دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- خاک و پی

موضوع:

بررسی پارامتریک اثر شمع بر پایداری شیروانی‌های خاکی

استاد راهنما:

دکتر عیسی شوش‌پاشا

نگارش:

حسن عباس‌زاده امیردهی

بهمن ۱۳۹۲

در تلاطم امواج زندگی، سختی‌ها را با تکیه‌گاه **مادر** می‌توان

تحمل نمود، و در طغیان افکار افسار گسیخته، راهنمایی داناتر و

دلسوزتر از **پدر** نیست.

پس دستشان را می‌بوسم

این پایان‌نامه تحفه ناچیزی است پیشکش به روح بلند شهدای اسلام

دایی جان عزیزم، شهید حسین خادمی

و

پسرعموی رشیدم، شهید محمد عباس‌زاده

که در راه استقلال و آزادی ایران، جرعه‌ای تلخ از دنیا برکشیدند و

کامیابی ابدی برای خود خریدند.

به امید شفاعت

تقدیر و تشکر

بر خود واجب می‌دانم از راهنمایی‌ها و ارشادهای مشفقانه و بی‌منت استاد راهنمای عزیز و بزرگوارم "**دکتر عیسی شوش‌پاشا**" تشکر و قدردانی وافر داشته باشم که در تمامی مراحل انجام کار پشتیبان اینجانب بودند و بدون یاری ایشان به پایان رساندن این پایان‌نامه امری مشکل می‌نمود.

چکیده

کنترل پایداری شیروانی‌های خاکی همواره به عنوان یکی از مباحث مهم علم مکانیک خاک مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از معضلات اساسی در کنترل پایداری شیروانی‌ها، وقوع پدیده‌ی زمین‌لغزش و جنبش توده‌ای می‌باشد که در کشور ایران به دلیل تنوع زمین‌شناسی و اقلیمی آن به وفور رخ می‌دهد. جابجایی و لغزش توده‌ی زمین در اثر عوامل گوناگونی پدید می‌آید که موجب ضرر و زیان‌های فراوان با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی ناگوار می‌شود، به همین دلیل پایدارسازی شیروانی‌ها به منظور کنترل و تثبیت زمین‌لغزش‌ها حائز اهمیت فراوانی خواهد بود. یکی از راهکارهای کنترلی و پیشگیرانه در پایدارسازی شیروانی‌ها که استفاده از آن اغلب بدون ایجاد اختلال در تعادل شیروانی امکان‌پذیر می‌باشد، استفاده از شمع‌های مقاوم در تقویت درجای زمین است.

در این پژوهش عملکرد شیروانی مسلح شده با شمع، با استفاده از تحلیل همبسته[۱] و شیوه‌ی کاهش مقاومت برشی[۲] در نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا مدل‌سازی دقیق یکی از مطالعات پیشین انجام شد و صحت مدل‌سازی با استفاده از مقایسه‌ی نتایج بدست آمده تأیید گردید؛ سپس ضمن تحلیل رفتار شمع در حالات مختلف، مطالعات پارامتریک با تغییر مشخصات هندسی و مقاومتی این مجموعه مانند شرایط سر شمع، مکان قرارگیری شمع، طول شمع، نسبت فاصله به قطر شمع‌ها، سختی خمشی شمع، ویژگی‌های خاک و زاویه‌ی شیب انجام شده و میزان تأثیر هر کدام بر تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند که به دلیل سازوکار گسیختگی متفاوت ایجاد شده در شیروانی، سطح عملکرد شمع‌ها با شرایط سر گوناگون یکسان نخواهد بود؛ به نحوی که شرایط سر مفصلی و سر گیردار تأثیرگذارتر بوده و شرایط سر آزاد نیز دارای کمترین تأثیر است. صرف نظر از شرایط سر شمع، پیشرفت حداکثری ضریب اطمینان در حالتی که شمع در مرکز شیروانی قرار گرفته باشد رخ خواهد داد. کاهش فاصله‌ی بین شمع‌ها منجر به افزایش مقادیر ضریب اطمینان و طول بحرانی شمع که بعد از آن ضریب اطمینان ثابت باقی می‌ماند، خواهد شد. افزایش سختی خمشی شمع بتنی موجب ارتقاء سطح عملکرد شمع‌ها با سر آزاد و سر غیرچرخشی می‌شود؛ درحالیکه تأثیری بر عملکرد شمع‌ها با سر مفصلی و سر

---

[۱] Coupled Analysis

[۲] Shear Strength Reduction Method

گیردار نخواهد گذاشت. نرخ رشد ضریب اطمینان حداکثر با افزایش میزان چسبندگی از ۵ به ۱۵ کیلوپاسکال ابتدا افزایش یافته و سپس روند صعودی آن تقریباً متوقف می‌شود. همچنین با افزایش زاویه‌ی شیب نیز از مقدار این نرخ کاسته خواهد شد؛ این بدین معنی است که در شیروانی‌ها با شیب کمتر، کاربرد شمع‌های پایدارکننده تأثیرگذارتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پایداری شیروانی، ضریب اطمینان، شمع، سطح گسیختگی، شیوه‌ی کاهش مقاومت برشی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسأله ۲

۱-۳- اهداف پژوهش ۴

۱-۴- ساختار کلی پایان‌نامه ۴

فصل دوم: بررسی متون فنی و روش‌های تحلیل

۲-۱- کلیات ۷

۲-۲- انواع ناپایداری در شیروانی‌ها ۷

۲-۳- عوامل مؤثر در ناپایداری شیروانی‌ها ۹

۲-۴- طبقه‌بندی راهکارهای حفاظت شیروانی‌ها ۱۲

۲-۵- کاربرد شمع در پایدارسازی شیروانی‌های خاکی ۱۵

۲-۶- روش‌های تحلیل شیروانی‌های مسلح شده با شمع ۱۶

۲-۶-۱- روش تعادل حدی ۱۷

۲-۶-۲- روش تحلیل حدی ۱۹

۲-۶-۳- روش مبتنی بر فشار ۲۱

۲-۶-۴- روش مبتنی بر جابجایی ۲۳

عنوان **صفحه**

۲-۶-۵- روش‌های پیوسته‌ی عددی ۲۷

۲-۶-۵-۱- شیوه‌ی کاهش مقاومت برشی ۲۹

۲-۷- عوامل مؤثر بر عملکرد شیروانی مسلح شده با شمع ۳۰

۲-۷-۱- مدل ساختاری خاک ۳۰

۲-۷-۱-۱- مدل‌های الاستیک خاک ۳۱

۲-۷-۱-۲- مدل‌های الاستوپلاستیک خاک ۳۱

۲-۷-۱-۳- معیار گسیختگی مور-کولن ۳۲

۲-۷-۱-۴- قانون جریان-تابع پتانسیل پلاستیک ۳۷

۲-۷-۱-۵- قانون سخت‌شوندگی ۳۸

۲-۷-۲- مدل شمع ۴۰

۲-۷-۳- سطح مشترک خاک و شمع ۴۰

۲-۷-۴- ویژگی‌ها و جابجایی‌های خاک ۴۱

۲-۷-۵- شرایط سر شمع ۴۳

۲-۷-۶- مکان قرارگیری شمع در شیروانی ۴۴

۲-۷-۷- سختی خمشی شمع ۴۷

۲-۷-۸- فاصله‌ی بین شمع‌ها ۴۷

۲-۷-۹- طول شمع ۵۰

۲-۸- مروری بر تاریخچه‌ی استفاده از شمع‌های پایدارکننده در بازسازی شیروانی‌ها ۵۲

عنوان **صفحه**

فصل سوم : معرفی نرم‌افزار Abaqus و مدل‌سازی

۳-۱- مقدمه ۵۸

۳-۲- معرفی نرم‌افزار Abaqus ۵۸

۳-۳- بخش‌های گوناگون در Abaqus ۵۹

۳-۳-۱- ایجاد هندسه‌ی مدل ۶۰

۳-۳-۲- تخصیص مصالح ۶۲

۳-۳-۳- مونتاژ قطعات ۶۵

۳-۳-۴- تعریف مراحل تحلیل ۶۶

۳-۳-۵- تعریف اندرکنش ۷۰

۳-۳-۶- بارگذاری و شرایط مرزی ۷۳

۳-۳-۷- مش‌بندی ۷۷

۳-۳-۸- پردازش مدل ۸۰

۳-۳-۹- مشاهده‌ی نتایج تحلیل ۸۱

۳-۴- اعمال شیوه‌ی کاهش مقاومت برشی در نرم‌افزار Abaqus ۸۲

۳-۵- بررسی صحت مدل‌سازی ۸۵

فصل چهارم: ارائه و تحلیل نتایج

۴-۱- مقدمه ۸۹

۴-۲- مشخصات مدل تحلیلی ۸۹

عنوان **صفحه**

۴-۳- برخی نکات مدل‌سازی هندسی ۹۱

۴-۴- بررسی تأثیر عوامل گوناگون بر عملکرد شیروانی مسلح شده با شمع ۹۵

۴-۴-۱- مکان قرارگیری شمع ۹۵

۴-۴-۲- فاصله‌ی بین شمع‌ها ۱۰۴

۴-۴-۳- رفتار شمع و پایداری سازه‌ای ۱۱۱

۴-۴-۴- سختی خمشی شمع ۱۱۹

۴-۴-۵- زاویه‌ی شیب ۱۲۱

۴-۴-۶- ویژگی‌های خاک ۱۲۳

۴-۵- تعیین خاک معادل ۱۲۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه ۱۳۴

۵-۲- نتیجه‌گیری ۱۳۴

۵-۳- پیشنهادات ۱۳۷

مراجع

فهرست مراجع ۱۳۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): طبقه‌بندی انواع ناپایداری شیروانی‌ها [۲] ۸

شکل (۲-۲): اشکال طرح‌واره از انواع ناپایداری در شیروانی‌ها [۱] ۸

شکل (۲-۳): شمع‌های محرک و مقاوم [۳] ۱۵

شکل (۲-۴): نیروهای وارد بر شمع پایدارکننده و شیروانی در روش تعادل حدی [۴] ۱۹

شکل (۲-۵): سازوکار گسیختگی شیروانی در روش تحلیل حدی [۱۵] ۲۰

شکل (۲-۶): تغییر شکل پلاستیک زمین در اطراف شمع‌های پایدارکننده در روش مبتنی بر فشار [۱۷] ۲۳

شکل (۲-۷): جابجایی نسبی بین شمع و خاک در حالت‌های مختلف شکست [۲۴] ۲۴

شکل (۲-۸): مدل تحلیلی استفاده شده در روش مبتنی بر جابجایی [۲۵] ۲۵

شکل (۲-۹): نتایج بدست آمده از حل معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی چهارم [۹] ۲۷

شکل (۲-۱۰): رابطه‌ی تنش-کرنش در مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک [۳۰] ۳۳

شکل (۲-۱۱): پوش گسیختگی مور-کولن [۴۴] ۳۳

شکل (۲-۱۲): سطح تسلیم معیار مور-کولن در فضای تنش‌های اصلی [۳۰] ۳۴

شکل (۲-۱۳): سطوح گسیختگی مدل‌های دراکر-پراگر و مور-کولن در صفحه‌ی انحرافی [۳۰] ۳۶

شکل (۲-۱۴): تطابق مخروط دراکر-پراگر و هرم مور-کولن در فضای تنش‌های اصلی [۳۰] ۳۶

شکل (۲-۱۵): مش‌بندی مورد استفاده در تحلیل کرنش مسطح ارائه شده توسط چن و مارتین [۴۷] ۴۰

شکل (۲-۱۶): مدل‌سازی سطح مشترک شمع و خاک ارائه شده توسط جئونگ و همکاران [۴] ۴۱

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱۷): نیمرخ‌های تغییرشکل خاک [۳۰] ۴۲

شکل (۲-۱۸): تغییرشکل‌های چهار حالت از شرایط سر شمع در مدل‌سازی عددی [۳۰] ۴۳

شکل (۲-۱۹): اثر مکان شمع بر ضریب اطمینان در مدل ارائه شده توسط کای و یوگای [۳۸] ۴۵

شکل (۲-۲۰): مدل شیروانی مسلح شده با شمع ارائه شده توسط وی و چنگ [۳۹] ۴۸

شکل (۲-۲۱): اثر فاصله‌ی بین شمع‌ها بر ضریب اطمینان ارائه شده توسط وی و چنگ [۳۹] ۴۸

شکل (۲-۲۲): سطح لغزش در مقطع میانی بین شمع‌ها [۳۹] ۴۹

شکل (۲-۲۳): مقایسه‌ی سطوح لغزش بدست آمده از شیوه‌ی کاهش مقاومت برشی و روش ساده شده‌ی بیشاپ ۵۰

شکل (۲-۲۴): اثر طول شمع بر مکان سطح لغزش بحرانی در تحلیل همبسته [۴۰] ۵۰

شکل (۲-۲۵): تأثیر طول و مکان قرارگیری شمع بر ضریب اطمینان ارائه شده توسط گریفیتس و همکاران [۴۰] ۵۱

شکل (۲-۲۶): اثر طول شمع بر ضریب اطمینان در شرایط گوناگون ارائه شده توسط یانگ و همکاران [۴۲] ۵۲

شکل (۳-۱): لیست بخش‌های موجود در نرم‌افزار Abaqus/CAE ۶۰

شکل (۳-۲): پنجره‌ی Create Part ۶۱

شکل (۳-۳): مراحل ایجاد طرح سه‌بعدی ۶۲

شکل (۳-۴): پنجره‌ی Edit Material ۶۳

شکل (۳-۵): پنجره‌ی Create Section ۶۴

شکل (۳-۶): پنجره‌ی Edit Section برای نوع Homogeneous Solid ۶۴

شکل(۳-۷): پنجره‌ی Create Instance ۶۵

شکل (۳-۸): موقعیت‌دهی قطعه‌ها در مختصات کلی ۶۶

شکل (۳-۹): پنجره‌ی Create Step در حالت انتخاب تحلیل Static, General ۶۸

عنوان **صفحه**

شکل (۳-۱۰): پنجره‌ی Edit Step در تحلیل Static, General ۶۸

شکل (۳-۱۱): پنجره‌ی Create Interaction در حالت انتخاب اندرکنش Surface-to-surface contact ۷۰

شکل (۳-۱۲): پنجره‌ی Edit Interaction ۷۱

شکل (۳-۱۳): تعیین خصوصیات رفتار تماسی در سطح تماس ۷۲

شکل (۳-۱۴): تعیین خصوصیات رفتار نرمال در سطح تماس ۷۳

شکل (۳-۱۵): پنجره‌ی Create Load در حالت انتخاب بارگذاری Gravity ۷۴

شکل (۳-۱۶): پنجره‌ی Edit Load در حالت انتخاب بارگذاری Gravity ۷۴

شکل (۳-۱۷): پنجره‌ی Create Boundary Condition در حالت انتخاب Displacement/Rotation ۷۵

شکل (۳-۱۸): شرایط مرزی مدل شیروانی در حالت دوبعدی ۷۵

شکل (۳-۱۹): شرایط مرزی مدل شیروانی در حالت سه‌بعدی ۷۶

شکل (۳-۲۰): یکپارچه‌سازی رفتار سر شمع توسط قید MPC در بخش Interaction ۷۷

شکل (۳-۲۱): ایجاد دانه‌بندی جهت‌دار در مدل ۷۸

شکل (۳-۲۲): المان‌های خطی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته [۷۲] ۷۹

شکل (۳-۲۳): مش‌بندی آزاد مدل در فضای دوبعدی با استفاده از الگوریتم پیش‌رونده ۷۹

شکل (۳-۲۴): مش‌بندی مدل در فضای سه‌بعدی با استفاده از تکنیک Sweep ۸۰

شکل (۳-۲۵): پنجره‌ی Job Manager ۸۱

شکل (۳-۲۶): رابطه‌ی بین حداکثر جابجایی نسبی و زمان [۷۴] ۸۴

شکل (۳-۲۷): رابطه‌ی بین ضریب تناسب بار و ضریب اطمینان ۸۴

شکل (۳-۲۸): هندسه‌ی شیروانی خاکی و شبکه‌بندی اجزاء محدود ارائه شده توسط کیانجون و همکاران [۷۴] ۸۵

عنوان **صفحه**

شکل (۳-۲۹): مقایسه‌ی منحنی حداکثر جابجایی نسبی در برابر ضریب تناسب بار ۸۶

شکل (۴-۱): هندسه‌ی شیروانی خاکی و شبکه‌بندی اجزاء محدود ۹۰

شکل (۴-۲): رابطه‌ی بین ضریب اطمینان و تراکم نسبی مش ۹۱

شکل (۴-۳): استفاده از شمع‌های مربعی معادل با شمع‌های دایره‌ای ۹۳

شکل (۴-۴): نمای بالا از مدل‌سازی شمع‌های دایره‌ای و مربعی در فضای سه‌بعدی ۹۴

شکل (۴-۵): نمونه‌های مختلف از میزان محدوده‌ی مدل‌سازی در بعد سوم ۹۴

شکل (۴-۶): سطح لغزش بحرانی شیروانی در حالت مسلح نشده (ضریب اطمینان=۱/۲۰) ۹۵

شکل (۴-۷): تغییرات ضریب اطمینان شیروانی مسلح شده در برابر مکان قرارگیری شمع ۹۶

شکل (۴-۸): سطوح لغزش بحرانی شیروانی مسلح شده در حالت شمع با سر آزاد ۹۹

شکل (۴-۹): سطوح لغزش بحرانی شیروانی مسلح شده در حالت شمع با سر غیرچرخشی ۱۰۰

شکل (۴-۱۰): سطوح لغزش بحرانی شیروانی مسلح شده در حالت شمع با سر مفصلی ۱۰۱

شکل (۴-۱۱): سطوح لغزش بحرانی شیروانی مسلح شده در حالت شمع با سر گیردار ۱۰۲

شکل (۴-۱۲): تغییرات ضریب اطمینان شیروانی مسلح شده در برابر فاصله‌ی بین شمع‌ها ۱۰۴

شکل (۴-۱۳): عمق سطح لغزش بحرانی در مرکز شیروانی ۱۰۶

شکل (۴-۱۴): مقایسه‌ی تغییرات ضریب اطمینان حداکثر برای شرایط مختلف سر شمع ۱۰۷

شکل (۴-۱۵): سطوح لغزش بحرانی در مقطع میانی بین شمع‌ها در حالت سر آزاد ۱۰۹

شکل (۴-۱۶): سطوح لغزش بحرانی در مقطع میانی بین شمع‌ها در حالت سر مفصلی ۱۱۰

شکل (۴-۱۷): رفتار شمع با سر آزاد در طول‌های مختلف (S=۲D) ۱۱۲

شکل (۴-۱۸): رفتار شمع با سر مفصلی در طول‌های مختلف (S=۲D) ۱۱۳

عنوان **صفحه**

شکل (۴-۱۹): روند توزیع لنگر خمشی در فاصله‌گذاری‌های گوناگون ۱۱۶

شکل (۴-۲۰): روند توزیع لنگر خمشی در شرایط مختلف سر شمع (S=۲D) ۱۱۷

شکل (۴-۲۱): مقطع شمع بتنی تقویت شده ۱۱۸

شکل (۴-۲۲): ساده‌سازی الاستوپلاستیک منحنی لنگر-انحناء [۷۷] ۱۱۸

شکل (۴-۲۳): اثر سختی خمشی شمع بر ضریب اطمینان (S=۲D) ۱۱۹

شکل (۴-۲۴): اثر سختی خمشی شمع بر توزیع فشار خاک (S=۲D) ۱۲۰

شکل (۴-۲۵): تغییرات زاویه‌ی شیب با در نظر گرفتن طول افقی ثابت ۱۲۲

شکل (۴-۲۶): تغییرات ضریب اطمینان با شیب‌های مختلف در برابر مکان قرارگیری شمع با سر آزاد (S=۲D)..... ۱۲۲

شکل (۴-۲۷): اثر زاویه‌ی شیب بر نرخ رشد ضریب اطمینان حداکثر در حالت شمع با سر آزاد (S=۲D) ۱۲۳

شکل (۴-۲۸): تغییرات ضریب اطمینان شیروانی در برابر مکان قرارگیری شمع (چسبندگی=۵ کیلوپاسکال) ۱۲۴

شکل (۴-۲۹): تغییرات ضریب اطمینان شیروانی در برابر مکان قرارگیری شمع (چسبندگی=۱۵ کیلوپاسکال) ۱۲۵

شکل (۴-۳۰): اثر چسبندگی خاک بر نسبت Z_s/L بحرانی (R=۰/۵۰)..... ۱۲۷

شکل (۴-۳۱): اثر چسبندگی خاک بر نرخ رشد ضریب اطمینان حداکثر ۱۲۷

شکل (۴-۳۲): تغییرات ضریب اطمینان شیروانی مسلح نشده در برابر پارامترهای مقاومت برشی خاک ۱۲۹

شکل (۴-۳۳): روش ساده‌ی مرزهای بالا و پایین در تخمین ضریب اطمینان شیروانی مسلح شده ۱۳۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): عوامل و سازوکارهای ناپایداری شیروانی‌ها [۱]..... ۱۱

جدول (۲-۲): راهکارهایی برای جلوگیری از گسیختگی شیروانی‌ها [۱]..... ۱۳

جدول (۲-۳): طبقه‌بندی و کاربرد راهکارهای حفاظت شیروانی‌ها [۱] ۱۴

جدول (۲-۴): مقایسه‌ی مدل‌های ساختاری خاک [۳۰]..... ۳۹

جدول (۲-۵): خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در رابطه با مکان بهینه‌ی قرارگیری شمع‌ها..... ۴۶

جدول (۲-۶): اثر سختی خمشی و شرایط سر شمع بر ضریب اطمینان ارائه شده توسط کای و یوگای [۳۸]..... ۴۷

جدول (۲-۷): موارد تاریخی استفاده از شمع‌های پایدارکننده در بازسازی شیروانی‌ها [۳۰]..... ۵۳

جدول (۳-۱): مقادیر زاویه‌ی اصطکاک بین مواد اندرکنش [۷۳]..... ۷۲

جدول (۳-۲): ویژگی‌های خاک ارائه شده توسط کیانجون و همکاران [۷۴] ۸۶

جدول (۴-۱): ویژگی‌های مواد..... ۹۰

جدول (۴-۲): ضریب اطمینان در تراکم‌های نسبی مش متفاوت ۹۱

جدول (۴-۳): تعیین حداکثر فاصله‌ی مورد نیاز برای مرزهای کناری مدل در تحلیل دوبعدی..... ۹۳

جدول (۴-۴): پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی شمع‌های دایره‌ای و مربعی..... ۹۳

جدول (۴-۵): ضرایب اطمینان برای شمع‌های دایره‌ای و مربعی در حالات مختلف..... ۹۴

جدول (۴-۶): طول بحرانی و ضریب متناظر Z_s/L در فاصله‌گذاری‌های گوناگون بین شمع‌ها ۱۰۷

جدول (۴-۷): نرخ رشد ضریب اطمینان حداکثر برای شرایط مختلف سر شمع ۱۰۸

جدول (۴-۸): ظرفیت نهایی لنگر خمشی شمع برای نسبت‌های گوناگون تقویت ۱۱۸

عنوان **صفحه**

جدول (۴-۹): اثر سختی خمشی شمع بر ضریب اطمینان حداکثر در شرایط مختلف سر شمع (S=۲D) ۱۲۰

جدول (۴-۱۰): اثر زاویه‌ی شیب بر مکان بهینه‌ی دقیق قرارگیری شمع با سر آزاد ۱۲۲

جدول (۴-۱۱): مقایسه‌ی نتایج بدست آمده در شیروانی با زوایای مختلف برای حالت شمع با سر آزاد (S=۲D)..... ۱۲۳

جدول (۴-۱۲): مقایسه‌ی نسبت Z_s/L بحرانی در خاک‌ها با چسبندگی متفاوت (R=۰/۵۰)..... ۱۲۶

جدول (۴-۱۳): مقایسه‌ی نرخ رشد ضریب اطمینان حداکثر در خاک‌ها با چسبندگی متفاوت..... ۱۲۷

جدول (۴-۱۴): روابط ضریب اطمینان شیروانی در حالت شمع قرار گرفته شده در مرکز شیروانی با سر آزاد..... ۱۳۰

جدول (۴-۱۵): روابط ضریب اطمینان شیروانی در حالت شمع قرار گرفته شده در مرکز شیروانی با سر مفصلی ۱۳۱

جدول (۴-۱۶): روابط بدست آمده جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی معادل خاک..... ۱۳۱

فهرست علائم

M_R	لنگر مقاوم خاک
M_D	لنگر محرک توده‌ی لغزنده
F_r	نیروی مقاوم حدی بر واحد عرض
M_P	لنگر تولید شده توسط نیروی عکس‌العمل شمع
M_{cr}	لنگر خمشی در سطح لغزش
V_{cr}	نیروی برشی در سطح لغزش
V_{head}	نیروی برشی در سر شمع
R	شعاع دایره سطح لغزش
θ	زاویه بین خط عمود بر شمع و سطح گسیختگی
q	فشار اعمال شده بر روی شمع
D_1	فاصله‌ی مرکز به مرکز در یک ردیف شمع
D_2	فاصله‌ی بازشدگی بین شمع‌ها
C	چسبندگی خاک
φ	زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک
γ	وزن مخصوص خاک
Z	عمق دلخواه از سطح زمین
S_u	مقاومت برشی زهکشی نشده خاک
σ_p	فشار اعمال شده بر روی شمع
Q	بار محوری بر روی شمع
y	تغییرشکل جانبی شمع در نقطه‌ی X در طول شمع
P	عکس‌العمل خاک در واحد طول
EI	سختی خمشی شمع

w	بار توزیع شده در طول شمع
y_s	حرکت آزاد خاک در یک عمق مشخص
τ_r	تنش برشی مقاوم
τ_d	تنش برشی محرک
SRF	ضریب کاهش مقاومت
C_{trial}	چسبندگی کاهش یافته
φ_{trial}	زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش یافته
F_{trial}	ضریب آزمایشی
FS	ضریب اطمینان
σ	تنش نرمال
E	مدول الاستیک
ν	نسبت پوآسون
ψ	زاویه‌ی اتساع
σ_1,σ_3	تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر
σ_2	تنش اصلی میانی
I_1	اولین نامتغیر تانسور تنش
J_2	دومین نامتغیر تانسور تنش انحرافی
g	تابع پتانسیل
f	تابع تسلیم
η	ضریب اصطکاک
δ	زاویه‌ی اصطکاک بین شمع و خاک اطراف
S/D	نسبت فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها به قطر شمع‌ها
L	طول شمع
Z_s	عمق سطح لغزش
t	ضریب تناسب بار

Δ	حداکثر جابجایی نسبی
N_{pi}	نرخ رشد ضریب اطمینان
M_{ult}	ظرفیت نهایی لنگر خمشی
M_{max}	لنگر خمشی حداکثر
E_p	مدول الاستیک شمع
X_p	فاصله‌ی افقی شمع از پنجه‌ی شیروانی
X	طول افقی شیروانی