

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

گروه ژئوتکنیک (خاک و پی)

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک (خاک و پی)

عنوان

تعیین ظرفیت باربری گروه ریزشمع تحت اثر بار جانبی و قائم
با در نظر گرفتن اندرکنش بین ریزشمع‌ها

استاد راهنما

دکتر حسن قاسم‌زاده

نگارش

فرهاد کریمی

شماره دانشجویی

۹۴۱۰۲۹۴

شهریور ۱۳۹۷

تقدیم به

مادر مہربان

و

روح پاک پدرم

راهنمایی‌های بی‌دریغ استاد و سرور ارجمندم،

جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده

را در انجام، نگارش و تدوین این تحقیق، ارج می‌نهم و از ایشان سپاسگزارم.

چکیده

در شرایطی که گزینش و اعمال روش مناسب بهسازی خاک، جهت ارتقاء خصوصیات مهندسی ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار به‌همراه اجرای پی‌های عمیق، به‌منظور انتقال بارهای روسازه به نهشته‌های عمیق باربر، ناگزیر باشد، انتخاب نوع پی عمیق اعم از شمع‌های بتنی درجاریز، شمع‌های کوبشی و ریزشمع‌ها و همچنین، روش مناسب و مطلوب بهسازی بستر، با توجه به معیارهای طراحی و محدودیت‌های اقتصادی، صورت خواهد گرفت. به‌کارگیری و اجرای ریزشمع‌ها، به‌عنوان پی عمیق مقاوم در برابر بارگذاری محوری، جانبی و همچنین، یکی از روش‌های نوین و موثر بهسازی برجای بسترهای ضعیف و ناپایدار، امروزه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

ظرفیت باربری ریزشمع‌ها بر اساس یکی از سه معیار کمانش (در خاک‌های نرم)، گسیختگی اندرکنش خاک- دوغاب در ناحیه چسبندگی و یا مقاومت سازه‌ای، تعیین می‌گردد. تقریباً، تمامی مطالعات صورت‌گرفته در خصوص ریزشمع‌ها، بر سه معیار فوق‌الذکر متمرکز بوده و این در حالی است که مطالعات بسیار محدودی در زمینه رفتار و خصوصیات بار- جابجایی ریزشمع‌ها، تحت بارگذاری کمتر از بار مجاز تعیین‌شده، انجام گرفته است. در حال حاضر، بیشینه تغییرمکان مجاز یک پی، معیاری دقیق‌تر نسبت به پایداری سازه‌ای کلی و ظرفیت گسیختگی آن بوده و این مسئله نشانگر آن است که مطالعات بیشتر و دقیق‌تری در خصوص رفتار بار- جابجایی ریزشمع‌ها، می‌بایست صورت گیرد. در این پژوهش، سعی شده است تا با ارائه یک روش تحلیلی ساده و معتبر، رفتار بار- جابجایی سامانه ریزشمع، در قالب سامانه ریزشمع تک و گروه سامانه ریزشمع (سامانه‌های ریزشمع مجاور)، با توجه به خصوصیات مهندسی ناحیه موثر ریزشمع، ناشی از اجرای تزریق تحت فشار زیاد حین اجرای آن و همچنین، بر اساس فراسنجهایی نظیر فواصل مرکز تا مرکز و نسبت لاغری، تحت‌تأثیر بارگذاری محوری (قائم) و جانبی استاتیکی، بر اساس حل معادلات دیفرانسیل تعادل محوری، جانبی و لنگر خمشی، در قالب یک مدل پیوسته که در آن رفتار تمامی مصالح به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده و عکس‌العمل بستر نیز توسط فنرهای وینکلر معرفی شده‌اند، مورد مطالعه قرار گیرد.

در نهایت، بر اساس تحلیل و بررسی‌های صورت‌گرفته در ارتباط با رفتار بار- جابجایی محوری و جانبی ریزشمع‌ها، به‌صورت واضح آشکار شده است که درنظرگرفتن وجود ناحیه موثر، تحت‌تأثیر اجرای مطلوب عملیات تزریق، در رابطه با تحلیل رفتار بار- جابجایی ریزشمع‌ها، می‌تواند موجب بهبود چشمگیر رفتار بار- جابجایی محوری و جانبی آن‌ها گردد.

کلیدواژه: ریزشمع، پی، نشست، بار، تغییرمکان، اندرکنش

فهرست عناوین

۱	فصل ۱- پیش‌گفتار
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ طرح مسئله
۳	۳-۱ موضوع تحقیق
۳	۴-۱ اهمیت تحقیق
۴	۵-۱ ضرورت تحقیق
۴	۶-۱ هدف تحقیق
۴	۷-۱ پرسش‌های تحقیق
۴	۸-۱ روش تحقیق
۴	۹-۱ ساختار تحقیق
۷	فصل ۲- مروری بر ادبیات موضوع
۸	۱-۲ اصول و کلیات اصلاح و بهسازی ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار
۸	۱-۱-۲ روش‌های مقابله با شرایط ژئوتکنیکی مسئله‌دار
۸	۲-۱-۲ هدف از بهسازی ساختار ژئوتکنیکی
۹	۳-۱-۲ عوامل موثر بر انتخاب روش بهسازی
۱۱	۲-۲ اصول تزریق
۱۱	۱-۲-۲ هدف از تزریق دوغاب
۱۲	۲-۲-۲ انواع روش‌های تزریق
۱۴	۳-۲-۲ مکانیسم‌های بهسازی ساختار ژئوتکنیکی توسط انواع روش‌های تزریق
۲۱	۴-۲-۲ معیارهای تزریق‌پذیری خاک
۲۳	۵-۲-۲ نظریه تزریق دوغاب
۳۴	۳-۲ ریزشمع
۳۴	۱-۳-۲ مقدمه
۳۵	۲-۳-۲ طبقه‌بندی سامانه ریزشمع از نظر روش اجرا و ساخت
۳۷	۳-۳-۲ طبقه‌بندی سامانه ریزشمع از نظر فلسفه طراحی و عملکرد اجرایی
۳۷	۴-۳-۲ کاربرد سامانه ریزشمع
۳۹	۵-۳-۲ تاثیر اجرای تزریق تحت فشار بر ظرفیت ریزشمع حین ساخت و اجرای آن
۴۱	۶-۳-۲ به‌کارگیری انواع روش‌های تزریق در فرآیند اجرا و ساخت ریزشمع
۴۲	۷-۳-۲ رفتار بار محوری- جابجایی محوری ریزشمع
۴۵	۸-۳-۲ رفتار بار جانبی- جابجایی جانبی ریزشمع
۵۰	۴-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۵۱	۳- رفتار بار محوری- جابجایی محوری سامانه ریزشمع
۵۲	۱-۳ مقدمه
۵۲	۲-۳ تعریف مسئله

۵۲	۳-۳ مدل سازی مسئله
۵۳	۱-۳-۳ فرضیات مدل سازی
۶۱	۴-۳ رفتار بار محوری- جابجایی محوری سامانه ریزشمع
۶۱	۱-۴-۳ رفتار بار محوری- جابجایی محوری سامانه ریزشمع تک
۷۰	۲-۴-۳ رفتار بار محوری- جابجایی محوری سامانه ریزشمع با توجه به حضور سامانه ریزشمع مجاور
۹۶	۵-۳ خلاصه، جمع بندی و نتیجه گیری
۹۹	فصل ۴- رفتار بار جانبی- جابجایی جانبی سامانه ریزشمع
۱۰۰	۱-۴ مقدمه
۱۰۰	۲-۴ تعریف مسئله
۱۰۰	۳-۴ مدل سازی مسئله
۱۰۱	۱-۳-۴ فرضیات مدل سازی
۱۰۹	۴-۴ رفتار بار جانبی- جابجایی جانبی سامانه ریزشمع
۱۰۹	۱-۴-۴ رفتار بار جانبی- جابجایی جانبی سامانه ریزشمع تک
۱۲۰	۲-۴-۴ رفتار بار جانبی- جابجایی جانبی سامانه ریزشمع با توجه به حضور سامانه ریزشمع مجاور
۱۵۳	۵-۴ خلاصه، جمع بندی و نتیجه گیری
۱۵۵	فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۵۶	۱-۵ مقدمه
۱۵۶	۲-۵ نتیجه گیری
۱۵۸	۳-۵ پیشنهادات برای ادامه تحقیق
۱۵۹	۶ منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ تصویر نمادین سامانه ریزشمع ۳
- شکل ۱-۲ روش‌های بهسازی متداول برای انواع خاک‌ها [۶ و ۷] ۱۰
- شکل ۲-۲ انواع روش‌های تزریق [۶] ۱۳
- شکل ۳-۲ روش‌های مناسب تزریق برای دامنه وسیعی از خاک‌ها با توجه به دانه‌بندی و طبقه‌بندی آن‌ها [۱۱] ۱۳
- شکل ۴-۲ مراحل اجرایی روش تزریق تراکمی [۴] ۱۵
- شکل ۵-۲ توزیع تراکم در اطراف منبع تزریق تراکمی [۸] ۱۶
- شکل ۶-۲ مدل مفهومی مکانیسم اجرای روش ترک هیدرولیکی در خاک [۱۴] ۱۸
- شکل ۷-۲ اجزای تشکیل‌دهنده انواع روش‌های تزریق با جت [۴] ۱۹
- شکل ۸-۲ ساختار ستون خاک-دوغاب تشکیل‌شده با استفاده از اجرای روش تزریق با جت [۱۶] ۲۱
- شکل ۹-۲ تزریق‌پذیری خاک در برابر دوغاب پایه‌سیمانی برای انواع خاک‌ها بر اساس دانه‌بندی آن‌ها [۱۷] ۲۲
- شکل ۱۰-۲ مدل تحلیلی ارائه‌شده جهت محاسبه فراسنج‌های مربوط به تزریق نفوذی در خاک [۲۵] ۲۴
- شکل ۱۱-۲ مدل تحلیلی ارائه‌شده جهت محاسبه فراسنج‌های مربوط به روش تزریق نفوذی در خاک [۲۴] ۲۶
- شکل ۱۲-۲ نمایش اجزای سامانه تزریق، جهت محاسبه فشار تزریق لازم [۹] ۳۰
- شکل ۱۳-۲ مدل‌سازی فرآیند ایجاد ترک هیدرولیکی در خاک ماسه‌ای با استفاده از دواير موهر [۳۲] ۳۲
- شکل ۱۴-۲ مکانیسم جریان جت در آب و هوا حین اجرای تزریق با جت [۳۳] ۳۳
- شکل ۱۵-۲ مراحل ساخت و اجرای ریزشمع [۵۲] ۳۶
- شکل ۱۶-۲ انواع کاربرد ریزشمع‌ها [۶۳] ۳۸
- شکل ۱۷-۲ مقطع عرضی ریزشمع اجراشده تحت‌تأثیر تزریق تحت فشار زیاد [۷۴ و ۷۵] ۴۰
- شکل ۱۸-۲ اجرای ریزشمع با استفاده از اجرای انواع مختلف روش‌های تزریق [۹۱] ۴۲
- شکل ۱۹-۲ بستر زیر نوک شمع و در اطراف جداره شمع [۱۰۵] ۴۴
- شکل ۲۰-۲ تغییر مکان، شیب، لنگر و برش اعمال‌شده در طول شمع و فشار جانبی خاک در عمق، تحت‌تأثیر بارگذاری جانبی استاتیکی و اعمال لنگر خمشی در راس شمع [۱۱۵] ۴۷
- شکل ۲۱-۲ استفاده از روش تیر بر بستر الاستیک به‌منظور مدل‌سازی رفتار پی عمیق تحت بارگذاری جانبی [۱۱۴] ۴۸
- شکل ۱-۳ نمای مقطع عرضی مرکب سامانه ریزشمع، با توجه به فرضیات در نظر گرفته‌شده ۵۴
- شکل ۲-۳ مدل‌سازی پاسخ یا عکس‌العمل بستر اطراف سامانه ریزشمع توسط فنرهای الاستیک وینکلر [۱۳۳] ۵۶
- شکل ۳-۳ سامانه ریزشمع تحت بارگذاری محوری ۵۸
- شکل ۴-۳ مدل‌سازی المانی از سامانه ریزشمع تک تحت‌تأثیر بارگذاری محوری در راس سامانه ۶۲
- شکل ۵-۳ مدل‌سازی المان قرارگرفته در عمق z از سامانه ریزشمع دریافت‌کننده i به‌همراه بستر اطراف آن تحت‌تأثیر بارگذاری محوری در راس سامانه ریزشمع مرجع j ، با فاصله مرکز تا مرکز s سامانه‌ها از یکدیگر ۷۲
- شکل ۱-۴ سامانه ریزشمع تحت خمش خالص ۱۰۳
- شکل ۲-۴ مقطع عرضی مرکب سامانه ریزشمع تحت خمش خالص ۱۰۸
- شکل ۳-۴ مدل‌سازی المانی از سامانه ریزشمع تک i در راستای عمق آن به طول dx به‌همراه بستر اطراف آن تحت‌تأثیر بارگذاری جانبی در راس سامانه ۱۰۹
- شکل ۴-۴ موقعیت قرارگیری دو سامانه ریزشمع نسبت به یکدیگر [۱۳۵] ۱۲۱
- شکل ۵-۴ مدل‌سازی المان سامانه ریزشمع دریافت‌کننده i به‌همراه بستر اطراف آن در عمق x با فاصله مرکز تا مرکز s و

زاویه موقعیت قرارگیری θ نسبت به سامانه ریزشمع مرجع z تحت تاثیر بارگذاری جانبی در راس سامانه مرجع ۱۲۲

فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس آن بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($M_{ms} = 2 \times 10^3$) R_{ms}/R_{mp} ۶۵
- نمودار ۲-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس آن بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($M_{ms} = 5 \times 10^2$) R_{ms}/R_{mp} ۶۵
- نمودار ۳-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس آن بر حسب تغییرات R_{ms} و نسبت L/r_{mp} ($M_{ms} = 2 \times 10^3$) ۶۶
- نمودار ۴-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس آن بر حسب تغییرات R_{ms} و نسبت L/r_{mp} ($M_{ms} = 5 \times 10^2$) ۶۶
- نمودار ۵-۳ نسبت بدون بعد بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($M_{ms} = 2 \times 10^3$) R_{ms}/R_{mp} ۶۸
- نمودار ۶-۳ نسبت بدون بعد بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($M_{ms} = 5 \times 10^2$) R_{ms}/R_{mp} ۶۸
- نمودار ۷-۳ نسبت بدون بعد بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 2$) ۶۹
- نمودار ۸-۳ نسبت بدون بعد بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 3$) ۶۹
- نمودار ۹-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 7/6$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$) ۷۵
- نمودار ۱۰-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 3$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$) ۷۵
- نمودار ۱۱-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 7/6$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$) ۷۶
- نمودار ۱۲-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 3$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$) ۷۶
- نمودار ۱۳-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 150$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$) ۷۷
- نمودار ۱۴-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 250$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$) ۷۷
- نمودار ۱۵-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 150$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$) ۷۸
- نمودار ۱۶-۳ تغییر مکان محوری در راس ریزشمع i ناشی از بار محوری P در راس ریزشمع j بر حسب تغییرات نسبت های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 250$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$) ۷۸

۹. $(L/r_{mp} = 250 \text{ و } M_{ms} = 5 \times 10^2) R_{ms}/R_{mp} \text{ و } s/d$ های نسبت

- نمودار ۳-۳۳ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۲ نسبت‌های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 7/6$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۳-۳۴ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۲ نسبت‌های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 3$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۳-۳۵ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۳ نسبت‌های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 7/6$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۳-۳۶ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۳ نسبت‌های L/r_{mp} و R_{ms}/R_{mp} ($s/d = 3$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۳-۳۷ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۴ نسبت‌های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 250$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۳-۳۸ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۴ نسبت‌های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 250$ و $M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۳-۳۹ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۵ نسبت‌های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 150$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۳-۴۰ نسبت بار محوری - جابجایی محوری در راس ریزشمع i با توجه به حضور ریزشمع j بر حسب تغییرات
 ۹۵ نسبت‌های s/d و R_{ms}/R_{mp} ($L/r_{mp} = 250$ و $M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۴-۱ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرگردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب نسبت
 ۱۱۴ R_{ms}/R_{mp} ($M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۴-۲ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرگردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب نسبت
 ۱۱۴ R_{ms}/R_{mp} ($M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۴-۳ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرگردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب
 ۱۱۵ M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 2$)
- نمودار ۴-۴ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرگردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب
 ۱۱۵ M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 3$)
- نمودار ۴-۵ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب نسبت
 ۱۱۶ R_{ms}/R_{mp} ($M_{ms} = 2 \times 10^3$)
- نمودار ۴-۶ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب نسبت
 ۱۱۶ R_{ms}/R_{mp} ($M_{ms} = 5 \times 10^2$)
- نمودار ۴-۷ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب
 ۱۱۷ M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 2$)
- نمودار ۴-۸ تغییر مکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن بر حسب
 ۱۱۷ M_{ms} ($R_{ms}/R_{mp} = 3$)
- نمودار ۴-۹ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع i بر حسب R_{ms} و M_{ms}
 ۱۱۹

- نمودار ۴-۲۶ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرگیردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 3 \text{ و } M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۰
- نمودار ۴-۲۷ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرگیردار i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 3 \text{ و } M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۰
- نمودار ۴-۲۸ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 1 \text{ و } M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۱
- نمودار ۴-۲۹ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 1 \text{ و } M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۱
- نمودار ۴-۳۰ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 2 \text{ و } M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۲
- نمودار ۴-۳۱ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 2 \text{ و } M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۲
- نمودار ۴-۳۲ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 3 \text{ و } M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۳
- نمودار ۴-۳۳ تغییرمکان جانبی در طول ریزشمع سرآزاد i ناشی از بار جانبی Q در راس آن و در راس ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت $(R_{ms}/R_{mp} = 3 \text{ و } M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۳
- نمودار ۴-۳۴ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرگیردار i ، ناشی از حضور ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۶
- نمودار ۴-۳۵ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرگیردار i ، ناشی از حضور ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۶
- نمودار ۴-۳۶ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرآزاد i ، ناشی از حضور ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۴۷
- نمودار ۴-۳۷ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرآزاد i ، ناشی از حضور ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۴۷
- نمودار ۴-۳۸ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرگیردار i ، با توجه به حضور ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۵۱
- نمودار ۴-۳۹ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرگیردار i ، با توجه به حضور ریزشمع سرگیردار j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۵۱
- نمودار ۴-۴۰ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرآزاد i ، با توجه به حضور ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 2 \times 10^3) s/d$ ۱۵۲
- نمودار ۴-۴۱ نسبت بدون بعد بار جانبی - جابجایی جانبی در راس ریزشمع سرآزاد i ، با توجه به حضور ریزشمع سرآزاد j بر حسب نسبت‌های R_{ms}/R_{mp} و $(M_{ms} = 5 \times 10^2) s/d$ ۱۵۲

فهرست جداول

۲۳	جدول ۱-۲ حدود تزریق پذیری خاک‌ها بر اساس ضرایب نسبت تزریق پذیری، با توجه به مراجع مختلف
۴۶	جدول ۲-۲ تخمین طول تاثیر ریزشمع بر اساس مراجع مختلف

فصل ۱- پیش گفتار

۱-۱ مقدمه

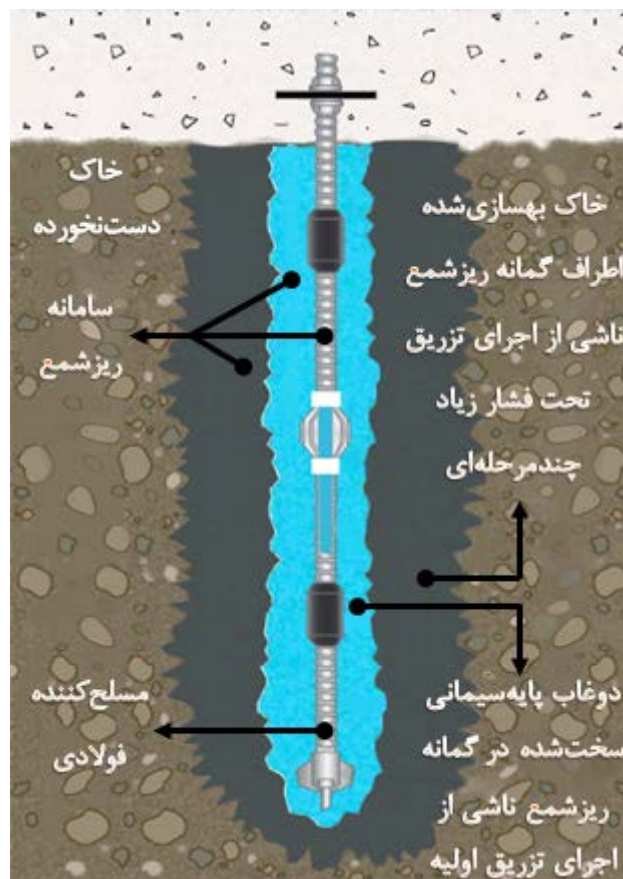
با توجه به افزایش تقاضا جهت استفاده از مکان‌های محدود، با دسترسی دشوار و متشکل از ساختار ضعیف و ناپایدار ژئوتکنیکی به منظور ساخت و ساز، به کارگیری یک رویکرد نوین فنی- مهندسی در زمینه پی‌سازی ناگزیر است. پیروی از روش‌های سنتی پیشین به منظور پی‌سازی در ساختارهای مسئله‌دار با توجه به شرایط و موقعیت نامناسب مکانی و دسترسی دشوار و همچنین، ابعاد و حجم عظیم تجهیزات و ماشین‌آلات حفاری لازم، جهت اجرای پی‌های عمیق رایج، اعم از شمع‌های کوبشی و درجاریز، با ملاحظات اجرایی و اقتصادی مطابق نیست. طی سال‌های اخیر، طراحی و اجرای ریزشمع‌ها، به عنوان تامین‌کننده همزمان نیاز خاک‌های مسئله‌دار به اصلاح و بهسازی و همچنین، به عنوان نگرشی نو ظهور در زمینه مهندسی پی، مورد تمرکز و توجه قرار گرفته است.

۱-۲ طرح مسئله

به منظور پی‌سازی در ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار، انتخاب روش بهسازی و اصلاح مناسب بستر، به همراه گزینش مطلوب‌ترین نوع پی، با توجه به ملاحظات فنی- مهندسی، اقتصادی و زیست‌محیطی، موثرترین اقدام مهندسی است. در محل‌هایی که از منظر دسترسی، در شرایط دشوار و محدودی قرار دارند، در صورتیکه به کارگیری و اجرای شمع‌های عمیق ناگزیر باشد، با توجه به شرایط مذکور، امکان نصب و استقرار تجهیزات و ماشین‌آلات سنگین حفاری جهت اجرای شمع‌های کوبشی و درجاریز وجود ندارد. بنابراین، به نظر می‌رسد که طراحی و اجرای پی عمیق نسبتاً سهل‌الاجرا نظیر ریزشمع‌ها که نیازمند پیاده‌سازی تجهیزات و ماشین‌آلات حفاری سبک است، به همراه اجرای روش موثر بهسازی و اصلاح خاک، به عنوان عاملی جبران‌کننده و تامین‌کننده برای ظرفیت باربری ریزشمع‌ها، با دارا بودن توان باربری کمتر نسبت به شمع‌های کوبشی و درجاریز عظیم، یکی از بهینه‌ترین و منطقی‌ترین تصمیمات پیشرو است.

ریزشمع‌ها، شمع‌های درجاریز با قطر نسبتاً کوچک هستند که توسط عملیات حفاری گمانه، تزریق دوغاب به داخل آن و مسلح‌نمودن گمانه توسط مسلح‌کننده فولادی با مقاومت بالا، اجرا می‌گردند. بر اساس ملزومات طراحی و فنی- مهندسی، خاک اطراف گمانه ریزشمع طی مراحل متوالی و تحت فشار زیاد، تحت تزریق دوغاب قرار می‌گیرد. در شکل ۱-۱، تصویر نمادین سامانه ریزشمع متشکل از المان سازه‌ای آن شامل دوغاب سخت‌شده پایه سیمانی به همراه مسلح‌کننده فولادی در داخل گمانه ریزشمع و همچنین، بستر یا ناحیه بهسازی‌شده در اطراف گمانه، تحت تاثیر اجرای عملیات تزریق با ویژگی‌های فوق‌الذکر، نشان داده شده است.

به کارگیری ریزشمع‌ها به دلیل اجرای آسان آن‌ها، در شرایطی که دسترسی به محل ساخت برای پیاده‌سازی و نصب تجهیزات و ماشین‌آلات حفاری سنگین، جهت اجرای پی‌های عمیق متداول امکان‌پذیر نبوده و همچنین، پی‌سازی و بهسازی برجای بستر به صورت همزمان موردنظر باشد، انتخابی مطلوب و موثر است.



شکل ۱-۱ تصویر نمادین سامانه ریزشمع

۳-۱ موضوع تحقیق

موضوع تحقیق پیشرو، تعیین ظرفیت باربری گروه ریزشمع در قالب مطالعه رفتار بار-جابجایی ریزشمع، تحت اثر بار جانبی و قائم، با در نظر گرفتن اندرکنش بین آن‌ها است. از آنجایی که مراحل اجرایی سامانه ریزشمع شامل اجرای المان سازه‌ای ریزشمع به عنوان پی عمیق و همچنین، اجرای تزریق به عنوان یکی از روش‌های موثر بهسازی است، تاثیر فراسنج‌های مربوط به ناحیه بهسازی شده در اطراف گمانه ریزشمع، بر ظرفیت باربری آن در چارچوب مطالعه رفتار بار-جابجایی، اصلی ترین موضوع مورد مطالعه پیشرو است.

۴-۱ اهمیت تحقیق

تا به امروز، روش‌ها و روابط ارائه شده در مقالات و آیین‌نامه‌ها، به منظور ارزیابی رفتار بار-جابجایی و محاسبه تغییر مکان ریزشمع‌ها تحت بارگذاری محوری و جانبی، همان روابط ارائه شده پیشین در رابطه با شمع‌ها هستند. همچنین، اثرات فرآیند افزایش شعاع ریزشمع، تحت تاثیر تزریق با فشار زیاد، حین اجرای

آن، تنها در خصوص افزایش مقاومت برشی و ظرفیت گسیختگی در سطح ناحیه چسبندگی اندرکنش خاک-دوغاب بررسی شده و این اثر در رابطه با بهبود رفتار بار- جابجایی ریزشمع‌ها، لحاظ نگردیده است. از آنجا که سامانه ریزشمع معمولاً در قالب گروه طراحی و اجرا شده و همچنین، فاصله مرکز تا مرکز ریزشمع‌های یک گروه در مقایسه با شمع‌های متداول درجاریز و کوبشی بسیار کمتر است، تاثیر اندرکنش ریزشمع-خاک- ریزشمع در گروه، بیش از پیش موردنیاز ارزیابی است. در این تحقیق، جهت مطالعه رفتار گروه ریزشمع، رفتار بار- جابجایی دو سامانه ریزشمع در مجاورت یکدیگر، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق، تاثیر به‌کارگیری و اجرای موثر عملیات تزریق حین اجرای ریزشمع را بر بهبود خصوصیات بار- جابجایی آن، نشان خواهد داد.

۱-۵ ضرورت تحقیق

با توجه به افزایش نیاز به پی‌سازی در فضاهای با دس‌ترسی محدود و همچنین، مواجهه با محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی جهت طراحی و ساخت شمع‌های بتنی و فولادی رایج، درنظرگرفتن اثر مطلوب تزریق بر رفتار ریزشمع‌ها و در نتیجه، کاهش شایان‌توجه هزینه‌های اجرایی از منظر عدم نیاز به اجرای پی‌های عمیق عظیم و بهبود چشمگیر عملکرد ریزشمع‌ها، ضرورت انجام تحقیق پیشرو، آشکار است.

۱-۶ هدف تحقیق

هدف انجام تحقیق پیشرو، مطالعه، تحلیل و بررسی رفتار بار- جابجایی سامانه ریزشمع تحت بارگذاری محوری و جانبی، با درنظرگرفتن اثر شکل‌گیری ناحیه یا بستر تزریق‌شده در اطراف گمانه ریزشمع و افزایش شعاع حقیقی آن تحت‌عنوان شعاع موثر، ناشی از تزریق چندمرحله‌ای و با فشار زیاد، حین اجرای آن است.

۱-۷ پرسش‌های تحقیق

مهم‌ترین پرسش‌هایی که در آغاز تحقیق وجود دارند، به‌صورت زیر مطرح می‌گردند:

- اساساً، شکل‌گیری بستر تزریق‌شده در اطراف گمانه ریزشمع که ناشی از اجرای عملیات تزریق، حین اجرای سامانه ریزشمع است، چه نقشی را در رفتار بار- جابجایی آن، تحت بارگذاری محوری و جانبی، ایفا می‌نماید؟
- تاثیر تغییرات خصوصیات مهندسی مربوط به این ناحیه، بر خصوصیات بار- جابجایی ریزشمع‌ها، تحت بارگذاری محوری و جانبی، چگونه است؟

۸-۱ روش تحقیق

در این تحقیق، در ابتدا، سامانه ریزشمع متشکل از المان سازه‌ای ریزشمع به همراه ناحیه تزریق شده اطراف گمانه آن، در نظر گرفته و مدل شده است. مدل سازی تحلیلی سامانه ریزشمع، با استفاده از مبانی و اصول نظریه الاستیسیته و همچنین، بر اساس فرضیات زیر صورت گرفته است:

- حین اجرای تزریق دوغاب از داخل گمانه ریزشمع، با کاهش یافتن فشار تزریق با افزایش فاصله شعاعی در داخل ساختار بستر، نحوه شکل گیری ناحیه تزریق شده اطراف گمانه ریزشمع به صورتی در نظر گرفته شده است که مقدار مدول الاستیسیته در سطح اندرکنش دیواره گمانه ریزشمع و بستر اطراف (مدول موثر)، بیشینه بوده و تا رسیدن به مدول بستر، به صورت خطی، کاهش می یابد.
- ماهیت ناحیه تزریق شده در اطراف گمانه ریزشمع، توسط دو فراسنج مدول موثر ریزشمع و همچنین، شعاع موثر ریزشمع یا شعاع سامانه ریزشمع، معرفی می گردد. شعاع موثر ریزشمع، شعاعی است که با توجه به سختی پی و بستر، ناحیه تزریق شده در اطراف گمانه، تا محدوده آن، همراه با المان سازه‌ای ریزشمع، تامین کننده صلبیت محوری موثر و خمشی ریزشمع، تحت بارگذاری محوری و جانبی است.

عوامل موثر بر میزان شعاع موثر ریزشمع عبارتند از:

- روش تزریق و فشار تزریق به کار گرفته شده
- خصوصیات مهندسی دوغاب (مانند نسبت آب به سیمان، لزجت، چسبندگی و دانه بندی مصالح جامد موجود در دوغاب) که بر میزان نفوذ دوغاب در خاک و خواص مکانیکی دوغاب (نظیر مدول) اثرگذار است
- تزریق پذیری ساختار مورد نظر
- خصوصیات مهندسی بستر (مانند دانه بندی، شکل دانه های خاک، پوکی، ضریب نفوذ پذیری و نحوه ارتباط حفرات بین دانه ای با یکدیگر) که بر تزریق پذیری آن موثر است
- سختی و صلبیت المان سازه‌ای ریزشمع
- سختی بستر

پس از مدل سازی سامانه ریزشمع با استفاده از روش تحلیلی مبتنی بر ترکیب روابط تحلیلی ارائه شده توسط پژوهش های پیشین در خصوص رفتار بار- جابجایی شمع تک و گروه شمع تحت بارگذاری محوری و جانبی با روابط حاکم بر نظریه الاستیسیته به منظور مدل سازی سامانه ریزشمع، رفتار سامانه ریزشمع تک و همچنین، رفتار سامانه ریزشمع با توجه به حضور سامانه ریزشمع مجاور، تحت انواع بارگذاری های مذکور، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است.

۹-۱ ساختار تحقیق

تحقیق پیشرو، در ۵ فصل به نگارش درآمده است. در فصل ۱، علاوه بر تعریف مسئله و موضوع مورد مطالعه، به بیان اهمیت، لزوم و ضرورت تحقیق، اشاره شده است.

در فصل ۲، به مطالعات صورت‌گرفته و انواع روش‌های ارائه‌شده توسط محققین مختلف در حوزه بهسازی و اصلاح بستر با استفاده از به‌کارگیری انواع روش‌های تزریق و همچنین، تحقیقات انجام‌شده در زمینه مطالعه رفتار بار-جابجایی شمع تک و گروه شمع، تحت بارگذاری محوری و جانبی، اشاره شده است.

در فصل ۳، در گام نخست، با استفاده از مدل‌سازی سامانه ریزشمع تک بر اساس فرضیات مشروح و همچنین، اعمال بارگذاری محوری، معرفی عکس‌العمل بستر توسط فنرهای وینکلر در طول سامانه ریزشمع و در نهایت، حل معادلات تعادل استاتیکی نیروی محوری و لنگر خمشی، تابع تغییرمکان سامانه ریزشمع تک تحت بارگذاری محوری، محاسبه شده و سپس، رفتار بار-جابجایی آن در قالب محاسبه مقدار کمی نشست محوری تحت بارگذاری معین و همچنین، تعیین نسبت بدون‌بعد بار محوری-جابجایی محوری، با توجه به تاثیر تغییرات مقادیر فراسنج‌های مربوط به ناحیه تزریق‌شده موثر ریزشمع بر رفتار بار-جابجایی سامانه آن، مورد بررسی قرار گرفته است. در گام دوم، تحلیل و بررسی انجام‌گرفته در ارتباط با رفتار بار-جابجایی محوری سامانه ریزشمع تک، جهت مطالعه رفتار بار-جابجایی محوری سامانه ریزشمع، با درنظرگرفتن حضور سامانه ریزشمع مجاور، در قالب موارد فوق‌الذکر و با توجه به تغییرات مقادیر فراسنج‌های مذکور، به‌کارگرفته‌شده است.

در فصل ۴، مشابه با موارد اشاره‌شده در ارتباط با فصل ۳، با توجه به اثرگذاری تغییرات مقادیر خصوصیات مهندسی مربوط به ساختار تزریق‌شده قرارگرفته در محدوده شعاع موثر ریزشمع، رفتار بار جانبی-جابجایی جانبی آن، مشابه با روش تحلیلی مذکور شامل اعمال بارگذاری جانبی استاتیکی بر سامانه ریزشمع، معرفی عکس‌العمل بستر در اطراف آن توسط فنرهای وینکلر و حل معادلات تعادل استاتیکی نیروی جانبی و لنگر خمشی، مورد مطالعه قرار گرفته است.

در انتها و در فصل ۵، به تشریح نتایج به‌دست‌آمده حاصل از تحلیل و بررسی‌های صورت‌گرفته پرداخته شده و در آخرین بخش، به موضوعات و پیشنهاداتی که می‌تواند در ادامه و راستای این تحقیق انجام گیرند، اشاره شده است.

فصل ۲- مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱ اصول و کلیات اصلاح و بهسازی ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار

در این بخش به اختصار، به تبیین مبانی اصلی اصلاح و بهسازی ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار شامل روش‌های مقابله، اهداف و عوامل موثر بر انتخاب روش بهسازی پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱ روش‌های مقابله با شرایط ژئوتکنیکی مسئله‌دار

بر اساس عثمان^۱، ۱۹۹۰، روش‌های معمول جهت مقابله با خاک‌های مسئله‌دار و شرایط ژئوتکنیکی نامطلوب، شامل موارد زیر می‌گردد [۱]:

- ممانعت از ساخت در محل موردنظر و انتقال آن به محلی دیگر
- طراحی روسازه با توجه به خصوصیات موجود ساختار موردنظر
- حذف مصالح نامناسب ساختار خاکی یا سنگی و یا جایگزین نمودن آن توسط مصالح مطلوب
- بهسازی یا به بیانی دیگر، اصلاح و پایدارسازی ساختار مسئله‌دار

۲-۱-۲ هدف از بهسازی ساختار ژئوتکنیکی

اصلاح خاک^۲ به معنای اعمال تغییرات جزئی در خصوصیات خاک بوده اما پایدارسازی^۳ به معنای اعمال تغییرات در خصوصیات خاک تا زمانی است که ویژگی‌های مقاومتی یا مربوط به نفوذپذیری (و یا هر دو) به میزان مطلوب برسند. در خاک‌های دانه‌ای (غیرچسبنده)، اصلاح همواره شامل کاهش حجم حفرات خاک یا جایگزین نمودن این فضا توسط مصالح مناسب و یا هر دوی آن‌ها است. در خاک‌های چسبنده، اصلاح شامل مخلوط نمودن این نوع از خاک‌ها همراه با پایدارکننده‌ها و اعمال پیش‌بارگذاری^۴، جهت حذف یا کاهش نشست‌های آتی است [۲].

به صورت کلی، اصلاح و پایدارسازی خاک موجب افزایش مقاومت برشی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان در صفحه گسیختگی، کاهش نفوذپذیری و احتمال رخداد روانگرایی خاک می‌گردد [۲ و ۳]. هدف از اصلاح و پایدارسازی خاک یا بهسازی^۵ آن، به صورت کلی، در قالب موارد زیر تعریف می‌گردد [۴]:

- کاهش تراکم‌پذیری و نشست خاک
- افزایش مقاومت جهت بهبود پایداری، ظرفیت باربری، سختی و دوام خاک

¹ Hausmann

² Soil modification

³ Stabilization

⁴ Preloading

⁵ Soil improvement

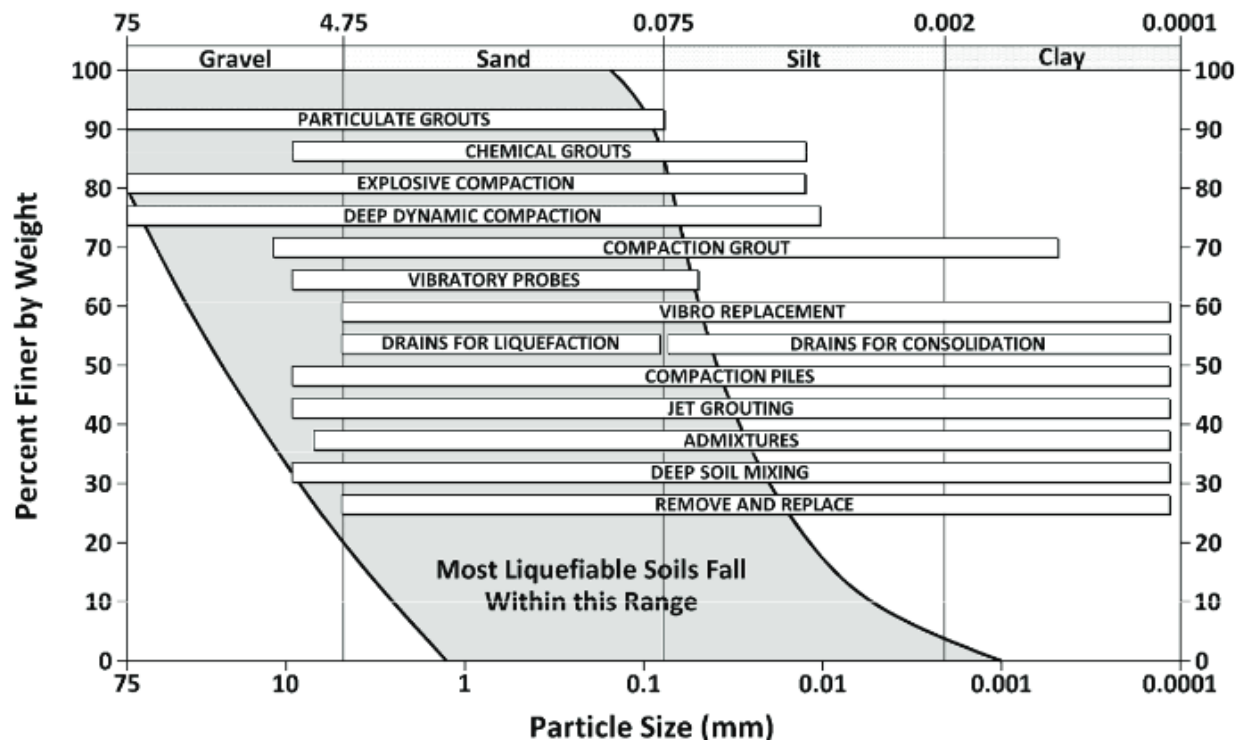
- کاهش نفوذپذیری جهت کنترل یا جلوگیری از جریان آب زیرزمینی
- افزایش نفوذپذیری به منظور ایجاد امکان زهکشی
- کاهش احتمال رخداد روانگرایی

۲-۱-۳ عوامل موثر بر انتخاب روش بهسازی

انتخاب روش بهسازی جهت مقابله با ساختار ژئوتکنیکی مسئله‌دار، تحت تاثیر عوامل زیر است [۲ و ۴-۶]:

- خصوصیات مهندسی خاک شامل:
 - نوع، توزیع دانه‌بندی و طبقه‌بندی
 - شکل دانه‌ها
 - چگالی ویژه، وزن مخصوص، تراکم نسبی، تراکم‌پذیری، ضریب پیش‌تحکیمی و نفوذپذیری
 - نسبت تخلخل، پوکی و چگونگی ارتباط حفرات خاک با یکدیگر
 - شاخص‌های مربوط به مقاومت برشی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی)
 - خصوصیات انتقال تنش و روابط تنش- کرنش
 - درجه اشباع و درصد رطوبت
 - حدود اتربرگ
 - ضریب تحکیم
 - موقعیت قرارگیری لایه‌های زهکشی
 - گستره قائم و جانبی نهشته‌ها با خصوصیات متفاوت
 - وضعیت آب تحت‌الارضی
 - وجود سنگدانه و قلوه‌سنگ در ساختار موردنظر
 - خصوصیات ساختار سنگی
- خصوصیات روسازه و پی
 - نوع، شکل و ابعاد روسازه و پی
 - شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری روسازه و پی
 - نوع، اندازه و توزیع بارگذاری‌ها
 - ملزومات عملکردی (مانند نشست کل و نسبی، تغییرشکل‌های جانبی و حداقل ضریب اطمینان)
- عمق و موقعیت ناحیه موردنظر بهسازی
- خصوصیات موردنظر و مطلوب خاک بر اساس معیارهای طراحی
- دسترسی به مصالح موردنیاز جهت اجرای روش بهسازی
- مهارت‌ها، تجربیات و ترجیحات موجود
- ملاحظات زیست‌محیطی
- ملاحظات اقتصادی

به صورت کلی، روش‌های بهسازی رایج، بر اساس نوع و توزیع دانه‌بندی خاک‌ها برای دامنه‌ای از انواع آن‌ها، در شکل ۱-۲، نشان داده شده است [۶ و ۷].



شکل ۱-۲ روش‌های بهسازی متداول برای انواع خاک‌ها [۶ و ۷]

با توجه به اینکه به کارگیری ریزشمع‌ها، علاوه بر استفاده از آن‌ها به عنوان یکی از انواع رایج پی‌های عمیق، به علت استفاده از یکی از روش‌های تزریق^۶ شامل تزریق نفوذی^۷، تزریق تراکمی^۸، تزریق شکافتی^۹ و تزریق با جت^{۱۰}، حین اجرای آن‌ها، به عنوان یکی از روش‌های نوین بهسازی به شمار می‌آید، ارزیابی انتخاب نوع روش تزریق، با توجه به ملاحظات و ملزومات اشاره شده در این فصل، در رابطه با انتخاب روش بهینه و موثر بهسازی، از اهمیت قابل توجهی، برخوردار است. بنابراین، با توجه به الزام و ضرورت تحلیل و بررسی انواع روش‌های تزریق به منظور مطالعه رفتار ریزشمع‌ها، ابتدا در بخش ۲-۲، به تشریح اصول، تعاریف و روابط

^۶ Grouting

^۷ Permeation/Penetration grouting

^۸ Compaction grouting

^۹ Hydrofracture grouting

^{۱۰} Jet grouting

نظری ارائه شده در رابطه با انواع روش‌های تزریق پرداخته شده و سپس، در بخش ۲-۳، تشریح و نتایج مطالعات انجام گرفته در خصوص ریزشمع‌ها، ارائه می‌گردد.

۲-۲ اصول تزریق

تزریق شامل وارد نمودن مصالح دوغاب^{۱۱} متشکل از مایعات، سوسپانسیون‌ها و یا مخلوط‌های نیمه جامد تحت فشار، به داخل ساختار متخلخل خاکی یا سنگی دارای حفرات، درزه‌ها و شکاف‌ها با ابعاد، حجم و ساختار معمولاً نامشخص، به منظور بهبود خصوصیات مهندسی این ساختارها است. معمول‌ترین دوغاب مورد استفاده در عملیات تزریق در مهندسی ژئوتکنیک، مخلوط آب و سیمان (دوغاب سیمان^{۱۲}) است. در صورتیکه سیال (آب یا هوا) موجود در حفرات و منافذ خاک یا سنگ توسط مواد جامد جایگزین گردند، جابجا شدن دانه‌های خاک نسبت به یکدیگر دشوارتر بوده و بنابراین، مقاومت برشی توده ساختار افزایش می‌یابد. مقاومت برشی افزایش یافته، عاملی بازدارنده در برابر نشست خاک در نواحی بارگذاری شده بوده و موجب افزایش ظرفیت باربری و پایداری شیروانی‌های خاکی تزریق شده می‌گردد [۲ و ۸-۱۰].

۲-۲-۱ هدف از تزریق دوغاب

تزریق دوغاب سبب بهبود ظرفیت باربری، خصوصیات مربوط به نشست نظیر نسبت تخلخل و مدول الاستیسیته و مقاومت برشی خاک شده و همچنین، حجم حفرات آن را کاهش می‌دهد. از سویی دیگر، در تمامی مواردی که بحران هیدرولیکی (نظیر تراوش غیرقابل کنترل) مسئله ساز است، تزریق دوغاب به صورت رایج، به عنوان یکی از چندین روش معمول، جهت بهسازی و مقاوم سازی به شمار می‌آید. بسته به نوع کاربرد مورد نظر، تزریق دوغاب می‌تواند به عنوان روش اصلی بهسازی یا به صورت ترکیبی با سایر روش‌های بهسازی دیگر، مورد استفاده قرار گیرد [۹].

به صورت کلی، اهداف تزریق دوغاب در قالب موارد زیر بیان می‌گردند [۴، ۶، ۸ و ۱۱]:

- کنترل یا کاهش نشست
- افزایش ظرفیت باربری خاک از طریق افزایش سختی، مقاومت و مدول آن و همچنین، تسلیح خاک از طریق ایجاد اعضای سازه‌ای در آن
- کاهش نفوذپذیری
- کنترل یا کاهش تراوش و جریان آب تحت الارضی
- پی‌ریزی و ایجاد تکیه‌گاه اضافی برای سازه‌های موجود

¹¹ Grout

¹² Cement grout