بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: خاک و پی

عنوان:

آنالیز عددی رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در خاکهای مستعد روانگرایی

استاد راهنما:

دکتر ایرج رحمانی

استاد مشاور:

دکتر سهیل قره

پژوهشگر:

ابوالفضل زحمتی

تابستان ۱۳۹۱

تقدیم به:

تقدیم به پدر و مادر عزیزم و تقدیم به همه آنان که مرا علم آموختند.

سپاسگزاری :

ای آنکه تو طالب خدایی به خود آ　　از خود بطلب کز تو جدا نیست خدا

اول به خود آ، چون به خود آیی به خدا　　اقرار نمایی به خدایی خدا

به نام یگانه ایزد منان و خاتم پیامبران و به نام آن خدایی که حضرت علی(ع) را الگوی مردان و حضرت زهرا(س) را الگوی زنان قرار داد.

قبل از هرچیز از کلیه اساتید بزرگوارم بویژه جناب آقای دکتر رحمانی که در انجام هرچه بهتر این پژوهش زحمات فراوانی را متقبل شدند، و نیز دوستان خوبم و کلیه عزیزانی که مرا در انجام تحقیقات مربوط به پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر و سپاس خود را اعلام می‌دارم.

و همچنین با تشکر از

پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی

برای تصویب طرح پژوهشی با موضوع پایان‌نامه و ارائه حمایت‌های مادی و معنوی

چکیده

با توجه به اینکه در طبیعت و اغلب در کنار سواحل و بنادر خاکهای ماسه‌ای وجود دارد و از آنجا که برای بروز پدیده مخرب گسترش جانبی تنها به شیب ملایم در خاک ماسه‌ای اشباع نیاز است باید راهکارهای مقابله با این پدیده مخرب بررسی گردد. علی الخصوص که در مناطق ساحلیِ رودها و دریاهای کشور که برای گردشگری بسیار مناسب هستند احداث سازه‌هایی همچون پل‌های گذرگاهی و برج‌ها در بنادر و سواحل در آینده بیشتر خواهد شد. بنابراین لزوم تحقیقات در مورد رفتار خاکهای این مناطق برای مستحکم سازی پی سازه‌ها بسیار احساس می‌شود. یکی از پدیده‌هایی که به هنگام زلزله پیِ سازه‌های این مناطق را تهدید می‌کند گسترش جانبی ناشی از روانگرایی است از این رو در تحقیق حاضر به بررسی یکی از ابعاد مقابله با پدیده گسترش جانبی یعنی تأثیر تغییرات پارامترهای لرزه‌ای و ژئوتکنیکی بر نیروهای وارد بر پی‌های عمیق پرداخته شده است.

در این پژوهش با استفاده از مدلسازی نرم‌افزاری تغییرات نیرو و جابه‌جایی جانبی در تک شمع به هنگام وقوع روانگرایی در خاک ماسه‌ای چندلایه با شیب ملایم بررسی شده است. نتایج تحقیق حاکی از آن است که جابه‌جایی‌های حداکثری مربوط به پایان بارگذاری است و این جابه‌جایی‌ها با افزایش دانسیته کاهش می‌یابد.گیرداری سر شمع باعث کاهش جابه‌جایی جانبی شمع و ایجاد لنگر خمشی در سر شمع خواهد شد. افزایش فرکانس تحریک ورودی باعث کاهش شدید در نیروها و تغییرشکلهای جانبی شمع خواهد شد. با توجه به تبدیل شدن خاک به یک سیال ویسکوز پس از روانگرایی و بواسطه وجود شیب، نیروهای کینماتیکی زیادی از طرف خاک به شمع وارد خواهد شد. بنابراین باید تمهیداتی از جمله اصلاح خاک اطراف شمع و یا ایجاد سازه‌های نگهبان در کنار فونداسیون اصلی برای کنترل نیروهای وارده از طرف خاک در نظر گرفته شود.

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل اول : مقدمه ۱

فصل دوم : پدیده روانگرایی وگسترش جانبی ۵

۲-۱ مقدمه ۵
۲-۲ مفاهیم کلی ۵
۲-۲-۱ روانگرایی جریانی ۵
۲-۲-۲ تحرک سیکلی ٦
۲-۳ معیارهای مهندسی برای بررسی استعداد روانگرایی ۷
۲-۳-۱ تخلخل بحرانی ۷
۲-۳-۲ تغییر شکل حالت پایدار ۸
۲-۳-۳ پارامتر حالت ۱۱
۲-۴ ارزیابی قابلیت روانگرایی در خاکها ۱۱
۲-۴-۱ محاسبه تنشهای برشی ماکزیمم در توده ماسه ۱۲
۲-۴-۲ تعیین تعداد سیکل معادل (N_c) ۱۳
۲-۴-۳ تعیین تنشهای لازم جهت ایجاد روانگرایی ۱٤
۲-۵ تشریح پدیده گسترش جانبی ۱۷
۲-۶ صدمات گسترش جانبی به سازه های مدفون ۱۹
۲-۶-۱ استراتژی حفاظت از سازه های مدفون در برابر گسترش جانبی ۱۹
۲-۷ رفتار خاک روانگرا شده در گسترش جانبی ۲۰
۲-۷-۱ پاسخ اتساعی و انقباضی خاکها ۲۰
۲-۷-۲ مقاومت برشی پسماند زهکشی نشده ۲۲
۲-۷-۳ اثر ریزدانه ۲٤
۲-۸ بررسی آب حفره ای در گسترش جانبی ۲۵
۲-۸-۱ حرکت رو به بالای آب حفره ای ۲۵
۲-۸-۲ زهکشی اضافه فشار حفره ای ۲۷
۲-۹ تغییر شکل توده روانگرا شده ۲۷
۲-۹-۱ شباهت به مایع ویسکوز ۲۷
۲-۹-۲ تغییر شکلهای قائم ۲۹
۲-۹-۳ تأثیر ضخامت لایه روانگرا ۳۰
۲-۱۰ اثرات مرزبندی ۳۱
۲-۱۰-۱ اثر شیب سطح زمین ۳۱
۲-۱۰-۲ مرزهای لغزش ۳۱
۲-۱۱ اثر نیروی اینرسی ۳۳
۲-۱۱-۱ اینرسی و تنشهای استاتیکی ۳۳
۲-۱۱-۲ جابه جایی های پس از زلزله ۳٤
۲-۱۲ نشست ۳٤

فصل سوم : تاریخچه تحقیقات پیشین ۳٦

۳-۱ مقدمه ۳۶
۳-۲روشهای تحلیلی ۳۶
۳-۲-۱ روش جابه جایی یا P-y ۳۶
۳-۲-۲روش نیرو (تعادل حدی) ۳۸
۳-۲-۲-۱ روش ارائه شده توسط مؤسسه راه ژاپن (JRA) ۳۹
۳-۳ مطالعات آزمایشگاهی ٤۰
۳-۳-۱ آزمایشهای میز لرزان ٤۱
۳-۳-۱-۱ مطالعات انجام شده توسط حائری و همکاران ٤۱
۳-۳-۱-۲ مطالعات انجام شده توسط معتمد و همکاران ٤۳
۳-۳-۱-۳ مطالعات انجام شده توسط He و همکاران ٤۷
۳-۳-۲ آزمایشهای سانتریفیوژ ۵۱
۳-۳-۲-۱ مطالعات انجام شده توسط Gonzalez و همکاران ۵۱
۳-۳-۲-۲ مطالعات انجام شده توسط Brandenberg و همکاران ۵٤
۳-۴ مطالعات عددی ۵۵
۳-۴-۱ مطالعات انجام شده توسط حائری و بوشهریان ۵٦
۳-۴-۲ مطالعات انجام شده توسط پاک و رحمانی ۵۷
۳-۴-۳ مطالعات انجام شده توسط بازیار و همکاران ۵۹
۳-۴-4 مطالعات انجام شده توسط Sarkar و Maheshwari ٦۱
۳-۴-5 مطالعات انجام شده توسط Lin و همکاران ٦۳
۳-۴-6 مطالعات انجام شده توسط Lu و همکاران ٦٦

فصل چهارم : مدلسازی و آنالیز عددی ٦۸

۴-۱ مقدمه ٦۸
۴-۲ مدل رفتاری خاک ماسه ای ۷۰
۴-۲-۱ کلیات مبانی تئوریک ۷۰
۴-۲-۲ شناسایی پارامتر در نرم افزار OpenSees ۷۳
۴-۲-۲-۱ تشریح مصالح nDMaterial PressureDependMultiYield ۷٤
۴-۲-۲-۲ تشریح المان BrickUP ۷۹
۴-۳ صحت سنجی عملکرد نرم افزار ۸۱
۴-۳-۱ نرم افزار LPILE ۸۱
۴-۳-۲ پیش فرض های صحت سنجی ۸۱
۴-۴ مدلسازی ۸۳
۴-۴-۱ خصوصیات شمع ۸۵
۴-۴-۲ خصوصیات خاک ۸٦
۴-۴-۲-۱ لایه بندی خاک ۸٦
۴-۴-۲-۲ پارامترهای ژئوتکنیکی ۸۷
۴-۴-۲-۳ قابلیت روانگرایی ۸۸
۴-۴-۳ نحوه مش بندی ۹۱
۴-۴-۴ نحوه آنالیز ۹۲
۴-۴-۴-۱ تحریک ورودی ۹۲
۴-۴-۴-۲ میرایی ۹۲
۴-۴-۵ مرزها و شیب مدل ۹۳
۴-۵ جمع بندی و نتیجه گیری ۹٤

فصل پنجم: تحلیل نتایج ۹۷

۵-۱ مقدمه ۹۷
۵-۲ فشار آب حفره ای ۹۸
۵-۳ نتایج حاصل از تغییرات دانسیته نسبی خاک روانگرا ۹۹
۵-۳-۱ پاسخ جابه جایی جانبی شمع به تغییرات دانسیته نسبی ۱۰۰
۵-۳-۲ پاسخ نیروی برشی شمع به تغییرات دانسیته نسبی ۱۰۲
۵-۳-۳ پاسخ خمشی شمع به تغییرات دانسیته نسبی ۱۰۳
۵-۴ نتایج حاصل از تغییرات فرکانس بارگذاری ۱۰۵
۵-۴-۱ پاسخ اضافه فشار آب حفره ای به تغییرات فرکانس ۱۰۵
۵-۴-۲ پاسخ جابه جایی جانبی شمع به تغییرات فرکانس ۱۰۶
۵-۴-۳ پاسخ نشست سر شمع به تغییرات فرکانس ۱۰۸
۵-۴-۴ پاسخ برشی شمع به تغییرات فرکانس ۱۱۰
۵-۴-۵ پاسخ خمشی شمع به تغییرات فرکانس ۱۱۲
۵-۵ نتایج حاصل از تغییرات نسبت طول به قطر شمع ۱۱۳
۵-۵-۱ پاسخ جابه جایی جانبی شمع به تغییرات نسبت طول به قطر شمع ۱۱۴
۵-۵-۲ پاسخ نیروی برشی و لنگر خمشی شمع به تغییرات نسبت طول به قطر شمع ۱۱۵
۵-۶ نتایج حاصل از تغییرات شتاب تحریک ورودی ۱۱۹
۵-۶-۱ پاسخ جابه جایی جانبی شمع به تغییرات شتاب ۱۱۹
۵-۶-۲ پاسخ نیروی برشی و لنگر خمشی شمع به تغیرات شتاب ۱۲۱
۵-۷ نتایج حاصل از تغییرات سربار قائم ۱۲۴
۵-۷-۱ پاسخ جابه جایی جانبی شمع به تغییرات سربار قائم ۱۲۵
۵-۷-۲ پاسخ جابه جایی قائم شمع به تغییرات سربار قائم ۱۲۶

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۲۹

۶-۱ جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۹
۶-۱-۱ کلیات ۱۲۹
۶-۱-۲ نتایج تغییر دانسیته نسبی ۱۲۹
۶-۱-۳ نتایج تغییر فرکانس ۱۳۰
۶-۱-۴ نتایج تغییرات نسبت طول به قطر شمع ۱۳۱
۶-۱-۶ نتایج تغییر سربار قائم ۱۳۱
۶-۲ پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ۱۳۲

منابع ۱۳۳

پیوست الف: ۱۳۷

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول۱-۱: محدوده تغییرات پارامترها جهت تحلیل پارامتریک ٤
جدول۲-۱: تعداد سیکلهای اساسی تنش بر حسب مقدار زلزله[۲] ١٤
جدول۲-۲: مقادیر Cr برای دانسیته های نسبی متفاوت[۲] ١٦
جدول ۳-۱: مشخصات شمع[۳۳] ٤٣
جدول۳-۲: پارامترهای آزمایشهای میز لرزان در تحقیقات MOTAMED و همکاران[۳۴] ٤٤
جدول۳-۳: خصوصیات شمع به کار رفته در آزمایشها[۳۴] ٤٦
جدول ۳-۴: خلاصه ای از پروفایلهای خاک و شمعها در طول آزمایشهای میز لرزان[۳۵] ٤٨
جدول۳-۵: داده های تحریک ورودی پایه[۳۵] ٥٠
جدول۳-۶: مشخصات کلی مدل مبنا[۳۸] ٥٧
جدول۴-۱: روابط مربوط به پارامترهای مصالح با مدل PDMY [۴۶] ٧٩
جدول۴-۲: ترکیب بارگذاری در این مطالعه ٨٢
جدول۴-۳: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل در نرم افزارهای OPENSEES و LPILE ٨٣
جدول۴-۴: مقادیر به کار رفته در هر یک از مدلها برای حالت سرشمع آزاد ٨٤
جدول۴-۵: مقادیر به کار رفته در هر یک از مدلها در حالت سرشمع گیردار ٨٥
جدول۴-۶: مقادیر پارامترهای به کار رفته برای مصالح خاکی ٨٨
جدول۴-۷: مقادیر تنش برشی ناشی از زلزله در اعماق مختلف ٨٩
جدول۴-۸: مقادیر تنش برشی لازم برای روان شدن ماسه در اعماق مختلف ٩٠

فهرست شکل‌ها

عنوان | صفحه

شکل۲-۱: پدیده جوشش ماسه ناشی از روانگرایی سطحی در زلزله LOMA PRIETA (۱۹۸۹)[۱] ۷

شکل۲-۲: رفتار نمونه های شل و متراکم در آزمایش سه محوری کرنش کنترل[۱] ۸

شکل۲-۳: خط CVR به عنوان مرز بین حالت متخلخل انقباضی و حالت متراکم اتساعی[۱] ۸

شکل۲-۴: روانگرایی، رفتار اتساعی و روانگرایی محدود برای نمونه های با تخلخل اولیه متفاوت در آزمایشهای بارگذاری یکنواخت[۱] ۹

شکل۲-۵: خط حالت پایدار در فضای سه بعدی E-$\boldsymbol{\sigma}$-$\boldsymbol{\tau}$ [۱] ۱۰

شکل۲-۶: خط SSL مرز تعیین استعداد روانگرایی جریانی[۱] ۱۱

شکل۲-۷: دامنه تغییرات $\boldsymbol{rd}$ برای پروفیل خاکها در تحلیل روانگرایی[۲] ۱۳

شکل۲-۸: تغییرات تنش برشی با زمان در خلال زلزله برای تحلیل روانگرایی خاکها[۲] ۱۴

شکل۲-۹: شرایط تنش جهت ایجاد روانگرایی ماسه ها در ۱۰ سیکل[۲] ۱۵

شکل۲-۱۰: شرایط تنش جهت ایجاد روانگرایی ماسه ها در ۳۰ سیکل[۲] ۱۵

شکل ۲-۱۱ : روش ارزیابی قابلیت روانگرایی[۲] ۱۷

شکل۲-۱۲: صدمات ناشی از گسترش جانبی به سبب روانگرایی[۳] ۱۸

شکل۲-۱۳: رفتار شیروانیها در زلزله A) روانگرایی جریانی در حالت انقباض B) حدود تغییرشکل در حالت اتساع و انقباض[۳] ۲۲

شکل۲-۱۴: نشست دانه های خاک روانگرا و انتقال آب حفره ای به قسمتهای فوقانی[۳] ۲۶

شکل۲-۱۵: پروفیل جابه جایی جانبی A)خاک فوقانی نفوذپذیر B)خاک فوقانی نفوذناپذیر[۳] ۲۹

شکل۲-۱۶: پدیده مرزهای افتان در اطراف ناحیه گسترش جانبی[۳] ۳۳

شکل۳-۱: مدل فنرهای WINKLER برای آنالیز شمع ها[۲۹] ۳۷

شکل۳-۲: نحوه اعمال فشار جانبی خاک در روش تعادل حدی[۲۹] ۳۸

شکل۳-۳: نیروهای وارد بر شمع از لایه روانگرا و غیر روانگرا [۳۲] ۴۰

شکل ۳-۴: نمای مدل فیزیکی[۳۳] ۴۲

شکل۳-۵: مدل فیزیکی در پلان[۳۳] ۴۲

شکل۳-۶: آزمایش گروه کوچک شمعها (۳×۳)[۳۴] ۴۵

شکل۳-۷: گروه بزرگ شمعها (۶×۶)[۳۴] ۴۵

شکل۳-۸: رفتار ماسه روان شده در آزمایشهای میز لرزان[۳۴] ۴۷

شکل۳-۹: نحوه ابزارگذاری آزمایش UCSD3 [۳۵] ۴۹

شکل۳-۱۰: ابزارگذاری آزمایش JAPAN4 [۳۵] ۵۰
شکل۳-۱۱: نحوه ابزارگذاری در مدلهای سانتریفیوژ GONZALEZ و همکاران[۳۶] ۵۳
شکل۳-۱۲: تاریخچه زمانی شتاب پایه ورودی به مدلهای گروه شمع ۲×۲[۳۶] ۵۳
شکل۳-۱۳: آرایش شمعها در آزمایش سانتریفیوژ BRANDENBERG در سال ۲۰۰۵ [۳۷] ۵۵
شکل۳-۱۴: A) هندسه مدل فیزیکی B) شبیه سازی عددی با یک چهارم مدل به دلیل تقارن C)شرایط مرزی در شبیه سازی عددی[۴۰] ۵۹
شکل۳-۱۵: مقایسه نتایج بار-نشست در آزمایش فیزیکی در محیط 1-G با روش PDR و نتایج مدلسازی عددی[۴۰] ۶۱
شکل۳-۱۶: مش بندی سه بعدی سیستم شمع-خاک[۴۱] ۶۲
شکل۳-۱۷: تاریخچه زمانی شتاب در اعماق مختلف در نرم افزار CYCLIC-1D [۴۲] ۶۴
شکل۳-۱۸: تاریخچه زمانی فشار آب حفره ای در اعماق مختلف در نرم افزار CYCLIC-1D [۴۲] ۶۴
شکل۳-۱۹: جابه جایی جانبی شمع در گامهای زمانی مختلف[۴۲] ۶۵
شکل۳-۲۰: لنگر خمشی شمع در گامهای زمانی مختلف[۴۲] ۶۵
شکل۳-۲۱: مش بندی مدل عددی ساخته شده توسط LU و همکاران(۲۰۰۴)[۴۳] ۶۶
شکل۳-۲۲: جابه جایی جانبی خاک و شمع در زمانهای مختلف[۴۳] ۶۷
شکل۳-۲۳: پروفیل لنگرخمشی شمع در زمانهای مختلف[۴۳] ۶۷
شکل۴-۱: سطوح سیلان تو در تو در فضای تنش اصلی و صفحه تفاضلی[۴۶] ۷۲
شکل۴-۲: طرحی کلی از پاسخ مدل ساختاری [۴۶] ۷۳
شکل۴-۳: پارامترهای تعریف شده در فضای تنش برشی- کرنش برشی[۴۴] ۷۴
شکل۴-۴: دامنه سیلان اولیه در ترازهای پایین فشار دورگیر مؤثر[۴۸] ۷۷
شکل۴-۵: مفهوم تعداد سطوح سیلان در نرم افزار OPENSEES [۴۸] ۷۸
شکل۴-۶: تصویر المانهای 8NODE و 20NODE [۴۴] ۸۰
شکل۴-۷: نمایشی شماتیک از مش بندی و نیروهای وارده به مدل ۸۲
شکل۴-۸: شماتیک مقطع شمع ۸۶
شکل۴-۹: شماتیکی از پروفیل خاک همراه با شمع در مدل مبنا ۸۷
شکل۴-۱۰: نمایش محدوده ای از خاک با احتمال وقوع روانگرایی بالا ۹۰
شکل۴-۱۱: مش بندی مدل شمع- خاک ۹۱
شکل۴-۱۲: تاریخچه زمانی تحریک ورودی ۹۲
شکل۴-۱۳: منحنی میرایی در تحلیل سه بعدی[۴۸] ۹۳
شکل۴-۱۴: نمایشی از خروجی های نرم افزار مربوط به مدل مبنا در حالت سر شمع آزاد ۹۶

شکل۴-۱۴: نمایشی از خروجی های نرم افزار مربوط به مدل مبنا در حالت سر شمع گیردار ۹۶
شکل۵-۱: نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر عمودی در وسط لایه ماسه ای شل در مدل مبنا ۹۹
شکل۵-۲: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی در طول شمع با تغییر دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع آزاد ۱۰۰
شکل۵-۳: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی در طول شمع با تغییر دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع گیردار ۱۰۱
شکل۵-۴: نمودار تغییرات جابه جایی جانبی سر شمع با تغییر دانسیته نسبی خاک روانگرا ۱۰۱
شکل۵-۵: نمودار حداکثر نیروی برشی در طول شمع با تغییر دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع آزاد۱۰۲
شکل۵-۶: نمودار حداکثر نیروی برشی در طول شمع با تغییرات دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع گیردار ۱۰۳
شکل۵-۷: نمودار تغییرات نیروی برشی در مرز بین لایه روانگرا و لایه فوقانی با تغییر دانسیته نسبی خاک روانگرا ۱۰۳
شکل۵-۸: نمودار حداکثر لنگرخمشی در طول شمع با تغییر دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع آزاد۱۰۴
شکل۵-۹: نمودار حداکثر لنگرخمشی در طول شمع با تغییر دانسیته نسبی خاکِ روانگرا در حالت سر شمع گیردار ۱۰۴
شکل۵-۱۰: نمودار تغییرات لنگر خمشی در سر شمع با تغییر دانسیته نسبی خاک روانگرا ۱۰۵
شکل۵-۱۱: نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر عمودی در وسط لایه ماسه ای روانگرا برای فرکانسهای مختلف بارگذاری..... ۱۰۶
شکل۵-۱۲: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی در طول شمع با تغییر فرکانس تحریک ورودی در حالت سر شمع آزاد..... ۱۰۷
شکل۵-۱۳: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی در طول شمع با تغییر فرکانس تحریک ورودی در حالت سر شمع گیردار ۱۰۸
شکل۵-۱۴: نمودار تغییرات جابه جایی جانبی سر شمع با تغییر فرکانس ۱۰۸
شکل۵-۱۵: نمودار تاریخچه زمانی نشست سر شمع در فرکانسهای مختلف در حالت سر شمع آزاد ۱۰۹
شکل۵-۱۶: نمودار تاریخچه زمانی نشست سر شمع در فرکانسهای مختلف در حالت سر شمع گیردار..... ۱۱۰
شکل۵-۱۷: نمودار تغییرات نشست سر شمع بر حسب فرکانس در پایان تحلیل..... ۱۱۰
شکل۵-۱۸: نمودار تغییرات حداکثر نیروی برشی در طول شمع با تغییر فرکانس در حالت سر شمع آزاد ۱۱۱
شکل۵-۱۹: نمودار تغییرات حداکثر نیروی برشی در طول شمع با تغییر فرکانس در حالت سر شمع گیردار. ۱۱۱
شکل۵-۲۰: نمودار تغییرات نیروی برشی در مرز بین لایه روانگرا و لایه فوقانی با تغییر دانسیته نسبی خاک روانگرا ۱۱۲
شکل۵-۲۱: نمودار تغییرات حداکثر لنگر خمشی در طول شمع با تغییر فرکانس در حالت سر شمع آزاد..... ۱۱۲
شکل۵-۲۲: نمودار تغییرات حداکثر لنگر خمشی در طول شمع با تغییر فرکانس در حالت سر شمع گیردار .. ۱۱۳

شکل۵-۲۳: نمودار تغییرات لنگر خمشی در سر شمع با تغییر فرکانس ۱۱۳
شکل۵-۲۴: نمودار تغییرات حداکثر جابه جایی جانبی شمع برای شمعهای با طول مختلف در حالت سر شمع آزاد۱۱٤
شکل۵-۲۵: نمودار تغییرات حداکثر جابه جایی جانبی شمع برای شمعهای با طول مختلف در حالت سر شمع گیردار ۱۱۵
شکل۵-۲۶: نمودار تغییرات جابه جایی جانبی سر شمع با تغییر نسیت طول به قطر شمع..... ۱۱۵
شکل۵-۲۷: نمودار حداکثر نیروی برشی برای شمعهای با طول مختلف در حالت سر شمع آزاد ۱۱٦
شکل۵-۲۸: نمودار حداکثر نیروی برشی برای شمعهای با طول مختلف در حالت سر شمع گیردار ۱۱۷
شکل۵-۲۹: نمودار حداکثر لنگر خمشی برای طولهای مختلف شمع در حالت سر شمع آزاد..... ۱۱۷
شکل۵-۳۰: نمودار حداکثر لنگر خمشی برای طولهای مختلف شمع در حالت سر شمع گیردار ۱۱۸
شکل۵-۳۱: نمودار تغییرات نیروی برشی در مرز بین لایه روانگرا و لایه فوقانی با تغییر نسبت طول به قطر شمع ۱۱۸
شکل۵-۳۲: نمودار تغییرات حداکثر جابه جایی شمع بر حسب شتابهای مختلف برای حالت سر شمع آزاد..... ۱۲۰
شکل۵-۳۳: نمودار تغییرات حداکثر جابه جایی شمع بر حسب شتابهای مختلف برای حالت سر شمع آزاد..... ۱۲۰
شکل۵-۳۴: نمودار تغییرات جابه جایی جانبی سر شمع با تغییر شتاب ۱۲۱
شکل۵-۳۵: نمودار تغیرات حداکثر نیروی برشی شمع بر حسب شتابهای مختلف در حالت سر شمع آزاد ۱۲۲
شکل۵-۳۶: نمودار تغیرات حداکثر نیروی برشی شمع بر حسب شتابهای مختلف در حالت سر شمع گیردار . ۱۲۲
شکل۵-۳۷: نمودار تغییرات نیروی برشی در مرز بین لایه روانگرا و لایه فوقانی با تغییر شتاب ۱۲۳
شکل۵-۳۸: نمودار تغییرات حداکثر لنگر خمشی برای شتابهای مختلف در حالت سر شمع آزاد..... ۱۲۳
شکل۵-۳۹: نمودار تغییرات حداکثر لنگر خمشی برای شتابهای مختلف در حالت سر شمع گیردار ۱۲٤
شکل۵-۴۰: نمودار تغییرات لنگر خمشی در مرز بین لایه روانگرا و لایه فوقانی با تغییر شتاب..... ۱۲٤
شکل۵-۴۱: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی شمع با سربارهای مختلف در حالت سر شمع آزاد..... ۱۲۵
شکل۵-۴۲: نمودار حداکثر جابه جایی جانبی شمع با سربارهای مختلف در حالت سر شمع گیردار ۱۲٦
شکل۵-۴۳: نمودار تغییرات جابه جایی جانبی سر شمع با تغییر سربار ۱۲٦
شکل۵-۴۴: نمودار تاریخچه زمانی نشست سر شمع با سربارهای مختلف در حالت سر شمع آزاد ۱۲۷
شکل۵-۴۵: نمودار تاریخچه زمانی نشست سر شمع با سربارهای مختلف در حالت سر شمع گیردار ۱۲۸
شکل(۵-۴۶): نمودار تغییرات نشست سر شمع بر حسب سربار قائم در پایان تحلیل..... ۱۲۸

فصل اول : مقدمه

اندرکنش بین شمع و خاک یکی از مهمترین مباحث ژئوتکنیک و علوم مرتبط با آن می‌باشد. محققین زیادی تا کنون به بررسی این موضوع پرداخته‌اند و جنبه‌های مختلف رفتار شمع‌ها را تحت اثر بارهای مختلف بررسی کرده‌اند. با توجه به افزایش استفاده از پی‌های عمیق طی دهه اخیر در سطح کشور و گسترش بنادر شمالی و جنوبی کشور در سواحل ماسه‌ای و خطر روانگرایی در اثر زلزله، لزوم تحقیقات بیشتر در این مقوله حس می‌شود. در واقع تغییرمکان جانبی در زمینهای دارای شیب ملایم که ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای در لایه‌های سطحی خاک در طول زلزله باشد را گسترش جانبی ناشی از روانگرایی گویند.

پدیده گسترش جانبی در مورد سازه‌های مدفون در خاک یک خطر جدی محسوب می‌گردد چراکه در صورت بروز این پدیده مخرب خاک نیروهای بزرگی را به سازه اعمال می‌کند. اگرچه در طی سالیان گذشته در تحقیقات متعددی تأثیر پدیده گسترش جانبی بر پی‌های عمیق بررسی گشته ولی همچنان به دلیل تأثیر پارامترهای مختلف محیطی شبهات زیادی در روش‌های طراحی وجود دارد[۱].

بحث در مورد گسترش جانبی به سال ۱۹٦٤ در زلزله نیگاتای ژاپن برمی‌گردد که از جمله زلزله‌هایی است که سازه‌ها را در معرض خطرات ناشی از این پدیده مخرب قرار داد. اگرچه متخصصان فن در سال‌های گذشته بسیاری از خطرات ناشی از زلزله‌ها را شناسایی کرده و راه‌حل‌هایی نیز برای آن‌ها اندیشیده بودند ولی در زلزله‌های بزرگی چون نیگاتا در سال ۱۹٦٤ و

کوبه در سال ۱۹۹۵ به مسئله مهمی در مورد روانگرایی خاکها پی بردند و آن تأثیر روانگرایی بر سازه‌های مدفون بود چراکه مثلاً در مورد شمع‌ها خرابی‌هایی مشاهده گردید که گویای یک هماهنگی مشترک در تمام سازه‌ها بود و آن میزان خرابی در ارتفاع خاصی از شمع‌ها بود. برخی از آن‌ها در محل تغییر سختی لایه خاک و برخی در محل اتصال به سر شمع دچار خرابی‌های مشابه شده بودند. بازنگری این صدمات نشان از وقوع پدیده‌ای داشت که توجه مهندسین ژئوتکنیک را به خود جلب کرد و آن خرابی شمع‌ها ناشی از گسترش جانبی بود.

مهمترین شاخص خرابیِ ناشی از گسترش جانبی تغییرمکان خاک است؛ از آنجا که سازه‌ها اغلب قادر به تحمل جابه‌جایی‌های کوچک می‌باشند لذا در صورتی که از میزان جابه‌جایی خاک و تأثیر آن با خبر باشیم می‌توانیم به طراحی‌های اقتصادی‌تر اعتماد کرده و یا طراحی جدیدی را بر مبنای نیروهای ناشی از گسترش جانبی ارائه کنیم.

به همین جهت محققین در سال‌های اخیر همواره سعی بر آن داشته‌اند تا نیروهای وارده از طرف خاک بر سازه‌های مدفون را در صورت بروز گسترش جانبی تخمین زده و فرمول‌هایی را ارائه کنند.

به طور کلی مطالعات انجام گرفته در زمینه بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه–شمع در خاک مستعد روانگرایی را می‌توان به سه دسته کلی، مطالعات صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی بر روی مدلهای فیزیکی و مطالعات عددی تقسیم بندی نمود. نتایج این تحقیقات به طور جامع در فصل سوم آمده است.

ارزیابی پدیده مخرب گسترش جانبی نیازمند نگاهی کامل و هماهنگ به تمام پارامترهای تأثیرگذار است که البته روابط و عملکرد این پارامترها در این پدیده بسیار پیچیده می‌باشد. با توجه به بنا شدن بسیاری از سازه‌های مهم بر روی پی‌های عمیق در سال‌های اخیر در کشور تحلیل و بررسی ابعاد مختلف و نقاط ضعف و قوت این‌گونه پی‌ها در شرایط مختلف، ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل آنالیز عددی به کمک نرم‌افزارها و مقایسه نتایج با نتایج واقعی و آزمایشگاهی می‌تواند به

ما در تسریع و اطمینان از نتایج احتمالات خرابی‌ها کمک کند تا بتوانیم هر چه شایسته‌تر در احداث سازه‌هایی مستحکم‌تر گام برداریم.

این تحقیق مشتمل بر فصول ذیل است :

❖ فصل اول : مقدمه

این فصل شامل مقدمه‌ای بر اهداف و لزوم بررسی تأثیر گسترش جانبی بر شمع‌ها است.

❖ فصل دوم : پدیده روانگرایی وگسترش جانبی

در این فصل هویت روانگرایی و عمده روش‌های بررسیِ احتمال وقوع روانگرایی در خاکها بازگو خواهد شد. همچنین در این فصل با مفهوم گسترش جانبیِ ناشی از روانگرایی آشنا شده و عوامل اثر گذار در شکل گیری این پدیده تشریح خواهد شد.

❖ فصل سوم : تاریخچه تحقیقات پیشین

در این فصل تاریخچه کارهای انجام گرفته قبلی در مورد بحث گسترش جانبی خاک و روش‌های تحلیل و طراحی شمع‌ها شامل روش جابه‌جایی و روش نیرو در خاکهای روانگرا آمده است. همچنین مطالعات پارامتریک و آزمایشگاهی گذشته که بر روی مدل‌های فیزیکی انجام شده آورده شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط پاک در سال ۱۳۸۹ ، Baziar در سال ۲۰۰۹ و Motamed در سال ۲۰۰۸، و حائری و همکاران در سال ۱۳۸۷اشاره کرد که به تحلیل و بررسی پارامترهایی همچون شیب، فشار آب حفره‌ای، فرکانس، ضخامت لایه روانگرا و ... پرداخته‌اند.

❖ فصل چهارم : مدل‌سازی و آنالیز عددی

در این فصل به معرفی برنامه OpenSees و صحت عملکرد برنامه پرداخته و پیش‌فرض‌های برنامه تشریح شده‌اند. همچنین پارامترهای لرزه‌ای، هندسی و ژئوتکنیکی مطابق با جدول ذیل جهت تحلیل پارامتریک به کار گرفته شده است:

جدول۱-۱: محدوده تغییرات پارامترها جهت تحلیل پارامتریک

شتاب(g)	مقدار بار(KN)	طول شمع (m)	دانسیته نسبی(%)	فرکانس(Hz)	شرایط سرشمع
0.15-0.45	500-5000	6-16	25-50	1-10	Free&Fixed

❖ فصل پنجم : تحلیل نتایج

در این فصل نتایج بدست آمده از نرم‌افزار آورده شده و صحت و سقم آنها بررسی می‌شود.

❖ فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج کلی و کاربردی این تحقیق بازگو شده است و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه گشته است.

فصل دوم : پدیده روانگرایی وگسترش جانبی

۲-۱ مقدمه

اثرات ویران کننده روانگرایی در سال ۱۹٦٤ به دلیل وقوع زلزله‌های نیگاتا در ژاپن و Good Friday درآلاسکا توجه مهندسین را به خود جلب کرد. پس از آن مطالب فراوانی در مورد روانگرایی، توسط صدها محقق در سراسر جهان بررسی و مطالعه گردید[۱].

کلمه روانگرایی ابتدا توسط Mogami و Kubu (۱۹۵۳) ابداع شد و با پیشرفت علم و در سالهای اخیر چهارچوب‌های مفاهیم رفتار خاک در ارتباط با روانگرایی دقیق‌تر گشته و از آن جهتِ تشریح روش‌های ارزیابی مخاطرات روانگرایی استفاده می‌شود[۱].

۲-۲ مفاهیم کلی

تمایل خاکهای غیر چسبنده به متراکم شدن در اثر بارگذاری استاتیکی و یا سیکلی امری شناخته شده است. خاکهای غیر چسبنده اشباع در اثر بارگذاری سریع در شرایط زهکشی نشده تمایل به تراکم دارند که این امر موجب افزایش فشار آب حفره‌ای گشته و در نتیجه تنشهای مؤثر کاهش می‌یابند. اگرچه تولید فشار منفذی در شرایط غیر زهکش نشان اصلی همه پدیده‌های روانگرایی است اما می‌توان آنها را به دو دسته کلی تقسیم کرد: روانگرایی جریانی (flow liquefaction)، تحرک سیکلی (cyclic mobility)[۱].

۲-۲-۱ روانگرایی جریانی

روانگرایی جریانی[1] زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی استاتیکی در توده خاک از مقاومت برشی خاک بالاتر رود. روانگرایی جریانی را می‌توان از روی ماهیت ناگهانی آنها، سرعت گسترش و حرکت طولانی مصالح روان‌شده تشخیص داد.

۲-۲-۲ تحرک سیکلی

تحرک سیکلی[2] برعکس روانگرایی جریانی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی استاتیکی کمتر از مقاومت خاک روان‌شده است. تغییر شکلهای ایجاد شده ناشی از تحرک سیکلی در طول زلزله به طور فزآینده‌ای افزایش می‌یابد و برعکس روانگرایی جریانی، تغییرشکل‌های ناشی از تحرک سیکلی هم در اثر تنش‌های سیکلی و هم در اثر تنش‌های استاتیکی ایجاد می‌شوند. این نوع تغییر شکلها که به گسترش جانبی (lateral spreading) مشهورند، در صورت وجود سازه در محل می‌توانند خرابی‌های مهمی ایجاد نمایند[۱].

در صورتی که تحرک سیکلی تنها ناشی از تنش‌های سیکلی باشد و تنش‌های افقی استاتیکی نقش قابل توجهی نداشته باشند، روانگرایی را روانگرایی سطحی (level-ground) می‌نامند. در این حالت جابجایی‌های جانبی کوچک بوده و مصالح ماسه‌ای در صورت امکان پس از زلزله با مستهلک شدن اضافه فشار منفذی از لایه‌های فوقانی عبور کرده و خود را به سطح می‌رسانند و موجب نشست‌های قائم مفرط می‌شوند. پدیده جوشش ماسه (شکل۲-۱) از نشانه‌های این نوع روانگرایی است[۱].

[1] Flow Liquefaction
[2] Cyclic Mobility

شکل۲-۱: پدیده جوشش ماسه ناشی از روانگرایی سطحی در زلزله Loma Prieta (۱۹۸۹)[۱]

۲-۳ معیارهای مهندسی برای بررسی استعداد روانگرایی

۲-۳-۱ تخلخل بحرانی

کاساگرانده (۱۹٦۳) در تحقیقات خود یکسری آزمایش‌های سه محوری کرنش کنترل را بر روی نمونه‌های ماسه‌ای شل و متراکم با استفاده از دستگاه سه محوری انجام داد که نتایج حاصله در شکل (۲-۲) آمده است. او مشاهده کرد که هنگامیکه نمونه‌ها در اثر کرنش بزرگ در یک فشار محدود کننده برابر، دچار گسیختگی می‌شوند، به دانسیته یکسانی می‌رسند. او تخلخل متناظر با این دانسیته ثابت را تخلخل بحرانی (e_c) نامید. او نشان داد که (e_c) به فشار جانبی مؤثر وابسته است و پوش خط تخلخل بحرانی در اثر فشار جانبی‌های مؤثر را ترسیم کرد و آن را خط تخلخل بحرانی (CVR) نامید. (شکل۲-۳)

از آنجا که خط CVR مرز بین حالات انقباضی و اتساعی خاک است لذا می‌تواند به عنوان مشخصه بین حالات مستعد و غیرمستعد برای روانگرایی جریانی در نظر گرفته شود (شکل۲-۳).