

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه گیلان

دانشکده فنی - گروه مهندسی عمران

گرایش مکانیک خاک و پی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

تحلیل عددی تاثیر قانون جریان بر توان باربری پی‌های سطحی

از:

فاطمه ولیخواه

استاد راهنما:

دکتر مهدی ویس کرمی

استاد مشاور:

Professor Jyant Kumar

Indian Institute of Science, Bangalore

تابستان ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که چگونه زیستن را به من آموختند و زندگی‌ام مرهون بزرگواری‌ها و تلاش‌های بی‌دریغ آنهاست.

سپاسگزاری

پروردگار را شاکرم که مرا شایسته‌ی حضور در عرصه‌ی پر برکت علمی دانسته، با لطف و عنایت بی‌پایان خود اساتید بزرگ و فرهیخته را در مسیر زندگی‌ام قرار داده است تا با بهره‌گیری از دانش و تجربه‌ی آنان در مسیری صحیح قرار بگیرم. امید که شایستگی الطاف خدای بزرگ را داشته باشم.

بدینوسیله از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر مهدی ویس کرمی سپاس‌گزاری و تقدیر می‌کنم که بی‌شک بدون زحمات ایشان قادر به انجام این پژوهش نبودم.

همچنین از جناب آقای پروفیسور **Jyant Kumar**، که استاد مشاور این پایان‌نامه بودند صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنم که اگرچه از مسافتی دور ولی همواره در دسترس بودند و با راهنمایی‌هایشان به پیش‌برد این پژوهش کمک زیادی نمودند.

از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر رضا جمشیدی چناری و جناب آقای دکتر علی قربانی کمال تقدیر و تشکر را دارم که فراگیری مفاهیم پایه‌ی مکانیک خاک و پی در طول دوران تحصیل در این دانشکده مرهون زحمات ایشان است.

و همچنین از خانواده‌ی عزیزم و دوستان بزرگوام که همواره در طول دوران تحصیل مشوق من بودند، خالصانه سپاس‌گزارم.

Acknowledgments

I would like to thank my supervisor, **Dr. Mehdi Veiskarami**, for his unsparing efforts that this study could not be done without his presence.

I sincerely want to thank my advisor, **Professor Jyant Kumar**, for his kind guidance and support.

Thanks are also due to **Dr. Reza Jamshidi Chenari** and **Dr. Ali Ghorbani**, professors of the University of Guilan, for teaching the base of geotechnique.

Finally, I appreciate my family and friends who support and encourage me in my life.

فهرست

۱. فصل اول - کلیات ۱
- ۱-۱. مقدمه ۱
- ۲-۱. تعریف مساله ۲
- ۳-۱. روش پژوهش ۲
- ۴-۱. فصل‌بندی ۳
۲. فصل دوم - پیشینه‌ی پژوهش و مروری بر ادبیات فنی ۵
- ۱-۲. پیش‌گفتار ۵
- ۲-۲. پژوهش‌های انجام گرفته در ارتباط با توان باربری ۵
۳. فصل سوم - کاربرد نظریه‌ی پلاستیک در مکانیک خاک و فرمولاسیون مساله ۱۳
- ۱-۳. مقدمه ۱۳
- ۲-۳. روش‌های حدی و کاربرد آنها در تخمین توان باربری پی‌های سطحی ۲۲
۴. فصل چهارم - تحلیل و نتایج ۳۵
- ۱-۴. مقدمه ۳۵
- ۲-۴. روش اول: استفاده از روش مشخصه‌های تنش و به‌دست آوردن سطح تسلیم معادل ۳۵
- ۳-۴. روش دوم: تلفیق دو روش مشخصه‌های تنش و سینماتیک گسیختگی تحلیل حد بالا
- روند اول: استفاده از سطح تسلیم معادل ۴۲
- ۴-۴. روش دوم: تلفیق دو روش مشخصه‌های تنش و سینماتیک گسیختگی تحلیل حد بالا
- روند دوم: محاسبه‌ی تنش‌ها به طور مستقیم بدون فرض سطح تسلیم معادل ۵۴

۶۰.....	۵. فصل پنجم - مقایسه‌ی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی.....
۶۰.....	۵-۱. مقدمه.....
۶۰.....	۵-۲. موارد عملی از آزمایش‌های بارگذاری پی‌های سطحی.....
۷۰.....	۶. فصل ششم - جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهاد.....
۷۰.....	۶-۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۷۳.....	۶-۲. محدودیت‌های تحقیق.....
۷۳.....	۶-۳. پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار.....
۷۴.....	منابع و مراجع.....
۷۹.....	۷. فصل هفتم - پیوست.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ مکانیزم گسیختگی Prandtl (1920) زیر پی صلب ۵
- شکل ۲-۲ اندرکنش کلی شالوده-خاک برای معادلات توان باربری شالوده‌ی نواری، سمت چپ برای (Terzaghi (1943) ۶
- شکل ۳-۲ مکانیزم گسیختگی Hill (1950)، (الف) شکست ناشی از خمش و (ب) شکست برشی ناشی از دو نیم شدن ... ۸
- شکل ۴-۲ مکانیزم پیشنهادی Bolton and Lau (1993) و گوهی صلب تثبیت شده‌ی شکل گرفته زیر پی زیر ۱۰
- شکل ۵-۲ مکانیزم بلوک‌های صلب چندگانه‌ی پیشنهادی Michalowski (1997) ۱۰
- شکل ۱-۳ اصل کار پلاستیک بیشینه ۱۶
- شکل ۲-۳ (الف) نمونه اولیه خاک و (ب) انبساط حجمی در خاک ۱۸
- شکل ۳-۳ تنش‌ها و سرعت‌ها روی سطح تسلیم خطی Mohr- Coulomb و قانون جریان غیر وابسته‌ی هم‌محور ۲۰
- شکل ۴-۳ اصل پایداری Drucker (الف) پایدار و (ب) ناپایدار ۲۰
- شکل ۵-۳ جهات خطوط مشخصه‌ی تنش $(\sigma +, \sigma -)$ و کرنش $(\epsilon +, \epsilon -)$ ۲۷
- شکل ۶-۳ حالت و جهات مشخصه‌ی تنش بر دایره‌ی موهر و المان خاک ۳۰
- شکل ۷-۳ نواحی پلاستیک تشکیل شده زیر پی ۳۱
- شکل ۸-۳ (الف) ناحیه‌ی Coulomb، (ب) ناحیه‌ی Goursat و (ج) ناحیه‌ی Rankine و فن سه نقطه‌ی ای برای یافتن اطلاعات سایر نقاط در نواحی پلاستیک تشکیل شده زیر پی ۳۲
- شکل ۹-۳ رابطه‌ی تنش و کرنش برای حالت صلب-پلاستیک کامل ۳۳
- شکل ۱-۴ همگرایی مقدار $N\gamma$ با افزایش تعداد نقاط در MATLAB برای $\phi = 30^\circ$ و $\psi = 15^\circ$ ۳۶
- شکل ۲-۴ مقایسه‌ی مقادیر (الف) $N\gamma$ و (ب) Nq با نتایج Bolton and Lau (1993) برای پی با سطح مشترک صاف ۳۷
- شکل ۳-۴ تحلیلها برای $\phi = 45^\circ$ و (الف) $\psi = 45^\circ$ ، (ب) $\psi = 0^\circ$ ، برای پی با سطح مشترک صاف، (ج) $\psi = 45^\circ$ ، ۳۷
- شکل ۴-۴ (د) $\psi = 0^\circ$ ، برای پی با سطح مشترک زیر ۳۸

- شکل ۴-۴ خروجی تصویری از نرم افزار MATLAB برای $\phi = 45^\circ$ در هر دو حالت جریان وابسته و غیر وابسته ۳۸
- شکل ۴-۵ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از خطوط لغزش با نتایج به دست آمده توسط (Frydman and Burd (1997) و (1997) Michalowski، الف) $\phi = 40^\circ$ و ب) $\phi = 30^\circ$ ۳۹
- شکل ۴-۶ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از خطوط لغزش با نتایج به دست آمده توسط (1997) Michalowski با در نظر گرفتن قانون جریان غیر وابسته برای سطح مشترک صاف، الف) $\psi = 0^\circ$ ، ب) $\psi = 0.25\phi$ ، ج) $\psi = 0.5\phi$ و د) $\psi = \phi$ ۴۱
- شکل ۴-۷ بردارهای سرعت منطبق بر خطوط مشخصه‌ی تنش با زاویه‌ی ψ و هودوگراف‌های سرعت ۴۳
- شکل ۴-۸ تفاوت لغزش اصطکاکی و ب) برش پلاستیک ۴۳
- شکل ۴-۹ باند برش در نمونه‌ی خاک ۴۴
- شکل ۴-۱۰ الف) تنش‌های قائم و سرعت‌ها در طول پایین‌ترین خط لغزش و ب) هودوگراف‌های سرعت برای دو بلوک مجاور ۴۵
- شکل ۴-۱۱ بخش‌های تشکیل شده زیر پی و توزیع نیروهای خارجی بر آنها ۴۶
- شکل ۴-۱۲ الف) تنش‌ها بر روی خط لغزش و ب) برش پلاستیک ۴۷
- شکل ۴-۱۰ نمونه‌ای از المان‌های تشکیل شده زیر پی و بردارهای تغییر شکل المان‌های اطراف و هودوگراف سرعت ۴۸
- شکل ۴-۱۳ نمونه‌ای از المان‌های تشکیل شده زیر پی و بردارهای تغییر شکل المان‌های اطراف و هودوگراف سرعت ۴۸
- شکل ۴-۱۴ شبکه‌ی خطوط لغزش و میدان سرعت نظیر آنها برای $\phi = 40^\circ$ و زوایای اتساع مختلف برای شالوده‌ی سطحی با کف صاف بر روی مصالح دانه ای (بررسی تأثیر تعداد نقاط) ۴۹
- شکل ۴-۱۵ تأثیر Ω بر ضریب $Nq\gamma$ ۵۰
- شکل ۴-۱۶ خطوط لغزش و میدان‌های سرعت نظیر آنها برای $\phi = 40^\circ$ و زوایای اتساع مختلف برای شالوده‌ی سطحی با کف صاف واقع بر روی مصالح دانه ای ۵۲
- شکل ۴-۱۷ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از روش حد بالا با نتایج به دست آمده توسط (Frydman and Burd (1997) و (1997) Michalowski، الف) $\phi = 40^\circ$ و ب) $\phi = 30^\circ$ ۵۲
- شکل ۴-۱۸ خطوط مشخصه‌های تنش ب) بردارهای سرعت برای $\psi = \phi = 40^\circ$ (قانون جریان وابسته) ج) بردارهای سرعت برای $\psi = 0.5\phi$ (قانون جریان غیر وابسته) د) بردارهای سرعت برای $\psi = 0^\circ$ (قانون جریان غیر وابسته) و ه) توزیع تنش متوسط (kPa) و) کانتورهای توزیع تنش متوسط (kPa) ۵۵

- شکل ۴-۱۹ الگوی گسیختگی زیر پی با کف زیر (الف) خطوط مشخصه‌های تنش (ب) توزیع تنش متوسط (kPa) (ج)
- بردارهای سرعت برای $\psi = \phi = 40^\circ$ (قانون جریان وابسته) (د) بردارهای سرعت برای $\psi = 0^\circ$ (قانون جریان غیر وابسته) ۵۶
- شکل ۴-۲۰ ضریب توان باربری $N\gamma$ برای پی نواری با کف صاف برای زوایای اتساع مختلف، (الف) روش تلفیقی پیشنهادی با محاسبه‌ی زاویه اصطکاک معادل، ϕ^* (روش دوم-روند اول) و (ب) روش تلفیقی پیشنهادی با محاسبه‌ی تنش قائم (روش دوم-روند دوم) ۵۹
- شکل ۴-۲۱ ضریب توان باربری $N\gamma$ برای پی نواری با کف زیر برای زوایای اتساع مختلف، (الف) روش تلفیقی پیشنهادی با محاسبه‌ی زاویه اصطکاک معادل، ϕ^* (روش دوم-روند اول) و (ب) روش تلفیقی پیشنهادی با محاسبه‌ی تنش قائم (روش دوم-روند دوم) ۵۹
- شکل ۵-۱ روند Meyerhof برای محاسبه‌ی زاویه‌ی اصطکاک برانگیخته شده در تخمین توان باربری پی ۶۲
- شکل ۵-۲ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی ۶۸
- شکل ۵-۳ مقایسه‌ی نتایج (Michalowski (1997) با نتایج آزمایشگاهی ۶۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۴ مقایسه‌ی مقادیر $N\gamma$ با نتایج Bolton and Lau (1993) برای هر دو حالت پی با سطح مشترک صاف و زبر
۳۷.....
- جدول ۲-۴ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از خطوط لغزش با نتایج به دست آمده توسط Michalowski (1997) با در نظر گرفتن قانون جریان غیر وابسته برای سطح مشترک صاف
۴۰.....
- جدول ۳-۴ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از خطوط لغزش با نتایج به دست آمده توسط Michalowski (1997) با در نظر گرفتن قانون جریان غیر وابسته برای سطح مشترک زبر
۴۰.....
- جدول ۴-۴ همگرایی پاسخ‌ها با افزایش تعداد نقاط مش
۵۱.....
- جدول ۵-۴ ضریب توان باربری $N\gamma$ برای پی با کف صاف با فرض برقراری قانون جریان وابسته
۵۷.....
- جدول ۶-۴ ضریب توان باربری $N\gamma$ به دست آمده از روش نوین سینماتیکی تحلیل حد بالا و خطوط لغزش و مقایسه‌ی آن با نتایج موجود در ادبیات فنی برای $\phi = 40^\circ$
۵۷.....
- جدول ۷-۴ ضریب توان باربری $N\gamma$ برای پی با کف صاف برای زوایای اتساع مختلف
۵۸.....
- جدول ۱-۵ مشخصات خاک‌ها و اندازه‌ی پی‌ها
۶۱.....
- جدول ۲-۵ مقایسه‌ی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی
۶۴.....
- جدول ۳-۵ مقایسه‌ی نتایج Michalowski (1997) با نتایج آزمایشگاهی
۶۷.....

تحلیل عددی تأثیر قانون جریان بر توان باربری پی‌های سطحی

فاطمه ولیخواه

روش‌های متعددی برای محاسبه توان باربری پی‌ها وجود دارد که پاسخ همگی آنها با فرض برقرار بودن قانون جریان وابسته در خاک‌ها به دست می‌آید؛ در حالی که مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که در اغلب موارد، زاویه اتساع خاک‌ها از زاویه اصطکاک داخلی آنها کمتر است. این مسأله بیان می‌کند که خاک‌ها عمدتاً از قانون جریان غیر وابسته پیروی می‌کنند. محاسبات نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن این قانون اندازه نواحی پلاستیک زیر پی کاهش قابل توجهی داشته، از میزان توان باربری پی کاسته می‌شود؛ از این‌رو توجه به تأثیر این قانون در تحلیل توان باربری پی‌ها امری ضروری است. در این پژوهش از دو روش جداگانه برای تخمین توان باربری پی‌های سطحی با در نظر گرفتن تأثیر قانون جریان استفاده شده است. روش اول استفاده از روش مشخصه‌های تنش و به دست آوردن سطح تسلیم معادل خاک‌ها با در نظر گرفتن قانون جریان غیر وابسته با استفاده از روابط پیشنهادی توسط (Drescher and Detournay (1993 که پیش‌تر توسط (Davis (1968 و (Rowe (1969 معرفی شده بود. روش دوم تلفیقی از روش خطوط لغزش (مشخصه‌های تنش) و روش سینماتیکی تحلیل حدی با استفاده از قضیه‌ی حد بالاست که برای نخستین بار انجام شده است. در استفاده از این روش نوین، دو روند جداگانه ارائه شده است. روند اول استفاده از روش مشخصه‌های تنش به کمک سطح تسلیم معادل و استفاده از روش سینماتیک گسیختگی حد بالای تحلیل حدی است و روند دوم استفاده از روش مشخصه‌های تنش و روش سینماتیک گسیختگی تحلیل حد بالا به طور مستقیم است که در واقع با محاسبه‌ی مقادیر تنش قائم از روابط خطوط لغزش و برابری نرخ کار خارجی و زوال انرژی داخلی به محاسبه‌ی توان باربری پی‌های سطحی پرداخته شده است. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر در استفاده از روش سینماتیکی برخلاف پژوهش‌های گذشته از جمله مطالعات (Michalowski (1997 به جای استفاده از مکانیزم گسیختگی فرضی و کمینه نمودن بار حدی با تغییر در شکل مکانیزم، شکل گسیختگی با استفاده از خطوط لغزش به دست آمده از روش مشخصه‌ها، به طور دقیق به دست آمده است. در پایان، ضرایب توان باربری N_{γ} برای پی سطحی قرار گرفته بر روی ماسه از این دو روش به دست آمده و با برخی نتایج موجود در ادبیات فنی مرتبط مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: توان باربری، پی‌های سطحی، ماسه، روش مشخصه‌های تنش، تحلیل حدی، نظریه پلاستیک، قانون جریان، مدل عددی.

Abstract

Numerical Analysis of the Influence of the Flow Rule on the Bearing Capacity of Shallow Foundations

Fatemeh Valikhah

Bearing capacity of foundations has a long history in development since early 1900s. It is common practice that the results for the bearing capacity of foundations have been determined with an associated flow rule assumptions. However, the angle of dilation in most soils is usually much lower than their friction angle. In fact, the non-associated flow rule governs the soil's actual behavior. The flow rule affects the size of plastic zone beneath foundations and reduces the bearing capacity obtained often by an associated flow rule assumption. Having known this fact, the influence of flow rule on the bearing capacity has been investigated in the current work. Two different approaches were employed to estimate the bearing capacity of shallow foundations considering the flow rule effect. The first approach comprises the use of equivalent friction angle derived by Davis (1968) and Rowe (1969), later introduced by Drescher and Detournay (1993). In the second approach, a Coulomb type failure mechanism was assumed obeying the characteristics of the stress and the kinematic approach of the upper-bound limit analysis was employed to estimate the bearing capacity. In the latter approach, the continuity of the normal stress within and in the exterior of the shear bands (stress characteristics) was presumed and work equations were derived based on normal and shear components of stress along velocity discontinuities. The second approach can be considered as a quite direct application of the non-associativity as there is no alteration in the yield criterion as in the first approach. Moreover, in contrary to previous researches (e.g. Michalowski, 1997), the shape of the failure mechanism was not assumed; instead, it was found by nature. Finally, N_{γ} values computed for shallow foundations on sand, based on either of these two approaches, were compared with experimental data available in the literature indicating that the non-associated flow rule is a fact which cannot be disregarded in estimation of the bearing capacity.

Keywords: Bearing Capacity, Shallow Foundations, Sand, Stress Characteristics Method, Limit Analysis, Plasticity, Flow Rule, Numerical Model.

۱. فصل اول – کلیات

۱-۱. مقدمه

خاک زیر پی‌های سطحی باید بدون آنکه دچار گسیختگی برشی شود، توانایی تحمل بارهای ناشی از سازه مهندسی روی خود را داشته باشد؛ از این رو ارائه‌ی تخمینی از توان باربری پی‌های سطحی به عنوان یکی از مسایل اصلی در مهندسی ژئوتکنیک مطرح است. به طور کلی برای به دست آوردن ظرفیت باربری پی‌ها روش‌های متعددی به شرح زیر وجود دارد:

- مطالعات تجربی و آزمایشگاهی
- روش‌های نظری
- روش تعادل حدی^۱
- روش تحلیل حدی^۲ با استفاده از قضایای حدی در پلاستیسیته (قضایای حد بالا و حد پایین^۳)
- روش مشخصه‌های تنش^۴ (روش خطوط لغزش^۵)
- روش مشخصه‌های کرنش^۶ (روش خطوط تغییر طول صفر^۷)
- روش المان‌های محدود^۸
- روش بدون المان^۹

این روش‌ها فرضیات متفاوتی دارند که در استفاده از آنها برای تخمین توان باربری باید به این فرضیات توجه شود. به عنوان مثال در دو روش آخر، استفاده از یک رابطه‌ی بنیادی^{۱۰} اجتناب ناپذیر است اما روش مشخصه‌های تنش تنها به معیار تسلیم و

¹ Limit equilibrium

² Limit analysis

³ Upper and lower bound limit theorems

⁴ Stress characteristics method

⁵ Slip line method

⁶ Strain characteristics method

⁷ Zero extension line method (ZEL)

⁸ Finite element method

⁹ Mesh free method

¹⁰ Constitutive law

نهایتاً قانون جریان پلاستیک احتیاج دارد که می‌تواند هم به عنوان نقطه‌ی قوت و هم به عنوان نقطه‌ی ضعف آن (بسته به مورد) محسوب گردد.

۲-۱. تعریف مساله

از آنجا که اغلب مصالح دانه‌ی معمولاً اتساعی پایین‌تر از مقدار پیش‌بینی شده توسط قانون جریان وابسته^۱ را از خود نشان می‌دهند، لذا انتظار می‌رود تا نواحی پلاستیک زیر پی‌های سطحی که در محدوده‌ی بار حدی شکل می‌گیرند، دارای ابعاد کوچکتری باشند و بنابراین، توان باربری خاک کمتر از مقادیری است که بر اساس نظریه‌ی پلاستیک و قانون جریان وابسته به دست می‌آید. بنابراین، فرض اساسی این است که رفتار خاک پس از تسلیم توسط قانون جریان غیر وابسته^۲ توصیف می‌شود. بدین ترتیب، توان باربری پی‌ها بر اساس این فرض و مبانی نظریه‌ی پلاستیک قابل تحلیل است. هدف اصلی، ارائه‌ی تخمینی از توان باربری پی‌های سطحی بر مصالح دانه‌ی با رفتار پلاستیک غیر وابسته، به کمک نظریه‌ی پلاستیک و قضایای حدی است. انتظار می‌رود که تخمین توان باربری با این فرض، مقادیری پایین‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت را به دست دهد. این پژوهش برای پی‌های نواری با سطح مشترک زبر و صاف^۳ انجام می‌شود. همچنین تخمینی از توان باربری پی‌های دایروی با هر دو سطح مشترک زبر و صاف نیز ارائه شده است که البته در مورد اخیر به دلیل محدودیت‌های موجود، از قضایای حدی استفاده نشده است.

۳-۱. روش پژوهش

روش پژوهش بر استفاده از نظریه‌ی پلاستیک استوار است. همچنین رفتار خاک جهت انجام تحلیلها به صورت رفتاری صلب-پلاستیک ایده‌آل با قانون جریان غیر وابسته^۴ فرض گردیده است. تخمین توان باربری با فرمولاسیون مساله در قالب یک مساله‌ی مقدار مرزی در یک محیط در حالت تعادل پلاستیک (یعنی محیطی که هر دو معیار تعادل و تسلیم در سراسر آن صدق می‌نماید) تخمین زده می‌شود. حل این معادلات به روش ارائه شده توسط Sokolovskii (1960) موسوم به روش مشخصه‌های تنش^۵ و تحلیل سینماتیکی حد بالا^۶ انجام می‌پذیرد. همانطور که اشاره شد، روش اخیر تنها برای پی‌های نواری

¹ Associated flow rule

² Non-associated flow rule

³ Rough and smooth footing-soil interface

⁴ Non-associative rigid-perfect plastic

⁵ Method of stress characteristics

⁶ Kinematic approach of the upper-bound limit analysis

استفاده می‌شود و برای پی‌های دایروی تنها به استفاده از روش مشخصه‌های تنش بسنده شده است. معادلات مورد استفاده، معادلات به فرم ارائه شده توسط (Anvar and Ghahramani (1997 یا Harr (1966 هستند. روش حد بالای تحلیل حدی نیز بر اساس فرمولاسیون (Drucker and Prager (1952 و یا (Chen and Liu (1993 است. شایان ذکر است که در مصالح با قانون جریان غیر وابسته بار حدی می‌بایست به کمک تخمینی از میدان تنش به دست آید (که برای محاسبه‌ی انرژی داخلی مورد نیاز است) که فرضیاتی برای آن صورت گرفته است و در حقیقت در این پژوهش، برای نخستین بار از تلفیق دو روش تحلیل حدی و مشخصه‌های تنش استفاده شده است.

۴-۱. فصل‌بندی

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل هفت فصل است. فصل اول شامل بخش‌های پیش‌گفتار، تعریف مساله، روش پژوهش و فصل‌بندی پایان‌نامه می‌باشد. در بخش پیش‌گفتار، به معرفی انواع روش‌های تخمین توان باربری پی‌ها پرداخته شده است؛ در بخش تعریف مساله، مفهوم کلی پژوهش حاضر و هدف از انجام آن شرح داده شده است. در بخش روش پژوهش، به معرفی روش استفاده شده در این پایان‌نامه اشاره شده است و در نهایت در بخش فصل‌بندی پایان‌نامه، ساختار کلی پایان‌نامه در فصول مختلف شرح داده شده است.

در فصل دوم به طور خلاصه به پژوهش‌هایی که در رابطه با موضوع این پایان‌نامه پیش‌تر توسط سایر محققین انجام گرفته‌با شرح مکانیزم‌ها و روش‌های پیشنهادی هر یک اشاره شده است.

در فصل سوم به کاربرد نظریه‌ی پلاستیک در مکانیک خاک پرداخته شده است. ابتدا تاریخچه‌ای مختصر در رابطه با پیشینه‌ی پیدایش این نظریه ارائه شده، در ادامه توضیحاتی اجمالی در رابطه با مفاهیم و اصول بنیادی نظریه‌ی پلاستیک از جمله قانون جریان پلاستیک، اصل کار پلاستیک حداکثر، اعتبار اصل نرمالیده در خاک‌ها و اصل پایداری Drucker بیان شده است. در انتها به بررسی روش‌های حدی، از جمله روش مشخصه‌های تنش و روش تحلیل حدی و کاربرد آنها در تخمین توان باربری پی‌های سطحی پرداخته شده است.

در فصل چهارم به معرفی دو روش متفاوت برای تخمین توان باربری پرداخته شده است. روش اول استفاده از روش مشخصه‌های تنش و به دست آوردن سطح تسلیم معادل است و روش دوم که خود به دو روند جداگانه به شرح زیر تقسیم می‌شود: روند اول استفاده از روش مشخصه‌های تنش به کمک سطح تسلیم معادل و استفاده از روش سینماتیک گسیختگی حد بالای تحلیل حدی و روند دوم استفاده از روش مشخصه‌های تنش و روش سینماتیک گسیختگی تحلیل حد بالا به طور

مستقیم. شایان ذکر است که روش دوم برای نخستین بار ارائه شده است. در ادامه‌ی این فصل نتایج به دست آمده توسط این دو روش با یکدیگر و با نتایج سایر پژوهش‌گران اشاره شده در ادبیات فنی مقایسه شده‌اند.

در فصل پنجم نتایج به دست آمده از روش‌های مورد استفاده در این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط سایر پژوهش‌گران مقایسه شده، نتایج در قالب جداول و نمودار ارائه شده است.

در فصل ششم به جمع‌بندی مطالب پرداخته، نتیجه‌گیری نهایی ارائه شده، در انتها به ارائه‌ی پیشنهادات برای ادامه‌ی کار بر روی موضوع این پژوهش پرداخته شده است.

و در نهایت در فصل هفتم خلاصه‌ای از این پژوهش در قالب چکیده‌ی مبسوط انگلیسی، پیوست شده است.

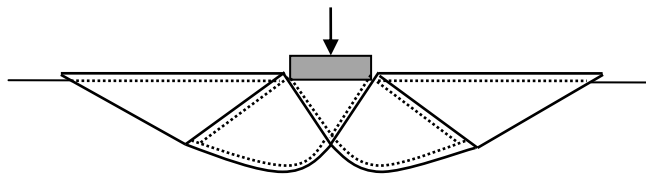
۲. فصل دوم – پیشینه‌ی پژوهش و مروری بر ادبیات فنی

۱-۲. پیش‌گفتار

توان باربری پی‌ها در سال‌های متمادی توسط افراد متعددی از روش‌های گوناگون و با فرضیات مختلف محاسبه شده است. اغلب مطالعات تحلیلی بر توان باربری به کمک نظریه‌ی پلاستیک انجام پذیرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به تحقیقات Prandtl (1920) و Reissner (1924) اشاره نمود. بعدها نتایج این مطالعات توسط Terzaghi (1943) به کار گرفته شد و رابطه‌ی معروف توان باربری با سه جمله‌ی مشخص آن پا به عرصه نهاد. از آنجا که اغلب این تحقیقات بر پایه‌ی نظریه‌ی پلاستیک و قضایای حدی در مکانیک خاک هستند، ابتدا به گسترش کاربرد نظریه‌ی پلاستیک برای تحلیل مسایل ژئومکانیک پرداخته می‌شود.

۲-۲. پژوهش‌های انجام گرفته در ارتباط با توان باربری

در اوایل قرن بیستم، Prandtl از نظریه‌ی پلاستیک برای تحلیل پدیده‌ی سوراخ‌کنندگی^۱ یک پی صلب در مصالح نرم‌تر چسبنده - اصطکاکی (مثل خاک) استفاده کرد. وی خاک را بدون وزن در نظر گرفت. مکانیزم گسیختگی در مطالعات او در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ مکانیزم گسیختگی Prandtl (1920) زیر پی صلب

¹ Punch or indentation

Prandtl فشار گسیختگی را از رابطه (۱-۲) به دست آورد:

$$P' = c \left(\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} - 1 \right) \cot \phi \quad (1-2)$$

Reissner نیز همانند Prandtl خاک را بدون وزن در نظر گرفت و به بررسی پدیده‌ی سوراخ‌کنندگی پی در یک فضای نیمه بی‌نهایت پرداخت. دو تفاوت اساسی در فرضیات Reissner نسبت به Prandtl عبارتند از فرض عدم وجود چسبندگی (مصالص صرفاً اصطکاکی) و همچنین وجود فشار سربار در اطراف پی در یک طول نامحدود.

وی فشار گسیختگی را از رابطه‌ی (۲-۲) به دست آورد:

$$P'' = q \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad (2-2)$$

رابطه توان باربری و ضرایب آن به ترتیب زیر است:

$$p = cN_c + qN_q \quad (3-2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (4-2)$$

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad (5-2)$$

بر اساس مطالعات Prandtl و Reissner، نزدیک به یک دهه‌ی بعد (1943) Terzaghi برای یک شالوده سطحی واقع بر سطح بدون شیب، تحت بار متمرکز قائم، یک مکانیزم گسیختگی پیشنهاد داد و تعادل برای بلوک صلب را نوشت. مکانیزم پیشنهادی وی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در این مکانیزم ناحیه‌ی I به صورت الاستیک باقی می‌ماند و نواحی II و III به صورت پلاستیک عمل می‌کنند. برش در ناحیه‌ی II به صورت برش شعاعی^۱ و در ناحیه‌ی III به صورت برش صفحه‌ای^۲ فرض می‌شود (Meyerhof, 1951). Terzaghi اثر وزن خاک را نیز در نظر گرفت و رابطه ظرفیت باربری را به صورت مجموع سه پارامتر مرتبط با چسبندگی، فشار سربار و وزن خاک به صورت زیر بیان کرد:

¹ Radial shear

² Plane shear

Hill (1950) با فرض مکانیزم های گسیختگی متفاوت برای پی های با کف صاف و با در نظر گرفتن خاک بدون وزن مقادیر جدیدی برای N_{γ} پیشنهاد داد. مکانیزم او بعدها توسط سایر محققان به عنوان یک مکانیزم گسیختگی استاندارد استفاده شده است.



شکل ۲-۳ مکانیزم گسیختگی Hill (1950)، (الف) شکست ناشی از خمش و (ب) شکست برشی ناشی از دو نیم شدن

Meyerhof (1951, 1963) مکانیزم گسیختگی را به صورت ماریچ لگاریتمی^۱ در نظر گرفت. معادلات پیشنهادی وی شبیه به معادلات ترزاقی است، با این تفاوت که ضرایب شکل، عمق و شیب کف (برای کاهش توان باربری پی قرار گرفته بر روی سطح شیب دار) را وارد معادلات کرد. مکانیزم پیشنهادی وی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که تا عمق $D \approx B$ در شکل ۲-۲ توان باربری نهایی Meyerhof (q_{ult}) تفاوت چشمگیری با مقادیر ارائه شده توسط Terzaghi نشان نمی دهد. در نسبت های بزرگتر D/B ، تفاوت مشخص تر می شود (Bowels, 1996).

Sokolovskii (1960) برای اولین بار از روش مشخصه های تنش برای تخمین توان باربری پی با در نظر گرفتن اثر وزن خاک استفاده کرد. وی این حقیقت را دریافت که جهات مشخصه های تنش به دست آمده از معادلات دیفرانسیل جزئی هذلولوی (که تنش ها در آن پیش تر توسط Kötter (1903) بر حسب جهت تنش اصلی بیشینه و تنش متوسط، در حالت کرنش صفحه ای تعریف شده بود) بر صفحات برش منطبق است. محاسبات توان باربری توسط Sokolovskii برای چند مقدار محدود از زاویه ی اصطکاک داخلی انجام گرفته است.

پس از آن، مطالعات دیگری بر کاربرد این روش در تخمین توان باربری پی های سطحی و عمیق انجام گرفت که از آن جمله می توان به مطالعات Larkin (1968) که به بررسی توان باربری پی های بسیار کم عمق با استفاده از روش مشخصه های تنش پرداخت، اشاره کرد.

¹ Logarithmic- spiral