بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران- خاک و پی

تحلیل عددی پی نواری واقع بر خاک‌های با لایه‌بندی مورب

استاد راهنمای اول: دکتر رضا پور حسینی

استاد راهنمای دوم: دکتر مهدی فلاح تفتی

استاد مشاور: دکتر کاظم برخورداری

پژوهش و نگارش:عماد ملک سعیدی

بهمن ۱۳۹۲

کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه/ رساله متعلق به دانشگاه یزد است و هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی از این پایان نامه / رساله برای تولید دانش فنی، ثبت اختراع، ثبت اثر بدیع هنری، همچنین چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس و ارائه مقاله در سمینارها و مجلات علمی از این پایان‌نامه / رساله منوط به موافقت کتبی دانشگاه یزد است.

تقدیم به سه وجود مقدس:

اسوه صبر و ایثار. . . . مادرم

کوه شهامت و بردباری. . . . پدرم

و آنانی سوختند تا بسازند. . . استادانم

از اساتید محترم، آقایان**دکتر رضا پور حسینی** و **دکتر مهدی فلاح تفتی** که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در انجام این تحقیق دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده داشتند و همچنین از استاد محترم، آقای **دکتر کاظم برخورداری** که زحمت مشاوره این رساله را بر عهده داشتند و بدون مساعدت ایشان این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

طراحی شالوده‌های مهندسی به منظور انتقال و توزیع نیروهای وارده به لایه‌های خاکی و سنگی زیرین انجام می‌گیرد. مقاومت خاکی که شالوده بر روی آن قرار می‌گیرد از نوع برشی است و هنگامی که پی مقاومت برشی خود را از دست بدهد اصطلاحاً پی دچار گسیختگی می‌شود. در طبیعت لایه‌های آبرفتی عمدتا به صورت لایه ای وجود دارند که می تواند بر روی ظرفیت باربری شالوده اثر محسوسی بگذارند. وجه اشتراک اکثر مطالعات انجام شده، در نظر گرفتن لایه‌های خاک به صورت یکنواخت و افقی است. در واقعیت ممکن است پی بر روی لایه‌های خاک و یا بستر سنگی مورب قرار بگیرد. تاثیر مورب بودن خاک‌های لایه‌بندی شده اشباع بر عملکرد پی به صورت دقیق در مطالعات گذشته بررسی نشده است. در این پایان‌نامه به کمک نرم افزار *FLAC* که مبنای آن روش تفاضل محدود است، اثر شیب دو لایه خاک رسی زه‌کشی نشده، اثر شیب بستر سنگی در عمق محدود و تاثیر زه‌کشی لایه‌های خاک بر ظرفیت باربری شالوده نواری واقع بر روی سطح زمین مطالعه شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد، اگر نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده (نسبت مقاومت برشی لایه فوقانی به لایه تحتانی) کمتر از یک باشد، در نسبت عمق لایه اول به عرض پی ثابت، با افزایش شیب لایه‌بندی ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند و اگر نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده بزرگ‌تر از یک باشد، با افزایش شیب لایه‌بندی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت عمق لایه اول به عرض پی، از اثر شیب لایه‌بندی کاسته می‌شود. با استفاده از نتایج حاصل‌شده ضرایب باربری چسبندگی N_c اصلاح‌شده و به صورت جداول طراحی برای مقاصد عملی تهیه شده‌اند.

کلمات کلیدی: پی نواری، رس زه‌کشی نشده، روش‌های عددی، خاک لایه‌بندی شده، بارگذاری زه‌کشی، ظرفیت باربری نهایی

فهرست مباحث

فصل۱ : مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق ۱

۱-۳ اهداف پژوهش ۳

۱-۴ مفروضات و سؤالات پژوهشی ۳

۱-۵ نوآوری‌های پژوهش ۴

فصل۲ : مرور ادبیات ۶

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ روش‌های نیمه تجربی ۱۱

۲-۲-۱ روش میرهوف و برون ۱۱

۲-۲-۲ روش وسیک ۱۲

۲-۲-۳ روش بولز ۱۳

۲-۲-۴ روش میرهوف و هانا ۱۴

۲-۳ روش‌های تعادل حدی ۱۶

۲-۳-۱ روش باتن ۱۶

۲-۳-۲ روش ردی و سیرینیواسان ۱۷

۲-۴ روش‌های حدی ۱۷

۲-۴-۱ روش چن و دویدسان ۱۷

۲-۴-۲ روش چن ۱۸

۲-۴-۳ روش فلورکیویکز ۱۹

۲-۴-۴ روش میشلوفسکی و شی ۲۰

۲-۵ روش‌های عددی ۲۱

۲-۵-۱ تحلیل اجزا محدود ۲۲

۲-۵-۲ تحلیل تفاضل محدود ۲۷

۲-۶ جمع بندی ۲۸

فصل۳ : روش‌های تحلیلی ۲۹

۳-۱ مقدمه ۳۰

۳-۲ روش‌های تحلیلی ۳۰

۳-۳ تحلیل حدی ۳۳

۳-۳-۱ نظریه پایداری ۳۴

۳-۳-۲ اصول تحلیل حدی ۳۵

۳-۳-۳ تعیین ظرفیت باربری به کمک نظریه حد بالا ۳۹

۳-۳-۴ تعیین ظرفیت باربری به کمک نظریه حد پایین ۴۴

فصل۴: مدل‌سازی عددی در FLAC ۴۸

۴-۱ معرفی نرم‌افزار *FLAC*..... ۴۹

۴-۲ مبانی و مفروضات نرم افزار..... ۵۰

۴-۳ مکانیسم استفاده از *FLAC*..... ۵۶

۴-۴ تعریف مسئله و مدل‌سازی..... ۵۹

۴-۴-۱ کد نویسی با زبان *FISH* برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی ۶۰

۴-۴-۲ هندسه مدل و شرایط مرزی ۶۳

۴-۴-۳ اختصاص دادن مشخصات خاک..... ۶۸

۴-۴-۴ تحلیل اولیه ۷۸

۴-۴-۵ مدل‌سازی پی ۸۳

۴-۴-۶ اعمال بارگذاری ۸۵

۴-۴-۷ نمایش نتایج و انجام تحلیل نهایی ۸۵

فصل۵ : نتایج تحلیل عددی ۸۶

۵-۱ مقدمه..... ۸۷

۵-۲ نتایج مطالعات عددی..... ۸۸

۵-۲-۱ بررسی اثر ابعاد مش بندی مدل بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری ۸۸

۵-۲-۲ بررسی اثر انتخاب نسبت‌های مختلف مقاومت برشی بر روی ظرفت باربری نهایی..... ۹۷

۵-۲-۳ بررسی تغییرات نسبت مدول الاستیسیته بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری.. ۱۰۱

۵-۲-۴ بررسی تأثیر شیب سطح اشتراک دو لایه رسی زه‌کشی نشده بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری ۱۰۶

۵-۲-۵ بررسی اثر قرارگیری بستر سنگی بکر در عمق محدود بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری..... ۱۱۹

۵-۲-۶ بررسی اثر زه‌کشی ناقص لایه اول بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری..... ۱۲۴

۵-۲-۷ بررسی اثر تغییر عرض پی همراه با زه‌کشی ناقص لایه اول بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری ۱۳۰

۵-۲-۸ بررسی اثر زه‌کشی کامل لایه اول بر روی ظرفیت باربری نهایی شالوده نواری..... ۱۳۲

فصل۶ : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۳۷

۶-۱ نتیجه گیری..... ۱۳۸

۶-۲ پیشنهادهایی برای پژوهشهای آینده..... ۱۴۱

منابع: ۱۴۲

پیوست: ۱۴۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱ مکانیسم‌های گسیختگی برشی در خاک ۹

شکل۲-۲ سطوح گسیختگی به پیشنهاد ترزاقی و پک ۱۰

شکل۲-۳ نمودار تغییرات واحد چسبندگی به نسبت مقاومت برشی ۱۶

شکل۲-۴ مکانیسم گسیختگی باتن و چن ۱۹

شکل۲-۵ هدوگراف پی نواری پیشنهادشده توسط فلورکیویتز ۲۰

شکل۲-۶ مقایسه نتایج روش فلورکیویتز و میرهوف و هانا ۲۱

شکل۲-۷ مقایسه تحلیل برد و فریدمن ۲۳

شکل۲-۸ ضرایب باربری اصلاح‌شده توسط ژو ۲۴

شکل۲-۹ نتایج تحلیل ونگ و کارتر ۲۵

شکل۲-۱۰ نتایج تحلیل ونگ و کارتر ۲۶

شکل۳-۱ مکانیسم گسیختگی و اتلاف انرژی برای مصالح پیروی مدل رفتاری ترسکا ۴۰

شکل۳-۲ مکانیسم گسیختگی و اتلاف انرژی برای مصالح پیروی مدل رفتاری موهر کولمب ۴۱

شکل۳-۳ مکانیسم های گسیختگی فرضی برای رس زه‌کشی نشده ۴۲

شکل۳-۴ میدان تنش موجود در تحلیل حد پایین ۴۵

شکل۳-۵ میدان تنش ناپیوسته برای پی نواری ۴۶

شکل۴-۱ چرخه حل مسئله در نرم‌افزار FLAC ۵۲

شکل۴-۲ نحوه تشکیل المان در نرم‌افزار FLAC ۵۶

شکل۴-۳ الگوریتم کلی مدل‌سازی و تحلیل در FLAC ۵۸

شکل۴-۴ طرح کلی از شالوده نواری واقع بر خاک دو لایه‌ای رسی زه‌کشی نشده مورب ۵۹

شکل۴-۵ طرح کلی از قرارگیری پی نواری بر روی خاک رسی زه‌کشی نشده مورب و بستر سنگی در عمق محدود ۶۰

شکل۴-۶ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با نسبت $s_{u1}/s_{u2} \leq 1$ ۶۲

شکل۴-۷ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه بندی شده با نسبت $s_{u1}/s_{u2} \geq 1$ ۶۲
شکل۴-۸ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری با فرض تحلیل تحکیمی ۶۷
شکل۴-۹ ترسیم فضایی از معیار گسیختگی موهر کولمب ۷۰
شکل۴-۱۰ رویه تسلیم ترسکا گست در فضای سه بعدی ۷۲
شکل۴-۱۱ رابطه بین آزمایش‌های برش و مدهای تنش برشی ۷۳
شکل۴-۱۲ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با در نظر گرفتن وزن مصالح ۸۰
شکل۴-۱۳ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب بدون در نظر گرفتن وزن مصالح ۸۰
شکل۴-۱۴ منحنی هم رفتار تنش قائم برای خاک رسی زه‌کشی نشده لایه‌بندی شده مورب با در نظر گرفتن وزن مصالح ۸۰
شکل۴-۱۵ منحنی هم رفتار تنش قائم برای خاک رسی زه‌کشی نشده لایه‌بندی شده مورب بدون در نظر گرفتن وزن مصالح ۸۱
شکل۴-۱۶ نمودار تغییرات نیروهای نامتعادل کننده در سیستم ۸۳
شکل۴-۱۷ بردارهای جابه‌جایی در زیر پی نواری با کف صاف (تصویر بزرگنمایی شده) ۸۴
شکل۴-۱۸ بردارهای جابه‌جایی در زیر پی نواری با کف زبر (تصویر بزرگنمایی شده) ۸۴
شکل۵-۱ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha = 20^{o}$، $H_d/B = 0/5$، $s_{u1}/s_{u2} \prec 1$ در ابعاد $40B \times 80B$ ۸۹
شکل۵-۲ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha = 20^{o}$، $H_d/B = 0/5$، $s_{u1}/s_{u2} \prec 1$ در ابعاد $40B \times 80B$ ۸۹
شکل۵-۳ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha = 20^{o}$، $H_d/B = 0/5$، $s_{u1}/s_{u2} \succ 1$ در ابعاد $20B \times 40B$ ۸۹
شکل۵-۴ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha = 20^{o}$، $H_d/B = 0/5$، $s_{u1}/s_{u2} \succ 1$ در ابعاد $20B \times 40B$ ۹۰

شکل۵-۵ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ با تراکم مش $۵X$ ۹۱
شکل۵-۶ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ با تراکم مش $۵X$ ۹۱
شکل۵-۷ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ با تراکم مش $۳X$ ۹۲
شکل۵-۸ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ با تراکم مش $۳X$ ۹۲
شکل۵-۹ منحنی هم رفتار تنش قائم در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۹۴
شکل۵-۱۰ منحنی هم رفتار تنش قائم در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده افقی در حالت، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\prec۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۹۴
شکل۵-۱۱ منحنی هم رفتار تنش قائم در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha=۲۰^{o}$، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\succ۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۹۵
شکل۵-۱۲ منحنی هم رفتار تنش قائم در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $\alpha=۲۰^{o}$، $H/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}\prec۱$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۹۵
شکل۵-۱۳ رابطه بین نسبت بیش تحکیمی خاک رسی با مدول الاستیسیته ۹۸
شکل۵-۱۴ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha=۲۰^{o}$، $H_d/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}=۴۰/۲۰=۲/۰$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۹۹
شکل۵-۱۵ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha=۲۰^{o}$، $H_d/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}=۴۰/۲۰=۲/۰$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۱۰۰
شکل۵-۱۶ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha=۲۰^{o}$، $H_d/B=۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲}=۲۰/۴۰=۰/۵$ در ابعاد $۴۰B\times۲۰B$ ۱۰۰

شکل۵-۱۷ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} = ۲۰/۴۰ = ۰/۵$ در ابعاد $۴۰B \times ۲۰B$ ۱۰۰
شکل۵-۱۸ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $H_d/B = ۰/۵$، $E_{u۱}/E_{u۲} \succ ۱$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در ابعاد ۱۰۴
شکل۵-۱۹ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $H_d/B = ۰/۵$، $E_{u۱}/E_{u۲} \succ ۱$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در ابعاد ۱۰۴
شکل۵-۲۰ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $H_d/B = ۰/۵$، $E_{u۱}/E_{u۲} \prec ۱$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در ابعاد ۱۰۵
شکل۵-۲۱ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب با زاویه $H_d/B = ۰/۵$، $E_{u۱}/E_{u۲} \prec ۱$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در ابعاد ۱۰۵
شکل۵-۲۲ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۷
شکل۵-۲۳ منحنی هم رفتار تنش در زیر نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۷
شکل۵-۲۴ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۷
شکل۵-۲۵ منحنی هم رفتار تنش در زیر نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۸
شکل۵-۲۶ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۳۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۸
شکل۵-۲۷ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۳۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \prec ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۸
شکل۵-۲۸ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۳۰^{o}$، $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در حالت کف زبر ۱۰۹

شکل۵-۲۹ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده مورب در حالت، $\alpha = ۳۰^{o}$ $H_d/B = ۰/۵$، $s_{u۱}/s_{u۲} \succ ۱$ در حالت کف زبر..... ۱۰۹
شکل۵-۳۰ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۰/۲۵$..... ۱۱۳
شکل۵-۳۱ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۰/۵$..... ۱۱۳
شکل۵-۳۲ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۰/۷۵$..... ۱۱۴
شکل۵-۳۳ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۱/۰$..... ۱۱۴
شکل۵-۳۴ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۱/۵$..... ۱۱۵
شکل۵-۳۵ مقایسه نتایج حاصل‌شده برای خاک لایه‌بندی شده افقی با نتایج موجود در ادبیات برای $H/B = ۲/۰$..... ۱۱۵
شکل۵-۳۶ تغییرات ضریب باربری اصلاح‌شده نسبت به زوایای مختلف لایه‌بندی برای نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده $s_{u۱}/s_{u۲} = ۰/۲۵$..... ۱۱۶
شکل۵-۳۷ تغییرات ضریب باربری اصلاح‌شده نسبت به زوایای مختلف لایه‌بندی برای نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده $s_{u۱}/s_{u۲} = ۰/۵۰$..... ۱۱۷
شکل۵-۳۸ تغییرات ضریب باربری اصلاح‌شده نسبت به زوایای مختلف لایه‌بندی برای نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده $s_{u۱}/s_{u۲} = ۲/۰$..... ۱۱۷
شکل۵-۳۹ تغییرات ضریب باربری اصلاح‌شده نسبت به زوایای مختلف لایه‌بندی برای نسبت مقاومت برشی زه‌کشی نشده $s_{u۱}/s_{u۲} = ۴/۰$..... ۱۱۸
شکل۵-۴۰ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha = ۲۰^{o}$ $H_d/B = ۰/۲۵$ در حالت کف زبر..... ۱۲۰

شکل۵-۴۱ منحنب هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha=۲۰^o$ $H_d/B=۰/۲۵$ در حالت کف زبر..... ۱۲۰
شکل۵-۴۲ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha=۲۰^o$ $H_d/B=۱/۰$ در حالت کف زبر..... ۱۲۰
شکل۵-۴۳ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha=۲۰^o$ $H_d/B=۱/۰$ در حالت کف زبر..... ۱۲۱
شکل۵-۴۴ بردارهای جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha=۲۰^o$ $H_d/B=۲/۰$ در حالت کف زبر..... ۱۲۱
شکل۵-۴۵ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده با بستر سنگی در حالت، $\alpha=۲۰^o$ $H_d/B=۲/۰$ در حالت کف زبر..... ۱۲۱
شکل۵-۴۶ تغییرات ضریب باربری چسبندگی با نسبت عمق حداقل به عرض پی..... ۱۲۳
شکل۵-۴۷ تغییرات ضرایب باربری اصلاح‌شده با تغییرات زاویه بستر سنگی..... ۱۲۴
شکل۵-۴۸ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده در حالت زه‌کشی ناقص $H_d/B=۰/۵$ و $\alpha=۲۰^o$، $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $\phi=\psi=۱^o$ (در حالت کف زبر)..... ۱۲۸
شکل۵-۴۹ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده در حالت زه‌کشی ناقص $H_d/B=۰/۵$ و $\alpha=۲۰^o$، $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $\phi=\psi=۱^o$ (در حالت کف زبر)..... ۱۲۸
شکل۵-۵۰ نمودار بار جابه‌جایی پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده در حالت زه‌کشی ناقص $H_d/B=۰/۵$ و $\alpha=۲۰^o$، $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $\phi=\psi=۳^o$ (در حالت کف زبر)..... ۱۲۹
شکل۵-۵۱ منحنی هم رفتار تنش در زیر پی نواری واقع بر خاک لایه‌بندی شده در حالت زه‌کشی ناقص $H_d/B=۰/۵$ و $\alpha=۲۰^o$، $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $\phi=\psi=۳^o$ (در حالت کف زبر)..... ۱۲۹
شکل۵-۵۲ مقایسه ضرایب باربری اصلاح‌شده برای $c_۱/s_{u۲}\prec ۱$ و $H_d/B=۰/۵$ ۱۳۵
شکل۵-۵۳ مقایسه ضرایب باربری اصلاح‌شده برای $c_۱/s_{u۲}\prec ۱$ و $H_d/B=۱/۵$ ۱۳۵
شکل۵-۵۴ مقایسه ضرایب باربری اصلاح‌شده برای $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $H_d/B=۰/۵$ ۱۳۶
شکل۵-۵۵ مقایسه ضرایب باربری اصلاح‌شده برای $c_۱/s_{u۲}\succ ۱$ و $H_d/B=۱/۵$ ۱۳۶

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱ ضرایب باربری اصلاح‌شده توسط وسیک..... ۱۳

جدول۴-۱ مقایسه روشهای عددی صریح و غیرصریح..... ۵۳

جدول۴-۲ دستورهای مرتبط با اعمال شرایط مرزی..... ۶۳

جدول۴-۳ ادامه دستورهای مرتبط با اعمال شرایط مرزی..... ۶۴

جدول۴-۴ دستورهای مرتبط با اعمال شرایط اولیه..... ۶۴

جدول۴-۵ کدهای مربوط به مدل‌سازی مصالح کِشسان همگن..... ۶۹

جدول۴-۶ کدهای مربوط به مدل‌سازی مصالح موهر کولمب..... ۷۸

جدول۵-۱ مقایسه ظرفیت باربری نهایی به دست آمده در ابعاد مختلف..... ۹۰

جدول۵-۲ مقایسه ظرفیت باربری نهایی در تراکم مش‌های متفاوت..... ۹۳

جدول۵-۳ موقعیت پایین‌ترین نقطه در حباب‌های تنش زیر پی..... ۹۶

جدول۵-۴ رابطه بین مقاومت برشی زه‌کشی نشده خاک و استحکام آن..... ۹۷

جدول۵-۵ ضرایب باربری اصلاح‌شده با توجه به نسبت مقاومت برشی‌های متفاوت (N_c')..... ۱۰۱

جدول۵-۶ مقادیر ضرایب باربری در نسبت سختی‌های متفاوت برای $H/B = ۰/۵$..... ۱۰۳

جدول۵-۷ مقادیر ضرایب باربری در نسبت سختی‌های متفاوت برای $H/B = ۱/۵$..... ۱۰۳

جدول۵-۸ ضرایب باربری چسبندگی اصلاح‌شده برای پی با کف زبر(N_c')..... ۱۱۱

جدول۵-۹ ضرایب باربری چسبندگی اصلاح‌شده برای پی با کف صاف (N_c')..... ۱۱۲

جدول۵-۱۰ ضرایب باربری چسبندگی اصلاح‌شده برای پی با کف زبر..... ۱۲۲

جدول۵-۱۱ ضرایب باربری چسبندگی اصلاح‌شده برای پی با کف صاف..... ۱۲۳

جدول۵-۱۲ ضریب باربری چسبندگی با در نظر گرفتن زه‌کشی ناقص..... ۱۲۶

جدول۵-۱۳ خطای محاسبات ضریب باربری چسبندگی در حالت زه‌کشی ناقص..... ۱۲۷

جدول۵-۱۴ تغییرات ظرفیت باربری نهایی نسبت به تغییرات عرض پی در نسبت $c_۱/s_{u۲} = ۰/۵$..... ۱۳۱

جدول۵-۱۵ تغییرات ظرفیت باربری نهایی نسبت به تغییرات عرض پی در نسبت $c_1/s_{u2}=2/0$ ۱۳۲
جدول۵-۱۶ تغییرات ظرفیت باربری نهایی در حالت زه‌کشی کامل در نسبت $c_1/s_{u2}=0/5$ ۱۳۳
جدول۵-۱۷ تغییرات ظرفیت باربری نهایی در حالت زه‌کشی کامل در نسبت $c_1/s_{u2}=2/0$ ۱۳۳
جدول۵-۱۸ ضرایب باربری N_γ اصلاح‌شده در زوایای مختلف برای $c_1/s_{u2}=0/5$ ۱۳۴
جدول۵-۱۹ ضرایب باربری N_γ اصلاح‌شده در زوایای مختلف برای $c_1/s_{u2}=2/0$ ۱۳۴

فصل۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

هدف از طراحی مهندسی انتقال و توزیع بار وارده به خاک و یا سنگ زیرین پی است. هر طرح نیازمند تأمین سه معیار طراحی است. ظرفیت باربری نهایی پی (معیار مقاومت)، نشست کلی و نسبی پی (معیار سرویس‌دهی) و توجیه اقتصادی مبنای طراحی یک پی است. تمرکز اصلی این پایان‌نامه معطوف به معیار اول طراحی و به خصوص در خاک‌های زه‌کشی نشده رسی خواهد بود. خاک‌های رسی زه‌کشی نشده به دلیل رفتار متفاوتی که از خود نشان می‌دهند، به عنوان خاک‌های مشکل ساز شناخته می‌شوند.

یک پی سطحی وقتی دارای عملکرد صحیح است که دو شرط زیر را برآورد نماید.[۱]

۱- گسیختگی برشی در خاک زیر پی سطحی (شالوده) رخ ندهد.

۲- نشست‌های بیشتر از مقدار مجاز در زیر شالوده اتفاق نیفتد. مقدار نشست مجاز یک کمیت نسبی است، زیرا مقدار آن برای یک سازه به عوامل و شرایط گوناگون بستگی دارد.

گسیختگی برشی در خاک زیر پی می‌تواند به صورت کلی، موضعی و یا سوراخ کننده باشد. بنا به نوع گسیختگی برشی رخ داده در خاک، روش‌های متعددی برای تحلیل ظرفیت باربری پی استفاده می‌شود. تخمین و ارزیابی ظرفیت باربری یک شالوده از جمله مسائل رایج و درعین‌حال پیچیده در مهندسی ژئوتکنیک است. در نتیجه ادبیات گسترده‌ای در دو حوزه مطالعات نظری و آزمایشگاهی وجود دارد. بیشتر مطالعات صورت گرفته معطوف به تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی تحت اثر ترکیب بارگذاری قائم، افقی و لنگر خمشی، تأثیر شکل پی، صلبیت خاک، انحراف بار اعمال‌شده، دوران کف پی، انحراف شیب سطح زمین و عمق مدفون پی بوده است.

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

راهکارهای سنتی برای تعیین ظرفیت باربری زه‌کشی نشده خاک‌های رسی بر این فرض بناشده‌اند که لایه خاک همگن و همسان گرد باشند. این امر بدین معناست که ضخامت لایه در

مقایسه با عرض پی بسیار زیاد باشد. در طبیعت این امکان وجود دارد که لایه‌های خاکی با سختی‌های متفاوت در ناحیه تأثیر پی وجود داشته باشند. برای مثال شالوده‌های فرا ساحلی عریض از جمله سازه‌های ژئوتکنیکی هستند که سطوح گسیختگی در زیر پی تا عمق‌های قابل‌توجهی نسبت به سطح زمین گسترش می‌یابد. همه لایه‌های خاکی که در این سطوح قرار می‌گیرند بر ظرفیت باربری پی تأثیرگذار هستند. پی مخازن نفتی و جاده‌های روسازی نشده که بر روی خاک‌های رسی سست احداث می‌شوند از دیگر سازه‌های ژئوتکنیکی هستند که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد.

در ایران، اهمیت بررسی ظرفیت باربری خاک‌های رسی زه‌کشی نشده در مناطقی جلوه پیدا می‌کند که تراز آب زیرزمینی در عمق کمی نسبت به سطح زمین واقع شده باشد. برای مثال، با توجه به مطالعات انجام‌شده [۲]، شهر رشت واقع در جنوب جلگه خزر، دارای لایه‌های خاکی متنوعی از ریزدانه‌های با نفوذپذیری پایین تا مصالح ماسه‌ای است. همچنین سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف شهر و حومه آن، ثابت نبوده و از ۰٫۵ متر تا ۱۰ متری متغیر است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که غالب خاک‌های رسی محدوده شهر رشت دارای وضعیت اشباع بوده [۳] و بنابراین رفتار خاک‌های زه‌کشی نشده در مسائل ژئوتکنیکی از اهمیت ویژه برخوردار است. در بسیاری از نقاط کشور به خصوص در حاشیه شمالی خلیج فارس و دریای عمان که سطح آب زیرزمینی بالاست، لایه‌های خاکی مارن گسترده شده‌اند. مطالعه رفتار این نوع خاک‌ها کمک شایانی به پیش برد پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌کند. لازم به ذکر است که خاک مارن، به خاکی گفته می‌شود که دارای ۳۵ تا ۶۵ درصد رس و حدود ۶۵ تا ۳۵ درصد کربنات کلسیم باشد.

ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی بر روی خاک‌های لایه‌ای در طول سال‌های گذشته توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. اما شناخت بهتر از رفتار پی بر روی خاک‌های لایه‌ای شیبدار می‌تواند منجر به طرح اقتصادی و ایمن تر سازه‌های ژئوتکنیکی شود.