۲
۸	۵	۴۵	۲



شکل ۸. مدل اولیه سه بعدی در میداس ژئوتکنیک.



شکل ۹. کانتورهای جابه‌جایی برای مدل سه بعدی.



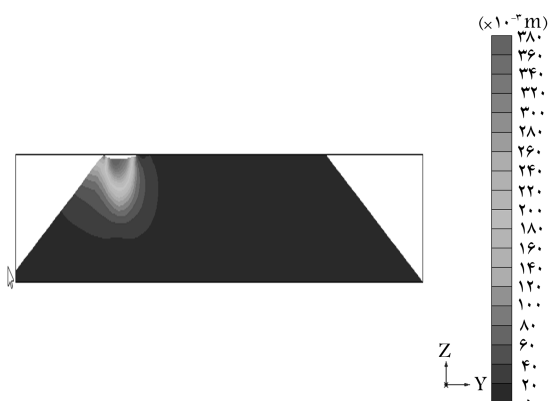
شکل ۱۰. تعیین ظرفیت باربری با استفاده از منحنی تنش قائم - نشست زیر پی.

هم‌خوانی دارد. بنابراین با توجه به اینکه انطباق نسبتاً خوبی در نتایج یافت می‌شود، می‌توان از نسبت اعداد به دست آمده برای ظرفیت باربری تا حد قابل قبولی در این مطالعه استفاده کرد.

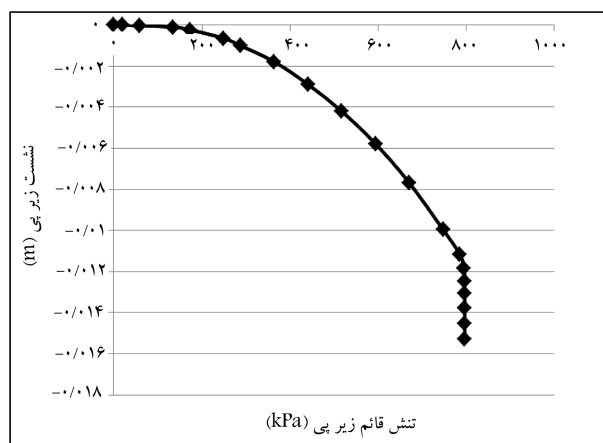
۳.۳. مقایسه‌ی نتایج مطالعه با معادلات کلاسیک برای پی واقع بر

سطح شیب‌دار صاف

همان‌طور که اشاره شد، هنگامی که نسبت شعاع انحناء به اندازه‌ی ضلع پی مربعی واقع بر شیروانی خاکی محدب خیلی زیاد باشد، آنگاه نتایج حاصل برای ظرفیت



شکل ۶. کانتورهای جابه‌جایی کلی برای مقطع عمود بر شیب، عبوری از مرکز پی.



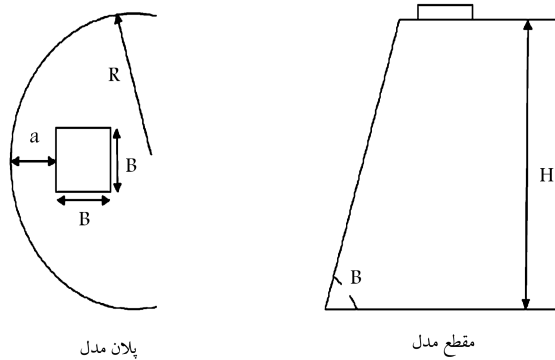
شکل ۷. منحنی تنش کلی - نشست برای یک نقطه در مرکز پی.

مقدار تفاوت در نتایج می‌تواند نشان‌دهنده‌ی غلط‌بودن نتایج به دست آمده باشد، ولی با پژوهش‌هایی که بر روی مدل موهر کلمب مورد استفاده در پلاکسیس سه‌بعدی انجام شده است و همچنین با مشاهده‌ی شکل نمودار تنش - نشست می‌توان به این نتیجه رسید که علت این مسئله گسیختگی خاک به صورت محلی است، زیرا نرم‌افزار پلاکسیس سه‌بعدی قادر به محاسبه‌ی گسیختگی کلی در خاک ماسه‌یی نیست. به عبارت دیگر، این نرم‌افزار به محض رسیدن به حد گسیختگی محلی در یک نقطه از پی اعلام گسیختگی می‌کند.

۲.۲.۳. انجام آنالیز توسط نرم‌افزار میداس ژئوتکنیک

مدل به‌کاررفته برای آنالیز در نرم‌افزار میداس ژئوتکنیک در شکل ۸ نشان داده شده است. مانند حالت آنالیز توسط نرم‌افزار پلاکسیس سه‌بعدی در این آنالیز نیز کل شیروانی را مدل کرده‌ایم. همان‌گونه که مشخص است، المان‌های اطراف و داخل پی نسبت به سایر مکان‌ها ریزتر هستند. کانتورهای مرتبط به جابه‌جایی کلی برای مدل در مرحله‌ی گسیختگی در شکل ۹ نمایش داده شده است.

مشاهده می‌شود که جابه‌جایی کلی در جهت شیروانی است و خاک زیر پی در جهت شیروانی گسیخته می‌شود. برای یک نقطه در وسط پی منحنی تنش قائم - نشست را ترسیم می‌کنیم، این منحنی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای پیدا کردن ظرفیت باربری، منحنی تنش قائم نشست را به صورت دو خطی در نظر می‌گیریم و محل تقاطع دو خط را به عنوان ظرفیت باربری در نظر می‌گیریم. برای ظرفیت باربری مقدار تقریبی ۱۵۹۰ کیلوپاسکال محاسبه می‌شود. این مقدار با نتیجه‌ی نرم‌افزار آباکوس که ۱۷۰۰ کیلوپاسکال است،



شکل ۱۲. شیروانی محدب و پارامترهای مربوط به هندسه‌ی شیب در مقطع و پلان.

پارامترهای مربوط به هندسه‌ی مسئله در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند، که R شعاع انحنای شیب، a فاصله‌ی پی از تاج شیب، B ضلع پی مربعی، H ارتفاع شیب، و β زاویه‌ی شیب است که برای این مطالعه باید این زاویه مقداری در نظر گرفته شود که شیب تحت اثر وزن خود پایدار باشد.

در این مطالعه از یک پی مربعی 5×5 (متر) استفاده شده است. ۴ عدد زاویه‌ی شیب (β) مورد بررسی قرار داده شده است که با توجه به پایداری شیب تحت اثر وزن خود ۴ زاویه‌ی 20° ، 30° ، 37° و 45° در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی پی از تاج شیب (a) نیز مورد بررسی قرار داده شده است. برای این مطالعه ۳ فاصله مورد آنالیز قرار داده شده است که مقادیر محاسبه‌شده: ۵ متری، 2.5 متری و 0.5 متری نسبت به تاج شیب است. ۵ عدد شعاع انحناء (R): 20 ، 50 ، 100 ، 200 ، 300 (متر) برای شیب در نظر گرفته شده است. در اینجا کلیه‌ی پارامترهای هندسی و مقادیر آنها به طور خلاصه ذکر شده است:

$$B = 5 \text{ m}$$

$$H = 20 \text{ m}$$

$$\beta = 20^\circ, 30^\circ, 37^\circ, 45^\circ$$

$$a = 0.5, 2.5, 5 \text{ (m)}$$

$$R = 20, 50, 100, 200, 300 \text{ (m)}$$

تعداد آنالیزهای انجام‌شده برای این مطالعه ۱۳۵ عدد است، که به‌علت تعداد زیاد المان‌های هر کدام از این مدل‌ها، مدت زمان هر آنالیز به طور متوسط برابر ۱۲ ساعت بوده است.

۵. پارامترهای خاک

خاک به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه خاک ماسه‌یی است. همچنین اثر شعاع انحناء با تغییرات پارامترهای خاک ماسه‌یی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین برای بازه‌یی از پارامترهای خاک آنالیزهای مربوط انجام گرفته است. خاک‌های ماسه‌یی به‌کار رفته دارای وزن مخصوص 20 کیلو نیوتن بر مترمکعب، چسبندگی نسبتاً پایین (5 کیلو پاسکال) و زوایای اصطکاک 30° و 37° و 45° درجه هستند.

$$C = 5 \text{ kpa}$$

$$\varphi = 30^\circ, 37^\circ, 45^\circ$$

باربری پی واقع بر سطح شیب‌دار محدب به نتایج حاصل برای ظرفیت باربری پی واقع بر سطح شیب‌دار صاف در حالت سه بعدی میل می‌کند. بنابراین می‌توان نتایج ظرفیت باربری را در حالتی که نسبت $\frac{R}{B}$ زیاد است، با معادلات وسیک و هانسن برای پی واقع بر سطح شیب‌دار با سطح صاف مقایسه کرد.

برای مقایسه‌ی نتایج از شیروانی خاکی ماسه‌یی با زاویه‌ی شیب 30° درجه و نسبت شعاع به عرض پی زیاد ($\frac{R}{B} = 100$) استفاده شده است. میزان فاصله‌ی پی از تاج را برابر صفر ($\frac{a}{B} = 0$) در نظر گرفته‌ایم، تا شرایط حاکم بر پی واقع بر سطح شیب‌دار صاف مطابق شرایط حاکم بر معادلات هانسن و وسیک شود. زاویه‌ی اصطکاک خاک ماسه‌یی 30° درجه و وزن مخصوص خاک 20 کیلو نیوتن بر مترمکعب است. همچنین ضلع پی مربعی 5 متر در نظر گرفته شده است.

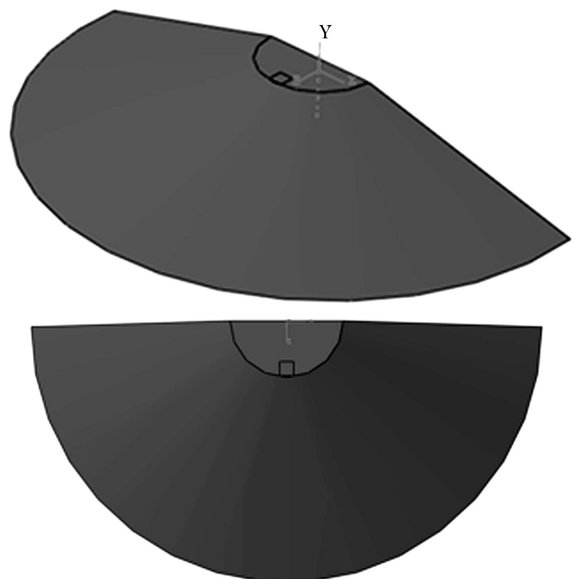
نتایج مقایسه‌ی این بخش در جدول ۳ نشان داده شده است، که هم‌خوانی نسبتاً خوب نتایج این مطالعه با نتایج وسیک و هانسن برای ظرفیت پی مربعی واقع بر سطح شیب‌دار صاف مشخص است.

۴. مدل‌سازی و بازه‌ی پارامترهای هندسی به‌کارگرفته

مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت مدل سه بعدی شکل ۱۱ است. همان‌گونه که در این مدل مثال مشاهده می‌شود پی به‌صورت مربعی در لبه‌ی شیب نمایش داده شده است.

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی حاصل با معادلات وسیک و هانسن برای پی واقع بر سطح شیب‌دار صاف.

ظرفیت باربری (کیلو پاسکال)	
65°	Hansen
67°	Vesic
72°	Current Study

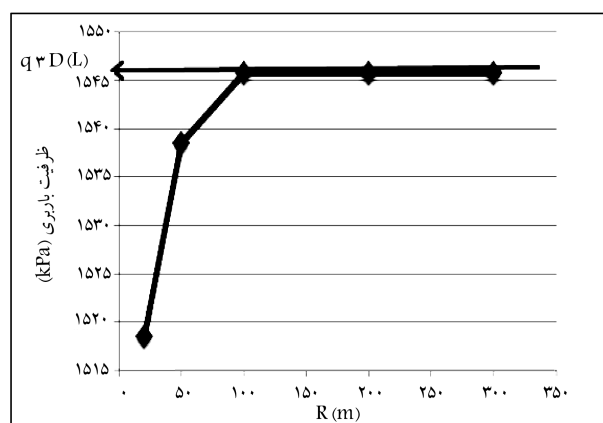


شکل ۱۱. مدل اولیه‌ی موردنیاز برای آنالیز.

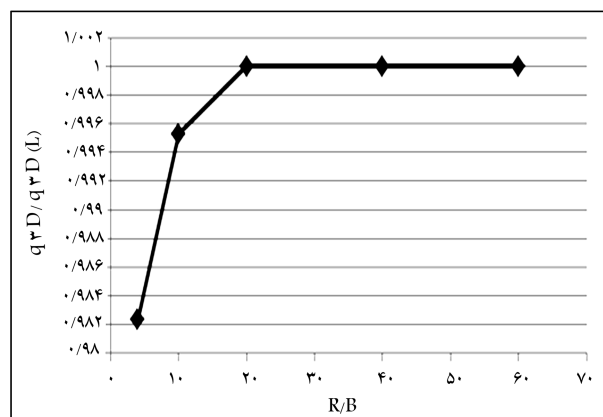
۶. نحوه‌ی ارائه نتایج

از آنجا که می‌خواهیم تغییر میزان ظرفیت باربری را با تغییر شعاع انحناء به دست آوریم، لذا از نمودارهایی استفاده شده است که محور افقی آنها شعاع انحناء بر حسب متر و محور قائم میزان ظرفیت باربری بر حسب کیلوپاسکال است. نمونه‌ی بی از این منحنی‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحناء شیروانی خاکی محدب، ظرفیت باربری پی واقع بر آن نیز افزایش می‌یابد و سپس به مقداری ثابت می‌رسد. این مقدار ثابت را $q_{3D}(L)$ می‌نامیم. علت ثابت شدن ظرفیت باربری با افزایش شعاع انحناء از مقداری خاص این است که پس از این مقدار خاص تقریباً نسبت شعاع انحناء شیروانی به عرض پی زیاد می‌شود و شیروانی محدب به شیروانی خاکی سه‌بعدی صاف (نسبت به عرض پی) میل می‌کند. به منظور اینکه تأثیرات اثر شعاع انحناء در ظرفیت باربری به صورت خالص در نمودارها نشان داده شود، محور افقی را بر ضلع پی مربعی و محور قائم نمودارها را بر مقدار $q_{3D}(L)$ تقسیم کرده‌ایم. نمودار بی بعد حاصل از این عمل در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار نسبت ظرفیت باربری محاسبه‌شده به ظرفیت باربری حالت شیب با سطح صاف به سمت عدد ۱ میل می‌کند.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی قرارگرفته بر روی شیروانی خاکی محدب با تغییر شعاع انحناء شیروانی.



شکل ۱۴. نمودار بی بعدشده تغییرات ظرفیت باربری پی قرارگرفته بر روی شیروانی خاکی محدب با تغییر شعاع انحناء شیروانی.

نتایج در این نوشتار به صورت نمودارهای بی بعد مشابه این نمودار ارائه داده شده است، تا بتوان تأثیر انحناء شیروانی خاکی محدب را در ظرفیت باربری پی واقع بر آن بهتر مشاهده و با سایر نمودارها مقایسه کرد.

۷. نتایج

۱.۷. نمودارهای ظرفیت باربری براساس تغییر نسبت a/B

با تغییر فاصله‌ی پی از تاج شیروانی مقدار ظرفیت باربری تغییر می‌یابد که میزان تغییرات حاصل بستگی به پارامترهای متعددی دارد. چند نمونه از نمودارهای به دست آمده با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها و تغییر نسبت a/B بر حسب شعاع انحناء رسم شده است (شکل ۱۵). مشاهده می‌شود که صرف نظر از اثر انحناء با نزدیک شدن پی به تاج شیروانی مقدار ظرفیت باربری مطابق انتظار کاهش می‌یابد.

۲.۷. نمودارها بی بعد شده بر اساس پارامتر a/B

با تغییر فاصله‌ی پی از لبه‌ی شیروانی (پارامتر a) میزان تأثیر شعاع انحناء در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر شیروانی‌های ماسه‌یی محدب تغییر می‌کند. این اثر را می‌توان با ارائه‌ی نتایج به صورت بی بعد نشان داد. بنابراین برای بررسی اثر انحناء، چند نمونه نمودارهای بی بعد نرمالیزه شده براساس بیشینه‌ی ظرفیت باربری (ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی هنگامی که نسبت شعاع انحناء به عرض پی زیاد است) در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این نمودارها نمایانگر موضوع بسیار جالبی است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی پی از تاج شیب، منحنی‌ها به سمت بالاتر حرکت می‌کنند، یعنی اثر انحناء در ظرفیت باربری با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها با کاهش نسبت a/B افزایش می‌یابد. کلیه‌ی نمودارهای به دست آمده از این روند تبعیت می‌کنند.

۱.۲.۷. نمودارهای ظرفیت باربری براساس تغییر زاویه‌ی اصطکاک خاک

با تغییر زاویه‌ی اصطکاک خاک میزان ظرفیت باربری تغییر می‌کند. برای نشان دادن اثر اصطکاک، چند نمونه نمودار در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

۲.۲.۷. نمودارها بی بعدشده براساس تغییر زاویه‌ی اصطکاک خاک

ماسه‌یی

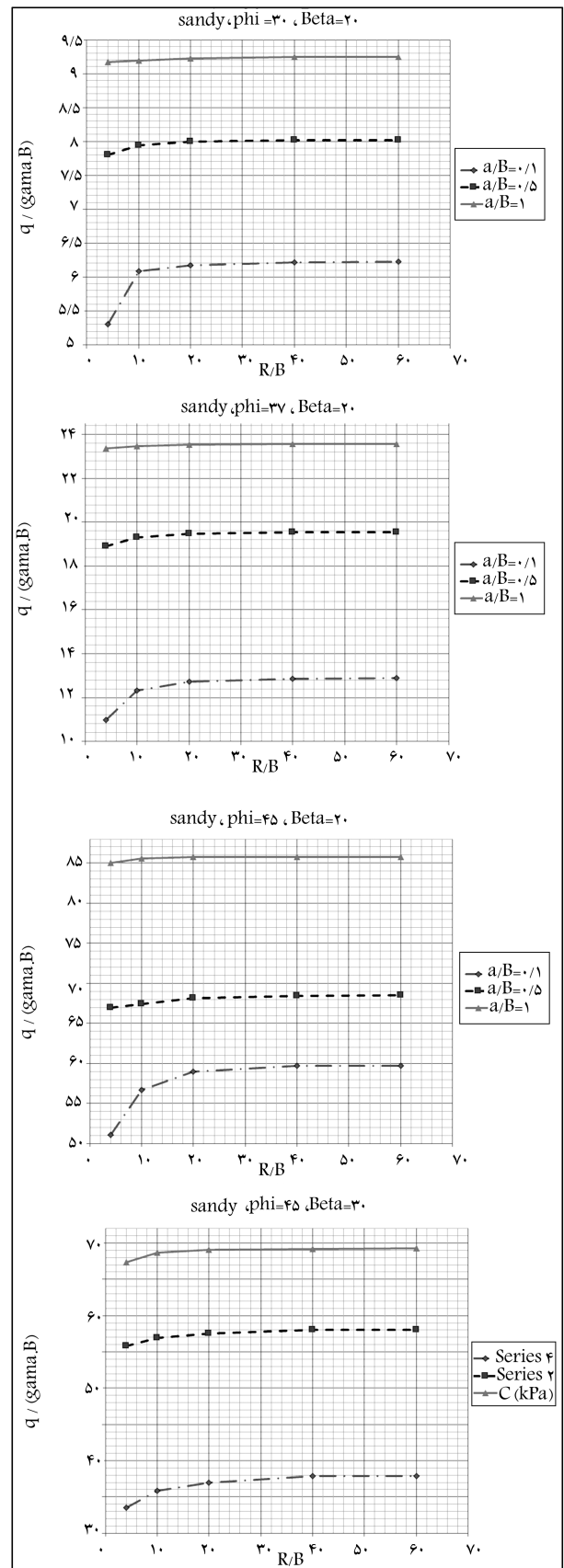
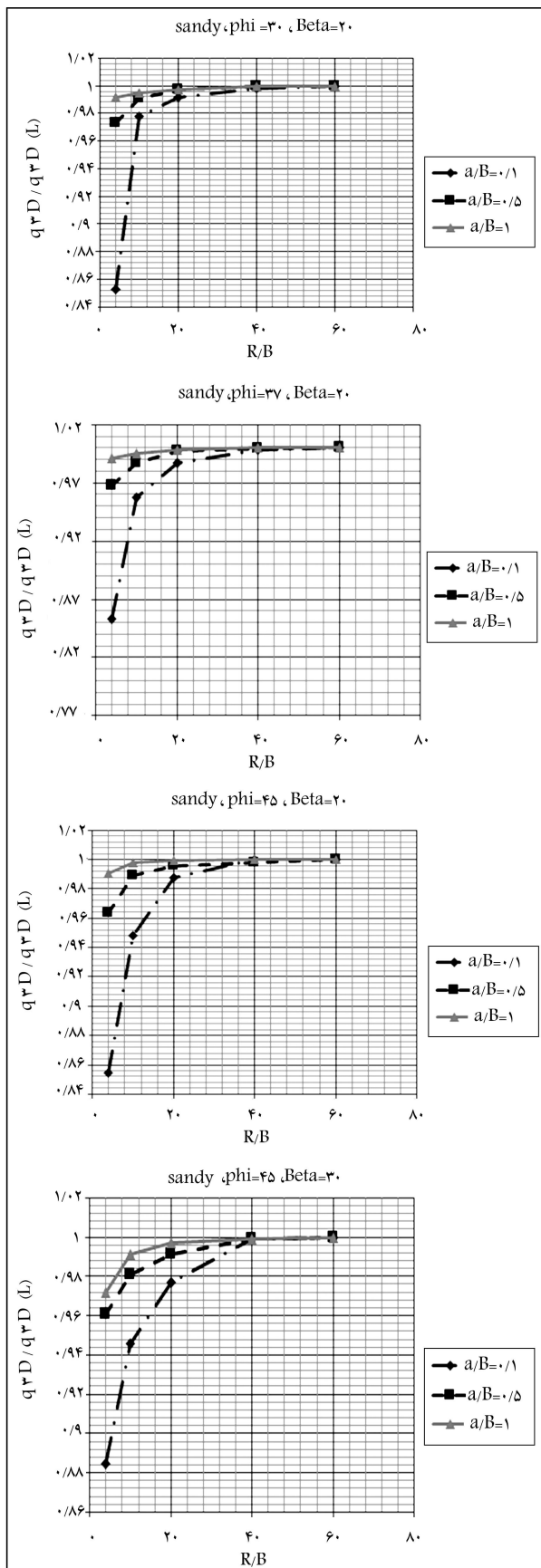
حال برای اینکه تأثیر زاویه‌ی اصطکاک خاک ماسه‌یی در اثر شعاع انحناء دیده شود، منحنی‌ها را به صورت بی بعد ارائه کرده‌ایم. کلیه‌ی این منحنی‌ها از یک روند مشابه پیروی می‌کنند، ولی این منحنی‌ها به عنوان نمونه ارائه شده‌اند (شکل ۱۸).

همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، منحنی خاک با زاویه‌ی اصطکاک بیشتر، پایین‌تر از منحنی خاک با زاویه‌ی اصطکاک کمتر است، که این موضوع تأثیر کمتر انحناء شیروانی خاکی را در خاک‌های با زاویه‌ی اصطکاک بیشتر می‌رساند.

۳.۷. بررسی اثر تغییر ضلع پی مربعی در تأثیر شعاع انحناء در

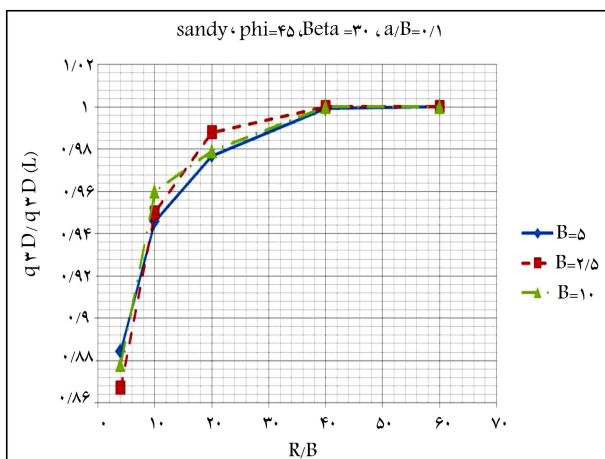
ظرفیت باربری پی واقع بر شیروانی محدب

در این مطالعه ظرفیت باربری برای یک پی مربعی به ضلع ۵ متر محاسبه شده است. برای اینکه نتایج این مطالعه را بتوان به کلیه‌ی پی‌های مربعی تعمیم داد، باید



شکل ۱۶. نمودارهای بی‌بعد شده بر اساس تغییر نسبت a/B در خاک‌های ماسه‌بی.

شکل ۱۵. نمودارهای ظرفیت باربری بر اساس تغییر نسبت a/B با تغییر شعاع انحناء.



شکل ۱۹. تاثیر تغییر ضلع پی مربعی در اثر شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی محدب ماسه‌یی در ظرفیت باربری پی واقع بر آنها.

با ثابت نگاه داشتن پارامترهای هندسی و خاکی مدل تعدادی آنالیز با تغییر ضلع پی مربعی انجام داد.

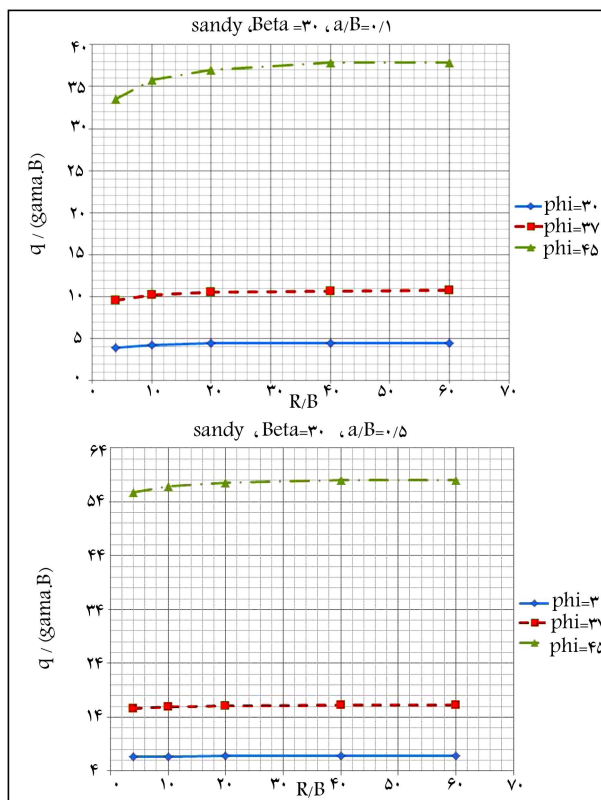
یک مثال خاص از هندسه‌ی شیروانی خاکی با زاویه‌ی شیب ۳۰ درجه و نسبت a/B برابر ۰/۱ و نیز یک خاک ماسه‌یی با زاویه‌ی اصطکاک ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین از ۳ عدد پی مربعی به اضلاع ۲/۵، ۵ و ۱۰ متر در این قسمت استفاده شده است. نمودارهای بی‌بعد مربوط با تغییر ضلع پی مربعی رسم و در شکل ۱۹ ارائه شده‌اند.

بنابراین مشاهده می‌شود که تمام نمودارهای بی‌بعد مربوط به عرض‌های مختلف پی بر هم منطبق هستند. این نکته نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که عرض پی تأثیری در نتایج حاصله ندارد.

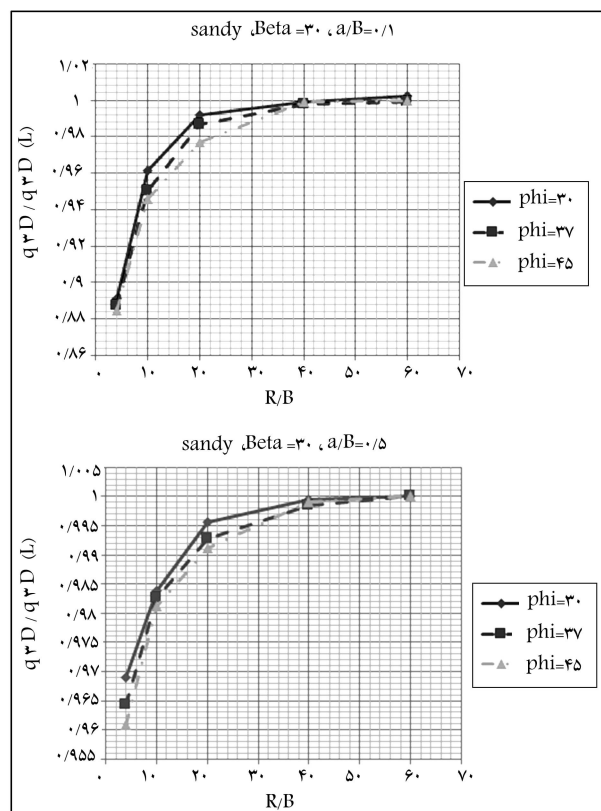
۸. خلاصه و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل و نمودارها، این نتایج قابل استدلال هستند:

۱. همواره ظرفیت باربری در شیروانی‌های خاکی ماسه‌یی محدب در پلان کمتر از شیروانی‌های خاکی ماسه‌یی صاف است.
۲. با افزایش شعاع انحناء شیروانی خاکی محدب در پلان، ظرفیت باربری پی واقع بر آن افزایش می‌یابد و در نسبت شعاع انحناء خاصی (تقریباً در $R/B = 40$) به مقدار معینی میل می‌کند. این مقدار برابر ظرفیت باربری پی واقع بر سطح شیروانی صاف در حالت سه‌بعدی است.
۳. بیشینه‌ی کاهش ظرفیت باربری در خاک‌های ماسه‌یی برابر ۱۵٪ بیشینه‌ی ظرفیت باربری است.
۴. با کاهش فاصله‌ی پی از تاج شیب (با کاهش نسبت a/B) میزان تأثیر شعاع انحناء در ظرفیت باربری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.
۵. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک میزان اثر انحناء شیروانی خاکی محدب در ظرفیت باربری پی واقع بر آن به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۷. نمودارهای ظرفیت باربری براساس تغییر زاویه‌ی اصطکاک خاک ماسه‌یی با تغییر شعاع انحناء.



شکل ۱۸. نمودارهای بی‌بعد شده براساس تغییر زاویه‌ی اصطکاک.

(References) منابع

1. Prandtl, L. "Über die eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden. Zeit. Angew", *Math. Mech.*, **1**(1), pp. 15-20 (1921).
2. Reissner, H. "Zum erddruck problem", *Proc. 1st Int. Conf. Appl. Mech.*, Delft., pp. 295-311 (1924).
3. Terzaghi, K.A., Peck, R.B. and Mesri, G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd edition, John Wiley & Sons, USA (1996).
4. Meyerhof, G.G. "Some recent research on the bearing capacity of foundations", *Canadian Geotech. J.*, **1**(1), pp. 16-26 (1963).
5. Hansen, J.B. "A revised and extended formula for bearing capacity", *Danish Geotech. Inst. Bulletin*, **28**, Denmark (1970).
6. Azzouz, A.S. and Baligh, M.M. "Loaded areas on cohesive slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, **109**(5), pp. 724-729 (1983).
7. Michalowski, R.L. "Three-dimensional analysis of locally loaded slopes", *Geotechnique*, **39**(1), pp. 27-38 (1989).
8. Narita, K. and Yamaguchi, H. "Bearing capacity analysis of foundations on slopes by use of log-spiral sliding surfaces", *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **30**(3), pp. 144-152 (1990).
9. De Buhan, P. and Garmier, D. "Three dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope", *Japanese Geotechnical Society Journal of Soils and Foundations*, **38**(3), pp. 153-163 (1998).
10. Michalowski, R.L. and Dawson, E.M. "Three-dimensional analysis of limit loads on Mohr-Coulomb soil", *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, **1**(1), pp. 137-147 (2002).
11. Arabshahi, M. and Mirghasemi, A.A. "Three dimensional bearing capacity of shallow foundations adjacent to slopes using discrete element method", *International Journal of Engineering (IJE)*, **4**, pp. 160-178 (2004).
12. Farzaneh, O., Askari, F. and Ganjian, N. "Three-dimensional stability analysis of convex slopes in plan view", *J. Geotech. Eng.*, **134**(8), pp. 1192-1200 (2008).
13. ABAQUS Theory Manual: Version 6.9 "Hibbitt, Karlsson & Sorensen: Pawtucket, RI", *Geotechnical Engineering*, **109**(5), pp. 724-729 (2009).