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

تحلیل پایداری سدهای خاکی مسلح تحت اثر بارهای زلزله با استفاده از روش اجزای محدود

استاد رهنما :

جناب آقای دکتر سعید خرقانی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر ابراهیم صفا

دانشجو:

ناصر صادقی رحیم‌آبادی

شماره دانشجویی: ۸۸۰۰۰۲۷۵۵۰۰

تابستان ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر فداکار

و

مادر مهربانم

خدایا به هر کس دوست می‌داری بیاموز که عشق از زندگی کردن بهتر است و به هر کس دوست‌تر می‌داری بچشان دوست‌داشتن از عشق برتر!

در اینجا بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس خود را از زحمات و حمایت‌های بی‌دریغ معلم فرزانه و استاد گرانمایه جناب آقای دکتر سعید خرقانی و جناب آقای دکتر ابراهیم صفا اعلام نمایم.

صمیمانه‌ترین سپاس خود را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم که در سخت‌ترین مراحل زندگی راه را بر من هموار نمودند.

همچنین لازم است از زحمات و راهنمایی‌های بسیار ارزشمند حامی لحظه لحظه زندگیم برادر خوبم نیما صادقی که همواره در طول مدت زندگی همدل و همراه من بوده کمال تشکر را داشته باشم.

و صمیمانه تشکر می‌کنم از خواهر عزیزم خانم مهندس شیما صادقی و همچنین خانم مهندس نگار محبی که در تنظیم و ویرایش پایان‌نامه‌ی حاضر، به یاری من شتافتند.

در پایان بار دیگر خداوند بزرگ را شاکرم که توانستم به وعده خود جامه عمل بپوشانم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مختصری درباره خاک مسلح ۲

۱-۳- اهداف پژوهش ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مروری بر متون فنی ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- مسلح‌کننده‌ها ۷

۲-۲-۱- ژئوسنتتیک‌ها ۷

۲-۲-۲- کاربردهای معمول مسلح‌کننده در سازه‌های خاکی ۱۰

۲-۲-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی مسلح‌کننده‌ها ۱۱

۲-۲-۴- نحوه قرارگیری و امتداد مسلح‌کننده‌ها ۱۳

۲-۲-۵- بکارگیری نیروهای محرک و مقاوم در مسلح‌کننده‌ها ۱۴

۲-۲-۶- اثر زهکشی ژئوتکستایل‌ها ۱۵

۲-۳- پایداری سدهای خاکی ۱۶

۲-۳-۱- هندسه سد ۱۶

۲-۳-۲- سطح لغزش ۱۹

۲-۳-۳- شرایط حاکم بر تحلیل پایداری شیب ۲۰

۲-۳-۴- مراحل بحرانی پایداری سدهای خاکی ۲۲

۲-۴- تحلیل سدهای خاکی مسلح ۲۴

۲-۴-۱- مقاومت برون‌کشی مسلح‌کننده ۲۵

۲-۴-۲- عملکرد مسلح‌کننده بر مقاومت برشی خاک ۲۶

۲-۴-۳- تحلیل تنش‌های داخلی در خاک مسلح ۲۷

۲-۴-۴- بررسی خاک مسلح به وسیلهٔ آزمایش‌های سه محوری ۳۰

۲-۴-۵- بررسی سازوکار مسلح‌سازی غشائی ۳۱
۲-۴-۶- اثر افزایش فشارجانبی بر افزایش مقاومت خاک مسلح ۳۱
۲-۴-۷- اثر افزایش چسبندگی درخاک بر افزایش مقاومت خاک مسلح ۳۲
۲-۴-۸- نیروی کششی مسلح‌کننده‌ها ۳۴
۲-۴-۹- اندرکنش خاک و مسلح‌کننده ۳۴
۲-۴-۱۰- گسیختگی خاک مسلح ۳۸
۲-۴-۱۱- طول و راستای قارگیری مسلح کننده ۳۹
۲-۵- تاریخچه مطالعات آزمایشگاهی و انگاره‌ای ۴۰
۲-۶- برآورد تنش و تغییر شکل در بدنه سدهای خاکی ۴۳
۲-۶-۱- مقدمه ۴۳
۲-۶-۲- مراحل اصلی اجزاءمحدود ۴۵
۲-۶-۳- استفاده از روش اجزاء محدود در تحلیل سدهای خاکی ۴۵
۲-۶-۴- تحلیل دو بعدی و سه بعدی سدهای خاکی ۴۷
۲-۶-۵- محاسبه بر اساس تنش کل و تنش موثر ۴۸
۲-۶-۶- تحلیل سد در مرحله ساختمان ۴۸

فصل سوم: مبانی و مشخصات نرم‌افزار PLAXIS ۵۱

۳-۱- مقدمه ۵۲
۳-۲- دلایل انتخاب نرم‌افزار Plaxis برای انجام پژوهش ۵۲
۳-۳- مراحل انجام یک پروژه توسط PLAXIS ۵۳
۳-۳-۱- برنامه ورودی ۵۴
۳-۳-۱-۱- خصوصیات مصالح ۵۴
۳-۳-۱-۲- شرایط مرزی و بارها ۵۵
۳-۳-۱-۳- ایجاد شبکه اجزاء محدود (مش بندی) ۵۵
۳-۳-۱-۴- تعیین شرایط اولیه ۵۵
۳-۳-۲- برنامه محاسبات ۵۸
۳-۳-۲-۱- تحلیل خمیری ۵۹
۳-۳-۲-۲- تحلیل خمیری با تغییر شکل‌های بزرگ (تحلیل شبکه اجزاء محدود اصلاح شده) ۵۹

۳-۳-۲-۳- تحلیل تحکیمی ۵۹
۳-۳-۲-۴- تحلیل دینامیکی ۶۰
۳-۳-۳- برنامه خروجی ۶۰
۳-۳-۴- برنامه منحنی‌ها ۶۱
۳-۴- اجزاء موجود در نرم‌افزار PLAXIS ۶۱
۳-۴-۱- اجزاء خاک ۶۱
۳-۴-۲- اجزاء تیری ۶۲
۳-۴-۳- اجزاء ژئوتکستایل ۶۳
۳-۴-۴- اجزاء اندرکنش خاک و سازه ۶۳
۳-۴-۴-۱- مقاومت جزء فصل مشترک ۶۵
۳-۴-۴-۲- مقادیر لغزش و جداشدگی جزء فصل مشترک ۶۵
۳-۴-۴-۳- ضخامت واقعی جزء فصل مشترک ۶۶
۳-۴-۴-۴- نفوذپذیری جزء فصل مشترک ۶۷
۳-۴-۵- اجزاء مهاری ۶۸
۳-۴-۶- اجزاء تونل ۶۸
۳-۵- الگوهای تحلیلی ۶۸
۳-۵-۱- الگوی کرنش صفحه‌ای ۶۸
۳-۵-۲- الگو با تقارن محوری ۶۸
۳-۵-۳- الگوی سه بعدی با تقارن محوری ۶۸
۳-۶- الگوسازی رفتار خاک ۶۹
۳-۶-۱- الگوی الاستیک خطی ۶۹
۳-۶-۲- الگوی مور- کولن ۶۹
۳-۶-۳- الگوی خاک سخت‌شونده ۶۹
۳-۶-۴- الگوی خاک نرم ۷۰
۳-۶-۵- الگوی خاک نرم توأم با خزش ۷۰
۳-۷- نوع رفتار ماده ۷۰
۳-۷-۱- رفتار زهکشی شده ۷۰
۳-۷-۲- رفتار زهکشی نشده ۷۰

۳-۷-۳- رفتار غیر متخلخل ۷۱
۳-۸- فرمول‌بندی و انتگرال‌گیری عددی اجزاء ۷۱
۳-۸-۱- فرمول‌بندی اجزاء ۷۱
۳-۸-۱-۱- توابع شکل اجزاء خطی ۷۲
۳-۸-۱-۲- توابع شکل اجزاء مثلثی ۷۳
۳-۸-۲- انتگرال‌گیری عددی اجزاء ۷۵
۳-۸-۲-۱- انتگرال‌گیری عددی اجزاءمثلثی ۷۶
۳-۹- گام‌های بارگذاری ۷۷
۳-۱۰- بارگذاری: ۷۷
فصل چهارم : الگوسازی سد خاکی مسلح برای تجزیه و تحلیل به روش اجزاء محدود ۷۹
۴-۱- الگوسازی خاکریز سد خاکی ۸۰
۴-۲- الگوسازی پی ۸۰
۴-۳- الگوهای مصالح ۸۱
۴-۴- الگوسازی رفتار خاک ۸۳
۴-۴-۱- الگوی مور ـ کولن ۸۳
۴-۴-۲- الگوی خاک نرم ۸۴
۴-۵- پارامترهای متغیر الگوی شبیه‌سازی شده ۸۴
۴-۵-۱- مشخصات مکانیکی مصالح بدنه سد، مصالح پی و هسته ۸۵
۴-۵-۲- ارتفاع سد ۸۵
۴-۵-۳- زهکشی در بند سد ۸۷
۴-۵-۴- تعداد ژئوتکستایل ۸۸
۴-۵-۵- سختی ژئوتکستایل ۸۹
۴-۵-۶- مشخصات جزء فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل ۹۰
۴-۵-۴- سختی ژئوتکستایل ۸۵
۴-۵-۶- مشخصات جزء فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل ۸۸
۴-۶- مشخصات هندسی مسئله ۸۸
۴-۶-۱- مشخصات هندسی خاکریز سد ۸۸

۴-۶-۲- مشخصات هندسی پی سد ۸۸
۴-۶-۳- نحوه قرارگیری ژئوتکستایل‌ها ۹۰
۴-۶-۴- طول گیرداری پایدارکننده‌ی خاکریز ۹۱
۴-۶-۴-۱- جزئیات ساخت ۹۱
۴-۶-۴-۲- روش طراحی تعادل حدی در طول گیرداری ۹۲
۴-۶-۴-۳- طول ژئوتکستایل‌ها ۹۵
۴-۷- شرایط مرزی ۹۶
۴-۸- شبیه سازی اجزاء محدود ۹۷
۴-۸-۱- شبکه اجزاء محدود خاکریز و پی ۹۷
۴-۸-۲- شبکه اجزاء محدود ژئوتکستایل ۹۷
۴-۸-۳- شبکه اجزاء محدود فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل ۹۷
۴-۹- الگوسازی اجزاء محدود ساخت مرحله‌ای و آبگیری ۹۷
۴-۹-۱- تنش اولیه در محل ۹۸
۴-۹-۲- ساخت مرحله‌ای ۹۸
۴-۹-۲-۱- ساخت مرحله‌ای خاکریز ۹۸
۴-۹-۲-۲- نخستین آبگیری ۹۸
۴-۱۰- نوع رفتار در خاکریز و پی سد ۹۹
۴-۱۱- بررسی تئوریک رفتار دینامیکی ۱۰۰
۴-۱۱-۱- معادله اساسی رفتار دینامیکی ۱۰۰
۴-۱۱-۲- انتگرال‌گیری زمان ۱۰۱
۴-۱۱-۲-۱- سرعت‌های موج ۱۰۲
۴-۱۱-۲-۲- مرحله زمانی بحرانی ۱۰۳
۴-۱۱-۳ مرزهای مدل ۱۰۳
۴-۱۱-۳-۱- مرزهای جاذب ۱۰۴
۴-۱۱-۴- تنش‌های اولیه و افزایش‌های تنش ۱۰۴
۵-۱۲- نحوه‌ی انجام تحلیل‌ها ۱۰۴
فصل پنجم : نتایج تحلیل ۱۱۰

۵-۱- مقدمه: ۱۰۷
۵-۲- تحلیل جابه جایی قائم بخش میانی خاکریز در دو ناحیه پائین دست (نقطه B) و بالا دست (نقطه D) در حالت پایان ساخت ۱۰۷
۵-۳- تحلیل جابه‌جایی افقی بخش پی در دو ناحیه پنجه (نقطه C) و پاشنه سد (نقطه E) در حالت پایان ساخت ۱۱۰
۵-۴- شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت ۱۱۱
۵-۵- تحلیل جابه‌جایی قائم تاج سد (نقطه A) در حالت نخستین آبگیری: ۱۱۲
۵-۶- تحلیل جابه جایی قائم بخش میانی خاکریز در دو ناحیه پائین دست (نقطه B) و بالا دست (نقطه D) سد در حالت نخستین آبگیری: ۱۱۴
۵-۷- تحلیل جابه جایی افقی بخش پی در دو ناحیه پنجه (نقطه C) و پاشنه (نقطه E) سد در حالت نخستین آبگیری ۱۱۷
۵-۸- شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری ۱۱۹
۵-۹- تحلیل جابه‌جایی افقی وقائم، شتاب افقی و شتاب قائم در حالت دینامیکی: ۱۱۹
۵-۱۰- مقایسه جابه‌جایی‌های افقی درارتفاعات مختلف سد: ۱۲۲
۵-۱۱- تحلیل نتایج حاصل از تسلیح سد و تأثیر مسلح‌کننده‌ها به تغییر شکل‌های افقی و قائم نقاط مختلف سد ۱۲۲
۵-۱۲- تحلیل نمودار تأثیر استفاده از مسلح‌کننده‌ها بر شتاب ایجاد شده درتاج سد: ۱۲۳
۵-۱۳- شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری: ۱۲۴
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۵۰
۶-۱- مقدمه ۱۵۱
۶-۲- نتیجه‌گیری ۱۵۲
۶-۳- پیشنهادات ۱۵۳
مراجع ۱۵۴

فـهـرسـت اشـکـال

صفحه

فصل دوم

شکل۲-۱ نمونه‌های مختلف بکارگیری ژئوتکستایل‌ها برای پایداری شیب خاک مسلح بر روی فونداسیون نرم ۱۳
شکل ۲-۲ بررسی اثر راستای نیروی مسلح‌کننده ۱۴
شکل ۲-۳ بررسی سیستم پایدار ۲۵
شکل ۲-۴ نمایش عملکرد مسلح‌کننده در برش مستقیم، الف: مؤلفه‌های نیروی مسلح کننده؛ ب: کرنش‌های کششی و فشاری درخاک ۲۷
شکل ۲-۵ تغییر شکل دو جزء الف) سطح مشترک بدون اصطکاک ب) پیوستگی کامل بین دو جزء ۲۹
شکل ۲-۶- تنش‌های جانبی داخلی ۲۹
شکل ۲-۷- افزایش مقاومت خاک به واسطه فشار جانبی اضافی ۳۱
شکل ۲-۸ نیروهای وارد بر یک جزء مسلح‌کننده درخاک ۳۳
شکل ۲-۹ کثیرالاضلاع نیروها ۳۴
شکل ۲-۱۰ الف: امتداد بهینه نظیر کرنش کششی، حداکثر، ب: امتداد بهینه نظیر حداکثر پیوستگی ۳۵
شکل (۲-۱۱) الف: نمودار نیروی برون کشی-جابه‌جایی، ب: آزمایش برون‌کشی ۳۷
شکل (۲-۱۲) الف: نمودار تنش برشی در مقابل تنش قائم ب: آزمایش برش مستقیم ۳۸
شکل (۲-۱۳) توجیه افزایش مقاومت تودهٔ خاک مسلح با استفاده از دوایر مور ۳۹
شکل ۲-۱۴ تنش‌ها در نزدیکی نمای خاکریز ۴۱
شکل ۲-۱۵ نمودارهای طراحی خاکریزهای مسلح ۴۲
شکل ۲-۱۶ پلان و مقطع خاکریز آزمایشی دوون ۴۳
شکل ۲-۱۷ شمای تحلیل استاتیکی مورد لزوم یک سد خاکی ۴۵
شکل ۲-۱۸ الگوسازی اجزاء محدود ساخت خاکریز ۴۹
شکل ۲-۱۹ گزینه‌های چندلایه‌ای یا افزایش نیروهای وزنی در چند مرحله برای حالت یک بعد ۵۱

فصل سوم

شکل ۳-۱ پنجره اصلی برنامه ورودی در نرم‌افزار PLAXIS ۵۵
شکل ۳-۲ پنجره مجموعه مواد، بیانگر داده‌های پایه برای مصالح ۵۶
شکل ۳-۳ شکل محاسبات تنش‌های اولیه در اثر وزن خاک ۵۸
شکل ۳-۴ نمونه‌هایی از سطوح غیر افقی و لایه‌بندی‌های غیر افقی لایه‌های وزنی ۵۸

شکل ۳-۵ مثالی از ایجاد شبکه جریان ۵۹
شکل ۳-۶ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در اجزاء خاک ۶۳
شکل ۳-۷ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در اجزاء تیری ۶۴
شکل ۳-۸ نمونه‌هایی از کاربر ژئوتکستایل ۶۴
شکل ۳-۹ کاربرد ازجاء فصل مشترک در مسائل ژئوتکنیک ۶۵
شکل ۳-۱۰ موقعیت گره‌ها و نقاط تنش اجزاء فصل مشترک و تماس با اجزاء خاک ۶۵
شکل ۳-۱۱ اثر اجزاء فصل مشترک بر توزیع نامناسب تنش در گوشه‌ها ۶۶
شکل ۳-۱۲ پنجره مربوط به خصوصیات مصالح خاکی و اجزاء تماسی ۷۱
شکل ۳-۱۳ توابع شکل برای اجزاء سه گرهی و پنج گرهی ۷۵
شکل ۳-۱۴ شماره‌های محلی و موقعیت گره‌ها برای یک جزء ۱۵ گرهی ۷۶

فصل چهارم

شکل ۴-۱- مقطع نمونه خاکریز غیرمسلح ۸۲
شکل ۴-۲- مقطع نمونه خاکریز مسلح ۸۲
شکل ۴-۳- جداسازی خاکبرداری‌ها و خاکریزی‌ها ـ الف) خاکبرداری ـ ب) خاکریزی و پی ۸۳
شکل ۴-۴- منحنی ایده‌آل شده الگوی الاستو ـ پلاستیک ۸۶
شکل۴-۵- الف نقاط تحلیل شده سد خاکی، ب الگوی شبیه‌سازی شده‌ی خاکریز سد ۹۱
شکل ۴-۶- ابعاد خاکریز سد خاکی غیرمسلح به ارتفاع ۱۵ متر ۹۲
شکل ۴-۷- ابعاد خاکریز سد خاکی غیرمسلح به ارتفاع ۲۵ متر ۹۲
شکل ۴-۸- ابعاد خاکریز سد خاکی غیرمسلح به ارتفاع ۳۵ متر ۹۲
شکل ۴-۹- فاصله نیم متری ژئوتکستایل در خاکریز سد به ارتفاع ۱۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۰- فاصله یک متری ژئوتکستایل از یکدیگر در خاکریز سد به ارتفاع ۱۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۱- فواصل نیم متری ژئوتکستایل‌ها از یکدیگر در خاکریز سد به ارتفاع ۲۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۲- فواصل یک متری ژئوتکستایل از یکدیگر در خاکریز سد به ارتفاع ۲۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۳- فواصل نیم متری ژئوتکستایل‌ها از یکدیگر در خاکریز سد به ارتفاع ۳۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۴- فواصل یک متری ژئوتکستایل‌ها از یکدیگر در خاکریز سد به ارتفاع ۳۵ متر ۹۳
شکل ۴-۱۵- انواع مختلف قرارگیری بافت در خاکریزهای پایدار ۹۴
شکل ۴-۱۶- جزئیات تحلیل پایداری شیب با کمان دایره‌ای برای خاک‌های با مقاومت برشی (c,φ) ۹۵
شکل ۴-۱۷- طول گیرداری ژئوتکستایل ۹۶
شکل ۴-۱۸- نواحی سه‌گانه در شیب‌های مسلح تند ۹۷
شکل ۴-۱۹- ماکزیمم تنش مورد نیاز در خاک و تنش در دسترس بیشتر در مسلح کننده با دو فاصله ۹۷

شکل ۴-۲۰- مقاومت لازمه مسلح کننده الف ـ توزیع یکنواخت ب ـ توزیع مثلثی ج ـ توزیع مثلثی و فاصله‌های متفاوت در هر مرحله ۹۸
شکل ۴-۲۱- مش بندی اجزاء محدود خاکریز غیرمسلح و پی ۹۹
شکل ۴-۲۲- پنجره ایجاد تنش اولیه (روش k_0) ۱۰۱
شکل ۴-۲۳- بارگذاری آب مخزن سد در نخستین آبگیری ۱۰۲
شکل ۴-۲۴- پنجره مربوط به مراحل محاسبات ۱۰۸

فصل پنجم

شکل ۵-۱ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۱۵متر در ناحیه پائین‌دست ۱۱۱
شکل ۵-۲ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پائین‌دست ۱۱۱
شکل ۵-۳ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پائین‌دست ۱۱۱
شکل ۵-۴ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۱۵متر در ناحیه بالادست ۱۱۲
شکل ۵-۵ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه بالادست..... ۱۱۲
شکل ۵-۶ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه بالادست ۱۱۲
شکل ۵-۷ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه پنجه ۱۱۴
شکل ۵-۸ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پنجه ۱۱۴
شکل ۵-۹ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پنجه ۱۱۴
شکل ۵-۱۰ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۱۵
شکل ۵-۱۱ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۱۵
شکل ۵-۱۲ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت پایان ساخت برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۱۵
شکل ۵-۱۳ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۱۷
شکل ۵-۱۴ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۱۷
شکل۵-۱۵ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۱۸
شکل ۵-۱۶ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت مسلح ۱۱۸
شکل ۵-۱۷ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت مسلح ۱۱۹
شکل ۵-۱۸ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی قائم برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت مسلح ۱۱۹
شکل ۵-۱۹ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه تاج سد ۱۲۱
شکل ۵-۲۰ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه تاج سد ۱۲۱
شکل ۵-۲۱ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه تاج سد ۱۲۱
شکل ۵-۲۲ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه پائین‌دست ..... ۱۲۳.
شکل ۵-۲۳ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پائین‌دست ۱۲۳

شکل ۵-۲۴ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پائین‌دست ۱۲۳
شکل ۵-۲۵ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه بالادست ۱۲۴
شکل ۵-۲۶ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه بالادست ۱۲۴
شکل ۵-۲۷ نمودار جابه‌جایی قائم در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه بالادست ۱۲۴
شکل ۵-۲۸ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه پنجه ۱۲۶
شکل ۵-۲۹ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پنجه ۱۲۶
شکل ۵-۳۰ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پنجه ۱۲۶
شکل ۵-۳۱ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۱۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۲۷
شکل ۵-۳۲ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۲۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۲۷
شکل ۵-۳۳ نمودار جابه‌جایی افقی در حالت نخستین آبگیری برای ارتفاع ۳۵ متر در ناحیه پاشنه ۱۲۷
شکل ۵-۳۴ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۲۹
شکل ۵- ۳۵ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۲۹
شکل ۵- ۳۶ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۳۰
شکل ۵- ۳۷ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت مسلح ۱۳۰
شکل ۵-۳۸ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت مسلح ۱۳۱
شکل ۵- ۳۹ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت مسلح ۱۳۱
شکل ۵-۴۰ تغییرات جابه‌جایی افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۱۵ متر ۱۳۳
شکل ۵-۴۱ تغییرات جابه‌جایی افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۲۵ متر ۱۳۳
شکل ۵-۴۲ تغییرات جابه‌جایی افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۳۵ متر ۱۳۳
شکل ۵-۴۳ تغییرات جابه‌جایی قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۱۵ متر ۱۳۴
شکل ۵-۴۴ تغییرات جابه‌جایی قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۲۵ متر ۱۳۴
شکل ۵-۴۵ تغییرات جابه‌جایی قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۳۵ متر ۱۳۴
شکل ۵-۴۶ تغییرات شتاب افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۱۵ متر ۱۳۵
شکل ۵-۴۷ تغییرات شتاب افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۲۵ متر ۱۳۵
شکل ۵-۴۸ تغییرات شتاب افقی نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۳۵ متر ۱۳۵
شکل ۵-۴۹ تغییرات شتاب قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۱۵ متر ۱۳۶
شکل ۵-۵۰ تغییرات شتاب قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۲۵ متر ۱۳۶
شکل ۵-۵۱ تغییرات شتاب قائم نقاط مختلف سد برای ارتفاع ۳۵ متر ۱۳۶
شکل ۵-۵۲ تغییرات جابه‌جایی‌های افقی در ارتفاعات مختلف سد در ناحیه تاج ۱۳۷
شکل ۵-۵۳ تغییرات جابه‌جایی‌های افقی در ارتفاعات مختلف سد در ناحیه پائین‌دست ۱۳۷

شکل ۵-۵۴ تغییرات جابه‌جایی‌های افقی در ارتفاعات مختلف سد در ناحیه پنجه ۱۳۸
شکل ۵-۵۵ تغییرات جابه‌جایی‌های افقی در ارتفاعات مختلف سد در ناحیه بالادست ۱۳۸
شکل ۵-۵۶ تغییرات جابه‌جایی‌های افقی در ارتفاعات مختلف سد در ناحیه پاشنه ۱۳۸
شکل ۵-۵۷ تغییر شکل قائم تاج سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۰
شکل ۵-۵۸ تغییر شکل افقی تاج سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۰
شکل ۵-۵۹ تغییر شکل قائم بخش میانی پائین‌دست در ارتفاعات مختلف ۱۴۱
شکل ۵-۶۰ تغییر شکل افقی بخش میانی پائین‌دست در ارتفاعات مختلف ۱۴۱
شکل ۵-۶۱ تغییر شکل قائم پنجه سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۲
شکل ۵-۶۲ تغییر شکل افقی پنجه سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۲
شکل ۵-۶۳ تغییر شکل افقی بخش میانی بالادست در ارتفاعات مختلف ۱۴۳
شکل ۵-۶۴ تغییر شکل قائم بخش میانی بالادست در ارتفاعات مختلف ۱۴۳
شکل ۵-۶۵ تغییر شکل قائم پاشنه سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۴
شکل ۵-۶۶ تغییر شکل افقی پاشنه سد در ارتفاعات مختلف ۱۴۴
شکل ۵-۶۷ نمودار تأثیر استفاده از مسلح‌کننده بر شتاب ایجاد شده در تاج سد در حالت مسلح و غیرمسلح برای ارتفاع ۱۵متر ۱۴۶
شکل ۵-۶۸ نمودار تأثیر استفاده از مسلح‌کننده بر شتاب ایجاد شده در تاج سد در حالت مسلح و غیرمسلح برای ارتفاع ۲۵متر ۱۴۶
شکل ۵-۶۹ نمودار تأثیر استفاده از مسلح‌کننده بر شتاب ایجاد شده در تاج سد در حالت مسلح و غیرمسلح برای ارتفاع ۳۵متر ۱۴۶
شکل ۵- ۷۰ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۴۷
شکل ۵-۷۱ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۴۷
شکل ۵-۷۲ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت غیرمسلح ۱۴۷
شکل ۵- ۷۳ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۱۵ متر در حالت مسلح ۱۴۸
شکل ۵- ۷۴ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۲۵ متر در حالت مسلح ۱۴۸
شکل ۵- ۷۵ شبکه تغییر شکل یافته و بردارهای جابه‌جائی افقی برای سد به ارتفاع ۳۵ متر در حالت مسلح ۱۴۸

فهرست جداول

صفحه

فصل دوم

جدول (۲-۱) مقادیر معمول ضریب نفوذپذیری و گذردهی ژئوتکستایل‌ها ۱۶
جدول (۲-۲) شیب مقدماتی پیشنهادی برای سدهای خاکی همگن ساخته شده روی پی پایدار ۱۸
جدول (۲-۳) شیب مقدماتی پیشنهادی برای سدهای خاکی غیرهمگن روی پی پایدار ۱۹
جدول (۲-۴) مقاومت برشیس، فشار آب و وزن مخصوص برای تحلیل پایداری ۲۳

فصل سوم

جدول ۳-۱ نقاط و توابع وزن برای انتگرالگیری روش نیوتن-گوتس ۷۷
جدول ۳-۲ نقاط وزن برای انتگرال‌گیری روش گوس ۷۸
جدول ۳-۳ سه نقطه انتگرال‌گیری برای جزء ۶ گرهی ۷۸
جدول ۳-۴ دوازده نقطه انتگرال‌گیری برای جزء ۱۵ گرهی ۷۸

فصل چهارم

جدول ۴-۱ مشخصات مکانیکی مصالح بدنه سد، مصالح پی و هسته ۸۷
جدول ۴-۲- پارامترهای ژئوتکستایل ۹۰
جدول ۴-۳- مشخصات هندسی سد ۹۲

فصل پنجم

جدول ۵-۱ حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش پایان ساخت ۱۱۶
جدول ۵-۲ حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش پایان ساخت ۱۱۶
جدول ۵-۳ حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش پایان ساخت ۱۱۶
جدول ۵-۴ حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش نخستین آبگیری ۱۲۸
جدول ۵-۵- حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش نخستین آبگیری ۱۲۸
جدول ۵-۶ حداکثر جابه‌جایی افقی و نشست در نقاط مختلف سد در حالت مسلح و غیر مسلح برای بخش نخستین آبگیری ۱۲۸

فصل اول:
کلیات

۱-۱- مقدمه

از دیر باز خاک مسلح به عنوان یک مصالح مهندسی خوب شناخته می‌شد، زیرا تا قبل از آن که هنری ویدال[1] مهندس فرانسوی ترکیب خاک‌های چسبنده را در سال ۱۹۶۶ معرفی نماید تعداد زیادی سازه به کمک خاک مسلح ساخته شده بود؛ به عبارتی ایده اصلی این کار از طبیعت گرفته شده است و نمونه‌های زیادی از شیب‌های طبیعی وجود دارند که توسط ریشهٔ گیاهان مسلح شده‌اند. ساکنین آفریقا و جنوب آسیا با خاک مسلح آشنایی داشتند و به طریق گوناگون با استفاده از ورقه‌های بامبو، پوست بز، کاه، نی و پوست درختانی مثل خرما ویژگی بناهای خاکی خود را بهبود می‌بخشیدند.

از سوی دیگر در طی سال‌های طولانی و از مدتها پیش سدهای خاکی نقش مهمی در جمع‌آوری آب‌های سطحی داشته‌اند. از مزایای عمده سدهای خاکی نسبت به نوع بتنی آن در جایی‌که امکان ساخت هر دو نوع سد موجود باشد، کاهش در هزینه احداث سد و نیاز به تکنولوژی ساده‌تر در اجرا می‌باشد؛ اما ساخت سدهای خاکی همواره با محدودیت‌هایی نظیر پرداخت هزینه اضافی برای احداث سرریز، سطح اشغال بالای زمین، حجم بالای عملیات خاکی و محدودیت افزایش ارتفاع همراه خواهد بود. برخی از این محدودیت‌ها را با استفاده از خاک مسلح می‌توان جبران نمود و یا کاهش داد؛ به عبارتی استفاده از خاک مسلح در سدها باعث کاهش حجم عملیات خاکی، افزایش سرعت ساخت، کاهش شیب بالا دست و پایین دست شده میزان سطوح تنش در خاک و همچنین نشست و جابه‌جایی ذرات خاک را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر به علت امکان اجرای قائم شیب پایین دست می‌توان بر روی تاج سدهای خاکی مسلح سرریز اجرا نمود.

از دهه‌های اخیر روش‌های اجزای محدود در تحلیل پایداری سازه‌های خاک مسلح و غیر مسلح بکار می‌رفته است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، این روش‌ها امکان تحلیل پارامترهای مربوط به هر پروژه را به ۲ روش استاتیکی و دینامیکی فراهم می‌آورد وامکان بررسی‌های مقایسه‌ای را جهت انجام تحلیل‌های موردی محیا می‌سازد.

۱-۲- مختصری درباره خاک مسلح

خاک، به عنوان ارزان‌ترین مصالح ساختمانی از مراحل اولیه صنعت ساختمان مورد توجه قرار داشته است و تا به امروزه نیز در ساخت سازه‌های مهم از قبیل سدهای بزرگ خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ضعف خواص مکانیکی خاک و ابعاد بزرگ سازه‌های خاکی در مقایسه با سازه‌های بتنی یا فولادی، مسئله تقویت خواص مکانیکی خاک همواره مورد بررسی پژوهشگران بوده است و در مورد افزایش مقاومت درونی

[1] Henri Vidal

خاک از طریق کاربرد مصالح دیگر، به نحوی که هزینه‌های مربوط غیراقتصادی نباشند، مطالعات گوناگون صورت گرفته است.

داستان اختراع روش خاک مسلح از سال ۱۹۵۸شروع شد که ویدال جهت گذراندن تعطیلات به جزایر بالیارس[1] در دریای مدیترانه رفته بود. در روزی که وی در ساحل بود و با ماسه بازی می‌کرد، چندین بار تلی از ماسه را ساخت و شیب قرار طبیعی آن را مشاهده می‌نمود همیشه ماسه تحت یک شیب قرار می‌گرفت. در اطرافش مقدار زیادی برگ‌های سوزنی کاج وجود داشت و وی سعی کرد که ردیف‌هایی از برگ‌های سوزنی کاج را در داخل ماسه قرار دهد. به این صورت که پس از استفاده از یک ماسه، یک لایه برگ سوزنی کاج به کار گرفته می‌شد. به نظر رسید که شیب تل ماسه‌ای تندتر شد. در نتیجه ویدال از خودش پرسید که آیا قراردادن رشته‌ای انعطاف‌پذیر در ماسه مفید است؟ پس از پنج سال مطالعات نظری و انجام آزمایش‌ها بر روی الگوهای ساخته شده[2] از ماسه وکاغذ، وی موفق شد جواب سوال بالا را بیابد و این سوال در سال ۱۹۶۳ در یک کتاب ۲۰۰ صفحه‌ای چاپ شد. دراین کتاب گفته شد که ترکیب دو مصالح، یعنی ماسه و عنصر مسلح‌کننده انعطاف‌پذیر، مصالح جدیدی را می‌سازد که خاک مسلح نامیده می‌شود[۵].

در طبیعت نمونه‌های زیادی از شیب‌های طبیعی که توسط ریشه‌های گیاهان تسلیح شده‌اند را می‌توان مشاهده کرد. نخستین کاربردهای خاک مسلح توسط انسان به چهار تا پنج هزار سال قبل از میلاد مسیح بر می‌گردد، که از کاه یا نی برای مسلح نمودن خاک رس و آجرهای رسی استفاده می‌کردند.

ساکنین آفریقا و جنوب آسیا با خاک مسلح آشنایی داشتند و به طریق گوناگون با استفاده از ورقه‌های بامبو، پوست بز، کاه، نی و پوست درختانی مثل خرما ویژگی بناهای خاکی خود را بهبود می‌بخشیدند. یکی از ضعف‌های خاک مقاومت کشش پایین آن است. ایدهٔ خاک مسلح در حقیقت راه‌حلی برای رفع این نقطه ضعف می‌باشد. مشارکت مناسب مسلح‌کننده و خاک، مصالح ویژه‌ای را ایجاد می‌نماید که دارای خواصی کاملاً متفاوت با خواص اجزاء تشکیل‌دهندهٔ آن است. مسلح‌کننده‌ها اجزاء مقاوم در برابر نیروهای کششی می‌باشند و به صورت سیم،نوار، مش، پارچه، نمد و ... از جنس فولاد آلومینیوم، پلاستیک، مواد پلیمری و غیره تولید می‌شوند.

خاک مسلح چه از نظر فنی و چه از نظر اقتصادی، با توجه به سهولت اجرا، عدم نیاز به کارگران با مهارت‌های فنی بالا،کم بودن زمان اجراء و ارزان بودن مصالح، در اغلب اوقات بر دیگر روش‌ها برتری دارد. از نظر سازه‌ای خاک مسلح به علت انعطاف‌پذیری و میرایی بالایی که دارد در مقابل بار ناشی از زلزله عملکرد خوبی نشان می‌دهد.

---

[1] Baleares Islands
[2] Model Tests

۱-۳- اهداف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش تحلیل پایداری سدهای خاکی مسلح تحت بارهای زلزله با استفاده از روش اجزای محدود می‌باشد. با توجه به اینکه مصالح پوسته سدهای خاکی باید از مصالح سنگریزه‌ای یا مصالح درشت‌دانه (شن یا ماسه تمیز یعنی فاقد مصالح ریزدانه) تشکیل شده باشد. در صورت عدم وجود چنین مصالحی در یک فاصله معقول و اقتصادی از محور سد یا باید از سد همگن استفاده شود که برای سدها با ارتفاع بیش از ۱۵ متر (سدهای بزرگ) اقتصادی نمی‌باشد و یا اینکه از معدن سنگ که با خرد کردن سنگ و تبدیل آن به قطعات سنگی (مصالح سنگریزه‌ای) استفاده گردد. البته راه حل دوم نیز در پاره‌ای از اوات به دلیل دور بودن معدن سنگ اقتصادی نمی‌باشد. در چنین شرایطی استفاده از خاک چسبنده مسلح به عنوان یک راه حل اقتصادی بهینه می‌تواند مطرح باشد و به راحتی با سایر گزینه‌ها رقابت نماید و راه حل برتر شناخته شود.

با توجه به اینکه موضوع مورد بحث مفهومی جدید می‌باشد. بنابراین در این راستا باید مطالعه پارامتری انجام شود.

به منظور دست یافتن به نتایج این تحلیل از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار تحلیل‌های تنش- کرنش سد خاکی در دو حالت بارگذاری پایان ساخت ونخستین آبگیری انجام می‌شود تا مقادیر تغییر شکل‌ها هم به صورت استاتیکی وهم به صورت دینامیکی در خاکریز مسلح مشخص شود و این مقادیر تغییر شکل‌ها با خاکریز غیرمسلح مقایسه گردد.

مصالح مسلح‌کننده ژئوتکستایل می‌باشد که به صورت افقی قرار گرفته‌اند. اندرکنش بین خاک و ژئوتکستایل نیز با مشخصه‌های مقاومتی زاویه اصطکاک و همچسبی معرفی می‌گردد. این مشخصه‌ها توسط مقاومت برشی بین خاک و ژئوتکستایل کنترل می‌گردد.

به منظور مطالعه پارامتری لازم است که چندین تحلیل تنش- کرنش به دو صورت استاتیکی و دینامیکی انجام شود. متغیرهای مطالعه پارامتری شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- ارتفاع سد

۲- سختی ژئوتکستایل

۳- تعداد و فاصله ژئوتکستایل

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

همانطوری که اشاره شد در دو دهۀ اخیر استفاده از خاک مسلح پیشرفت وسیعی داشته است که با در نظر گرفتن این پیشرفت‌ها ضرورت انجام پژوهش را موجب شده است تا ازخاک مسلح در رسیدن به اهداف مورد نظر استفاده شود.