



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و  
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی مهندسی  
گروه عمران

## پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی عمران گرایش خاک و پی

### عنوان پایان نامه

**مطالعه آزمایشگاهی بررسی پایداری شیب خاکی واقع بر خاک تقویت شده توسط  
ستون‌های سنگی**

استاد راهنما:

دکتر محمد حاجی عزیزی

استاد مشاور:

دکتر محمد شریفی پور

نگارش:

اسماعیل نعمتی

آبان ۱۳۹۲

تقدیم به مادرم و پدرم

با سپاس فراوان و قدرانی از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرامی.

## چکیده:

پایداری سازی شیب‌های خاکی و پیشنهاد راهکارهای گوناگون، یکی از مسائل مطرح و مهم در مهندسی ژئوتکنیک است. استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در پایداری سازی شیب‌های خاکی به کمک شمع و یا ستون-سنگی، از روش‌های متداولی است که توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه‌یابی مکان شمع و یا ستون‌سنگی به منظور پایداری سازی شیب‌های خاکی با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی توسط محققین مختلف، منجر به نتایج متعددی شده است که این سوال را در ذهن طراح مطرح می‌کند که بهترین مکان واقعی برای نصب شمع و یا ستون سنگی کجاست؟ به نظر می‌رسد که جای مطالعات آزمایشگاهی برای این منظور خالی است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق قادر است که گره ایجاد شده در نتایج مختلف و گاه متضاد تحلیل‌های عددی را برای یافتن مکان بهینه شمع باز کند. مطالعه ایجاد آزمایشگاهی مذکور، برای شیب خاکی ماسه‌ای انجام شده است که توسط بارش اشباع می‌گردد و پس از اشباع شدن گسیخته شده است. با قرار دادن ستون سنگی در مکان‌های مختلف و اشباع کردن شیب خاکی توسط بارش، نتایج قابل توجه و معقولی بدست آمده است که می‌تواند راهگشای مناسبی برای طراحان باشد. تمام مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده، توسط روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود نیز مدل‌سازی و مقایسه شده‌اند که تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

**کلمات کلیدی:** پایداری سازی، شیروانی خاکی، ستون سنگی، موقعیت بهینه، مطالعه آزمایشگاهی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: تعریف و بیان مسئله</b>
۲.....	بخش اول: تعریف و بیان مسئله.....
۲.....	۱-۱-۱- مقدمه.....
۲.....	۲-۱-۱- بیان مسئله.....
۲.....	۳-۱-۱- روش تحقیق.....
۳.....	۴-۱-۱- ساختار پایان نامه.....
۴.....	بخش دوم: مفاهیم مطرح در تحلیل پایداری شیب های خاکی.....
۴.....	۱-۲-۱- مقدمه.....
۵.....	۲-۲-۱- ضریب اطمینان.....
۸.....	۳-۲-۱- سطح لغزش بحرانی.....
۹.....	۴-۲-۱- تحلیل دو بعدی و سه بعدی.....
۱۳.....	۵-۲-۱- روش های حدی.....
۱۳.....	۱-۵-۲-۱- روش خطوط مشخصه.....
۱۴.....	۲-۵-۲-۱- روش تحلیل حدی.....
۱۵.....	۳-۵-۲-۱- روش تعادل حدی.....
۱۶.....	۶-۲-۱- روش های عددی.....
۱۷.....	۱-۶-۲-۱- روش اجزای محدود.....
۲۲.....	بخش سوم: ستون سنگی.....
۲۲.....	۱-۳-۱- مقدمه.....



۲۳.....۱-۳-۲-ستون سنگی

۲۵.....۱-۳-۳-روش های اجرای ستون سنگی

### فصل دوم:پیشینه تحقیق

۳۱.....پیشینه تحقیق

### فصل سوم:مدل سازی آزمایشگاهی

۵۶.....۳-۱-مقدمه

۵۶.....۳-۲-تجهیزات آزمایشگاه

۶۰.....۳-۳-نحوه ای اجرای آزمایشات

۶۱.....۳-۴-مدل های آزمایش

۶۱.....۳-۴-۱-مدل شماره ۱

۶۲.....۳-۴-۲-مدل شماره ۲

۶۴.....۳-۴-۳-مدل شماره ۳

۶۵.....۳-۴-۴-مدل شماره ۴

۶۸.....۳-۴-۵-مدل شماره ۵

۷۰.....۳-۴-۶-مدل شماره ۶

۷۳.....۳-۴-۷-مدل شماره ۷

۷۵.....۳-۴-۸-مدل شماره ۸

۸۰.....۳-۴-۹-مدل شماره ۹

۸۳.....۳-۴-۱۰-مدل شماره ۱۰

۸۴.....۳-۴-۱۱-مدل شماره ۱۱

۹۰.....۳-۴-۱۲-مدل شماره ۱۲

## فصل چهارم: مدل سازی عددی

- ۹۵..... ۱-۴- تحلیل شیروانی به کمک نرم افزار ژئوآفیس.....
- ۹۵..... ۱-۱-۴- مشخصات مصالح.....
- ۹۵..... ۱-۴-۲- نتایج.....
- ۹۵..... ۱-۲-۱-۴- مدل در حالت بدون ستون سنگی (مدل شماره ۸).....
- ۹۶..... ۱-۴-۲-۲- مدل در حالتی که ستون سنگی در وسط قرار دارد: (مدل شماره ۹).....
- ۹۶..... ۱-۴-۲-۳- مدل در حالتی که ستون سنگی در بالا قرار دارد: (مدل شماره ۱۱).....
- ۹۷..... ۱-۴-۲-۴- مدل در حالتی که ستون سنگی در پایین قرار دارد: (مدل شماره ۱۲).....
- ۹۸..... ۲-۴- تحلیل شیروانی به کمک نرم افزار پلکسیس.....
- ۹۸..... ۱-۲-۴- مشخصات مصالح.....
- ۹۸..... ۲-۲-۴- نتایج.....
- ۹۸..... ۱-۲-۲-۴- مدل در حالت بدون ستون سنگی (مدل شماره ۸).....
- ۹۹..... ۲-۲-۲-۴- مدل در حالتی که ستون سنگی در وسط قرار دارد: (مدل شماره ۹).....
- ۹۹..... ۳-۲-۲-۴- مدل در حالتی که ستون سنگی در بالا قرار دارد: (مدل شماره ۱۰).....
- ۱۰۰..... ۴-۲-۲-۴- مدل در حالتی که ستون سنگی در پایین قرار دارد: (مدل شماره ۱۱).....

## فصل پنجم: آنالیز ابعادی

- ۱۰۳..... ۱-۵- مقدمه.....
- ۱۰۴..... ۲-۵- آنالیز ابعادی در شیروانی‌های خاکی.....
- ۱۰۵..... ۳-۵- محاسبه مقیاس کامل مدل های تست شده.....
- ۱۰۷..... نتیجه گیری.....
- ۱۰۸..... پیشنهادات.....

پیوست ها..... ۱۰۹

منابع..... ۱۱۸

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

### فصل اول

شکل ۱-۱- یک شیب خاکی با سطح لغزش دایره‌ای با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر یک

قطعه جهت محاسبه‌ی ضریب اطمینان..... ۵

شکل ۱-۲- برخی از سطوح لغزش و توده‌های لغزشی..... ۸

شکل ۱-۳- مفاهیم مرتبط با توده لغزش..... ۹

شکل ۱-۴- مدهای گسیختگی دورانی و انتقالی در شیب‌ها..... ۱۲

شکل ۱-۵- اجرای ستون سنگی به روش خیس با تغذیه از بالا (جایگزینی + جا به جایی)..... ۲۹

شکل ۱-۶- اجرای ستون سنگی به روش خشک با تغذیه از پائین (جا به جایی)..... ۲۹

### فصل دوم

شکل ۲-۱- مشخصات خاک شیروانی و دانه‌های ستون سنگی..... ۳۲

شکل ۲-۲- نمودار دانه بندی خاک شیروانی و دانه‌های ستون‌های سنگی..... ۳۲

شکل ۲-۳- باکس آزمایشگاه..... ۳۳

شکل ۲-۴- پی استفاده شده روی شیروانی..... ۳۳

شکل ۲-۵- مشخصات هندسی شیروانی..... ۳۴

شکل ۲-۶- مدل هندسی شیروانی در پلکسیس..... ۳۴

شکل ۲-۷- تغییرات میزان ظرفیت باربری به نشست پی به عرض پی..... ۳۵

شکل ۲-۸- باکس آزمایشگاه..... ۳۷

شکل ۲-۹- تغییرات ضریب اطمینان نسبت به درجه تراکم..... ۳۷

شکل ۲-۱۰- تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زاویه شیب..... ۳۷

- شکل ۲-۱۱- سنسورهای تغییر شکل ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۲- سنسورهای رطوبت ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۳- باکس آزمایشگاه ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۴- مدل‌های فرض شده برای آزمایش ..... ۴۰
- شکل ۲-۱۵- نمودارهای تغییرات فشار آب حفره ایی، جابجایی نسبت  
به زمان برای حالت های ۱ و ۲ ..... ۴۰
- شکل ۲-۱۶- نمودارهای تغییرات فشار آب حفره ایی، جابجایی نسبت  
به زمان برای حالت های ۳ و ۴ ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۷- تغییرات عرض تاج شیروانی و رابطه آن با منطقه اشباع ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۸- هندسه شیروانی در آزمایشگاه ..... ۴۳
- شکل ۲-۱۹- هندسه شیروانی ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۰- حرکت برداری گسیختگی در دو حالت مسلح و غیر مسلح ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۱- تغییرات نشست پی ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۲- هندسه شیروانی ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۳- وضعیت شیروانی در حالت یک ..... ۴۶
- شکل ۲-۲۴- وضعیت شیروانی در حالت دو ..... ۴۷
- شکل ۲-۲۵- تغییرات آب انباشته شده نسبت به ضریب اطمینان ..... ۴۷
- شکل ۲-۲۶- وضعیت شیروانی در حالت سه ..... ۴۸
- شکل ۲-۲۷- وضعیت شیروانی در حالت چهار ..... ۴۸
- شکل ۲-۲۸- نمای کلی از منطقه زمین لغزش ..... ۵۰
- شکل ۲-۲۹- وضعیت شیروانی در حالت‌های بررسی شده ..... ۵۱
- شکل ۲-۳۰- تاثیر سطح آب زیر زمینی در مقدار ضریب اطمینان در سال ۱۹۸۹ ..... ۵۱
- شکل ۲-۳۱- تاثیر سطح آب زیر زمینی در مقدار ضریب اطمینان در سال ۱۹۹۱ ..... ۵۲

## فصل سوم

- شکل ۳-۱- باکس آزمایشگاه..... ۵۷
- شکل ۳-۲- ترازو و الک..... ۵۷
- شکل ۳-۳- ماسه..... ۵۷
- شکل ۳-۴- منحنی دانه بندی..... ۵۸
- شکل ۳-۵- منحنی تنش برشی - تنش نرمال ماسه استفاده شده در آزمایشگاه..... ۵۹
- شکل ۳-۶- شن وماسه ی رنگی..... ۶۰
- شکل ۳-۷- هندسه شیروانی مدل شماره ۱..... ۶۱
- شکل ۳-۸- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۱ (عکس های ۱ الی ۴)..... ۶۲
- شکل ۳-۹- هندسه شیروانی مدل شماره ۲..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۲ (عکس های ۱ الی ۳)..... ۶۳
- شکل ۳-۱۱- هندسه شیروانی مدل شماره ۳..... ۶۴
- شکل ۳-۱۲- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۳..... ۶۴
- شکل ۳-۱۳- هندسه شیروانی مدل شماره ۴..... ۶۵
- شکل ۳-۱۴- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۴ (۱ الی ۳)..... ۶۶
- شکل ۳-۱۵- تابلوی پیزومتر، جهت اندازه گیری فشار آب منفذی در شیروانی..... ۶۷
- شکل ۳-۱۶- جمع شدگی آب در پایین دست شیروانی..... ۶۸
- شکل ۳-۱۷- هندسه شیروانی مدل شماره ۵..... ۶۹
- شکل ۳-۱۸- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۵..... ۶۹
- شکل ۳-۱۹- هندسه شیروانی مدل شماره ۶..... ۷۰
- شکل ۳-۲۰- شیروانی ساخته شده درآزمایشگاه در مدل ۶ (عکس های ۱ الی ۴)..... ۷۱
- شکل ۳-۲۱- موقعیت ترک در مدل شماره ۶..... ۷۲
- شکل ۳-۲۲- موقعیت ترک در مدل آزمایشگاهی شماره ۶..... ۷۳

- شکل ۳-۲۳- هندسه شیروانی مدل شماره ۷..... ۷۴
- شکل ۳-۲۴- شیروانی ساخته شده در آزمایشگاه در مدل ۷ (۱ و ۲)..... ۷۴
- شکل ۳-۲۵- هندسه شیروانی مدل شماره ۸..... ۷۵
- شکل ۳-۲۶- شیروانی ساخته شده در آزمایشگاه در مدل ۸ (۱ و ۲)..... ۷۶
- شکل ۳-۲۷- موقعیت ترک در مدل شماره ۸..... ۷۷
- شکل ۳-۲۸- موقعیت ترک در مدل آزمایشگاهی شماره ۸..... ۷۷
- شکل ۳-۲۹- شیروانی قبل و بعد از گسیختگی (مدل شماره ۸)..... ۷۸
- شکل ۳-۳۰- شیروانی قبل و بعد از گسیختگی در آزمایشگاه (مدل شماره ۸) (۱ الی ۴)..... ۷۸
- شکل ۳-۳۱- گسیختگی شیروانی خاکی مسیر راه آهن غرب کشور (صحنه)..... ۷۹
- شکل ۳-۳۲- موقعیت ستون های سنگی در شیروانی خاکی..... ۸۰
- شکل ۳-۳۳- هندسه شیروانی مدل شماره ۹..... ۸۱
- شکل ۳-۳۴- نحوه ای قرار گیری ستون سنگی در شیروانی (در وسط شیروانی)..... ۸۱
- شکل ۳-۳۵- شیروانی ساخته شده در آزمایشگاه در مدل ۹ (۱ و ۲)..... ۸۲
- شکل ۳-۳۶- مدل آزمایشگاهی شماره ۹ (بعد و در حین آبپاشی) (۱ الی ۴)..... ۸۳
- شکل ۳-۳۷- موقعیت ترک در مدل آزمایشگاهی شماره ۱۰ (۱ و ۲)..... ۸۴
- شکل ۳-۳۸- هندسه شیروانی مدل شماره ۱۱..... ۸۵
- شکل ۳-۳۹- نحوه ای قرار گیری ستون های سنگی  
در شیروانی (در وسط شیروانی) (۱ الی ۳)..... ۸۶
- شکل ۳-۴۰- شیروانی ساخته شده در آزمایشگاه در مدل ۱۱..... ۸۶
- شکل ۳-۴۱- مدل آزمایشگاهی شماره ۱۱ (بعد و در حین آبپاشی) (۱ و ۲)..... ۸۷
- شکل ۳-۴۲- موقعیت ترک ها در مدل شماره ۱۱..... ۸۸
- شکل ۳-۴۳- موقعیت ترک ها در مدل آزمایشگاهی شماره ۱۱ (۱ الی ۳)..... ۸۹
- شکل ۳-۴۴- هندسه شیروانی مدل شماره ۱۲..... ۹۰
- شکل ۳-۴۵- نحوه ای قرار گیری ستون های سنگی

- در شیروانی (در پایین شیروانی) (۱۱الی۴)..... ۹۱
- شکل ۳-۴۶- شیروانی ساخته شده در آزمایشگاه در مدل ۱۲ ..... ۹۱
- شکل ۳-۴۷- مدل آزمایشگاهی شماره ۱۲ (بعد و در حین آبیاشی) (۱ و ۲)..... ۹۲
- شکل ۳-۴۸- موقعیت ترک‌ها در مدل شماره ۱۲..... ۹۳
- شکل ۳-۴۹- موقعیت ترک در مدل آزمایشگاهی شماره ۱۲ (۱ و ۲)..... ۹۳

## فصل چهارم

- شکل ۴-۱- گسیختگی شیروانی در وضعیت بدون ستون سنگی در نرم افزار ژئوآفیس..... ۹۶
- شکل ۴-۲- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در وسط، در نرم افزار ژئوآفیس..... ۹۶
- شکل ۴-۳- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در بالا، در نرم افزار ژئوآفیس..... ۹۷
- شکل ۴-۴- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در پایین، در نرم افزار ژئوآفیس..... ۹۷
- شکل ۴-۵- گسیختگی شیروانی در وضعیت بدون ستون سنگی در نرم افزار پلکسیس..... ۹۹
- شکل ۴-۶- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در وسط، در نرم افزار پلکسیس..... ۹۹
- شکل ۴-۷- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در بالا، در نرم افزار پلکسیس..... ۱۰۰
- شکل ۴-۸- گسیختگی شیروانی در وضعیت ستون سنگی در پایین، در نرم افزار پلکسیس..... ۱۰۰

## فصل پنجم

- شکل ۵-۱- هندسه شیروانی خاکی در حالت مقیاس کامل..... ۱۰۶



## فهرست جداول

صفحه	عنوان
	<b>فصل دوم</b>
جدول ۱-۲-۳۵.....	تغییرات ظرفیت باربری نسبت به ستون‌ها به قطر
جدول ۲-۲-۳۶.....	تغییرات نشست نسبت به ستون‌ها به قطر
جدول ۳-۲-۳۸.....	خلاصه نتایج مقاله دوم.....
جدول ۴-۲-۴۰.....	مشخصات آزمایشات مقاله سوم .....
جدول ۵-۲-۴۳.....	مدل‌های آزمایشگاهی و شرایط آن.....
جدول ۶-۲-۴۵.....	مقادیر بحرانی از پارامترهای ژئوگرید.....
جدول ۷-۲-۴۸.....	مقدار ضریب اطمینان برای حالت‌های مختلف.....
جدول ۸-۲.....	خلاصه دیدگاه محققان نسبت به بهینه ترین
موقعیت شمع در شیروانی های خاکی در مدل های عددی.....	۵۴.....

### فصل سوم

جدول ۱-۳-۵۸.....	مشخصات دانه بندی ماسه.....
------------------	----------------------------

### فصل چهارم

جدول ۱-۴-۹۵.....	مشخصات مصالح در نرم افزار ژئوآفیس.....
جدول ۲-۴-۹۷.....	نتایج بدست آمده از نرم افزار ژئوآفیس.....
جدول ۳-۴-۹۸.....	مشخصات مصالح در نرم افزار پلکسیس.....
جدول ۴-۴-۱۰۱.....	نتایج مدل های عددی.....

## فصل پنجم

جدول ۱-۵- تبدیل مقیاس..... ۱۰۵

جدول ۲-۵- خلاصه مقایسه مدل آزمایشگاهی با مدل واقعی با ضریب مقیاس  $\frac{1}{100}$ ..... ۱۰۶

# فصل اول

تعريف و بيان مسئله

## بخش اول: تعریف و بیان مسئله

### ۱-۱-۱- مقدمه

ساخت ستون‌های سنگی به عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط زیست، توانایی بهسازی زمین‌های متشکل از خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده سست را دارند. این روش سال‌ها است به منظور کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری، کاهش پتانسیل روانگرایی و افزایش سرعت تحکیم زمین‌های سست به کار می‌رود که نخستین بار در سال ۱۸۳۰ در فرانسه و از سال ۱۹۵۰ به طور گسترده‌ای در کشورهای دیگر استفاده شده است. ستون‌های سنگی همچنین می‌توانند به عنوان عامل مؤثر جهت تثبیت و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌ها در برابر لغزش استفاده شوند.

### ۱-۱-۲- بیان مسئله

سوالی که در این زمینه یعنی پایدارسازی شیروانی‌های خاکی به کمک ستون‌های سنگی وجود دارد این است که، بهینه‌ترین موقعیت ستون‌های سنگی در پایدارسازی شیروانی‌های خاکی کجاست؟ تا به حال مطالعات تئوری فراوانی در این زمینه صورت گرفته است. بر اساس این مطالعات تئوری، نتایج متفاوتی هم بدست آمده که در برخی از موارد این نتایج متناقض و متضاد یکدیگر هستند. انجام مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند ما را در رسیدن به پاسخ این سوال کمک کند.

### ۱-۱-۳- روش تحقیق

ما در این تحقیق با انجام یکسری مطالعات آزمایشگاهی بر روی شیروانی‌های ماسه‌ای به این نتیجه رسیده ایم که بهینه‌ترین موقعیت شمع جهت پایدارسازی، وسط شیروانی‌های ماسه‌ای می‌باشد.

ما در آزمایشگاه به کمک باکس آزمایشگاهی شیروانی مد نظر را با تراکم خاص و مشخص داخل آن ساختیم و سپس آن را تحت بارندگی مصنوعی قرار دادیم بعد از گسیختگی شیروانی، آن را به کمک ستون