بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

مطالعه عددی تاثیر اندرکنش گروه ریزشمع و خاک بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

نام دانشجو

آرمین رحیمی

اساتید راهنما:

دکتر یاسر جعفریان

دکتر عبدالحسین حداد

اسفند ماه ۱۳۹۲

دانشکده مهندسی عمران

مطالعه عددی تاثیر اندرکنش گروه ریزشمع و خاک بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

نام دانشجو

آرمین رحیمی

اساتید راهنما:

دکتر یاسر جعفریان

دکتر عبدالحسین حداد

اسفند ماه ۱۳۹۲

دانشکده مهندسی عمران

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه‌ی آقای آرمین رحیمی برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – گرایش مکانیک خاک و پی تحت عنوان " مطالعه عددی تاثیر اندرکنش گروه ریزشمع و خاک بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها " در جلسه مورخ / / بررسی و با نمره

عدد	
حروف	

مورد تایید قرار گرفت.

اعضای هیئت داوران:

استاد راهنمای اول: **دکتر یاسر جعفریان** امضاء:

استاد راهنمای دوم: **دکتر عبدالحسین حداد** امضاء:

استاد داور: امضاء:

استاد داور: امضاء:

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده: ..... امضاء .....

دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی عمران

اینجانب **آرمین رحیمی** متعهد می شوم که محتوای علمی این نوشتار با عنوان " **مطالعه عددی تأثیر اندرکنش گروه ریزشمع و خاک بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها** " که به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش **مکانیک خاک و پی** به دانشگاه ارائه شده است، دارای اصالت پژوهشی بوده و حاصل فعالیت‌های علمی اینجانب می باشد.

در صورتی که خلاف ادعای فوق در هر زمانی محرز شود، کلیه حقوق معنوی متعلق به این پایان نامه از اینجانب سلب شده و موارد قانونی مترتب به آن نیز از طرف مراجع قابل پیگیری است.

نام و نام خانوادگی: آرمین رحیمی

شماره دانشجویی: ۹۰۱۱۱۴۶۰۰۳

امضاء

پایان نامه‌های تحت حمایت پژوهشکده فناوری‌های نوین مهندسی عمران دانشگاه سمنان

این پایان نامه تحت حمایت پژوهشکده فناوری‌های نوین نوین مهندسی عمران و در قالب گروه پژوهشی:

☐ روش‌های اجرایی نوین مهندسی عمران

☐ مصالح نوین مهندسی عمران

☐ سیستم‌های نوین ساخت

☐ روش‌های تحلیل نوین در مهندسی عمران

ارائه شده است.

امضای مدیر گروه پژوهشی

امضای رئیس پژوهشکده

این صفحه در صورتی تکمیل می‌گردد که فعالیت پژوهشی مورد نظر در راستای اهداف پژوهشکده فناوری‌های نوین مهندسی عمران و با حمایت یکی از گروه‌های پژوهشی صورت پذیرد.

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما با ذکر مرجع بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد راهنما: **دکتر یاسر جعفریان**

تاریخ:

امضاء:

تقدیم به :

پدر بزرگوارم که وجودش مایه دلگرمی و افتخارم است.

مادر مهربان و فداکارم که زندگیم را به او مدیونم.

خواهر و برادران عزیزم که همیشه یار و همراهم هستند.

حمد و سپاس ایزد منان را

که با الطاف بیکران خود این توفیق را به من ارزانی داشت تا بتوانم به این مرحله از تحصیلات برسم.

تشکر و قدردانی:

نگارش این تحقیق را مدیون زحمات و مساعدت‌های استاد ارجمندی می‌دانم که بی‌تردید بدون یاری و همکاری ایشان، به نتیجه مطلوب نمی رسید.

در این جا از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر یاسر جعفریان که راهنمایی این تحقیق را برعهده داشتند و در طول تحصیل، بنده را با رهنمودهای ارزنده، دلسوزانه و بی‌دریغ خود بهره‌مند ساختند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم و از خداوند بزرگ موفقیت و سلامت ایشان را خواستارم.

چکیده:

در سال‌های اخیر استفاده از گروه شمع‌ها به‌صورت ترکیب با پی‌های رادیه به دلیل عملکرد مناسب در کنترل و کاهش نشست‌ها و افزایش ظرفیت باربری پی، گسترش‌یافته و صرفه‌جویی اقتصادی نیز داشته‌اند. یکی از مباحث مهمی که در طراحی شمع‌های این سیستم ترکیبی مطرح است اجرای آن در خاک‌های مسئله‌دار ازجمله خاک‌های ماسه‌ای اشباع و در نتیجه، بحث احتمال وقوع روانگرایی خاک تحت بارهای لرزه‌ای می‌باشد. در این نوع خاک‌ها تحت بارهای لرزه‌ای مقاومت برشی خاک کاهش ناگهانی یافته، خاک روانگرا شده و تغییر شکل‌های قابل‌توجهی می‌یابد و در نتیجه نیروهای مخربی به شمع‌های مورد استفاده در سیستم پی شمع وارد می‌آید.

استفاده از این سیستم بخصوص در نواحی که لایه‌های سطحی مقاومت کافی نداشته یا سطح آب بالا بوده یکی از انتخاب‌های اول مهندسین ژئوتکنیک است علاوه بر این، برای سازه‌های دریایی نظیر سکوها یا اسکله‌ها معمولاً چاره‌ای جز استفاده از این نوع پی‌ها وجود ندارد. ازاین‌رو باید شناخت کافی از اندرکش‌های این سیستم داشته و رفتار آن‌ها در این خاک‌ها به خوبی شناخته شود.

در طی چند دهه اخیر، مطالعات فراوانی بر روی این نوع سیستم توسط محققین انجام شده است که در اکثر مطالعات عددی و غیرعددی انجام‌شده روی عملکرد شمع- خاک در خاک‌های روانگرا، بیشتر به تحقیق در مورد اندرکنش شمع‌های تکی و گروهی پرداخته‌شده و اثر پدیده روانگرایی را روی شمع (مانند: خرابی، بار، جابجایی، نشست ...) بررسی نموده‌اند و کمتر از این دیدگاه که یک گروه شمع، بخصوص گروه ریزشمع در کاهش پتانسیل روانگرایی موثر بوده پرداخته شده است. کاهش یا افزایش پتانسیل روانگرایی خاک‌ها به هنگام استفاده از سیستم پی‌شمعی با توجه به اندرکنش‌های پیچیده آن در سالیان اخیر مورد سؤال محققین بوده و تحقیقات کمی در رابطه آن انجام‌شده که نتایج متناقضی نیز با یکدیگر داشته‌اند، زیرا در پروفیل‌های خاک و یا برای موج‌های زلزله خاصی بررسی‌شده‌اند، علاوه بر آن در هیچ یک از این تحقیقات از ریزشمع استفاده نشده و به فواید ریزشمع در کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌ها اشاره‌ای نداشته‌اند.

باتوجه به استقبال فراوان به استفاده از ریزشمع به‌جای شمع طی ده‌های اخیر به دلیل اثرات مفیدی که ریزشمع هم در از نظر فنی هم از نظر اقتصادی نسبت به سازه‌های نگه‌دارنده مشابه دارد، لزوم انجام تحقیقاتی در این زمینه محسوس است، لذا این امر به‌عنوان یکی از اهداف اصلی انجام این پایان‌نامه در نظر گرفته شده است.

بدین منظور در ابتدای این پایان‌نامه با نگاهی بر سیستم پی‌شمعی و ریزشمع‌ها، اندرکنش‌های این سیستم به همراه مزایای آن‌ها در حالت کلی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه توضیحی پیرامون روانگرایی و اثرات نامطلوب آن بر عملکرد سیستم پی‌شمعی خواهد شد و در پایان نیز با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D که مبتنی بر روش عددی تفاضل محدود است ابتدا صحت سنجی با مدل‌سازی چند نمونه پروژه واقعی انجام شده است، سپس به بررسی عملکرد سیستم پی‌شمعی در خاک‌های مستعد روانگرایی تحت بارهای لرزه‌ای مختلف پرداخته و تأثیر آرایش شمع‌ها و ریزشمع‌ها در کاهش تغییر شکل‌های حجمی خاک و در نتیجه کاهش پتانسیل روانگرایی آن بررسی می‌شود. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد با یک چیدمان مناسب از گروه شمع و ریزشمع می‌توان پتانسیل روانگرایی خاک‌های مسئله دار را کاهش داد، از طرفی پتانسیل روانگرایی یک محل تحت اثر فرکانس و دامنه موج ورودی دچار تغییرات خواهد شد به گونه ای که در فرکانس‌های تشدید و دامنه‌های بالای موج این مقدار بسیار افزایش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: ریزشمع، اندرکنش شمع-خاک، پی‌شمعی، بار لرزه‌ای، پتانسیل روانگرایی، روش عددی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۲

۱-۳- اهداف و نوآوری تحقیق ۳

۱-۴- فرضیات تحقیق و محدودیت‌ها ۴

۱-۵- ساختار فصول پایان‌نامه ۴

فصل ۲: تحلیل رفتار دینامیکی شمع‌ها در خاک‌های مستعد روانگرایی ٦

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- سیستم پی‌شمعی ۷

۲-۳- اندرکنش‌های سیستم پی شمع- رادیه ۱۰

۲-۴- توزیع بار و درصد مشارکت شمع و رادیه ۱۲

۲-۵- اثرسازه‌های فوقانی روی فونداسیون‌های پی-شمع ۱۴

۲-۶- ریزشمع ۱۵

۲-۶-۱- مطالعات انجام‌شده روی ریزشمع‌ها ۱۸

۲-۶-۲- آزمایشات انجام‌شده روی ریزشمع‌ها ۱۸

۲-۶-۳- مطالعات پارامتریک ریزشمع و مشاهدات آن ۱۹

۲-۷- روانگرایی ۲۳

۲-۷-۱- پدیده روانگرایی ۲۳

۲-۷-۲- مکانیزم روانگرایی ۲۴

۲-۷-۳- انواع روانگرایی ۲۶

۲-۷-۴- عوامل موثر بر استعداد روانگرایی ۲۸

۲-۷-۵- روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی ۳۳

۲-۸- رفتار دینامیکی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا ۳۵

۲-۸-۱- مطالعات صحرایی ۳۶

۲-۸-۲- مطالعات آزمایشگاهی بر روی مدل‌های فیزیکی ۴۲

۲-۸-۳- مطالعات عددی ۴۳

۲-۹- انواع مکانیزم گسیختگی شمع‌ها در خاک‌های روانگرا ۴۴

۲-۱۰- تئوری‌های مرتبط با گسیختگی خمشی و ناپایداری کمانشی ۴۶

۲-۱۰-۱- تئوری گسیختگی شمع بر مبنای مکانیزم خمشی ۴۷

۲-۱۰-۱-۱- تئوری گسیختگی بر مبنای کار Tokimatsu et al (1998) ۴۷
۲-۱۰-۱-۲- مفهوم گسیختگی بر مبنای کار Ishihara (1997) ۴۸
۲-۱۰-۲- تئوری گسیختگی شمع بر اساس معیار ناپایداری کمانشی ۴۹
۲-۱۱- مهم‌ترین نتایج مکانیزم خرابی شمع تا کنون ۵۲

فصل ۳: مبانی مدل‌سازی عددی در FLAC و تحلیل‌های صحت سنجی ۵٤
۳-۱- مقدمه ۵۵
۳-۲- روش‌های عددی ۵۶
۳-۳- معرفی نرم‌افزار و تاریخچه ۵۸
۳-۳-۱- تشکیل شبکه تفاضل محدود ۶۰
۳-۳-۲- الگوهای رفتاری ۶۱
۳-۳-۳- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک ۶۲
۳-۳-۴- شرایط مرزی تحلیل دینامیکی و استاتیکی ۶۲
۳-۳-۵- میرایی‌ها ۶۵
۳-۳-۶- هندسه الگوها ۶۷
۳-۳-۷- پارامتر آب و نفوذپذیری خاک‌ها ۶۷
۳-۳-۸- مدل‌سازی شمع ۶۸
۳-۳-۹- بارگذاری دینامیکی ۷۱
۳-۳-۱۰- مراحل کلی الگوسازی ۷۳
۳-۳-۱۱- تحلیل استاتیکی و تولید تنش‌های اولیه ۷۴
۳-۴- اعمال الگوی فین ۷۵
۳-۵- فرایند تحلیل دینامیکی ۷۷
۳-۶- صحت سنجی مدل‌سازی عددی ۷۸

فصل ٤: مطالعه عددی اثر گروه شمع بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها و نتایج ۹۲
۴-۱- مقدمه ۹۳
۴-۲- گروه شمع و اثر آن بر پتانسیل روانگرایی ۹۴
۴-۳- معرفی پروژه ۱ ..... ۹۵
۴-۳-۱- بارگذاری استاتیکی ریزشمع پروژه ۹۶
۴-۳-۲- مدل‌سازی گروه ریزشمع پروژه و نتایج ۹۷
۴-۴- معرفی و مدل‌سازی پروژه فرضی ۲ ..... ۱۰۲
۴-۴-۲- پریود مشخصه ساختگاه ۱۰۴

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادات **۱۱۲**
۵-۱- مقدمه ۱۱۳
۵-۱-۱- جمع‌بندی ۱۱۳
۵-۱-۲- نوآوری ۱۱۵
۵-۱-۳- پیشنهادات ۱۱۵

مراجع **۱۱۷**

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱) اندرکنش‌ها ۱۰
شکل (۲-۲) اندرکنش‌های فونداسیون شمع-رادیه (Poulos, 2001) ۱۱
شکل (۲-۳) ضریب فونداسیون مرکب شمع- رادیه (Katzenbach et al, 2005) ۱۳
شکل (۲-۴) دیاگرام شماتیکی از آرایش ذرات در خاک‌های ماسه‌ای اشباع ۲۴
شکل (۲-۵) همبستگی شتاب حداکثر زمین و تراکم نسبی ماسه (Seed and Idriss, 1971) ۳۱
شکل (۲-۶) خرابی شمع‌ها ناشی از روانگرایی (Bhattacharya, 2003) ۳۶
شکل (۲-۷) مکان سیلوی آسیب‌دیده و ایستگاه‌های مشاهده‌ی حرکت زمین (Mori et al, 1999) ۳۷
شکل (۲-۸) سیلوی واژگون شده ناشی از زلزله ژاپن و جوشش گل و لای (Mori et al, 1999) ۳۸
شکل (۲-۹) خرابی پی‌شمعی ناشی از زلزله (Bhattacharya and Madabhushi, 2008) ۳۹
شکل (۲-۱۰) گسیختگی شمع ساختمان در شهر نیگاتا (Yoshida and Hamada, 1990) ۴۱
شکل (۲-۱۱) گسیختگی شمع ساختمان در شهر نیگاتا (Kawamura et al, 1985) ۴۱
شکل (۲-۱۲) گسیختگی شمع ساختمان در شهر کوبه (Fujii et al, 1998) ۴۲
شکل (۲-۱۳) انواع مکانیزم گسیختگی پی‌شمعی ساختمان بندر Kandla (Dash et al, 2009-2010) ۴۵
شکل (۲-۱۴) گسیختگی شمع بر اساس کار (Tokimatsu et al, 1998) ۴۸
شکل (۲-۱۵) مراحل مختلف بارگذاری وارد بر شمع (Bhattacharya, 2003) ۵۱
شکل (۳-۱) چرخه محاسباتی صریح در برنامه FLAC ۵۷
شکل (۳-۲) المان‌های شبکه تفاضل محدود ۶۰
شکل (۳-۳) شرایط مرزی تحلیل استاتیکی و دینامیکی. الف) بستر منعطف، ب) بستر صلب ۶۳
شکل (۳-۴) مدلسازی برای تحلیل لرزه ای سازه‌های سطحی و استفاده از مش بندی منطقه آزاد ۶۴
شکل (۳-۵) طیف پاسخ فوریه ۶۶
شکل (۳-۶) ابعاد ناحیه مورد استفاده در محاسبه سختی‌ها ۷۰
شکل (۳-۷) روند اصلاح خط پایه ۷۲
شکل (۳-۸) اصلاح خط پایه شتاب‌نگاشت Kobeh (PGA 0.22g) ۷۳
شکل (۳-۹) الگوریتم کلی مدل‌سازی و تحلیل FLAC ۷۴
شکل (۳-۱۰) هندسه مدل تست بارگذاری استاتیکی شمع (Comodromos et al, 2009) ۷۹
شکل (۳-۱۱) پروفیل ژئوتکنیکی خاک محل (Comodromos et al, 2009) ۸۰

شکل (۳-۱۲) مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری تک شمع ۸۱
شکل (۳-۱۳) مقایسه روش‌های مختلف برای تحلیل بار نشست (Poulos, 2001) ۸۲
شکل (۳-۱۴) مدل سانتریفیوژ CSP2 در آزمایش Wilson (1998) ۸۳
شکل (۳-۱۵) مدل سانتریفیوژ CSP3 در آزمایش Wilson (1998) ۸۴
شکل (۳-۱۶) منحنی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق 4.5 متر FLAC و Wilson (1998) ۸۶
شکل (۳-۱۷) منحنی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق 6.8 متر FLAC و Wilson (1998) ۸۶
شکل (۳-۱۸) منحنی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق 20.5 متر FLAC وWilson (1998) ۸۷
شکل (۳-۱۹) شتاب ورودی بستر FLAC 2D و مدل Wilson (1998) ۸۷
شکل (۳-۲۰) شتاب سطح FLAC 2D و مدل Wilson (1998) ۸۸
شکل (۳-۲۱) جابجایی سطح FLAC 2D و مدل Wilson (1998) ۸۸
شکل (۳-۲۲) تاریخچه فشار آب حفره‌ای نزدیک تک شمع FLAC 2D و Wilson (1998) ۸۹
شکل (۳-۲۳) تاریخچه فشار آب حفره‌ای داخل گروه شمع مدل‌سازی و آزمایشگاهی Wilson (1998) .. ۹۰
شکل (۳-۲۴) تاریخچه شتاب در سر شمع-تک شمع مدل‌سازی و آزمایشگاهی Wilson (1998) ۹۰
شکل (۳-۲۵) تاریخچه شتاب در سر شمع-گروه شمع FLAC 2D و Wilson,DW (1998) ۹۱
شکل (۴-۱) لایه‌بندی زمین بر اساس گمانه‌های BH1 و BH2 و BH3 ..... ۹۵
شکل (۴-۲) مدل‌سازی تست بارگذاری ریزشمع پروژه ۱ ..... ۹۷
شکل (۴-۳) پروفیل خاک پروژه ۱ در مدل‌سازی FLAC 2D ۹۸
شکل (۴-۴) تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای در عمق ۲ متری- پروژه ۱ ..... ۹۹
شکل (۴-۵) تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای در عمق ۵ متری- پروژه ۱ ..... ۹۹
شکل (۴-۶) تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای در عمق ۱۰ متری- پروژه ۱ ..... ۱۰۰
شکل (۴-۷) مقادیر ضریب فشار آب حفره‌ای در اعماق پروژه ۱ ..... ۱۰۱
شکل (۴-۸) تاریخچه زمانی شتاب ورودی در مدل‌سازی پروژه ۲ ..... ۱۰۳
شکل (۴-۹) فرکانس طبیعی زمین پروژه ۲ ..... ۱۰۴
شکل (۴-۱۰) پتانسیل روانگرایی انواع سیستم‌ها تحت شرایط ثابت- عمق ۵ متر ۱۰۵
شکل (۴-۱۱) تنش‌های المان خاک ناشی از زلزله و حضور گروه شمع ۱۰۵
شکل (۴-۱۲) پلان گروه شمع ۷ تایی در پروژه ۲ ..... ۱۰۷
شکل (۴-۱۳) پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی تحت فرکانس‌های مختلف- عمق ۵ متری ۱۰۷
شکل (۴-۱۴) فرکانس‌های تشدید گروه شمع ۷ تایی ۱۰۸

شکل (۴-۱۵) پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی تحت موج با دامنه‌های مختلف- عمق ۵ متر..... ۱۰۹
شکل (۴-۱۶) تغییرات پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی در اعماق تحت امواج با دامنه مختلف..... ۱۰۹
شکل (۴-۱۷) تغییرات پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی تحت اثر تغییرات قطر شمع‌ها- عمق ۵ متر .. ۱۱۰
شکل (۴-۱۸) تغییرات پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی با انواع قطرشمع-فرکانس ۳ هرتز..... ۱۱۰
شکل (۴-۱۹) تغییرات پتانسیل روانگرایی گروه شمع ۷ تایی با انواع قطرشمع-فرکانس ۴ هرتز..... ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۳-۱) مقادیر نفوذپذیری و ضریب انتقال دهی هیدرولیکی انواع خاک‌ها..... ۶۸
جدول (۳-۲) مشخصات خاک در مدل‌سازی بارگذاری استاتیکی شمع (Comodromos et al, 2009)... ۸۱
جدول (۳-۳) مشخصات شمع در بارگذاری استاتیکی (Comodromos et al, 2009)..... ۸۱
جدول (۳-۴) مقیاس‌ها در آزمایش Wilson (1998)..... ۸۴
جدول (۳-۵) مشخصات شمع در مدل Wilson (1998)..... ۸۵
جدول (۳-۶) مشخصات خاک نوادا(Wilson (1998), Cooke (2000), Popescu & Prevost (1993) ۸۵
جدول (۴-۱) مشخصات خاک پروژه ۱ در مدل‌سازی FLAC..... ۹۶
جدول (۴-۲) مشخصات خاک پروژه ۲..... ۱۰۲
جدول (۴-۳) مشخصات المان‌های خطی در مدل‌سازی پروژه ۲..... ۱۰۳
جدول (۴-۴) موج سینوسی‌هارمونیک..... ۱۰۳

فهرست علائم اختصاری

شتاب گرانش ..... $(m/s^2)\ a$

نیرو ..... $(N)\ F$

پریود طبیعی زمین ..... $(s)\ Tg$

پریود طبیعی ساختگاه ..... $(s)\ Ts$

نسبت پیش تحکیمی ..... Ocr

وزن مخصوص خشک ..... $(KN/m^3)\ \gamma_d$

وزن مخصوص ..... $(KN/m^3)\ \gamma$

ضریب اضافه فشار آب حفره ای ..... Ru

فرکانس ..... $(1/s)\ f$

ضریب فشار جانبی سکون ..... K_0

دانسیته ..... $(Kg/m^3)\ \rho$

تراکم نسبی ..... $(\%)\ Dr$

تنش موثر متوسط در حالت دینامیکی ..... $(N/m^2)\ \sigma'_{m\text{ -Dynamic}}$

تنش موثر اولیه متوسط قبل از حالت دینامیکی ..... $(N/m^2)\ \sigma'_{0m\text{ Pre-Dynamic}}$

ضریب انتقال دهی هیدرولیکی ..... $(cm/s)\ k_H$

نفوذپذیری ..... $(m^2/Pa\text{-}sec)\ k$

فونداسیون مرکب شمع–رادیه ..... $CPRF$

فصل ۱:

مقدمه