بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
(گرایش خاک و پی)

# تحلیل ظرفیت باربری خاک‌های تقویت شده با ژئوگرید در مقابل بارهای دینامیکی قائم

توسط:
**علی حسینعلی‌زاده**

استاد راهنما:
**دکتر سید مجدالدین میر محمد حسینی**

زمستان ۱۳۸۶

بسمه تعالی

شماره: .....

تاریخ: .....

معاونت پژوهشی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

# فرم اطلاعات پایان‌نامه
# کارشناسی ارشد و دکترا

**مشخصات دانشجو**

نام و نام خانوادگی: علی حسینعلی زاده ■ دانشجوی آزاد ☐ بورسیه ☐ معادل

شماره دانشجوئی: ۸٤۱۲٤۰۲٤ دانشکده: مهندسی عمران رشته تحصیلی مهندسی خاک و پی

---

**نام و نام خانوادگی استاد راهنما:** دکترمیر حسینی

---

**عنوان به فارسی:** تحلیل ظرفیت باربری خاکهای تقویت شده با ژئوگرید در مقابل بارهای دینامیکی قائم

**عنوان به انگلیسی:** **Analysis of Bearing Capacity of Geogrid-Reinforced Soil Subjected to Vertical Dynamic Loads**

**نوع پروژه:** ~~دکترا~~ کارشناسی ارشد ■ کاربردی ☐ بنیادی ☐ توسعه‌ای ☐ نظری

---

**تاریخ شروع:** ۸۵/۷/۱۵ **تاریخ خاتمه:** ۸٦/۱۱/۱۵ **تعداد واحد:** ٦

**سازمان أمین کننده اعتبار:**

---

**واژه‌های کلیدی به فارسی:** **ظرفیت باربری – ژئوگرید – ماسه – بار دینامیکی – خاک مسلح**

**واژه‌های کلیدی به انگلیسی:** **Bearing capacity – Geogrid – Sand – Dynamic load – Reinforced Soil**

---

**نظرها و پیشنهادات به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:**

**استاد راهنما:**

**دانشجو:**

**امضاء استاد راهنما:** **تاریخ:**

---

**نسخه ۱:** معاونت پژوهشی

**نسخه ۲:** کتابخانه به انضمام دو جلد پایان‌نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

## تشکر و قدردانی:

بی شک آنچه تحت عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد اینجانب از نظر می‌گذرد، حاصل رهنمودها و دلسوزی مربیانی است که در طول دوران تحصیل مرا یاری کرده‌اند که بدین وسیله از تمامی آن بزرگواران قدردانی می‌شود.

نخست صمیمانه‌ترین تقدیر و تشکر خود را به استاد عزیز و بزرگوارم **جناب آقای دکتر میر محمد حسینی** تقدیم می‌دارم که در انجام مراحل پروژه بنده را مورد حمایت بی‌دریغ خود قرار دادند و از هیچ کمکی مضایقه نفرمودند و با راهنمایی‌های ارزنده خود راهگشای مشکلات من در انجام پروژه بودند.

همچنین نهایت سپاسگزاری خود را از همکاری‌های مخلصانه و پشتگرمی‌های کلیه دوستانم و خصوصاً همکاری‌ها و همفکری‌های جناب آقای مهندس ابریشمی ابراز می‌نمایم که مرا در انجام هر چه بهتر پروژه مورد لطف و حمایت خود قرار دادند.

**تقدیم به:**

## پدر و مادر عزیزم،

آنانکه وجودم برایشان همه رنج، و وجودشان برایم همه مهر است،

توانشان رفت تا به توانی برسم و مویشان سپید گشت تا روی‌سپید بمانم،

آنانکه فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان، روشنی رویشان و غروب غم‌هایشان سرمایه‌های جاودانی زندگی من است،

آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان متجلی گشت،

در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با قلبی مملو از عشق، محبت و خضوع بر دستان پر مهر و محبتشان بوسه می‌زنم.

**دانشگاه صنعتی امیرکبیر**

**دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست**

چکیده پایان‌نامه ارائه شده توسط علی حسینعلی‌زاده

عنوان: تحلیل ظرفیت باربری خاک‌های تقویت شده با ژئوگرید در مقابل بارهای قائم دینامیکی

استاد راهنما: دکتر سید مجدالدین میر محمد حسینی

طی چند دهه اخیر استفاده از ژئوسینتتیک ها در مسلح کردن خاک، به دلیل مزایای فنی و اقتصادی آن، روند رو به گسترشی داشته است. افزوده شدن عناصر مسلح‌کننده که مقاومت کششی بالائی دارند، به خاک که مقاومت کششی ناچیزی دارد، منجر به مصالح مرکبی می‌گردد که رفتاری متفاوت با خاک غیرمسلح دارد. در نتیجه، بسیاری از روابط تجربی و تحلیلی و اصول و قوانین حاکم بر خاک غیرمسلح، در تحلیل و طراحی مسائل استاتیکی و دینامیکی خاک‌های مسلح قابل کاربرد نمی‌باشند.

با توجه به اهمیت و نقش کلیدی پی در سازه‌ها، بحث اندرکنش خاک و پی و مسأله فونداسیون ماشین‌آلات و لزوم تأمین ایمنی و کارآیی، در این پایان‌نامه تلاش شده تاثیر پارامترهای عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید، عرض ژئوگرید، فاصله لایه‌های ژئوگرید و تعداد لایه‌های ژئوگرید برافزایش ظرفیت باربری خاک مورد بررسی قرار گیرد و رفتار خاک‌های مسلح و غیر مسلح تحت بارگذاری سیکلی قائم بررسی شود. بدین منظور با انجام آزمایش‌ها وکالیبره کردن مدل عددی با استفاده از نتایج مدل‌سازیهای کوچک مقیاس آزمایشگاهی، به تحلیل خاک مسلح و بدست آوردن مقادیر بهینه برای پارامترهای فوق پرداخته شده است. جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. سپس مدل‌سازی عددی برای بارگذاری سیکلی توسعه داده شده و رفتار خاک‌های مسلح و غیر مسلح تحت بارگذاری سیکلی با دامنه‌های متفاوت بار استاتیکی و سیکلی مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر میزان بار استاتیکی اولیه و بار سیکلی اعمالی بر خاک‌های مسلح و غیر مسلح مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

نتایج تحلیل‌ها نشان دهنده این است که وجود ژئوگرید در خاک سبب افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح گردیده است. افزایش عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید تا مقدار بهینه آن، سبب افزایش ظرفیت باربری و از آن به بعد موجب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. و بعد از رسیدن به یک عمق ماکزیمم، افزایش عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید، تاثیری بر ظرفیت باربری نخواهد داشت. با افزایش عرض ژئوگرید ظرفیت باربری افزایش خواهد داشت. افزایش فاصله‌بندی لایه‌های ژئوگرید

نیز سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید نیز تاثیر مثبتی بر افزایش ظرفیت باربری خواهد داشت.

در بارگذاری سیکلی برای خاک مسلح و غیر مسلح ملاحظه گردید که هر چه مقدار سربار سیکلی افزایش یابد، نشست کلی خاک و شیب افزایش نشست نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار بار استاتیکی، نشست کلی خاک افزایش یافته و شیب منحنی نشست در مقابل تعداد سیکل بارگذاری نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقدار نشست الاستیک خاک در هر مقدار سربار استاتیکی و سیکلی، تقریباً مستقل از تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد و فقط با تغییر مقدار سربارهای استاتیکی و سیکلی تغییر می‌نماید. با افزایش سربار استاتیکی و سیکلی، نشست پلاستیک خاک افزایش می‌یابد. لیکن مقدار نشست پلاستیک در سیکل اول نسبت به سایر سیکل‌ها به وضوح بیشتر می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در بارگذاری سیکلی نشست الاستیک و پلاستیک خاک مسلح بیش از خاک غیر مسلح می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ظرفیت باربری، ژئوگرید، بار سیکلی، تحلیل عددی، ماسه، خاک مسلح، پی نواری

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

**فصل اول: پیشگفتار** ..... **۱**

۱-۱- مقدمه ..... ۱

۱-۲- اهداف و محدوده بررسی ..... ۳

۱-۳- فصل‌های مختلف پایان‌نامه ..... ٤

**فصل دوم: مفاهیم و کلیات** ..... **٦**

۲-۱- مقدمه ..... ٦

۲-۲- مفهوم ظرفیت باربری خاک ..... ۷

۲-۳- روش‌های محاسبه ظرفیت باربری خاک ..... ۸

۲-۳-۱- روش‌های تحلیلی (نظری) ..... ۹

۲-۳-۱-۱- روش جمع آثار قوا در تعیین ظرفیت باربری خاک ..... ۱۱

۲-۳-۱-۲- معادله ظرفیت باربری ترزاقی ..... ۱۱

۲-۳-۱-۳- معادله ظرفیت باربری میرهوف ..... ۱۳

۲-۳-۱-٤- معادله ظرفیت باربری هانسن ..... ۱۳

۲-۳-۱-۵- معادله ظرفیت باربری وسیک ..... ۱٤

۲-۳-۲- روش‌های عددی ..... ۱٤

۲-۳-۳- روش‌های تجربی ..... ۱۵

۲-٤- ظرفیت باربری پی سطحی روی خاک مسلح ..... ۱۵

۲-٤-۱- مقدمه ..... ۱۵

۲-٤-۲- پی‌ها روی خاک مسلح با ژئوگرید (پارامترهای عمومی) ..... ۱۷

۲-٤-۳- مکانیزم گسیختگی در خاک مسلح ..... ۲۲

**فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته** ..... **۲٤**

**عنوان** **صفحه**


۳-۱- مقدمه ..... ۲٤

۳-۲- ظرفیت باربری استاتیکی خاک‌های غیر مسلح ..... ۲۵

۳-۳- ظرفیت باربری دینامیکی خاک‌های غیر مسلح ..... ۲۵

۳-۳-۱- مطالعات تحلیلی ..... ۲۵

۳-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی ..... ۲٦

۳-٤- ظرفیت باربری استاتیکی خاک‌های مسلح ..... ۳۰

۳-٤-۱- تحقیقات آزمایشگاهی ..... ۳۰

۳-٤-۲- تحلیل‌های عددی ..... ۳٤

۳-٤-۳- خاک‌های مسلح به ژئوتکستایل ..... ۳۷

۳-٤-٤- ظرفیت باربری استاتیکی پی روی شیب ..... ۳۸

۳-۵- ظرفیت باربری دینامیکی خاک‌های مسلح ..... ۳۸

۳-۵-۱- تحلیل عددی ..... ۳۸

۳-۵-۲- تحقیقات و آزمایش‌های Das و همکاران ..... ۳۹

۳-۵-۳- اثر مسلح‌کننده بر ظرفیت باربری راه و راه آهن ..... ٤۲

۳-٦- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ..... ٤۳

**فصل چهارم: آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک مسلح به ژئوگرید ..... ٤۵**

٤-۱- مقدمه ..... ٤۵

٤-۲- دستگاه آزمایش ..... ٤٦

٤-۲-۱- تانک آزمایش ..... ٤٦

٤-۲-۲- سکو و ریل ..... ٤۸

٤-۲-۳- دستگاه بارش ..... ٤۸

٤-۲-۳-۱- صفحات مشبک ..... ٤۹

٤-۲-۳-۲- سیستم بالابر ..... ۵۰

٤-۲-۳-۳- تکیه‌گاه اصلی ..... ۵۰

**عنوان** **صفحه**


٤-٢-٤- سیستم بارگذاری ..... ٥٠
٤-٢-٥- سیستم قرائت و ثبت اطلاعات ..... ٥٢
٤-٢-٥-١- ابزار دقیق ..... ٥٣
٤-٢-٥-٢- دستگاه قرائت و ثبت اطلاعات ..... ٥٤
٤-٣- مدل فیزیکی ..... ٥٥
٤-٣-١- مدل زمین ..... ٥٥
٤-٣-١-١- مصالح خاکی استفاده شده ..... ٥٦
٤-٣-٢- مصالح مسلح‌کننده خاک ..... ٥٧
٤-٣-٣- مدل پی ..... ٥٧
٤-٣-٣-١- تماس بین مدل پی و خاک ..... ٦٠
٤-٣-٤- اثر مقیاس ..... ٦٠
٤-٤- آزمایش‌های آزمایشگاهی ..... ٦٢
٤-٤-١- آزمایش‌ها روی مصالح خاکی ..... ٦٢
٤-٤-٢- آزمایش بر روی ژئوگرید ..... ٦٥
٤-٤-٣- آزمایش‌های تعیین ظرفیت باربری خاک ..... ٦٦
٤-٤-٣-١- آزمایش تعیین ظرفیت باربری استاتیکی پی بر روی خاک‌های غیرمسلح ..... ٦٦
٤-٤-٣-٢- آزمایش تعیین ظرفیت باربری استاتیکی پی بر روی خاک مسلح‌شده به ژئوگرید ..... ٦٨
٤-٤-٣-٣- آزمایش تعیین ظرفیت باربری سیکلی پی بر روی خاک‌های غیرمسلح ..... ٧٢
٤-٤-٣-٤- آزمایش تعیین ظرفیت باربری سیکلی پی بر روی خاک مسلح‌شده به ژئوگرید ..... ٧٥

**فصل پنجم: مدل‌سازی عددی به‌وسیله نرم افزار FLAC ..... ٧٨**

٥-١- مقدمه ..... ٧٨
٥-٢- فرضیات تحلیل ..... ٧٩
٥-٣- مطالعه پارامتریک اجزاء سازنده مدل ..... ٧٩
٥-٣-١- اثر بزرگی بردار سرعت اعمالی بر پی ..... ٨٠
٥-٣-٢- اثر فاصله مرزها ..... ٨١

**عنوان** **صفحه**


۵-۳-۳- اثر اندازه المان‌ها ..... ۸۲

۵-۳-٤- اثر زاویه اتساع $\psi$ ..... ۸۳

۵-۳-۵- اثر رفتار الاستیک غیر خطی ..... ۸۵

۵-٤- ابعاد محیط مدل‌سازی شده ..... ۸۵

۵-۵- شرایط مرزی و نحوه المان‌بندی محیط خاک و پی ..... ۸٦

۵-٦- مدل خاک و مشخصات مکانیکی آن ..... ۸۷

۵-٦-۱- مدل خاک در حالت الاستیک ..... ۸۸

۵-٦-۲- مدل خاک در حالت پلاستیک ..... ۹۱

۵-٦-۳- مشخصات مکانیکی خاک ..... ۹۱

۵-۷- مدل ژئوگرید و مشخصات آن ..... ۹۲

۵-۸- مقایسه نتایج آزمایش‌های آزمایشگاه با نتایج تحلیل عددی ..... ۹٤

**فصل ششم: تحلیل عددی ظرفیت باربری خاک‌های مسلح به ژئوگرید** ..... **۹٦**

٦-۱- مقدمه ..... ۹٦

٦-۲- ظرفیت باربری پی بر روی خاک غیر مسلح ..... ۹۷

٦-۳- بررسی عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید در زیر پی ..... ۱۰۰

٦-٤- بررسی عرض ژئوگرید ..... ۱۰۵

٦-۵- بررسی اثر فاصله لایه‌های ژئوگرید ..... ۱۰۸

٦-٦- بررسی اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ..... ۱۱۲

٦-٦-۱- جمع‌بندی اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده ..... ۱۲۳

٦-۷- بررسی رفتار خاک غیر مسلح تحت بارگذاری سیکلی ..... ۱۲۳

٦-۸- بررسی رفتار خاک مسلح تحت بارگذاری سیکلی ..... ۱۳۷

٦-۹- مقایسه رفتار خاک‌های مسلح و غیر مسلح تحت بارگذاری سیکلی ..... ۱٤۵

**عنوان** **صفحه**

**فصل هفتم: خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهای پژوهشی** ..... **۱٤٦**

۷-۱- خلاصه و نتیجه‌گیری ..... ۱٤٦

۷-۲- ارائه پیشنهادهای پژوهشی ..... ۱٤۹

**منابع و مراجع** ..... **۱۵۱**

**پیوست: نرم افزار FLAC** ..... **۱۵۵**

پ-۱- مقدمه ..... ۱۵۵

پ-۲- اصول مقدماتی مدل‌سازی عددی ..... ۱۵٦

پ-۳- آشنایی کلی با نرم افزار FLAC ..... ۱٦۰

پ-۳-۱- مراحل حل مسائل با FLAC ..... ۱٦۳

پ-۳-۲- تفسیر نتایج در FLAC ..... ۱٦۸

پ-٤- توضیحی بر روش تفاضل محدود صریح ..... ۱٦۹

پ-٤-۱- تفاضل محدود ..... ۱۷۰

پ-٤-۲- طرح Time-Marchig صریح ..... ۱۷۰

پ-٤-۳- تحلیل لاگرانژی ..... ۱۷۲

پ-۵- مقایسه روش مورد استفاده در FLAC با روش‌های عددی دیگر ..... ۱۷٤

پ-٦- مدل‌های رفتاری ..... ۱۷۵

پ-٦-۱- مقدمه ..... ۱۷۵

پ-٦-۲- مدل‌های رفتاری مستقل از زمان ..... ۱۷۸

پ-٦-۳- مدل‌های رفتاری تابع زمان ..... ۱۸۰

پ-٦-٤- مدل‌های رفتاری موجود در FLAC ..... ۱۸۰

پ-٦-۵- مدل موهر-کلمب ..... ۱۸۱

پ-۷- مروری بر مشخصات تحلیل دینامیکی ..... ۱۸۷

پ-۷-۱- مقایسه روش خطی معادل و روش غیرخطی کامل ..... ۱۸۸

**عنوان** **صفحه**

پ-۷-۲- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی ..... ۱۹۱
پ-۷-۳- انتقال موج ..... ۱۹۳
پ-۷-٤- میرایی ..... ۱۹٤

# فهرست جدول‌ها

**عنوان** **صفحه**

جدول ٤-١- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک..... ٥٦
جدول ٤-٢- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید..... **٥٧**
جدول ٥-١- اندازه المان‌ها در نواحی المان‌بندی شده..... ٨٧
جدول ٥-٢- پارامترهای مدل هیپربولیک دانکن..... ٨٩
جدول ٥-٣- مشخصات مکانیکی خاک..... ٩٢
جدول ٥-٤- مشخصات مکانیکی ژئوگرید..... ٩٣
جدول ٥-٥- مشخصات محیط تزریق..... ٩٣
جدول پ-١- طبقه‌بندی کلی روش‌های عددی از دید مهندسین ژئوتکنیک..... ١٥٧
جدول پ-٢- مدل‌های ترکیبی موجود در نرم افزار FLAC..... ١٦٦
جدول پ-٣- مقایسه کلی روش صریح و ضمنی..... ١٧٣

# فهرست شکل‌ها و نمودارها

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲-۱- تقریب ظرفیت باربری برای پی مستقر بر خاک $\varphi = 0$ ..... ۷

شکل ۲-۲- ظرفیت باربری ساده‌شده برای خاک $C-\varphi$ ..... ۸

شکل ۲-۳- ظرفیت باربری ساده‌شده برای شالوده نواری مستقر بر خاک $C-\varphi$ ..... ۱۰

شکل ۲-٤- گوه‌های گسیختگی و نواحی سه‌گانه تشکیل دهنده آن ..... ۱۲

شکل ۲-۵- فرضیات معادله ظرفیت باربری میرهوف ..... ۱۳

شکل ۲-٦- انواع ژئوگرید((a)یک محوری،(b) دو محوری) ..... ۱٦

شکل ۲-۷- پارامترهای عمومی پی مستطیلی روی خاک مسلح به ژئوگرید ..... ۱۷

شکل ۲-۸- روند طبیعی منحنی تنش- نشست برای پی در دوحالت خاک مسلح و غیر مسلح ..... ۱۸

شکل ۲-۹- پارامترهای بدون بعد بحرانی ..... ۱۹

شکل ۲-۱۰- تغییرات $BCR_u$ در مقابل $\frac{d}{B}$ ..... ۲۰

شکل ۲-۱۱- روند تغییرات $BCR_u$ در مقابل $\frac{u}{B}$ ..... ۲۰

شکل ۲-۱۲- سطوح گسیختگی در خاک مسلح ..... ۲۱

شکل ۲-۱۳- سه حالت گسیختگی در خاک مسلح ..... ۲۲

شکل ۳-۱- تغییرات نشست الاستیک با تعداد سیکل‌ها و نسبت دامنه بار سیکلی به ظرفیت باربری نهایی خاک ($\sigma_d / q_u$) ..... ۲۷

شکل ۳-۲- تغییرات نشست حداکثر پی($S_{e(max)}$) با حداکثر شتاب و وزن فونداسیون ..... ۲۸

شکل ۳-۳- تغییرات نشست حداکثر پی ($S_{e(max)}$) در مقابل انرژی منتقل شده به خاک در هر سیکل ارتعاش ($E_{tr}$) ..... ۲۹

شکل ۳-٤- نشست حداکثر پی ($S_{e(max)}$) در مقابل شتاب حداکثر برای سه سطح انرژی عبوری ..... ۲۹

**عنوان** **صفحه**

شکل ۳-۵- نمودارهای بار- نشست نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی Sakti و Das روی خاک رس اشباع مسلح به ژئوتکستایل.....۳۷

شکل ۳-٦- بارگذاری سیکلی (شدت بار در مقابل زمان).....٤۰

شکل ۳-۷- نمودار $S_{ec}/B$ (نسبت نشست تحت بار سیکلی به عرض پی) در مقابل تعداد سیکل‌های بارگذاری.....٤۰

شکل ۳-۸- نیروی دینامیکی و نشست پی در مقابل زمان برای بار گذرا.....٤۱

شکل ٤-۱- مخزن خاک به همراه قاب اصلی و مخزن بارش ماسه.....٤۷

شکل ٤-۲- دستگاه بارش ماسه.....٤۹

شکل ٤-۳- سیستم بارگذاری.....۵۲

شکل ٤-٤- مبدل اندازه‌گیری تغییر مکان.....۵۳

شکل ٤-۵- مبدل اندازه‌گیری نیرو.....۵۳

شکل ٤-٦- دستگاه قرائت و ثبت اطلاعات.....۵٤

شکل ٤-۷- منحنی دانه‌بندی مصالح.....۵٦

شکل ٤-۸- مدل پی آلومینیومی و مبدل اندازه‌گیری نیروی متصل به آن.....۵۸

شکل ٤-۹- مدل آزمایشگاهی: الف) پلان پی نواری واقع بر خاک مسلح به لایه‌های ژئوگرید.....۵۹

ب) مقطع تانک خاک شامل خاک مسلح به ارتفاع H.....۵۹

شکل ٤-۱۰- ابعاد ژئوگرید.....٦۱

شکل ٤-۱۱- منحنی $\sigma_d - \varepsilon_a$ برای فشار همه جانبه ۲۵ کیلوپاسکال.....٦٤

شکل ٤-۱۲- منحنی $\sigma_d - \varepsilon_a$ برای فشار همه جانبه ۲۵۰ کیلوپاسکال.....٦٤

شکل ٤-۱۳- منحنی تنش-کرنش برای ژئوگرید.....٦۵

شکل ٤-۱٤- منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان برای مدل پی روی خاک غیر مسلح.....٦۷

شکل ٤-۱۵- منحنی‌های نیرو و تغییر مکان در مقابل زمان (خاک غیر مسلح).....٦۷

**عنوان** **صفحه**

شکل ٤-١٦- پی چوبی در لحظه گسیختگی و گوه‌های خاک (خاک غیر مسلح).....٦٨

شکل ٤-١٧- منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان برای مدل پی روی خاک مسلح.....٦٩

شکل ٤-١٨- منحنی‌های نیرو و تغییر مکان در مقابل زمان بر حسب ثانیه (خاک مسلح).....٧٠

شکل ٤-١٩- پی در لحظه گسیختگی و گوه‌های خاک مسلح به ژئوگرید.....٧١

شکل ٤-٢٠- ژئوگرید در لحظه گسیختگی و گوه‌های خاک در زیر ژئوگرید.....٧١

شکل ٤-٢١- منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان برای مدل پی در بارگذاری سیکلی(خاک غیر مسلح).....٧٣

شکل ٤-٢٢- منحنی‌های نیرو و تغییر مکان در مقابل زمان (ثانیه)در بارگذاری سیکلی(خاک غیر مسلح)...٧٣

شکل ٤-٢٣- پی آلومینیومی بر روی خاک در حین بارگذاری سیکلی.....٧٤

شکل ٤-٢٤- منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان برای مدل پی بر روی خاک مسلح در بارگذاری سیکلی برای ١٨٠٠٠ سیکل بارگذاری.....٧٦

شکل ٤-٢٥- منحنی‌های نیرو و تغییر مکان در مقابل زمان (ثانیه) برای خاک مسلح (بارگذاری سیکلی)...٧٦

شکل ٥-١- اثر بزرگی بردار سرعت اعمالی بر پی.....٨٠

شکل ٥-٢- اثر عرض مدل خاک بر روی ظرفیت باربری نهایی.....٨٢

شکل ٥-٣- میدان بردار تغییر مکان در شرایط مختلف قانون جریان.....٨٣

شکل ٥-٤- تغییرات مکانیزم گسیختگی با زاویه اتساع.....٨٤

شکل ٥-٥- شرایط مرزی و نواحی المان‌بندی شده محیط خاک و پی برای بارگذاری استاتیکی.....٨٦

شکل ٥-٦- رفتار ماسه خشک در حالت متراکم و سست.....٨٨

شکل ٥-٧- مسیرهای بارگذاری Hysteretic غیر خطی.....٨٩

شکل ٥-٨- تغییرات تنش برشی خاک در مقابل کرنش پلاستیک.....٩١

شکل ٥-٩- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاه در حالت بارگذاری استاتیکی برای خاک مسلح و غیر مسلح.....٩٤

شکل ٦-١- تغییرات تنش زیر پی ( $\frac{N}{m^2}$ ) در مقابل نشست پی بر حسب متر.....٩٧

**عنوان** **صفحه**


شکل ٦-٢- نواحی پلاستیک شده خاک.....٩٨

شکل ٦-٣- بردارهای جابجایی ذرات خاک بر حسب متر.....٩٩

شکل ٦-٤- تغییرات تنش عمودی خاک در عمق ( $\frac{N}{m^2}$ ).....٩٩

شکل ٦-٥- تغییرات نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی ( $\frac{u}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$.....١٠٠

شکل ٦-٦- تغییرات نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی ( $\frac{u}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای نسبت عرض‌های ژئوگرید به عرض پی مختلف.....١٠١

شکل ٦-٧- نیروی محوری المان‌های ژئوگرید ( $\frac{N}{m}$ ).....١٠٢

شکل ٦-٨- تغییر مکان افقی المان‌های ژئوگرید بر حسب متر.....١٠٣

شکل ٦-٩- بردار تغییر مکان گره‌های خاک بر حسب متر.....١٠٤

شکل ٦-١٠- تغییرات نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی( $\frac{b}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.25$.....١٠٥

شکل ٦-١١- تغییرات نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی( $\frac{b}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای نسبت عمق‌های قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی مختلف.....١٠٦

شکل ٦-١٢- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ( $\frac{h}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=10$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.75$ و دو لایه ژئوگرید ( $N=2$ ).....١٠٨

شکل ٦-١٣- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ( $\frac{h}{B}$ ) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=10$ و نسبت عمق‌های قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی متفاوت و دو لایه ژئوگرید ( $N=2$ ).....١٠٩

**عنوان** **صفحه**

شکل ٦-١٤- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.25$ و دو لایه ژئوگرید ($N=2$).....١١٠

شکل ٦-١٥- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق‌های قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی متفاوت و دو لایه ژئوگرید ($N=2$).....١١٢

شکل ٦-١٦- تغییرات تعداد لایه‌های ژئوگرید (N) و نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.25$.....١١٤

شکل ٦-١٧- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) و نسبت عمق مسلح‌سازی به عرض پی ($\frac{d}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.25$.....١١٦

شکل ٦-١٨- تغییرات تعداد لایه‌های ژئوگرید (N) و نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.5$.....١١٨

شکل ٦-١٩- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) و نسبت عمق مسلح‌سازی به عرض پی ($\frac{d}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.5$.....١١٩

**عنوان** **صفحه**

شکل ٦-٢٠- تغییرات تعداد لایه‌های ژئوگرید (N) و نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.75$ ..... ١٢١

شکل ٦-٢١- تغییرات نسبت فاصله لایه‌های ژئوگرید به عرض پی ($\frac{h}{B}$) و نسبت عمق مسلح‌سازی به عرض پی ($\frac{d}{B}$) در مقابل نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای حالت نسبت عرض ژئوگرید به عرض پی $\frac{b}{B}=15$ و نسبت عمق قرارگیری اولین لایه ژئوگرید به عرض پی $\frac{u}{B}=0.75$ ..... ١٢٢

شکل ٦-٢٢- تغییرات تنش زیر پی ($\frac{N}{m^2}$) در مقابل نشست خاک (m) برای ١٠٠ سیکل بارگذاری..... ١٢٥

شکل ٦-٢٣- منحنی سربار سیکلی $q_{dc}$ اعمال شده بر پی ($\frac{N}{m^2}$) در مقابل زمان بارگذاری بر حسب ثانیه برای ٥ سیکل بارگذاری..... ١٢٦

شکل ٦-٢٤- تغییرات نشست خاک زیر پی برای ١٠٠ سیکل بارگذاری در مقابل زمان بارگذاری(Sec).. ١٢٧

شکل ٦-٢٥- بردار تغییر مکان گره‌های خاک (m) پس از بارگذاری سیکلی برای خاک غیر مسلح..... ١٢٨

شکل ٦-٢٦- نشست کل خاک در نقطه اوج سربار سیکلی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای سربارهای سیکلی متفاوت و نیز برای بارهای استاتیکی مختلف ( خاک غیر مسلح)..... ١٣٠

شکل ٦-٢٧- نشست الاستیک در هر سیکل بارگذاری در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای سربارهای سیکلی متفاوت و نیز برای بارهای استاتیکی مختلف (خاک غیر مسلح)..... ١٣٢

شکل ٦-٢٨- نشست پلاستیک خاک در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای سربارهای سیکلی متفاوت و نیز برای بارهای استاتیکی مختلف (خاک غیر مسلح)..... ١٣٤

شکل ٦-٢٩- نشست پلاستیک خاک پس از ١٠٠ سیکل بارگذاری در مقابل سربارهای سیکلی برای بارهای استاتیکی مختلف (خاک غیر مسلح)..... ١٣٥

شکل ٦-٣٠- نشست پلاستیک خاک در سیکل اول بارگذاری در مقابل سربارهای سیکلی برای بارهای استاتیکی مختلف (خاک غیر مسلح)..... ١٣٦