بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی

برآورد ظرفیت باربری پی روی توده سنگ با معیارهای شکست غیرخطی

مؤلف:

مجتبی غیب‌الهی

استاد راهنما:

دکتر محمدحسین باقری‌پور

استاد مشاور:

دکتر سید مرتضی مرندی

آذر ماه ۱۳۹۲

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ‌گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو: مجتبی غیب‌الهی

استاد راهنما: دکتر محمدحسین باقری‌پور

استاد مشاور: دکتر سید مرتضی مرندی

داور ۱: دکتر محمدمحسن توفیق

داور ۲: دکتر حامد صفاری

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع: دکتر رضا رهگذر

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مریم احتشام‌زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

که همواره از حمایت‌ها، تشویق‌ها و محبت‌های خالصانه‌ی آنها، برخوردار بوده‌ام.

همچنین تقدیم به خواهران و برادرم.

«هیچ عبادتی مانند تفکر و مطالعه در مصنوعات (آفریده‌های) الهی نیست.»

امام علی (ع)

تشکر و قدردانی:

حال که به فضل خداوند متعال، این پایان نامه به سرانجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم که از تمام کسانی که به هر نحوی، حقیر را در این راه مساعدت کرده‌اند؛ تشکر و قدردانی نمایم.
از جناب آقای دکتر باقری‌پور که سخاوتمندانه و همچون پدری دلسوز مرا در انجام این پایان نامه یاریگر و راهنما بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر مرندی، جناب آقای دکتر توفیق و جناب آقای دکتر پورابراهیم و جناب آقای دکتر شجاعی باغینی که در دوران تحصیل از وجودشان بهرمند گشتم و در راه تعلیم بنده کوشش کرده‌اند، تشکر می کنم.

از جناب آقای دکتر توفیق و جناب آقای دکتر صفاری که زحمت داوری این پایان نامه را متحمل شده‌اند، کمال سپاسگزاری را دارم.

همچنین جا دارد از زحمات دوستان گرانقدرم آقایان: ابراهیم فولادی، اکبر سلیمان‌زاده، جعفر محمدی سربست، علی ابراهیمی، امیرحسین امجدی، پیام روحانی، علی سعیدی ریزی، صادق پاپری مقدم برازجانی، سلمان حیدرزاده و مرتضی دامرودی تشکر نمایم.

چکیده:

هنگامیکه گستره‌ی وسیعی از تنش در نظر گرفته شود، پوش مقاومت اکثر مصالح ژئوتکنیکی غیرخطی بدست می‌آید. بنابراین در مسائلی مثل تعیین ظرفیت باربری توده سنگ که تاثیر غیرخطی شدن رفتار مصالح را نمی توان نادیده گرفت باید از معیارهای غیرخطی استفاده کرد. در این پایان‌نامه در ابتدا انواع معیارهای شکست موجود برای سنگ بررسی می‌شود. سپس با استفاده از یکی از این معیارها که برای شکست سنگ بکر کاربرد دارد معیاری برای شکست توده سنگ و با استفاده از تحلیل رگرسیون بدست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که معیار حاصل شده به خوبی قادر به برآورد مقاومت توده سنگ‌ها می‌باشد. با استفاده از معیار بدست آمده روشی کران پایین برای برآورد ظرفیت باربری پی نواری حاصل می‌شود. مزیت روش ارائه شده در این است که با پارامترهایی کمتر نسبت به روش‌های مشابه خود، ضریب ظرفیت باربری را دقیق‌تر برآورد می‌نماید. مسئله برآورد ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر توده سنگ از طریق معیارهای غیرخطی تاکنون بررسی نشده است. در این تحقیق با به کارگیری معیار غیرخطی هوک-براون و از روش اجزا محدود استاندارد این مسئله بررسی شده است. در این تحقیق برخلاف اکثر روش‌های موجود، وزن توده سنگ در محاسبات لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای سنگ‌های با کیفیت پایین، وزن سنگ تاثیر مهمی بر ظرفیت باربری و تغییرمکان نزدیک گسیختگی می‌گذارد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از معیارهای خطی برای برآورد ظرفیت باربری توده سنگ مخصوصا برای توده سنگ‌های با کیفیت بالا خطای حاصل قابل توجه خواهد بود.

کلمات کلیدی: معیارهای شکست غیرخطی، معیار هوک-براون، معیار جانستون، ظرفیت بابری پی مربعی، روش اجزا محدود

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- پیشینه‌ی تحقیق ۲

۱-۳- اهداف پایان‌نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: مروری بر معیارهای شکست و توسعه‌ی آنها در تحقیق حاضر ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- معیارهای شکست تئوریک ۹

۲-۲-۱- معیار موهر-کولمب ۹

۲-۲-۲- معیار موهر ۱۰

۲-۲-۳- معیار شکست گریفیث ۱۱

۲-۳- معیارهای شکست تجربی برای سنگ بکر ۱۶

۲-۳-۱- معیار فایرهورست ۱۶

۲-۳-۲- معیار هابز برای سنگ بکر و شکسته ۱۷

۲-۳-۳- معیار خطی بودونی ۱۸

۲-۳-۴- معیار سهموی فرانکلین ۱۸

۲-۳-۵- معیار بینیاوسکی ۱۹

۲-۳-۶- معیار هوک-براون (۱۹۸۰) برای سنگ بکر ۱۹

۲-۳-۶-۱- معیار اصلاح شده هوک-براون برای سنگ بکر ۲۱

۲-۳-۷- معیار جانستون برای سنگ بکر ۲۲

۲-۳-۸- معیار رامامورتی برای سنگ بکر ۲۳

۲-۳-۹- معیار شئوری ۲۵

۲-۳-۱۰- معیار یوشیدا ۲۵
۲-۴- معیارهای متکی به فضای تنش‌های سه‌محوری $(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)$ ۲۶
۲-۴-۱- معیار کیم و لاد ۲۶
۲-۴-۲- معیار پن و هادسون ۲۶
۲-۴-۳- معیار ونگ و کیمینی ۲۷
۲-۵- معیارهای شکست برای توده سنگ ۲۷
۲-۵-۱- معیار هوک-براون برای توده سنگ ۲۷
۲-۵-۱-۱- اصلاح معیار هوک-براون ۲۸
۲-۵-۱-۲- معیار تعمیم‌یافته هوک-براون ۲۹
۲-۵-۱-۳- نسخه ۲۰۰۲ معیار هوک-براون ۳۰
۲-۵-۲- معیار بینیاوسکی-یودبیر و همکاران برای توده سنگ ۳۲
۲-۵-۲-۱- اصلاح معیار بینیاوسکی-یودبیر و همکاران ۳۳
۲-۵-۳- معیار شئوری همکاران برای توده سنگ ۳۳
۲-۶- ارائه یک معیار جدید برای توده سنگ براساس معیار جانستون ۳۶
۲-۶-۱- روش کار ۳۶
۲-۶-۲- روابط جدید براساس تحلیل رگرسیون ۳۶
۲-۶-۳- ارزیابی معیار جدید ۳۷
۲-۷- نتیجه‌گیری ۴۰
فصل سوم : روش‌های برآورد ظرفیت باربری پی واقع بر توده سنگ ۴۱
۳-۱- مقدمه ۴۲
۳-۲- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های درزه‌دار ۴۲
۳-۲-۱- روش کولهاوی و کارتر ۴۴
۳-۲-۲- رابطه‌ی جدید برآورد ظرفیت باربری بر اساس معیار تعمیم یافته جانستون ۴۶

۳-۲-۳- روش سرانو و اولالا ۴۷
۳-۲-۲-۱- جداول و نمو گرام‌های مربوط به حالت ساده شده ۵۰
۳-۲-۴- ضریب ظرفیت باربری ۵۲
۳-۳- تعیین ظرفیت باربری پی‌های مدفون ۵۳
۳-۴- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف ۵۴
۳-۵- تعیین ظرفیت باربری پی‌های شیب دار ۵۶
۳-۶- تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌های حاوی دسته‌های ناپیوستگی ۵۷
۳-۷- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های لایه‌ای ۵۹
۳-۸- نتیجه گیری ۶۲
فصل چهارم: به‌کارگیری معیار هوک-براون برای محاسبات اجزا محدود ۶۳
۴-۱- مقدمه ۶۴
۴-۲- معیار هوک- براون ۶۵
۴-۲-۱- پتانسیل خمیری ۶۹
۴-۲-۱-۱- نرخ ثابت اتساع ۷۰
۴-۳- فرآیند ارتجاعی-خمیری اجزا محدود ۷۰
۴-۴- اصول «حالت خمیری» و سطوح بازگشتی ۷۰
۴-۵- بهنگام‌سازی تنش برای حالت خمیری هوک-براون ۷۳
۴-۵-۱- بازگشت به سطح تسلیم ۷۵
۴-۶- تعیین درست بازگشت تنش ۷۷
۴-۶-۱- شرایط برای بازگشت به نقطه‌ی رأس ۷۷
۴-۶-۲- شرایط برای بازگشت به صفحه یا خط ۷۹
۴-۷- ماتریس ساختاری سازگار برای معیار هوک-براون ۸۰
۴-۷-۱- محاسبه‌ی D^{epc} روی سطح تسلیم ۸۰

۴-۷-۲- محاسبه‌ی D^{epc} روی یک منحنی ۸۲
۴-۷-۲-۱- ضرایب خمیری ۸۳
۴-۷-۲-۲- ماتریس ساختاری روی منحنی ۸۴
۴-۷-۲-۳- ماتریس ساختاری روی نقطه‌ی راس ۸۵
فصل پنجم: برآورد ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر توده سنگ با استفاده از حل عددی ۸۶
۵-۱- مقدمه ۸۷
۵-۲- روش اجزا محدود ۸۷
۵-۳- مدل اجزا محدود ۸۸
۵-۳-۱- نوع المان ۸۸
۵-۳-۲- مش و شرایط مرزی ۸۹
۵-۳-۳- مدل رفتاری ۹۰
۵-۳-۳-۱- مدل هوک-براون و سیستم GSI ۹۲
۵-۳-۴- روش بارگذاری در مدل اجزا محدود پی ۹۲
۵-۴- نتایج ۹۳
۵-۴-۱- دقت تحلیل‌های اجزا محدود ۹۳
۵-۴-۲- نتایج تحلیل یک مسئله نمونه ۹۴
۵-۴-۳- نمودارهای ظرفیت باربری ۹۴
۵-۵- ظرفیت باربری با تقریب‌های موهر-کلمب و مقایسه‌ی نتایج ۱۰۲
۵-۶- نتیجه‌گیری ۱۰۴
فصل ششم: نتایج و پیشنهادات ۱۰۷
۶-۱- مقدمه ۱۰۸
۶-۲- تعمیم معیار جانستون به توده سنگ درزه‌دار ۱۰۸
۶-۳- روش کران پایین جدید برای برآورد ظرفیت باربری پی نواری ۱۰۸

۶-۴- برآورد ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر توده سنگ ۱۰۸
۶-۵- پیشنهادات..... ۱۰۹
مراجع ۱۱۰

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقادیر پارامترهای m و s و ارتباط کمیتهای تعیین‌کننده کیفیت سنگ با این پارامترها [۱۵] ۲۰

جدول ۲-۲- مقادیر m_i برای سنگ بکر [۱۶] ۲۴

جدول ۲-۳- مقادیر مختلف B_i و M_i و بهترین رابطه بین M_i و σ_c برای سنگ‌های مختلف ۲۴

جدول ۲-۴- تخمین شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) ۳۱

شکل ۲-۸- رابطه بین تنش های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر برای معیار هوک-براون و موهر-کولمب. ۳۲

جدول ۲-۵- نتایج تحلیل رگرسیون. ۳۷

جدول ۲-۶- پارامترهای محاسبه‌شده دو معیار برای سه توده سنگ فرضی. ۳۸

جدول ۳-۱- مقادیر ضریب N_β برای مقادیر مختلف توان a در حالت ساده شده. ۵۱

جدول ۳-۲- ضریب ظرفیت باربری برای توده سنگ بدون وزن فرض شده $N_{\sigma 0}$ ۵۲

جدول ۳-۳- مقایسه ضریب ظرفیت باربری حاصل شده از روش‌های کران پایین با روش سرانو و اولالا ۵۳

جدول ۳-۲- ضرایب تصحیح شکل پی (L طول و B عرض پی) ۵۴

جدول ۵-۱- مقایسه نتایج ظرفیت باربری پی دایره‌ای از روش‌های مختلف. ۹۴

شکل ۵-۳- نمودار بار- تغییرمکان برای یک تحلیل. ۹۵

جدول ۵-۲- پارامترهای تحلیل مربوط به یک تحلیل. ۹۵

جدول ۵-۳- پارامترهای هوک-براون و موهر-کلمب معادل برای سه کیفیت توده سنگ. ۱۰۳

جدول ۵-۴- مقایسه‌ی روش های مختلف تعیین ظرفیت باربری نهایی پی مربعی واقع بر توده سنگ با کیفیت خیلی ضعیف. ۱۰۴

جدول ۵-۵- مقایسه‌ی روش های مختلف تعیین ظرفیت باربری نهایی پی مربعی واقع بر توده سنگ با کیفیت متوسط. ۱۰۴

جدول ۵-۶- مقایسه‌ی روش های مختلف تعیین ظرفیت باربری نهایی پی مربعی واقع بر توده سنگ

با کیفیت خیلی خوب..... ۱۰۵

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- تاثیر ابعاد حفره ایجاد شده در توده سنگی بر انتخاب معیار گسیختگی مورد استفاده [۱۵]..... ۹

شکل ۲-۲- نمودار معیار موهر-کولمب برحسب الف: تنش های اصلی و ب: تنش های نرمال و برشی..... ۱۱

شکل ۲-۳- نمودار معیار شکست موهر ۱۲

شکل ۲-۴- سیستم تنش وارد بر یک صفحه شکست بالقوه در سنگ در تئوری گریفیث ۱۳

شکل ۲-۵- تنش های وارد برمحیط اطراف یک شکاف بیضی شکل دو بعدی ۱۴

شکل ۲-۶-مقایسه معیار موهر-کولمب و معیار گریفیث برای $C=10\ MPa$، $\sigma_t=2$ MPa ، $\phi=40^\circ$..... ۱۶

شکل ۲-۷- مقایسه معیار هوک-براون با مقادیر مختلف m و s..... ۲۱

شکل ۲-۹- موقعیت سنگ نرم در طیف مصالح ژئوتکنیکی[۱۹]..... ۳۸

شکل ۲-۱۰- حد بالایی معیار تعمیم‌یافته جانستون در مقایسه با معیار هوک-براون برای سنگ مرمر..... ۳۹

شکل ۲-۱۱- حد پایینی معیار تعمیم‌یافته جانستون در مقایسه با معیار هوک-براون برای سنگ مرمر ۳۹

شکل ۲-۱۲- معیار تعمیم‌یافته جانستون در مقایسه با معیار هوک-براون برای سنگ گرانیت با مقاومت فشاری تک محوری ۲۵۰MPa ۳۹

شکل ۳-۱- شالوده قرار گرفته بر روی سنگ ۴۳

الف) تشکیل منطقه خرد شده در زیر سازه و تشکیل گوه های سنگی ب) پوش گسیختگی موهر مناطق A و B..... ۴۳

شکل۳-۲- پی نواری با عرض B بر روی توده سنگ افقی [۲۲]. ۴۵
شکل۳-۳- نمایشی ساده از اثر مقیاس روی انتخاب مدل رفتاری توده سنگ. ۴۸
شکل ۳-۴- حالت‌های شکست پی سنگ ۵۰
شکل ۳-۵- حالت ساده شده برای روش سرانو ۵۱
شکل۳-۶- ضرایب ظرفیت باربری شالوده‌ی واقع بر سطح افقی ۵۶
شکل ۳-۷- مقادیر ضرایب ظرفیت باربری شالوده‌ی واقع بر سطح شیب‌دار. ۵۸
شکل ۳-۸- ظرفیت باربری پی احداث شده روی سنگ حاوی دو دسته ناپیوستگی. ۵۹
شکل ۳-۹- احداث پی گسترده روی لایه‌های سنگی (لایه فوقانی صلب و لایه تحتانی ضعیف‌تر است) ۶۱
شکل ۴-۱- تصویر معیار هوک-براون روی صفحه‌ی σ_1-σ_3. ۶۶
شکل ۴-۳- معیار هوک-براون در فضای تنش های اصلی. محور تنش هیدرواستاتیک به وسیله‌ی p نشان داده شده است. ۶۸
شکل ۴-۴- سطح تسلیم اولیه معیار هوک-براون در فضای تنش اصلی، برای حالتی که $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ۶۹
شکل ۴-۵- اصول سطوح بازگشتی. ۷۲
شکل ۴-۶- چهار بازگشت تنش مختلف. ۷۴
شکل ۴-۷- بازگشت به سطح تسلیم. تصویر بر صفحه‌ی σ_1-σ_3. ۷۵
شکل ۴-۸- صفحات مرزی و بردارهای نرمال آنها برای تعیین اینکه کجا باید تنش پیش‌بینی‌کننده به نقطه‌ی راس برگشت کند. ۷۸
شکل ۴-۹- مقطعی از معیار هوک-براون روی صفحه‌ی هشت‌وجهی. معیارهای مجاور کششی و فشاری به وسیله‌ی خط چین مشخص شده است. ۸۳
شکل ۵-۱- نمونه‌ای از مش استفاده شده در تحلیل اجزا محدود پی مربعی. ۹۰
شکل ۵-۲- شرایط مرزی در صفحات تقاطع x-z و y-z از مدل. ۹۰
شکل۵-۴- جزئیات مربوط به تعیین تغییر مکان نزدیک به گسیختگی. ۹۶

شکل ۵-۵- ضرایب ظرفیت باربری برای توده سنگ بی وزن برای مقادیر مختلف GSI. ۹۶
شکل ۵-۶- تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی برای GSI=10..... ۹۷
شکل۵-۷- تغییرات تغییرمکان نزدیک گسیختگی برای GSI=10..... ۹۷
شکل ۵-۸- تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی برای GSI=30..... ۹۸
شکل ۵-۹- تغییرات تغییرمکان نزدیک گسیختگی برایGSI=30 ..... ۹۸
شکل ۵-۱۰- تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی برای GSI=50..... ۹۹
شکل ۵-۱۱- تغییرات تغییرمکان نزدیک گسیختگی برای GSI=50..... ۹۹
شکل ۵-۱۲- تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی برای GSI=60..... ۱۰۰
شکل ۵-۱۳- تغییرات تغییرمکان نزدیک گسیختگی برایGSI=60..... ۱۰۰
شکل ۵-۱۴- تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی برای GSI=80..... ۱۰۱
شکل ۵-۱۵- تغییرات تغییرمکان نزدیک گسیختگی پی مربعی برای GSI=80..... ۱۰۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

از جمله گزینه‌های محتمل برای فونداسیون سازه‌های عظیم می‌توان به پی‌های واقع بر روی توده‌های سنگی اشاره کرد. یکی از شرایط عملکرد صحیح پی‌ها، تحمل بار وارده از سازه بر روی پی است یا به عبارت دیگر ظرفیت باربری پی پاسخگوی بار تحمیلی باشد. ظرفیت باربری فونداسیون سازه‌های بنا شده روی توده‌های سنگی نظیر سدها، پل‌ها و سازه‌های عظیم از اهمیت و جذابیت قابل توجهی برای مهندسین ژئوتکنیک برخوردار است. براساس بررسی‌های انجام شده در سال ۲۰۰۷، در ۴۰ ایالت آمریکا، حدود ۷۲/۶ درصد فونداسیون‌های ساخته شده برای سازه پل‌ها بر روی و یا داخل سنگ‌ها ساخته شده‌اند؛ اما با این وجود، مطالعات اندکی برای بررسی دقت روش‌های طراحی موجود برای تخمین ظرفیت باربری یا نشست پی‌های روی توده سنگ انجام شده است [۱]. تعیین ظرفیت باربری پی‌ها از مسائل مهمی بوده که از دیرباز مورد توجه مهندسین ژئوتکنیک بوده و بنا به اهمیت آن روابط متعددی توسط محققین مختلف ارائه گردیده است. از جمله روابطی که برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های روی توده سنگ ارائه شده است می‌توان به روابط ترزاقی ، باولز و کولهاوی اشاره کرد. در هر کدام از روابط فوق عوامل مختلفی در نظر گرفته شده‌اند از جمله درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، چسبندگی و اصطکاک داخلی توده‌سنگ، شاخص‌های طبقه‌بندی سنگ‌ها و غیره. به طوری که تحت شرایط کاملا برابر برای خصوصیات طبیعی و هندسه توده سنگ، نتایج محاسبه مقدار ظرفیت باربری برای فونداسیون از روش‌های مختلف یکسان نخواهد بود.

در مقایسه با خاک‌ها، اغلب سنگ‌ها مقاوم‌تر هستند و ظرفیت باربری بیشتری دارند و بار وارده از سازه‌ها بر سنگ معمولا از نظر باربری مشکلی ایجاد نمی‌کند. با این وجود، بار سازه‌های بزرگ، همانند سدها، آسمانخراش‌ها یا پایه‌های پل‌ها می‌توانند در موارد بحرانی و حساس مانند زلزله برای ظرفیت باربری سنگ‌های نسبتا مقاوم مشکل‌زا باشند. در طبیعت، اکثر توده سنگ‌ها دارای درزه و گسل می‌باشند. در صورتی که سنگ درزه‌دار باشد و یا هوازده باشد دچار تغییر شکل‌های بیشتری می‌شود و در این حالت ظرفیت باربری نسبت به حالت بکر و سالم آن متفاوت می‌باشد. در نتیجه در طراحی فونداسیون‌های واقع بر روی بستر سنگی باید تمام پارامترهای ساختاری توده سنگ و شرایط محیطی را بررسی کرد.

۱-۲- پیشینه‌ی تحقیق

محاسبه‌ی ظرفیت باربری از مباحث اصلی و قدیمی مهندسی ژئوتکنیک است. لذا روش‌های مختلفی جهت یافتن مقدار آن موجود می‌باشد. اما در اکثر آن روش‌ها مصالح پیش فرض خاک

است. در دو دهه‌ی اخیر با پیشرفت تدریجی علم مکانیک سنگ، تلاش‌هایی برای یافتن مقدار دقیق ظرفیت باربری توده سنگ‌ها انجام شده است.

سرانو و اولالا[1] در سال ۱۹۹۴ روشی را برای تعیین ظرفیت باربری نهایی سنگ درزه‌دار ارائه دادند که در آن از معیار هوک-براون استفاده شده است [۲]. این روش شالوده‌های مدفون[2]، بارگذاری‌های مورب و قرارگیری پی بر روی سطوح شیب‌دار را در بر می‌گیرد. سرانو و همکاران در سال ۲۰۰۰ روش خود را بر اساس نسخه‌ی جدید معیار هوک اصلاح کردند [۳].

یانگ[3] و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک راه حل کران پایین[4] را برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی نواری واقع بر توده سنگ ارائه کردند [۴].

پراکوسو و کولهاوی[5] در سال ۲۰۰۴ راه حلی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی نواری واقع بر توده سنگ حاوی یک یا دو دسته درزه ارائه نمودند. در این روش مقاومت مصالح سنگ و نیز درزه ها از طریق معیار موهر-کلمب بدست می‌آید [۵].

ساکلیف[6] و همکاران در سال ۲۰۰۴ به مطالعه‌ی ظرفیت باربری به روش کران پایین پرداختند. آنها پی نواری را بر روی توده سنگ به همراه یک، دو و سه دسته درزه مدل کردند. در این روش معیار خطی موهر-کلمب استفاده شد [۶].

سینگ و رائو[7] در سال ۲۰۰۵ ظرفیت باربری توده سنگ‌های ناهمسانگرد را محاسبه کرده و جداول ظرفیت باربری آنها را ارائه نموند [۷].

یانگ و ین[8] در سال۲۰۰۵ راه حل کران بالا[9] را برای ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر توده سنگ ارائه نمودند [۸]. ایده‌ی استفاده شده در این روش جایگزینی معیار هوک-براون با یک دامنه‌ی بهینه‌ی موهر-کلمب است. برآوردهای کران بالا برای ظرفیت باربری در این روش از طریق اجرای روش کینماتیک[10] آنالیز حدی بدست آمد.

---

[1] Serrano & Olala
[2] Recessed Footings
[3] Yang
[4] Lower Bound Approach
[5] Prakoso & Kulhawy
[6] Sutcliffe
[7] Singh & Rao
[8] Yang & Yin
[9] Upper Bound Solution
[10] Kinematic Approach

مریفیلد[1] و همکاران در سال ۲۰۰۶ با بکار بردن آنالیز حدی عددی به ارزیابی ظرفیت باربری پی نواری واقع بر روی توده سنگی که مقاومت آن از طریق معیار هوک-براون محاسبه می‌شود پرداختند [۹]. در این روش با استفاده از روش اجزا محدود حد بالا و پایین ظرفیت باربری محاسبه شد. این روش بر کاربرد تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی و غیر خطی استوار است و نیز یک تقریب نرم را برای سطح تسلیم هوک-براون اتخاذ کرد.

سآدا[2] و همکاران در سال ۲۰۰۸ از طریق آنالیز حدی به محاسبه‌ی ظرفیت باربری پرداختند و نتایج خود را با «مریفیلد و همکاران» و «سرانو و اولالا» مقایسه کردند و نیز جداولی برای ظرفیت باربری پی نواری ارائه دادند [۱۰]. آنها در این روش برخلاف یانگ و ین برآورد کران بالای ظرفیت باربری را با حفظ معیار هوک-براون انجام دادند.

ایمانی و همکاران در سال۲۰۱۲ ظرفیت باربری را بر اساس روش کران بالا و با توجه به اثر آب زیرزمینی و نیز فاصله‌ی درزه ها مورد بررسی قراردادند [۱۱].

بایندلیش[3] و همکاران در سال۲۰۱۲ به مطالعه‌ی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی سطحی صلب واقع بر توده سنگ ناهمسانگرد، تحت شرایط کرنش مسطح، پرداختند [۱۲].

کلوزن[4] در سال ۲۰۱۳ ظرفیت باربری پی دایره‌ای واقع بر توده سنگی که مقاومت آن تابع معیار هوک-براون است را از طریق روش اجزا محدود محاسبه نموده است [۱۳].

همانطور که ملاحظه شد، توجه اکثر محققان در موضوع ظرفیت باربری پی سنگ، بر پی نواری تمرکز یافته است. آنها ظرفیت باربری پی نواری را از روش‌های مختلفی حل کرده‌اند ولی ظرفیت باربری پی مربعی تاکنون مورد توجه واقع نشده است.

۱-۳- اهداف پایان‌نامه

مقاومت سنگ می‌تواند به وسیله‌ی یک معیار شکست تخمین زده و برآورد شود. معیارهای شکست به دو دسته‌ی تئوریک و تجربی تقسیم می‌شوند. از بین این معیارهای تجربی، معیار غیر خطی «هوک-براون» امروزه به طور گسترده‌ای برای سنگ‌های بکر و توده سنگ‌ها استفاده می‌شود. این معیار در اصل برای سنگ‌های سخت توسعه پیدا کرد [۱۴] اما به دلیل نبود جایگزین،

[1] Merifield
[2] Saada
[3] Bindlish
[4] Clausen

با انجام اصلاحاتی به سنگ‌های ضعیف و نرم هم تعمیم داده شد.

معیار جانستون مقاومت سنگ‌های نرم را بهتر از معیار هوک-براون برآورد می‌کند. علاوه بر این معیار جانستون می‌تواند مقاومت خاک رس تحکیم‌یافته را نیز برآورد کند. از آنجا که این معیار شامل توده سنگ درزه‌دار نمی‌شود در این پایان‌نامه با استفاده از معیار هوک-براون نقیصه‌ی معیار جانستون، از طریق تعمیم آن به توده سنگ درزه‌دار رفع می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی بوضوح نشان میدهند که معیارهای مقاومتی اکثر سنگ‌ها به ازای تغییرات تنش نرمال، غیر خطی میباشد. با توجه به این مسأله در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی برای ظرفیت باربری نهایی توده سنگ‌ها با استفاده از معیار هوک-براون، که یکی از مناسب‌ترین معیارها برای بیان خواص مقاومتی توده سنگ است، صورت گرفته است، اما در تمامی این مطالعات از معیار اصلاح شده یا ساده شده هوک-براون استفاده شده یا سعی شده منحنی هوک-براون با معیار موهر-کولمب اصلاح شده تخمین زده شود. از طرف دیگر همانطور که تذکر داده شد توجه اکثر محققان در موضوع ظرفیت باربری پی سنگ، بر پی نواری تمرکز یافته است. این محققان ظرفیت باربری پی نواری را از روش‌های مختلفی حل کرده‌اند و بعضی از آنها جداول ظرفیت باربری پی نواری را ارائه نموده‌اند. در حالیکه برای پی مربعی روش تحلیلی یا گرافیکی برای ظرفیت باربری وجود ندارد.

لذا در این پایان‌نامه مسئله‌ی ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر توده سنگ با استفاده از معیار غیرخطی هوک-براون و از طریق روش اجزا محدود بررسی می‌شود و نمودارهایی برای استفاده‌ی عملی ارائه خواهند شد.

اهداف این پایان‌نامه را می‌توان به طور خلاصه در چند مورد به شرح زیر بیان نمود:

۱- توسعه‌ی معیار شکست جانستون به توده‌های سنگی درزه‌دار.
۲- ارائه‌ی روش جدیدی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی نواری بر اساس معیار توسعه یافته‌ی جانستون.
۳- یافتن ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر توده سنگ با استفاده از روش اجزا محدود.
۴- مقایسه‌ی نتایج روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری پی مربعی.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در شش فصل تنظیم شده است: فصل اول که فصل حاضر می‌باشد مقدمه، اهداف