بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دانشکده مهندسی عمران

عنوان:

مطالعه پارامتریک پایداری شیروانی خاکی مسلح با ژئوسنتتیک

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران – گرایش خاک و پی

استاد راهنما:
دکتر عسکر جانعلی‌زاده چوب‌بستی

استاد مشاور:
دکتر رضا نورزاد

نگارش:
علی غلامعلی‌تبار فیروزجائی

شهریورماه ۱۳۸۷

تقدیر و تشکر

بسیار مسرورم، که توفیق یافتم از راهنمایی‌های خردمندانه و دلسوزانه‌ی استاد فرزانه جناب آقای دکتر عسکر جانعلی‌زاده چوب‌بستی مستفید گردم چرا که ایشان چه در انتخاب موضوع پایان نامه و چه در تهیه و تدوین آن در تمام مراحل از هیچ کوششی دریغ نورزیده و مرا مورد لطف و امتنان خود قرار داده است؛ اینک به جاست از این استاد فرزانه صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین برخود فرض می‌دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر رضا نورزاد تقدیر و تشکر نمایم چرا که راهنمایی‌ها و اظهار نظرهای ایشان در تکمیل این پایان نامه سهم بسزایی داشته است.

همچنین از خدمات و راهنمایی‌های سایر اساتید محترم دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در تدوین پایان نامه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تقدیم:

به مادرم،

صبـور و باوقار

به پدرم،

نستوه و استوار

چکیده

خاک مسلح، مصالح ویژه‌ای است که از ترکیب خاک و عضو مسلح‌کننده بوجود می‌آید. مسلح‌کننده، اجزاء مقاوم در برابر نیروهای کششی است و به صورت سیم، نوار، شبکه، پارچه، نمد و.. که از جنس فولاد، آلومینیوم، پلاستیک، مواد پلیمری و یا هر ماده‌ی دیگری می‌تواند باشد. اصولاً خاک در برابر کشش و برش ضعیف است و ایده‌ی خاک مسلح در حقیقت راه‌حلی برای رفع این نقطه ضعف‌ها می‌باشد. مشارکت مسلح‌کننده و خاک، مصالح ویژه‌ای را ایجاد می‌نماید که دارای خواصی کاملاً متفاوت با خواص اجزاء تشکیل دهنده‌ی آن است و امکان ساخت سازه‌های اقتصادی که قادر به مهار نیروهای کششی می‌باشد را فراهم می‌سازد.

استفاده از مسلح‌کننده‌های پلیمری سبب شد خاک مسلح در طیف وسیعی از سازه‌های خاکی نظیر دیوارهای حائل، شیروانی‌های خاکی و... کاربرد گسترده‌تری پیدا کند. ژئوسنتتیک‌ها به عنوان المان مسلح‌کننده و عناصر کششی در توده‌ی خاک قرار داده می‌شوند و باعث افزایش توان باربری خاک می‌شوند.

روش‌های مختلفی برای آنالیز و طراحی خاک مسلح ارائه شده است. براساس مطالعات انجام شده، اغلب روش‌های طراحی شیروانی‌های خاکی مسلح با ژئوسنتتیک براساس روش‌های حدی استوار می‌باشند که روش تعادل حدی و روش اجزای محدود نسبت به بقیه موارد کاربرد بیشتری دارند.

در این پایان‌نامه با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS 8/2* و به روش اجزاء محدود یک مطالعه پارامتریک انجام گرفته و در آن اثر پارامترهای مختلفی همچون سختی کششی تسلیح، تعداد لایه‌های تسلیح، زاویه‌ی شیب شیروانی، طول لایه‌های تسلیح، امتداد قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق، ارتفاع شیروانی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و وزن مخصوص خشک خاک بر روی ضریب ایمنی، جابه‌جایی نهایی، حداکثر جابه‌جایی قائم، حداکثر جابه‌جایی افقی، حداکثر کرنش برشی و حداکثر تنش مؤثر خاکریز بررسی شده است.

در نهایت نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش مقادیر سختی کششی تسلیح، تعداد لایه‌های تسلیح، طول لایه‌های تسلیح و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک مقدار ضریب ایمنی افزایش و با افزایش مقادیر زاویه‌ی شیب خاکریز زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق، ارتفاع خاکریز و وزن مخصوص خشک خاکریز مقدار ضریب ایمنی کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: خاک مسلح، مطالعه‌ی پارامتریک، پایداری شیروانی، روش اجزاء محدود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات	
1-1- مقدمه	2
1-2- مختصری در مورد پروژه	3
1-3- اهداف پژوهش	7
1-4- ساختار پایان‌نامه	8
فصل دوم: مروری بر ادبیات تخصصی خاک مسلح	
2-1- مقدمه	10
2-2- تاریخچه و کلیات	12
2-3- مسلح کننده‌ها	19
2-4- ژئوسنتتیک‌ها	20
2-4-1- انواع اصلی ژئوسنتتیک‌ها و کاربردهای آن‌ها	23
2-4-1-1- ژئوتکستایل‌ها	23
2-4-1-2- ژئوگریدها	25
2-4-1-3- ژئونت‌ها	27
2-4-1-4- ژئوممبرین‌ها	27
2-4-1-5- ژئوکمپوزیت‌ها	28
2-5- مکانیک خاک مسلح	29
2-5-1- افزایش مقاومت برشی خاک	30
2-5-2- نیروی مسلح‌کننده	33
2-5-2-1- مقاومت کششی مسلح‌کننده	33
2-5-2-2- تنش چسبندگی ماکزیمم بین مسلح‌کننده و خاک	33
2-5-2-3-سازگاری کرنش کششی بین مسلح کننده و خاک	36
2-5-3- اثر افزایش فشار جانبی برافزایش مقاومت خاک مسلح	36
2-6- اندر کنش خاک و مسلح کننده	37
2-6-1- عوامل موثر بر خواص سطح مشترک خاک و مسلح کننده	39

عنوان	صفحه

2-7- مطالعات آزمایشگاهی 41

2-7-1- روشهای تعیین پارامترهای سطح مشترک 42

2-7-1-1- آزمایش برون کشی محلی 42

2-7-1-2- تحلیل نظری نتایج آزمایش برون کشی 42

2-7-1-3- تحلیل نتایج 43

2-7-1-4- ضریب اصطکاک ظاهری سطح مشترک 44

2-7-1-5- سختی برشی سطح مشترک 46

2-7-2- تعیین پارامترهای سطح مشترک در آزمایشگاه 46

2-7-2-1- آزمایش برون‌کشی 47

2-7-2-2- آزمایش برش مستقیم در مقیاس بزرگ 48

فصل سوم: کاربرد نرم‌افزار *PLAXIS* در بررسی مسائل مربوط به پایداری شیروانی خاکی مسلح

3-1- روش اجزاء محدود 52

3-1-1- مقدمه 52

3-1-2- آنالیز شیروانی خاکی مسلح به روش اجزاء محدود 54

3-1-2-1- آنالیز خاک مسلح با روش اجزاء محدود- نمایش گسسته (DFEM) 55

3-2- نرم‌افزار PLAXIS 56

3-2-1- دلایل انتخاب نرم‌افزار PLAXIS برای انجام تحقیق 56

3-2-2- مقدمه‌ای از نرم‌افزار PLAXIS 58

3-2-3- معرفی داده‌های ورودی 59

3-2-3-1- انتخاب نوع مدل 59

3-2-3-2- انتخاب نوع المان 60

3-2-3-3- واحدهای مورد استفاده 61

3-2-3-4- رسم شکل‌هندسی سازه 61

3-2-3-5- تعیین خصوصیات مصالح 62

3-2-3-5-1- مدل خاک سخت‌شونده 62

3-2-3-6- شرایط مرزی 63

3-2-3-7- شبکه‌بندی 63

عنوان	صفحه

3-2-3-8- تعریف شرایط اولیه	65
3-2-4- مرحله‌ی محاسبات	65
3-2-5- داده‌های خروجی	67
3-2-6- نکات مهم در نرم‌افزار PLAXIS	68
3-2-7- فلوچارت نرم‌افزار PLAXIS	69
فصل چهارم: آنالیز پایداری شیروانی خاکی مسلح	
4-1- مقدمه	72
4-2- بررسی صحت مدل‌سازی های انجام شده	72
4-2-1- شیب‌های غیرمسلح	72
4-2-2- شیب‌های مسلح	74
4-3- خصوصیات شیروانی خاکی مسلح	75
4-4- هندسه مدل	77
4-5- بررسی پارامترها	78
4-5-1- بررسی اثر سختی کششی تسلیح	79
4-5-2- بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح	83
4-5-3- بررسی اثر زاویه‌ی شیب خاکریز	87
4-5-4- بررسی اثر طول لایه‌های تسلیح	91
4-5-5- بررسی اثر زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق	95
4-5-6- بررسی اثر ارتفاع شیب	99
4-5-7- بررسی اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	103
4-5-8- بررسی اثر وزن مخصوص خشک خاک	107
4-5-9- بررسی اثر زاویه‌ی شیب خاکریز و سختی کششی تسلیح	111
4-5-10- بررسی اثر زاویه‌ی شیب خاکریز و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	112
4-5-11- بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح و سختی کششی تسلیح	114
4-5-12- بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	115
4-5-13- بررسی اثر سختی کششی تسلیح و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	117
4-5-14- بررسی اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و ارتفاع خاکریز	118

عنوان	صفحه

4-5-15- بررسی اثر زاویه‌ی شیب خاکریز و ارتفاع خاکریز 120

4-5-16- بررسی اثر تعداد لایه‌های تسلیح و ارتفاع خاکریز 121

4-5-17- بررسی اثر زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و ارتفاع خاکریز 122

4-5-18- بررسی اثر سختی کششی تسلیح و ارتفاع خاکریز 124

4-5-19- بررسی اثر زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک 125

4-5-20- بررسی اثر زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و سختی کششی تسلیح 127

4-6- نتایج بدست آمده از تحلیل‌های مختلف 128

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

5-1- نتیجه‌گیری 134

5-2- پیشنهادات 135

منابع 137

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (2-1): انواع سازه‌های خاکی مسلح	11
شکل (2-2): دیوار چوب‌بستی مانستر با اتصالات لغزان	14
شکل (2-3): دیوار مهاربندی شده	15
شکل (2-4): قطعات نیم‌بیضی فلزی برای نمای دیوار "خاک مسلح"	15
شکل (2-5): مدل تیر "هو" برای دیوارهای نردبانی	16
شکل (2-6): نمونه‌های مختلف بکارگیری ژئوتکستایل‌ها در پایداری شیروانی‌های خاکی مسلح	24
شکل (2-7): نمونه‌ای از ژئوتکستایل‌های بافته شده	25
شکل (2-8): نمونه‌ای از ژئوتکستایل‌های بافته نشده	25
شکل (2-9): شیروانی خاکی مسلح شده با ژئوتکستایل	25
شکل (2-10): نمونه‌ای از ژئوگریدها	26
شکل (2-11): روش تولید ژئوگریدها	26
شکل (2-12): نمونه‌ای از ژئونت‌ها	27
شکل (2-13): نمونه‌ای از ژئوکمپوزیت‌ها	29
شکل (2-14): آزمایش برش مستقیم در خاک مسلح	32
شکل (2-15): نمایش عملکرد تسلیح در برش مستقیم	
الف) کرنش‌های کششی و فشار در خاک، ب) مولفه‌های نیروی تسلیح	32
شکل (2-16): کثیرالاضلاع نیروها	34
شکل (2-17): نیروهای وارد بر یک جزء تسلیح در خاک	37
شکل (2-18): رفتار شیروانی خاکی مسلح	39
شکل (2-19): نمای آزمایش برون‌کشی	48
شکل (2-20): نمای آزمایش برش مستقیم	48
شکل (2-21): الف) نمودار نیروی برون‌کشی- جابجایی، ب) آزمایش برون‌کشی	50
شکل (2-22): الف) نمودار تنش برشی در مقابل تنش قائم، ب) آزمایش برش مستقیم	50
شکل (3-1): انواع المان‌های مورد استفاده در نرم‌افزار PLAXIS ، الف) گره‌ها، ب) نقاط تنش	61
شکل (3-2): فلوچارت مراحل ساخت و تعریف یک برنامه توسط نرم‌افزار PLAXIS	70

عنوان	صفحه
شکل (4-1): تغییرات ضریب ایمنی در مقابل زاویه‌ی اصطکاک برای شیب‌های غیرمسلح	73
شکل (4-2): تغییرات ضریب ایمنی در مقابل زاویه‌ی شیب برای شیب‌های غیرمسلح	74
شکل (4-3): شبکه‌بندی تغییرشکل یافته الف) در حالت غیرمسلح ؛ ب) در حالت مسلح	77
شکل (4-4): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها	
الف) سختی کششی تسلیح برابر با KN/m 100 ؛ ب) سختی کششی تسلیح برابر با KN/m 1000؛	
ج) سختی کششی تسلیح برابر با KN/m 2500 ؛ د) سختی کششی تسلیح برابر با KN/m 5000.	81
شکل (4-5): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به سختی کششی تسلیح:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	82
شکل (4-6): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها با:	
الف) تعداد لایه تسلیح برابر با 10 ؛ ب) تعداد لایه تسلیح برابر با 15؛	
ج) تعداد لایه تسلیح برابر با 20 ؛ د) تعداد لایه تسلیح برابر با 25.	85
شکل (4-7): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به تعداد لایه تسلیح:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	86
شکل (4-8): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) زاویه‌ی شیب برابر با 45 درجه ؛ ب) زاویه‌ی شیب برابر با 56/3 درجه؛	
ج) زاویه‌ی شیب برابر با 63/4 درجه ؛ د) زاویه‌ی شیب برابر با 71/5 درجه.	89
شکل (4-9): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به زاویه‌ی شیب:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	90
شکل (4-10): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) طول لایه‌ی تسلیح برابر با 3 متر ؛ ب) طول لایه‌ی تسلیح برابر با 6 متر؛	
ج) طول لایه‌ی تسلیح برابر با 9 متر ؛ د) طول لایه‌ی تسلیح برابر با 12 متر.	93
شکل (4-11): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به طول لایه‌ی تسلیح:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	94
شکل (4-12): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) زاویه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح نسبت به افق برابر با صفر درجه؛	
ب) زاویه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح نسبت به افق برابر با 5 درجه؛	
ج) زاویه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح نسبت به افق برابر با 10 درجه؛	
د) زاویه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح نسبت به افق برابر با 15 درجه.	97
شکل (4-13): تغییرات پارامترهای زیر در مقابل زاویه‌ی قرارگیری لایه‌ی تسلیح نسبت به افق:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	98

عنوان	صفحه
شکل (4-14): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) ارتفاع شیب برابر با 5 متر ؛ ب) ارتفاع شیب برابر با 7/5 متر؛	
ج) ارتفاع شیب برابر با 10 متر ؛ د) ارتفاع شیب برابر با 12/5 متر.	101
شکل (4-15): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به ارتفاع خاکریز:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	102
شکل (4-16): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر با 25 درجه ؛ ب) زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر بـا 30 درجـه؛	
ج) زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر با 35 درجه؛ د) زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر با 40 درجه.	105
شکل (4-17): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	106
شکل (4-18): شبکه‌بندی تغییرشکل‌یافته در شیب‌ها:	
الف) وزن مخصوص خشک خاک برابر با $12/5\ KN/m^3$؛ ب) وزن مخصوص خشک خاک برابر با $15\ KN/m^3$؛	
ج) وزن مخصوص خشک خاک برابر با $17/5\ KN/m^3$؛ د) وزن مخصوص خشک خاک برابر با $20\ KN/m^3$.	109
شکل (4-19): تغییرات پارامترهای زیر نسبت به وزن مخصوص خشک خاک:	
الف) ضریب ایمنی؛ ب) جابه‌جایی نهایی؛ ج) حداکثر جابه‌جایی قائم؛ د) حداکثر جابه‌جایی افقی؛	
هـ) حداکثر کرنش برشی؛ ی) حداکثر تنش موثر.	110
شکل (4-20): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی شیب خاکریز و سختی کششی تسلیح	112
شکل (4-21): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی شیب خاکریز و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	113
شکل (4-22): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به تعداد لایه‌های تسلیح و سختی کششی تسلیح	115
شکل (4-23): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به تعداد لایه‌های تسلیح و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	116
شکل (4-24): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به سختی کششی تسلیح و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	118
شکل (4-25): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و ارتفاع خاکریز	119
شکل (4-26): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی شیب خاکریز و ارتفاع خاکریز	121
شکل (4-27): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به تعداد لایه‌های تسلیح و ارتفاع خاکریز	122
شکل (4-28): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و ارتفاع خاکریز	123
شکل (4-29): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به سختی کششی تسلیح و ارتفاع خاکریز	125
شکل (4-30): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک	126
شکل (4-31): تغییرات ضریب ایمنی نسبت به زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های تسلیح نسبت به افق و سختی کشـشی تسلیح	128

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (4-1): طول لایه‌های تسلیح	75
جدول (4-2): ویژگی‌های شیروانی خاکی مسلح	76
جدول (4-3): تغییر پارامترهای مختلف در شیروانی خاکی غیرمسلح و مسلح	77
جدول (4-4): متغیرهای مطالعه شده در مطالعه‌ی پارامتریک شیروانی	78

علائم و تعاریف

متغیرهای موجود در پایان‌نامه	علامت	معادله‌ی ابعادی	واحد
تنش قائم در خاک مسلح	s_n	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
سطح مقطع نمونه	A	L^2	m^2
مولفه‌ی قائم نیروی مسلح‌کننده	N	MLT^{-2}	KN
مولفه‌ی افقی نیروی مسلح‌کننده	S	MLT^{-2}	KN
نیروی مسلح‌کننده	p_r	MLT^{-2}	KN
زاویه‌ی نیروی مسلح‌کننده با خط قائم	q	-	درجه
مقاومت برشی خاک مسلح	t_f	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
مقاومت برشی خاک	p_s	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
زاویه‌ی اصطکاک داخلی موثر	f'	-	درجه
تنش قائم موثر بزرگتر	s'_1	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
تنش قائم موثر کوچکتر	s'_3	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
ضریب رانش مقاوم	k_p	-	1
چسبندگی موثر	c'	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
نیروی کششی در هر لایه‌ی مسلح‌کننده	T	MLT^{-2}	kN
فاصله‌ی لایه‌های خاک مسلح	h	L	m
مقاومت برون کشی مسلح‌کننده	Pp	MLT^{-2}	kN
سطحی از مسلح‌کننده که تنش برشی در آن ایجاد می‌شود	A_f	L^2	m^2
ضریب اصطکاک ظاهری بین خاک و مسلح‌کننده	m	-	1
سطحی از مسلح‌کننده که به عنوان سطح باربر عمل می‌کند	A_n	L^2	m^2
تنش باربری مؤثر	s'_b	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
ضریب چسبندگی	f_b	-	1
ضریب ظرفیت باربری	N_q	-	1
تنش قائم مؤثر	s'_h	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
تفاوت بین نیروهای کششی	dT	MLT^{-2}	kN
ضریب اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده	f	-	1
طول جزء مسلح‌کننده	dL	L	m
اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده	t_f	-	1

متغیرهای موجود در پایان‌نامه	علامت	معادله‌ی ابعادی	واحد
چسبندگی بین مسلح‌کننده و خاک	t_c	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
تنش گیرداری بین مسلح‌کننده و خاک	t_g	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
تنش برشی بین مسلح‌کننده و خاک	t_{rt}	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
زاویه‌ی اصطکاک ظاهری	f_{rt}	-	درجه
چسبندگی ظاهری بین مسلح‌کننده و خاک	C_{rt}	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
طول مدفون مسلح‌کننده	L	L	m
ضخامت مسلح‌کننده	t	L	m
ضریب فشار خاک در حال سکون	k_0	-	1
عرض مسلح‌کننده	b	L	m
ضریب اصطکاک ظاهری	f'	-	1
ضریب اصطکاک طراحی	f_a	-	1
نیروی برون‌کشی نمونه	$\boldsymbol{F}$	MLT^{-2}	KPa
اندازه میانگین المان مش‌بندی	L_c	L	m
ابعاد هندسی خارجی سازه	x_{max}, x_{min} y_{max}, y_{min}	L	m
درشتی عمومی المان مش‌بندی	n_c	-	1
ضریب اطمینان	$S.F$	-	1
پارامتر کاهش یافته‌ی چسبندگی (چسبندگی دستخورده)	C_r	$ML^{-1}T^{-2}$	KPa
پارامتر کاهش یافته‌ی اصطکاک (اصطکاک دستخورده)	f_r	-	درجه

نکاتی در مورد علائم:

1- علامت « ٭» نشان‌دهنده تنش مؤثر است.

2- علامت «-» نشان‌دهنده مقدار میانگین است.

3- یک نقطه در بالای یک نشانه نمایانگر مشتق برحسب زمان است.

4- پیش علامت "d" یا "D" افزایش جزیی یا تغییر را نشان می‌دهد.

فصل اول

کلیـــــات

۱-۱- مقدمه

خاک به عنوان قدیمی‌ترین و پرکاربردترین و در عین حال پیچیده‌ترین مصالح مورد استفاده‌ی بشر و یکی از اجزای سازه‌ای تمام سازه‌های عمرانی (شالوده تمام سازه‌ها)، از دیرباز مورد توجه قرار گرفته است.

از طرفی با توجه به ضعف نسبی خاک نسبت به بسیاری از مصالح موجود، بشر از دیر باز در پی راه‌هایی جهت بالا بردن کیفیت و عملکرد این مصالح بوده است که یکی از این راه‌ها، تقویت خاک با استفاده از خانواده‌ی بزرگ ژئوسنتتیک‌ها می‌باشد. ژئوسنتتیک‌ها با ایفای نقش‌های متفاوت، ضعف‌های موجود در خاک از جمله مقاومت کم، تغییر شکل زیاد، امکان شستگی و فرسایش و ... را جبران می‌کنند [F۱].

خاک‌ها و به خصوص خاک‌های دانه‌ای تحت تنش‌های فشاری، بسیار مقاوم هستند. وقتی این خاک‌ها مسلح می‌شوند، مسلح‌کننده‌ها هم تنش‌های کششی را تحمل می‌کنند و در نتیجه از برآیند آن‌ها یک سازه مرکب که دارای محدوده‌ی وسیعی از مقاومت است، ایجاد می‌شود. همچنین پایداری شیب‌ها یکی از موضوعات مهم در مهندسی عمران است. اهمیت این مسئله را می‌توان از خسارات و تلفات ناشی از زمین لغزه‌ها و حجم وسیع پروژه‌های بزرگ و پرهزینه مانند سدها، جاده‌ها و ... که با شیب سر و کار دارند، پی برد. یکی از اقداماتی که جهت پایدارسازی شیب‌های خاکی انجام می‌گیرد، تکنیک مسلح نمودن خاک می‌باشد. در این تکنیک با قرار گرفتن مسلح‌کننده در خاک، خصوصیات مهندسی خاک بهبود می‌یابد[F۲].

احداث دیوارهای حائل به شکل‌های سنتی و معمولی در کارهای عمرانی یک گزینه پرهزینه محسوب می‌شود. ایده‌ی احداث دیوار یا شیروانی خاکی مسلح در حقیقت راه‌حلی برای اجتناب از احداث دیوارهای حائل به شکل سنتی بوده است. احداث دیوارها و شیروانی‌های خاکی مسلح نیز با اشکال

گوناگون امکان‌پذیر است که در این مورد می‌توان به دیوارهای مسلح با نمای بتنی و شیروانی‌های خاکی مسلح شده با ژئوگرید یا ژئوتکستایل اشاره کرد. در سال‌های اخیر استفاده از این نوع سازه‌ها در کشور پیشرفت زیادی داشته است. هزینه‌ی احداث دیوار یا شیروانی خاکی مسلح در مقایسه با دیوار حایل به شکل سنتی کمتر می‌باشد و از نظر فنی نیز این سازه‌ها عملکرد بهتری نسبت به موارد دیگر از خود نشان می‌دهند. با توجه به اینکه حجم مصالح مورد استفاده در احداث این سازه‌ها زیاد می‌باشد واضح است که ارائه طرح مناسب، موجب صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌ها خواهد شد.

در روند طراحی شیروانی‌های خاکی مسلح استفاده از ضرایب اطمینان در بخش‌های مختلف طراحی از جمله بررسی پایداری داخلی شیروانی رایج است. معمولاً این ضرایب اطمینان به منظور جبران کاستی‌های ناشی از اطلاعات بارگذاری، خواص مصالح و نحوه‌ی اجرای سازه اعمال می‌گردند. ضرایب اطمینان مورد استفاده در طراحی شیروانی‌ها، معمولاً بر مبنای تجربه، سوابق اجرایی و همچنین براساس اهمیت پروژه انتخاب می‌گردد. بدیهی است در صورت وجود خطاهای اندازه‌گیری در تعیین خواص مورد استفاده در شیروانی‌ها و یا خطاهای اجرائی، ضرایب اطمینان به تنهایی پاسخگوی وضعیت پیش آمده نخواهد بود. در این گونه حالات در صورتی‌که خواص مکانیکی اجزای شیروانی کمتر از مقدار واقعی آن‌ها فرض شده باشد، طراحی به صورت دست بالا انجام شده و هزینه اجرای پروژه افزایش می‌یابد [E۱].

۱-۲- مختصری در مورد پروژه

در مهندسی ژئوتکنیک روش‌های متفاوتی برای بهبود خواص مکانیکی خاک به کار برده می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان تثبیت خاک‌ها با افزودن آهک و سیمان، تراکم دینامیکی، پیش بارگذاری و مسلح‌سازی را نام برد. تکنیک تسلیح خاک به عنوان یک روش مفید و اقتصادی برای حل بسیاری از

مسائل عملی در مهندسی ژئوتکنیک نظیر بهبود زمین‌های سست، پایدارسازی شیروانی‌ها، کاهش فشار خاک و بسیاری از موارد دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. خاک مسلح از ترکیب خاک و اجزاء مقاوم در برابر نیروهای کششی به وجود می‌آید. استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در مسلح‌سازی خاک‌ها تکنیکی نسبتاً نو در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد که در دو دهه‌ی اخیر رایج شده است.

از مزایا و معایب شیروانی‌های تقویت شده با ژئوتکستایل یا ژئوگرید، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) مزایا:

۱- این روش، بسیار اقتصادی می‌باشد.

۲- ساخت آن‌ها معمولاً ساده و سریع است و نیاز به نیروی انسانی ماهر و تجهیزات خاص ندارد. از طرفی وجود بسیاری از بخش‌های از پیش ساخته اجازه‌ی ساخت نسبتاً سریع را می‌دهد.

۳- صرفنظر از ارتفاع و طول شیروانی‌ها، شیروانی‌ها در نیاز به نگهداری سازه در حین ساخت (قالب‌بندی و...) مانند آنچه در مورد دیوارهای حائل متداول است، نمی‌باشد.

۴- شیروانی‌های مسلح نسبتاً انعطاف‌پذیر (شکل‌پذیر) می‌باشند و می‌توانند تغییر شکل‌های جانبی بزرگ را تحمل کنند و اختلاف نشست‌های قائم (نشست‌های ناهمگن) بزرگ را بپذیرند. شکل‌پذیری شیروانی‌های مسلح با ژئوسنتتیک، موجب استفاده از ضریب اطمینان پایین‌تر در طراحی ظرفیت باربری، نسبت به سازه‌های صلب متعارف می‌شود.

۵- شیروانی‌های مسلح در برابر بارگذاری زلزله پتانسیل خوبی دارند زیرا شکل‌پذیرند و این جرم خاکی منسجم، خاصیت جذب انرژی ذاتی را نیز دارد.

ب) معایب:

۱- مقاومت ژئوسنتتیک‌ها در اثر ایجاد خسارت احتمالی به آن‌ها در حین اجرا کاهش می‌یابد.

۲- مقاومت ژئوسنتتیک‌ها با گذشت زمان، در تماس با بارها و حرارت خاک کاهش می‌یابد.

۳- ساخت شیروانی‌های مسلح در مناطق خاکبرداری، نیاز به حجم عملیات زیادی دارد.

۴- خاکبرداری از پشت شیروانی‌های مسلح، با محدودیت مواجه است [F۲].

با این حال از آنجا که کاربرد ژئوسنتتیک‌ها نسبتاً نوپا است، لذا آثار زیادی از آن‌ها مانند خزش، پیرشدگی و پایایی (داوم) براساس تجربه‌های عملی شناخته شده نیست. بنابراین عمر کوتاه ژئوسنتتیک‌ها پی‌آمد خطرناک و بزرگی همچون گسیختگی، تعمیرات زیاد و هزینه‌های جایگزینی را دربر دارد.

همچنین باید به این نکته توجه داشت که ژئوسنتتیک‌ها در معرض تابش اشعه‌ی فراءبنفش (نور خورشید) ممکن است به سرعت تنزل پیدا کنند (فرسوده شوند) که باید در انتهای ساخت یک پوشش مناسب، به سطوح خارجی شیروانی که در معرض تابش خورشید می‌باشد، اضافه شود.

همچنین از کاربرد شیروانی‌های مسلح خاکی می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱- ساخت شیروانی‌های جدید در بزرگراه‌ها

۲- جایگزین برای دیوارهای حائل معمولی

۳- تعریض شیروانی‌های موجود در بزرگراه‌ها

۴- ترمیم و تثبیت شیروانی‌های گسیخته شده

۵- ساخت بندهای خاکی دائمی و سازه‌های موقت کنترل سیلاب

۶- ساخت خاکریزهایی با مصالح درشت دانه و ریزدانه

۷- تعریض جاده‌های موقت [F۱].

به طور کلی رفتار یک سازه خاکی مسلح را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف بررسی نمود که دو دیدگاه زیر از مهم‌ترین دیدگاه‌ها می‌باشند:

۱- در دیدگاه اول، هدف بررسی پایداری داخلی و خارجی سازه خاکی مسلح است. در این حالت، شرایط گسیختگی و ضریب اطمینان پایداری سازه خاکی مسلح نظیر شیروانی، تعیین می‌گردد.