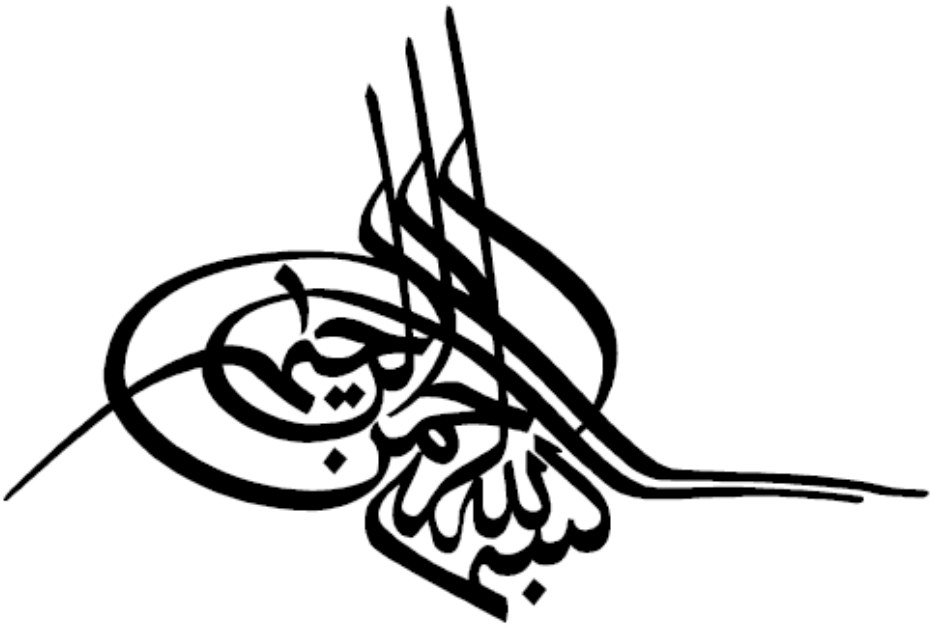
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد (مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی)

بررسی اثر حفر تونل بر پی های متکی به ریز شمع ها

تحقیق وتدوین:

علی سلیمانی

استاد راهنما:

دکتر سعید قربان‌بیگی

استاد مشاور:

دکتر احمدرضا محبوبی

اسفند ۱۳۹۰

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

پایا ن نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

آقای علی سلیمانی

تحت عنوان

بررسی اثر حفر تونل بر پی های متکی به ریز شمع ها

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۰۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سعید قربان‌بیگی	.....
۲- استاد مشاور	دکتر احمدرضا محبوبی	.....
۳- استاد داور	دکتر سعید خرقانی	.....
۴- استاد داور	دکتر محمد رضا عطرچیان	.....
معاونت تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر رضا راستی	.....

خداوندا مرا آن ده که آن به

با سپاس از زحمات بی دریغ پدر و مادر عزیزتر از جانم که هر چه دارم از دعای خیر آنهاست

و قدردانی از همسر مهربان و فداکارم که همواره مشوق و پشتیبان من بوده است.

و با تشکر ویژه از راهنمایی و مشاوره جناب آقای دکتر قربان بیگی و جناب آقای دکتر محبوبی که اینجانب را در تدوین این پایان نامه یاری نمودند.

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر:

اینجانب علی سلیمانی تائید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل کار پژوهشی اینجانب می باشد و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، پایین تر و بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق(شهید عباسپور) می باشد.

علی سلیمانی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کلیات ۲

۱-۲- هدف از انجام تحقیق ۲

۱-۳- فصل بندی و ساختار این تحقیق ۳

فصل دوم: کلیات تقویت از زیر

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- شناسایی مقدماتی ۶

۲-۳- روشهای تقویت از زیر ۷

۲-۳-۱- دوغاب ریزی با فشار ۷

۲-۳-۲- دوغاب ریزی متراکم ۹

۲-۳-۳- ریزشمع‌ها ۱۱

فصل سوم: ریز شمع

۳-۱- پیشینه تاریخی ریزشمع‌ها ۱۵

۳-۲- فلسفه طراحی ۱۶

۳-۲-۱- طراحی ریزشمع‌ها ۱۸

۳-۳- کاربردهای ریزشمع ها ۱۹

۳-۴- روش اجرا ۲۵

۳-۴-۱- ملاحضات اضافی ۲۷

۳-۵- مصالح ۳۰

۳-۶- تجهیزات حفاری ریزشمع‌ها ۳۱

۳-۷- نحوه اتصال به پی ۳۳

۳-۸- مطالعات موردی تقویت از زیر ۳۵

فصل چهارم: نشست زمین ناشی از حفر تونل

۴-۱- مقدمه ۳۹

۴-۲- مطالعات تجربی ۳۹

۴-۲-۱- تعیین میزان طول نقطهٔ عطف پروفیل نشست سطحی ۴۲

۴-۳- واکنش زمین به ساخت تونل ۴۲

۴-۳-۱- افت سینه کار ۴۳

۴-۳-۲- افت سپر ۴۳

۴-۴- تخریب و جابجایی‌های ایجاد شده در سطح زمین ناشی از تونلسازی ۴۴
۴-۴-۱- پتانسیل تخریب سازه های موجود ۴۴
۴-۴-۲- اثرات محیطی ساخت تونل ۴۵
۴-۵- تعریف تغییرشکل سازه ۴۵
۴-۶- طبقه بندی خسارات ۴۷
۴-۷- کرنش بحرانی ۴۹
۴-۸- نشست نسبی مجاز (DR) ۴۹

فصل پنجم: روش اجزا محدود

۵-۱- معرفی نرم افزار ۵۴
۵-۱-۱- المان بندی ۵۴
۵-۱-۲- المان تیر ۵۵
۵-۱-۳- مدل هندسی ۵۵
۵-۱-۴- المان سطح مشترک ۵۶
۵-۲- مدلسازی تونل به روش اجزاء محدود ۵۷
۵-۳- مبانی و جنبه های مدلسازی تحلیل FEM ۵۸
۵-۳-۱- اجزاء محدود مورد استفاده در تحقیق ۵۸

۵-۳-۲- شرایط مرزی ۵۹
۵-۳-۳- خطا ۶۰
۵-۳-۴- ابعاد مدل اجزاء محدود ۶۰
۵-۳-۵- ابعاد مدل دو بعدی ۶۰
۵-۳- ۶- تأثیر درشتی مش ۶۲
۵-۳-۷- تنش اولیه ۶۲
۵-۳-۷-۱- روش Ko ۶۳
۵-۴- مروری بر مراحل شبیه سازی دو بعدی FEM ۶۳
۵-۴-۱- مراحل شبیه‌سازی حفر تونل ۶۴
۵-۴-۱-۱- روش انقباض ۶۴
۵-۵- مدلسازی ریزشمع ۶۵
۵-۵-۱- مدلسازی سطوح مشترک ۶۵
۵-۶- مدلهای رفتاری ۶۷
۵-۶-۱- مدل موهر- کولمب ۶۷
۵-۶-۱-۱- پارامترهای اصلی مدل موهر- کولمب ۶۹
۵-۶-۲- مدل خاک سخت شونده ۷۱
۵-۶-۲-۱- پارامترهای اصلی مدل سخت شونده ۷۲

۵-۷- انتخاب مدل رفتاری ۷۳

۵-۸- صحت سنجی نرم افزار ۷۶

۵-۸-۱- ازریابی مدل میدان آزاد حفر تونل با نتایج تجربی ۷۶

۵-۸-۱-۱- مطالعه موردی تونل خط ۲ (Heinenoord) ۷۶

۵-۸-۱-۲- مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل ۷۷

۵-۸-۲- اعتبارسنجی مدلسازی عددی ریزشمع با نتایج آزمایش میدانی ۸۰

فصل ششم: مطالعات پارامتریک

۶-۱- مقدمه ۸۶

۶-۲-کلیات مدلسازی ۸۶

۶-۳-کفایت استفاده از میکروشمع‌ها ۹۰

۶-۴- بررسی تغییرات قطر بر رفتار پی سطحی ۹۳

۶-۵- بررسی تغییرات طول میکروشمع ۹۹

۶-۶- بررسی تغییرات فاصله بین میکروشمع ۱۰۸

۶-۷- تأثیر موقعیت تونل نسبت به پی سطحی ۱۱۳

۶-۸- بررسی تغییرات درصد افت ۱۲۳

فصل هفتم: نتیجه گیری

۷-۱- نتایج ۱۳۰

۷-۲- پیشنهادات ۱۳۲

منابع و مراجع ۱۳۳

فهرست اشکال

فصل دوم:

شکل ۲-۱: تقویت ساختمان جهت جلوگیری از نشست ۵

شکل۲-۲: طرح شماتیک جت گروت ۸

شکل۲-۳: طرح شماتیک روند اجرای جت گروت ۹

شکل۲-۴: طرح شماتیک و اجرای میدانی تزریق تراکمی ۱۰

شکل۲-۵: طرح شماتیک روند اجرای تزریق تراکمی ۱۰

شکل۲-۶: طرح شماتیک و اجرای میدانی میکروشمع‌ها ۱۲

فصل سوم:

شکل۳-۱: بنای مقبره ای که اولین بار ریزشمع در آن استفاده شد ۱۵

شکل۳-۲: اجزا باربر ریزشمع ۱۶

شکل۳-۳: ریزشمع‌های نوع یک ۱۷

شکل۳-۴: ریزشمع شبکه‌بندی شده نوع دو ۱۸

شکل ۳-۵: کاربردهای ریزشمع برای مقاصد مختلف ۲۳

شکل ۳-۶: کاربردهای ریزشمع‌های شبکه‌بندی شده برای محافظت از پی‌های موجود در هنگام حفر تونل ۲۴

شکل ۳-۷: طرح تقویت از زیر برج Panorama -توکیو – ژاپن ۲۴

شکل ۳-۸: کاربردهای ریزشمع‌های غیرشبکه‌بندی برای محافظت از پی‌های موجود در هنگام حفر تونل ۲۵

شکل۳-۹: مراحل اجرای ریزشمع ۲۶

شکل ۳-۱۰: طبقه بندی ریزشمع‌ها براساس نوع تزریق ۲۷

شکل۳-۱۱: گره های ایجاد شده دراثر تعبیه سوراخ در غلاف ریزشمع های درجا ۲۹

شکل۳-۱۲: حفاری دورانی محل اجرای ریزشمع ۳۲

شکل۳-۱۳: عملیات لوله کوبی ۳۲

شکل۳-۱۴: اتصال ریزشمع به سازه ۳۳

شکل۳-۱۵: نحوه اتصال ریزشمع زیر پی ساختمان قبل از ساخت پی ۳۴

شکل۳-۱۶: نحوه اتصال ریزشمع زیر پی ساختمان موجود ۳۴

شکل۳-۱۷: آرایش شماتیک طرح تقویت از زیر کلیسا ۳۶

فصل چهارم

شکل ۴-۱: گودی ایده‌آل نشست روی تونل ۴۰

شکل ۴-۲: رابطهٔ بی بعد عرض گودی نشست i/R و عمق تونل Z/۲R برای تونل در مصالح مختلف ۴۰

شکل ۴-۳: منابع افت حجمی (در دستگاه تونل زنی) ۴۳

شکل۴-۴: اضافه حفاری در روند حفر تونل ۴۴

شکل۴-۵: تغییرشکل قائم توأم با نرخ های جابجائی‌های افقی سازه متأثر از پروفیل نشست سطحی ناشی از تونلسازی . ۴۵

شکل ۴-۶: تعاریف مربوط به تغییر شکل ساختمان ۴۶

فصل پنجم:

شکل ۵-۱: مکان گره‌ها و نقاط تنش جزء المانهای خاکی ۵۴

شکل ۵-۲: موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در یک جزء پنج گره‌ای و سه گره‌ای تیر ۵۵

شکل ۵-۳: مثالی از یک مسئله کرنش صفحه‌ای و متقارن ۵۶

شکل ۵-۴: نقاط انعطاف‌پذیر گوشه‌ای، موجب مقدار برآیند ضعیف می‌شود..... ۵۷

شکل ۵-۵: نقاط ثابت گوشه موجب بهبود برآیند تنش می‌شود..... ۵۷

شکل ۵-۶: المان مثلثی ۱۵ گره‌ای ۵۹

شکل ۵-۷: شرایط مرزی المان محدود..... ۵۹

شکل۵-۸: مقدار و جهت تنشهای اولیه ۶۲

شکل۵-۹: روش انقباض ۶۴

شکل ۵-۱۰: مقطع ریزشمع که از خاک بیرون آورده شده است..... ۶۶

شکل۵-۱۱: پوشش المان سطح مشترک سطوح جانبی المان تیر در مدل کرنش مسطح ۶۶

شکل۵-۱۲: ایده اصلی یک مدل الاستیک کاملاً پلاستیک..... ۶۸

شکل۵-۱۳: سطح تسلیم مدل موهر- کولمب در فضای تنش های اصلی (c=۰)..... ۶۹

شکل ۵-۱۴: تعریف $E_{.}$ و $E_{.5}$ نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد ۷۰

شکل ۵-۱۵: رابطه هذلولی تنش-کرنش در بارگذاری اولیه برای یک آزمایش سه محوری زهکشی شده ۷۱

شکل ۵-۱۶: گودی نشست ناشی از حفر تونل به ازای عمق‌های مختلف برای مدل رفتاری موهر-کولمب ۷۴

شکل ۵-۱۷: گودی نشست ناشی از حفر تونل به ازای عمق‌های مختلف برای مدل سخت شوندگی ۷۵

شکل ۵-۱۸: نصب ابزارهای اندازه‌گیری وگیج‌های کرنش سنج در تونل Heinenoord ۷۷

شکل ۵-۱۹: مش‌بندی اجزاء محدود دوبعدی تونل Heinenoord ۷۸

شکل ۵-۲۰: مقایسه مقطع عرضی گودی نشست بین مدل عددی و نتایج تجربی ۷۹

شکل ۵-۲۱: اعمال بارگذاری جانبی از طریق عملیات جکینگ در آزمایش مقیاس واقعی ۸۰

شکل ۵-۲۲: ریزشمع تحت بارگذاری جانبی ۸۲

شکل ۵-۲۳: ریزشمع تحت بارگذاری قائم ۸۴

فصل ششم

شکل۶-۱: پی متکی بر میکروشمع در مجاورت تونل ۸۸

شکل۶-۲: مدل کرنش مسطح اثر حفر تونل بر پی متکی به میکروشمع‌ها ۹۰

شکل ۶-۳: پروفیل جابجایی قائم سطح زمین ۹۱

شکل۶-۴:ماکزیمم نشست قائم پی نواری فاقد تقویت و تقویت شده با ریزشمع ۹۱

شکل ۶-۵: توزیع تغییر مکان در جهت افق در زیر پی نواری فاقد تقویت در اثر حفر تونل ۹۲

شکل ۶-۶: توزیع تغییر مکان در جهت افق در زیر پی نواری تقویت شده با ریزشمع در اثر حفر تونل ۹۲

شکل۶-۷: تغییرات جابجایی قائم در مقابل افزایش قطر میکروشمع ۹۳

شکل۶-۸: تغییرات نیروی محوری در پی در مقابل افزایش قطر میکروشمع ۹۴

شکل۶-۹: تغییرات نیروی برشی در پی در مقابل افزایش قطر میکروشمع ۹۵

شکل۶-۱۰: تغییرات لنگرخمشی در پی، در مقابل افزایش قطر میکروشمع ۹۵

شکل۶-۱۱: تغییرات تغییرشکل جانبی بر اثر حفر تونل در مقابل کاهش قطر میکروشمع ۹۶

شکل۶-۱۲: تغییرات تغییرشکل جانبی بر اثر حفر تونل در مقابل کاهش قطر میکروشمع ۹۷

شکل۶-۱۳: تغییرات نیروی محوری در مقابل کاهش قطر میکروشمع ۹۷

شکل۶-۱۴: تغییرات لنگر خمشی در مقابل کاهش قطر میکروشمع ۹۸

شکل ۶-۱۵: مقایسه تغییرات لنگر خمشی در شمع جلویی و عقبی ۹۸

شکل۶-۱۶: موقعیت قرارگیری میکروشمع با طول‌های مختلف ۹۹

شکل ۶-۱۷: تغییرات نیروی محوری در میکروشمع برای طول‌های مختلف ۱۰۰

شکل ۶-۱۸: تغییرات لنگرخمشی در میکروشمع برای طول‌های مختلف..... ۱۰۱

شکل ۶-۱۹: تغییرات حرکت خاک در اطراف شمع مجاور تونل..... ۱۰۲

شکل ۶-۲۰: تغییرات لنگر خمشی در میکروشمع برای طول‌های مختلف درتونل به عمق۲۲ متر..... ۱۰۳

شکل ۶-۲۱: تغییرات جابجایی جانبی میکروشمع‌ها با طول‌های مختلف ۱۰۴

شکل ۶-۲۲: گسترش جابجایی خاک ناشی از حفر تونل اطراف میکروشمع به طول ۵ متر ۱۰۵

شکل ۶-۲۳: گسترش جابجایی خاک ناشی از حفر تونل اطراف میکروشمع به طول ۱۰ متر ۱۰۵
شکل ۶-۲۴: گسترش جابجایی خاک ناشی از حفر تونل اطراف میکروشمع به طول ۲۰ متر ۱۰۶
شکل ۶-۲۵: جابجایی ایجاد شده در سر میکروشمع‌ها بر حسب افزایش طول ۱۰۷
شکل ۶-۲۶: تغییرات نشست پی سطحی با افزایش S/D ۱۰۸
شکل ۶-۲۷: تغییرات حداکثر نیروی محوری در میکروشمع با افزایش S/D ۱۰۹
شکل ۶-۲۸: تغییرات لنگر خمشی در میکرو شمع با افزایش S/D ۱۱۰
شکل ۶-۲۹: تغییرات حداکثر نیروی محوری در پی سطحی با افزایش فاصله از تونل ۱۱۱
شکل ۶-۳۰: تغییرات حداکثر نیروی برشی در پی سطحی با افزایش فاصله از تونل ۱۱۲
شکل ۶-۳۱: تغییرات حداکثر لنگرخمشی در پی سطحی با افزایش فاصله از تونل ۱۱۲
شکل ۶-۳۲: موقعیت‌های مختلف قرارگیری پی متکی به میکروشمع از تونل ۱۱۴
شکل ۶-۳۳: تغییرات جابجایی ایجاد شده در پی با فواصل مختلف قرارگیری از تونل ۱۱۴
شکل ۶-۳۴: تغییرات اضافه نیروی محوری ایجاد شده در میکروشمع با فواصل مختلف از تونل ۱۱۵
شکل ۶-۳۵: تغییرات اضافه لنگرخمشی ایجاد شده در میکروشمع با فواصل مختلف از تونل ۱۱۵
شکل ۶-۳۶: تغییرات جابجایی جانبی ایجاد شده در میکروشمع با فواصل مختلف از تونل ۱۱۶
شکل ۶-۳۷: تغییرات جابجایی قائم ایجاد شده در میکروشمع با فواصل مختلف از تونل ۱۱۶
شکل ۶-۳۸: موقعیت‌های مختلف قرارگیری پی متکی به میکروشمع از تونل ۱۱۷
شکل ۶-۳۹: تغییرات پروفیل عرضی نشست سطح زمین با افزایش عمق تونل ۱۱۸

شکل ۶-۴۰: گسترش جابجایی خاک اطراف تونل حفرشده در عمق ۹ متر ۱۱۹
شکل ۶-۴۱: گسترش جابجایی خاک اطراف تونل حفرشده در عمق ۱۵/۵ متر ۱۱۹
شکل ۶-۴۲: گسترش جابجایی خاک اطراف تونل حفرشده در عمق ۲۲ متر ۱۲۰
شکل ۶-۴۳: تغییرات جابجایی قائم ایجاد شده در میکروشمع با عمق‌های مختلف حفر تونل ۱۲۱
شکل ۶-۴۴: تغییرات جابجایی جانبی ایجاد شده در میکروشمع با عمق‌های مختلف حفر تونل ۱۲۱
شکل ۶-۴۵: تغییرات نیروی محوری ایجاد شده در میکروشمع با عمق‌های مختلف حفر تونل ۱۲۲
شکل ۶-۴۶: تغییرات لنگر خمشی ایجاد شده در میکروشمع با عمق‌های مختلف حفر تونل ۱۲۳
شکل ۶-۴۷: تغییرات نشست سطح زمین در شرایط میدان آزاد با درصد افت ۱۲۴
شکل ۶-۴۸: تغییرات جابجایی قائم پی سطحی با درصد افت ۱۲۵
شکل ۶-۴۹: تغییرات جابجایی افقی پی سطحی با درصد افت ۱۲۵
شکل ۶-۵۰: تغییرات جابجایی قائم میکروشمع‌ها با درصد افت ۱۲۶
شکل ۶-۵۱: تغییرات تغییرشکل جانبی میکروشمع‌ها با درصد افت ۱۲۶
شکل ۶-۵۲: تغییرات اضافه نیروی محوری ایجاد شده در میکروشمع‌ها با درصد افت ۱۲۷
شکل ۶-۵۳: تغییرات اضافه لنگرخمشی ایجاد شده در میکروشمع‌ها با درصد افت ۱۲۷

فهرست جداول

فصل چهارم

جدول۴-۱: دسته بندی خرابی های قابل رویت با توجه به اصل سهولت در تعمیر بر ای آجر و گچ ۴۸

جدول ۴-۲: رابطه بین طبقه بندی خرابی و حدود کرنش کششی ۴۹

جدول۴-۳ : حداکثر نشست نسبی برای انواع ساختمانها بر اساس آیین نامه USSR..... ۵۰

جدول۴-۴: ماکزیمم نشست مجاز برخی سازه ها ۵۱

جدول ۴-۵: نشست نسبی قابل تحمل برای ساختمانها بر حسب میلیمتر ۵۲

فصل پنجم

جدول ۵-۱: ضرائب مقاومت المان سطح مشترک ۶۳

جدول ۵-۲: جدول پارامترهای مدل موهر- کولمب ۶۵

جدول ۵-۳ جدول پارامترهای اصلی مدل سخت شونده ۶۷

جدول ۵-۴: مشخصات مکانیکی مدل موهر-کولمب برای تونل Heinenoord..... ۷۲

جدول ۵-۵: خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل با استفاده از مدل سخت شونده ۷۳

جدول ۵-۶: مشخصات ریزشمع با قطر ۲۰۰ میلیمتر ۷۷

جدول ۵-۷: مقایسه آزمایشات میدانی و مدلسازی عددی تغییرمکان ریزشمع با قطر ۲۰۰ میلیمتر ۷۸

جدول ۵-۸: مشخصات خاک موجود در محل آزمایش. ۷۸

جدول ۵-۹: مشخصات ریزشمع با قطر ۱۵۰ میلیمتر ۷۹

جدول ۵-۱۰: مقایسه آزمایشات میدانی و مدلسازی عددی تغییرمکان ریزشمع با قطر ۱۵۰ میلیمتر..... ۸۰

فصل ششم

جدول ۶-۱: مشخصات پی نواری مربوط به ساختمان چهار طبقه..... ۸۷

جدول ۶-۲ : مشخصات سازهای برای میکروشمعهای مختلف مورد استفاده در مدلسازی ۸۸

جدول۶-۳: مشخصات خاک مورد استفاده در مدلسازی ۸۹