



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکز

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: خاک و پی

با عنوان:

تعیین پایداری گودها و نشست زمین مجاور گودهای مهار شده با سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار

استاد راهنما :

دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور :

دکتر محمدفرید آستانه

نگارنده:

امیرمحمد مرآتی ۸۹۰۶۶۹۹۶۳۰۰

تابستان ۹۳



چکیده

روش‌های مختلف محاسباتی و تحلیل برای بدست آوردن پایداری شیروانی‌ها و استفاده از سیستم‌های پایدارساز در گودها، بنا به نحوه رویکرد تئوری این روش‌های محاسباتی در حل مسائل و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر، یکی از مسائلی است که مورد اقبال فراوان از سوی محققین قرار گرفته است.

در این تحقیق روش تحلیل حدی در پایداری شیروانی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و فرضیات و تئوری‌های استفاده شده در آن تشریح شده است. در این راستا روش اجزا محدود صلب با استفاده از تحلیل حدی بررسی گردیده که در آن از حل ریاضیاتی قدرتمند برنامه‌ریزی یا بهینه‌سازی خطی، برای بدست آوردن نتایج بهینه ضریب بار حدی استفاده گردیده، سپس عملکرد این روش با شبیه سازی تست‌های عددی مورد صحت سنجی و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نرم‌افزار حالت حدی بر مبنای روش تحلیل حدی معرفی گردیده و روش بهینه‌سازی طرح ناپیوستگی ارائه شده در این نرم‌افزار بررسی شده، سپس عملکرد آن با داده‌های میدانی ارزیابی گردیده است.

روش تحلیل حدی به جهت رقابت آن با روش تعادل حدی در بررسی مسائل پایداری شیب‌ها با استفاده از سیستم‌های پایدارساز از جمله میخ‌کوبی و زمین مهار و ترکیب آنها، همچنین توسعه روزافزون نرم‌افزار تجاری تحلیل حدی بر اساس آن، مورد توجه محققین و طراحان است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

کلید واژه: تحلیل حدی، اجزا محدود صلب، بهینه‌سازی خطی، پایداری شیب، سیستم

ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار دیواره نگهبان.

عنوان

صفحه

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱- پیش گفتار.....	۲
۲-۱- هدف تحقیق.....	۳
۳-۱- روش تحقیق.....	۳
۴-۱- ساختار پایان نامه.....	۴
فصل ۲: ادبیات فنی روش تحلیل حدی.....	۵
۱-۲- مقدمه.....	۶
۲-۲- روش خط - لغزش:.....	۷
۱-۲-۲- تفسیر روش خط - لغزش:.....	۷
۳-۲- روش تعادل حدی:.....	۹
۱-۳-۲- محدودیت‌های روش تعادل حدی.....	۱۰
۴-۲- مفاهیم پایه پلاستیسیته و گسیختگی.....	۱۱
۱-۴-۲- تغییر شکل تسلیم و گسیختگی.....	۱۱
۲-۴-۲- شرایط کرنش مسطح.....	۱۳
۳-۴-۲- نرم شوندگی و پلاستیسیته کامل.....	۱۳
۴-۴-۲- تحلیل‌های حالت گسیختگی.....	۱۵
۱-۴-۴-۲- شرط تسلیم مور- کولمب.....	۱۵
۲-۴-۴-۲- نرخ کرنش و سرعت.....	۱۷
۳-۴-۴-۲- قانون جریان و تابع پتانسیل پلاستیک.....	۱۸
۴-۴-۴-۲- قائم بودن بردار نرخ کرنش و اصل هم محور بودن.....	۲۰
۵-۴-۴-۲- کرنش حجمی در مصالح دانه‌ای.....	۲۲
۶-۴-۴-۲- زایل شدن انرژی در برش ساده.....	۲۳
۵-۴-۲- قانون جریان در خاک‌های دانه‌ای در واقعیت.....	۲۴
۵-۲- مقدمه‌ایی بر تحلیل‌های حدی:.....	۲۵
۱-۱-۵-۲- روش تحلیل حدی:.....	۲۶
۲-۱-۵-۲- راه حل‌های کران بالا و پایین.....	۲۷
۳-۱-۵-۲- مفهوم حل خط - لغزش:.....	۳۰
۲-۵-۲- مفاهیم پایه در روش تحلیل حدی.....	۳۳
۱-۲-۵-۲- معیار تسلیم در روش تحلیل حدی.....	۳۱
۲-۲-۵-۲- اصل هیل.....	۳۲
۳-۲-۵-۲- اصل نرمالیده و اعتبار آن در خاک و سنگ.....	۳۳
۴-۲-۵-۲- میدان‌های تنش و سرعت قابل قبول.....	۳۵

۳۶	۵-۲-۵-۲- فرضیه تغییر شکل‌های کوچک و روابط کار مجازی.....
۳۸	۳-۵-۲- قضایای تحلیل حدی.....
۴۵	۴-۵-۲- تحلیل حدی اجزا محدود.....
۴۵	۶-۲- پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه پایداری شیب با روش تحلیل حدی.....
۴۵	۲-۶-۱- ژانگ و لنگزی (۱۹۹۳).....
۴۶	۲-۶-۲- ژانگ (۱۹۹۹).....
۴۷	۲-۶-۳- کیم، سالگادو و لی (۲۰۰۲).....
۴۸	۲-۶-۴- چن، یین و لی (۲۰۰۴).....
۴۹	۲-۶-۵- لیو، ژائو (۲۰۱۳).....
۵۰	۲-۷- پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه سیستم‌های ترکیبی.....
۵۰	۲-۷-۱- بررسی رفتار مهاری در یک سیستم ترکیبی.....
۵۳	۲-۷-۲- مدل سازی عددی برای پیش‌بینی تغییر شکل‌های دیوار مرکب.....
۵۸	فصل ۳: تحلیل حدی پایداری شیب.....
۵۹	۳-۱- مقدمه‌ای بر اجزا محدود صلب.....
۶۱	۳-۲- فرضیات انجام شده برای حل و گسسته سازی عددی در اجزا محدود صلب.....
۶۲	۳-۳- معادلات سازگاری مربوط به میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی:.....
۶۶	۳-۴- معادلات تعادل در المان صلب.....
۶۸	۳-۵- معیار تسلیم و قانون جریان برای مکانیسم‌های انتقالی و چرخشی.....
۶۸	۳-۵-۱- مکانیزم لغزشی بین دو المان صلب:.....
۶۹	۳-۵-۲- مکانیزم چرخشی بین دو المان صلب:.....
۷۱	۳-۵-۳- قانون جریان همبسته.....
۷۳	۳-۶- برنامه‌ریزی ریاضیاتی مسئله.....
۷۵	۳-۶-۱- بهینه‌سازی خطی و الگوریتم نقطه درونی.....
۷۶	۳-۶-۲- روش نقطه درونی.....
۷۹	۳-۶-۲- بهینه‌سازی خطی مسئله تحلیل حدی بر اساس اجزا محدود صلب:.....
۸۰	۳-۶-۲-۱- تعریف مسئله اولیه بهینه‌سازی خطی برای حالت سینماتیکی مسئله:.....
۸۱	۳-۶-۲-۲- تعریف مسئله دوگان بهینه‌سازی خطی برای حالت استاتیکی مسئله:.....
۸۲	۳-۷- بررسی و صحت سنجی الگوریتم تدوین شده.....
۸۲	۳-۷-۱- تشریح مسئله.....
۸۳	۳-۷-۲- مش‌بندی مسئله مورد بررسی.....
۸۵	۳-۷-۳- نحوه محاسبه ضریب اطمینان.....
۸۸	۳-۷-۴- میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی.....
۸۹	۳-۷-۵- جمع‌بندی و دستاوردهای روش معرفی شده.....
۹۰	فصل ۴: تحلیل حدی شیروانی مسلح شده با سیستم ترکیبی توسط نرم افزار.....
۹۱	۴-۱- مقدمه : مقایسه روش تحلیل حدی و تعادل حدی.....

۹۲	۴-۲- تحلیل حدی اجزا محدود و پیدایش روش بهینه‌سازی طرح ناپیوستگی.....
۹۴	۴-۳- بهینه‌سازی طرح ناپیوستگی.....
۹۷	۴-۴- اصول پایه.....
۹۹	۴-۵- سازگاری کرنش‌ها.....
۱۰۲	۴-۶- ناهمبستگی در قانون جریان و قیود سینماتیکی.....
۱۰۲	۴-۷- پارامترهای به کار رفته در مدل سازی نرم افزار.....
۱۰۳	۴-۷-۱- مصالح مور- کولمب.....
۱۰۴	۴-۷-۲- مصالح با قطع کششی یا فشاری.....
۱۰۵	۴-۷-۳- مصالح صلب.....
۱۰۶	۴-۷-۴- مصالح با المان‌های مهندسی.....
۱۰۹	۴-۷-۵- مصالح ترکیبی.....
۱۱۰	۴-۷-۵-۲- مدلسازی مصالح زهکشی نشده با مقدار قطع کششی صفر.....
۱۱۰	۴-۷-۵-۳- مدل سازی مصالح با مدل رفتاری غیرخطی و سطح تسلیم محدب و گوژ.....
۱۱۰	۴-۷-۵-۴- مدل سازی مصالح با عدم قطعیت در پارامترهای مکانیکی آنها.....
۱۱۱	۴-۷-۶- خاک مسلح.....
۱۱۲	۴-۷-۷- مسائل اندرکنش سازه و خاک.....
۱۱۳	۴-۷-۸- مصالح از پیش تعریف شده برای تسلیح.....
۱۱۳	۴-۷-۸-۱- میخ با قابلیت تسلیم در مفصل.....
۱۱۳	۴-۷-۸-۲- میخ صلب.....
۱۱۴	۴-۷-۸-۳- میخ قابل انعطاف.....
۱۱۴	۴-۷-۸-۴- سپری صلب.....
۱۱۵	۴-۷-۸-۵- سپری با قابلیت تسلیم شدگی در مفصل.....
۱۱۵	۴-۷-۹- مسلح سازی با ژئوتکستایل با قابلیت تسلیم شدگی در مفصل.....
۱۱۵	۴-۷-۱۰- توصیه نرم‌افزاری.....
۱۱۶	۴-۸- حالات حدی در طراحی دیواره‌های خاکی.....
۱۱۸	۴-۹- تحلیل دیواره با سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار.....
۱۲۱	۴-۹-۲- بررسی تغییرات ضریب اطمینان سیستم ترکیبی در مقابل چسبندگی.....
۱۲۳	۴-۹-۳- بررسی تغییرات ضریب اطمینان سیستم ترکیبی در مقابل زاویه اصطکاک داخلی خاک.....
۱۲۴	۴-۹-۴- بررسی تاثیر چسبندگی خاک و زاویه نصب سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار بر روی ضریب اطمینان.....
۱۲۷	۴-۹-۵- بررسی تاثیر زاویه اصطکاک خاک و زاویه نصب سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار بر روی ضریب اطمینان.....
۱۲۹	۴-۹-۶- تاثیر الگوی میخ‌کوبی در سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار بر روی چگالی تسلیح.....
۱۳۲	۴-۹-۷- تاثیر الگوی میخ‌کوبی در دیواره با سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار بر روی مقادیر نشست زمین مجاور گودبرداری و تغییر مکان‌ها.....

۴-۹-۸- تاثیر زاویه نصب سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار در جابجایی های دیواره و نشست زمین مجاور	۱۳۶
۴-۹-۹- بررسی اثر تغییر زاویه نصب زمین مهار بر روی تغییر مکان های قائم دیواره با سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۳۸
۴-۹-۱۰- اثر ارتفاع نصب زمین مهار بر روی تغییر مکان های قائم دیواره با سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۳۹
فصل ۵: نتایج و پیشنهادات	۱۴۱
۵-۱- نکات مهم کاربردی روش مورد بررسی	۱۴۲
۵-۲- نتایج به کارگیری روش تحلیل حدی مرز بالا و مرز پایین	۱۴۳
۵-۳- نتایج به کارگیری سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۴۴
۵-۴- دستاوردها	۱۴۶
۵-۵- پیشنهادات	۱۴۶
فصل ۶: مراجع	۱۴۷

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): نمودار تنش - کرنش برای حالت نرم شونده و غیر سخت شونده.....	۱۴
شکل (۲-۲): رفتار تنش - کرنش ماده در حالت یک بعدی.....	۱۵
شکل (۳-۲): قانون عمود بودن بردار کرنش خمیری بر سطح تسلیم [۱].....	۲۱
شکل (۴-۲): نمونه‌های تحت برش ساده و مولفه‌های سرعت زایل شدن انرژی در تسلیم پلاستیک [۱].....	۲۳
شکل (۵-۲): موقعیت تنش در داخل و روی سطح تسلیم [۴].....	۳۳
شکل (۶-۲): دو دسته مستقل در روابط کار مجازی [۱].....	۳۷
شکل (۷-۲): پدیده تخریب پلاستیک و تعریف بار حدی [۴].....	۳۹
شکل (۸-۲): مقطع سطح تسلیم در صفحه Π ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$).....	۴۴
شکل (۹-۲): نیروهای وارده بر المان در اجزا محدود صلب [۹].....	۴۷
شکل (۱۰-۲): مدل استفاده شده در تحقیقات کیم و همکاران [۱۴].....	۴۸
شکل (۱۱-۲): مقطع دیوار مهاربندی شده [۵].....	۵۱
شکل (۱۲-۲): تغییر مکان سر مهاری به ازای بار وارده [۵].....	۵۱
شکل (۱۳-۲): توزیع نیروی کششی در طول قسمت پیوندی مهار [۵].....	۵۲
شکل (۱۴-۲): توزیع تنش برشی در طول قسمت پیوندی مهار [۵].....	۵۲
شکل (۱۵-۲): پروفیل تغییر مکان جانبی دیوار [۵].....	۵۳
شکل (۱۶-۲): مقطع دیوار ترکیبی [۶].....	۵۴
شکل (۱۷-۲): نشست سطح زمین در بالای گود [۶].....	۵۶
شکل (۱۸-۲): تغییر مکان جانبی دیواره گود [۶].....	۵۶
شکل (۱-۳): میدان سرعت ناپیوسته قابل قبول سینماتیکی در سطح مشترک بین دو المان صلب [۱۲].....	۶۳
شکل (۲-۳): بردارهای تنش وارده بر روی المان صلب [۱۲].....	۶۶
شکل (۳-۳): معیار گسیختگی واژگونی بلوک [۱۲].....	۷۰
شکل (۴-۳): قانون جریان همبسته و تغییرات سرعت مماسی و چرخشی [۱۲].....	۷۲
شکل (۵-۳): مجموعه قیود، محدوده جواب شدنی، نقطه شروع الگوریتم بهینه سازی مسئله خطی و جواب بهینه در الگوریتم سیمپلکس.....	۷۶
شکل (۶-۳): نحوه انتخاب نقطه شروع حلقه تکرار در روش نقطه درونی.....	۷۷
شکل (۷-۳): مسیر طی شده از نقطه شروع واز میان محدوده شدنی جواب‌ها تا نقطه بهینه در نقطه درونی.....	۷۸
شکل (۸-۳): مدل شیب ناهمگن با سه لایه خاک (بر گرفته از KIM ET AL. 2002 [۱۴]).....	۸۳

۸۴	شکل (۳-۹): مش‌بندی انجام شده برای شیب ناهمگن با نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS
۸۶	شکل (۳-۱۰): تعیین ضریب اطمینان با بهینه‌سازی ضریب بار حدی برای مسئله پایداری شیب ناهمگن
	شکل (۳-۱۱): مقایسه خط لغزش بدست آمده برای مسئله پایداری شیب ناهمگن با نرم‌افزارهای GEOSTUDIO و
۸۷	LIMITSTATE:GEO
	شکل (۳-۱۲): میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی بدست آمده از تحلیل حدی در مسئله پایداری شیب خاک ناهمگن
۸۸	
۹۴	شکل (۴-۱): تعریف مدل و تکیه‌گاه‌ها [۲۱]
۹۴	شکل (۴-۲): شبکه بندی داخل مدل [۲۱]
۹۵	شکل (۴-۳): به هم پیوستن نقاط داخل مدل و ایجاد سطوح ناپیوستگی [۲۱]
۹۵	شکل (۴-۴): بدست آوردن مکانیزم گسیختگی [۲۱]
۹۵	شکل (۴-۵): ناپیوستگی‌های خطی و غیرخطی محتمل [۲۱]
۹۶	شکل (۴-۶): مکانیزم گسیختگی تشکیل شده از سطح گسیختگی خطی و غیرخطی [۲۱]
۹۶	شکل (۴-۷): تحلیل گوه کولمب برای دیوار حائل وزنی [۱۹]
۹۷	شکل (۴-۸): روش قطعه‌ای [۱۹]
۹۸	شکل (۴-۹): مدل فنداسیون و تشکیل سطوح ناپیوستگی احتمالی [۱۹]
۱۰۰	شکل (۴-۱۰): فنداسیون قرار گرفته بر روی ماسه و رس نرم [۱۹]
۱۰۰	شکل (۴-۱۱): منحنی تنش-کرنش ماسه و رس نرم [۱۹]
۱۰۳	شکل (۴-۱۲): سطح گسیختگی مور-کولمب [۱۹]
۱۰۵	شکل (۴-۱۳): سطح تسلیم با تعریف قطع کششی و خردشدگی فشاری
۱۰۹	شکل (۴-۱۴): تقریب سطح تسلیم محدب با ترکیب چند سطح تسلیم خطی [۱۹]
۱۱۸	شکل (۴-۱۵): الگوی مورد استفاده برای الگوی ترکیبی گود ۱۴ متری [۵]
۱۲۰	شکل (۴-۱۶): سطح گسیختگی بدست آمده از نرم‌افزار GEOSTUDIO
۱۲۰	شکل (۴-۱۷): سطح گسیختگی بدست آمده از نرم‌افزار LIMITSTATE:GEO
	شکل (۴-۱۸): مقایسه سطوح گسیختگی بدست آمده از نرم‌افزارهای GEO SLOPE و LIMITSTATE:GEO در مسئله
۱۲۱	پایداری با سیستم ترکیبی
۱۲۲	شکل (۴-۱۹): تغییرات مقدار ضریب اطمینان نسبت به تغییر چسبندگی با زاویه اصطکاک داخلی ثابت
۱۲۳	شکل (۴-۲۰): تغییرات مقدار ضریب اطمینان نسبت به تغییر زاویه اصطکاک داخلی با چسبندگی ثابت
۱۲۴	شکل (۴-۲۱): سطوح گسیختگی حاصله از دو نرم‌افزار تحلیل حدی و تعادل حدی
	شکل (۴-۲۲): مقادیر ضریب اطمینان در مقابل چسبندگی به ازای زوایای مختلف نصب با زاویه اصطکاک ثابت خاک
۱۲۵	$\varphi = 28$
	شکل (۴-۲۳): مقادیر ضریب اطمینان در مقابل زوایای مختلف نصب به ازای چسبندگی با زاویه اصطکاک ثابت خاک
۱۲۶	$\varphi = 28$

شکل (۴-۲۴): نمودار ضرایب اطمینان در مقابل زوایای اصطکاک داخلی مختلف خاک برای زوایای نصب سیستم ترکیبی با چسبندگی ثابت $C = 17kPa$	۱۲۷
شکل (۴-۲۵): نمودار ضریب اطمینان در مقابل زاویه نصب میخ‌ها با ازای زوایای مختلف با چسبندگی ثابت $C = 17kPa$	۱۲۸
شکل (۴-۲۶): الگوهای بررسی شده برای میخ کوبی در سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار در شرایط یکسان فواصل افقی S_h و عمودی S_v	۱۳۰
شکل (۴-۲۷): سطح گسیختگی بدست آمده از نرم افزار GEOSTUDIO برای الگوی شماره ۴	۱۳۱
شکل (۴-۲۸): مقایسه نشست و بالاآمدگی به وجود آمده بر اساس الگوهای مختلف میخ کوبی در سیستم ترکیبی	۱۳۳
شکل (۴-۲۹): مقایسه تغییر مکان‌های افقی دیواره بر اساس الگوهای مختلف میخ کوبی در سیستم ترکیبی	۱۳۴
شکل (۴-۳۰): مقایسه تغییر مکان‌های قائم دیواره بر اساس الگوهای مختلف میخ کوبی در سیستم ترکیبی	۱۳۴
شکل (۴-۳۱): الگوهای نصب سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۳۷
شکل (۴-۳۲): تغییرات نشست زمین مجاور گود در مقابل فاصله از گودبرداری برای زوایای مختلف نصب سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۳۷
شکل (۴-۳۳): تغییرات نشست زمین مجاور گود بر اثر زوایای مختلف نصب زمین مهار در سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۳۹
شکل (۴-۳۴): تغییرات نشست زمین مجاور برای نصب زمین مهار در ردیف‌های اول تا چهارم در سیستم ترکیبی میخ کوبی و زمین مهار	۱۴۰

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۱-۲): مشخصات مکانیکی خاک محل [۶].....	۵۵
جدول (۲-۲): مشخصات میخ‌ها و مهارها [۶].....	۵۵
جدول (۱-۳): پارامترهای مقاومتی و جرم حجمی لایه‌های خاک مورد بررسی در مسئله پایداری شیب ناهمگن [۱۲].	۸۳
جدول (۲-۳): مقایسه ضرایب اطمینان بدست آمده با روش‌های مختلف برای مسئله پایداری شیب ناهمگن.....	۸۶
جدول (۱-۴): پارامترهای ورودی خاک مدل سازی شده در دو نرم افزار.....	۱۱۸
جدول (۲-۴): المان‌ها و مقادیر به کار رفته برای مدل سازی میخ و زمین مهار در نرم افزار LIMITSTATE:GEO.....	۱۱۹
جدول (۳-۴): المان‌ها و مقادیر به کار رفته برای مدل سازی میخ و زمین مهار در نرم افزار GEOSTUDIO.....	۱۱۹
جدول (۴-۴): مقایسه ضرایب اطمینان بدست آمده برای مسئله سیستم ترکیبی.....	۱۲۱
جدول (۵-۴): تغییرات مقدار ضریب اطمینان نسبت به تغییر چسبندگی.....	۱۲۲
جدول (۶-۴): تغییرات مقدار ضریب اطمینان نسبت به تغییر زاویه اصطکاک داخلی.....	۱۲۳
جدول (۷-۴): مقادیر مختلف ضریب اطمینان در مقابل چسبندگی و زاویه نصب به ازای $\varphi = 28$	۱۲۵
جدول (۸-۴): مقادیر مختلف ضریب اطمینان برای زوایای اصطکاک داخلی در مقابل زوایای نصب سیستم ترکیبی.....	۱۲۷
جدول (۹-۴): مشخصات خاک مورد بررسی برای مدل سازی.....	۱۳۰
جدول (۱۰-۴): مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی المان‌ها.....	۱۳۲
جدول (۱۱-۴): جابجایی‌های حاصل از تحلیل گود الگوی ۱.....	۱۳۵
جدول (۱۲-۴): جابجایی‌های حاصل از تحلیل گود با الگوی شماره ۴.....	۱۳۵

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- پیش گفتار

تعیین پایداری شیب‌های خاکی از مسائل رایج و مهم مهندس مکانیک خاک می‌باشد. به خصوص در نگهداری دیواره‌های نگهبان با استفاده از سیستم‌های مختلف پایداری و مسلح سازی، تعیین ضریب اطمینان پایداری این دیواره‌ها از مسائل روز متخصصین این امر می‌باشد.

روش تحلیل حدی یک ابزار قوی برای بررسی مسائل پایداری در نرم‌افزارها می‌باشد. در این روش با استفاده از تئوری مرز بالا و پایین حدی می‌توان به حل دقیق و جواب قطعی مسئله با دقت بسیار زیاد نزدیک شد. در واقع این روش به جای حل دقیق مسئله با صرف نظر کردن از بعضی معادلات تعادل و سازگاری و ساده سازی در این روابط و معادلات، مرزهای بالا و پایین را تعیین کرده و با نزدیک کردن این دو مرز، جواب دقیق مسئله را بدست می‌آورد.

در دهه اخیر با استفاده از روش تحلیل حدی برای پایداری شیب‌های خاکی مطالعاتی صورت گرفته که در آنها فرضیات مختلفی از جمله در نظر گرفتن نیروهای بین بلوکی برای توده خاک، معرفی اجزا محدود صلب (حالت استاتیکی) جهت حذف کرنش درون المانی و روش‌های تحلیل حدی اجزا محدود برای مدل‌سازی و حل مسائل کرنش صفحه‌ای به کار برده شده است. همچنین حل ریاضیاتی مسئله و به کارگیری روابط خطی یا غیر خطی در معرفی معادلات مسئله نیز از موضوعات چالش برانگیز از ابتدای شروع تحقیقات مربوط به این مبحث بوده که همچنان تا به امروز این چالش پابرجا بوده و نظریه‌ها و تحقیقات مختلف و مفصلی برای ساده سازی معادلات خطی با استفاده از معادلات غیر خطی، از جنبه دقت نتایج، پیچیدگی حل مسئله و توانایی اعمال شروطی به مسئله از جمله شروط مرزی موجود می‌باشد.

۱-۲- هدف تحقیق

هدف از این تحقیق، تحلیل حدی اجزای محدود پایداری شیروانی‌ها و ارزیابی عملکرد آن در یک مسئله ریاضیاتی بهینه‌سازی خطی برای بدست آوردن جواب دقیق بوده. در این راستا، مفاهیم پلاستیسیته خاک به عنوان مقدمه‌ای بر معرفی روش تحلیل حدی بیان شده و پس از توضیح و تشریح مفاهیم تحلیل حدی، روش اجزای محدود استفاده شده توسط این روش تحلیل معرفی گردیده و در ادامه سعی بر همگرایی جواب‌های بدست آمده از حل بهینه‌سازی مسئله گردیده است. همچنین از نرم‌افزار LimitState:GEO نیز که نرم‌افزار حالت حدی بوده و از تئوری مرز بالای تحلیل حدی برای بدست آوردن بار حدی استفاده می‌کند، بهره برده و پس از صحت‌سنجی آن، پایداری شیب با سیستم‌های ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار را توسط این نرم‌افزار مورد بررسی قرار می‌دهد.

۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق سعی شده با بررسی معادلات حاکم بر روش تحلیل حدی و استفاده روش اجزای محدود به صورت مسئله‌ای ناپیوسته، یک مدل برای شبیه‌سازی پایداری شیب توسط نرم‌افزارهای MATLAB و COMSOL Multiphysics به صورت مشترک ساخته شود، و به کمک حل ریاضیاتی بهینه‌سازی خطی با کمک توابع موجود در نرم‌افزار MOSEK برای حل مسائل با ابعاد بزرگ، یک مسئله پایداری شیب مورد بررسی قرار گیرد.

پس از بررسی و آشنایی با مدل مذکور و روش حل مسئله به بررسی نرم‌افزاری حالت حدی، که اساس و روش حل این نرم‌افزار نیز مشابه با روش تحلیلی انجام شده در بخش قبلی است، می‌پردازیم. نرم‌افزار مورد استفاده برای انجام مدل‌سازی عددی این تحقیق، نرم‌افزار LimitState:GEO بوده که تنها نرم‌افزار حالت حدی بر اساس تئوری مرز بالا تحلیل حدی موجود تاکنون می‌باشد. این نرم‌افزار قادر مدل‌سازی انواع مدل‌های خاک و المان‌های مربوطه در زمینه

ژئوتکنیک و مکانیک خاک از جمله المان‌های مسلح سازی مرسوم را در محیطی گرافیکی بسیار ساده در اختیار کاربر قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که صحت سنجی این نرم‌افزار نیز توسط نرم‌افزار حالت حدی GeoStudio برای مدل‌های ارائه شده انجام گردیده است.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

در فصول مختلف این رساله مطالب زیر مطرح گردیده است:

در فصل اول که فصل حاضر می‌باشد به مقدمه اختصاص داده شد و در آن کلیاتی از روش تحلیل حدی، که محور اصلی این تحقیق به جهت رقابت با روش‌های دیگر و لزوم جایگزینی در طراحی می‌باشد، بیان گردید.

فصل دوم به مفاهیم پلاستیسیته برای معرفی تحلیل حدی پرداخته و در ادامه قضایای و فرضیات روش را بررسی می‌نماید.

در فصل سوم به تحلیل حدی پایداری شیب با روش اجزا محدود صلب پرداخته که شامل بخش‌های زیر است:

- بررسی معادلات و فرمول‌بندی مسئله
 - روش حل ریاضیاتی مسئله
 - ارزیابی مدل صحت سنجی مسئله
- فصل چهارم به بررسی تحلیل حدی پایداری شیروانی‌ها با سیستم ترکیبی مسلح سازی خاک پرداخته و شامل بخش‌های زیر است:

- مفاهیم پیش نیاز در نرم‌افزار LimitState:GEO
 - پارامترهای به کار رفته برای تعریف مدل
 - مدل‌سازی عددی سیستم ترکیبی میخ‌کوبی و زمین مهار
- فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات جهت تکمیل و ادامه تحقیق اختصاص یافته است.

فصل ۲: ادبیات فنی روش تحلیل حدی

۲-۱- مقدمه

جهت سهولت و با پیشرفت‌هایی که در تاریخ مطالعات مکانیک جامدات شکل پذیر انجام گرفته است، مسایل مکانیک خاک با دو دیدگاه متفاوت بررسی شده و عملاً به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- مسایل پایداری (برای شرایط گسیختگی)

- مسایل تنش و کرنش (برای شرایط بهره برداری)

مسایل پایداری با شرایط شکست نهایی خاک مرتبط هستند. مسائلی از قبیل ظرفیت باربری و پایداری شیروانی‌ها معمولاً در این دسته قرار می‌گیرند. مهم‌ترین نکته در این نوع مسایل تعیین بارهایی است که موجب شکست در توده خاک می‌شود. حل این مسایل معمولاً با استفاده از تئوری پلاستیک حاصل می‌گردد. از طرفی دیگر مسایل تنش و کرنش همانطور که از نام آن پیداست با تنش و تغییر شکل در خاک سر و کار دارند و شکست خاک در آن‌ها تاثیرگذار نمی‌باشد. تعیین تنش در نقطه‌ای در توده خاک در زیر فونداسیون، یا زیر دیوار حائل، تغییر شکل‌های اطراف تونل‌ها و حفاری‌ها و تمامی مسایل نشست خاک جزء این دسته اند. حل این نوع مسایل با استفاده از یک مدل ساختاری صورت می‌پذیرد که تنش و کرنش را به یکدیگر مرتبط می‌سازد، این مدل ساختاری در خاک‌ها معمولاً الاستیک خطی می‌باشد. اگرچه از مدل‌های الاستو پلاستیک و حتی ویسکو الاستو پلاستیک نیز استفاده می‌گردد.

تئوری الاستیسیته خطی بر مبنای قانون هوک^۱ بنا شده است بطوری که رابطه خطی میان تنش و کرنش وجود دارد. تئوری پلاستیک بر این حقیقت استوار است که یک توده خاک واقعی تا زمانی که میزان تنش به اندازه کافی کوچک باقی بماند، رفتار مکانیکی مطابق با قانون هوک از خود بروز می‌دهد. وقتی که میزان تنش به میزان بحرانی مشخصی رسید، که مقدار تسلیم نام دارد، خاک از

1 Hooke's law

حالت الاستیک خارج شده و وارد حالت جریان پلاستیک می‌شود، که منجر به تغییر شکل‌های پیوسته در میدان تنش ثابت می‌گردد. برای باقی ماندن در حالت جریان پلاستیک، میزان تنش می‌بایست در حد تسلیم باقی بماند ولی نباید از این مقدار تجاوز کند. اگر میزان تنش به کمتر از این مقدار نزول نماید، هر گونه تغییر کرنشی ماهیت الاستیک دارد. [۴]

۲-۲- روش خط - لغزش:

جاری شدن جریان پلاستیک در خاک زمانی رخ می‌دهد که تنش‌ها در منطقه‌ای به اندازه کافی بزرگ زیر فونداسیون، به شرایط تسلیم برسند. در نتیجه در خاک زیر فونداسیون به میزان نامحدودی جریان پلاستیک ایجاد می‌گردد. در لحظه وقوع جریان پلاستیک، شرایط تعادل و تسلیم در منطقه‌ی نزدیک فونداسیون ارضاء شده‌اند. برای خاک‌ها، معیار مور - کولمب با معادلات تعادل، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل به عنوان تعادل پلاستیک در این منطقه حاصل می‌گردد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی تنش، این مجموعه معادلات دیفرانسیل می‌تواند برای بررسی کردن تنش زیر فونداسیون یا پشت دیوار حائل در لحظه وقوع جریان پلاستیک مورد استفاده قرار گیرد. برای حل مسایل مشخص، انتقال این مجموعه معادلات به مختصات منحنی الخط ساده می‌باشد. بطوری که جهات در هر نقطه در منطقه تسلیم بر جهات‌های شکست یا صفحه‌ی لغزش منطبق می‌باشد. این جهات‌های لغزش خط‌های لغزش و شبکه ایجاد شده میدان خط - لغزش نامیده می‌شوند. [۴]

۲-۲-۱- تفسیر روش خط - لغزش:

یکی از نقاط ضعف این روش در نظر نگرفتن رابطه تنش - کرنش در خاک است. با توجه به مکانیک جامدات شکل‌پذیر، این رابطه به عنوان یک شرط برای یک حل معتبر باید ارضاء گردد. اما در حل خط - لغزش تنها تعادل و شرایط تسلیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که در بیشتر

مسایل تجربی، شرایط مرزی شامل تنش‌ها و نرخ جابجایی‌ها و پیش بینی حالت استاتیکی می‌باشند و روابط تنش - کرنش برای تعیین حل باید در نظر گرفته شوند.

در حالت کلی، در حل خط - لغزش، تنها قسمتی از خاک زیر فونداسیون یا پشت دیوار حائل به عنوان منطقه تعادل پلاستیک فرض می‌شوند. حل، شامل ساختن میدان خط - لغزش در منطقه می‌باشد، بطوری که تمامی شرایط مرزی تنش را ارضاء نماید و مستقیماً به منطقه وابسته باشد، همانطور که در واقعیت به تعادل و شرایط تسلیم در تمامی نقاط داخل منطقه وابسته است. میدان تنشی که حاصل می‌گردد به عنوان میدان تنش جزئی شناخته می‌شود. توزیع تنش، خارج از محدوده میدان تنش جزئی تعیین نمی‌گردد برای اینکه حل قابل قبول باشد، واضح است که باید حداقل بتواند نشان دهد توزیع تنشی در مناطق تسلیم نشده وجود دارد که با میدان تنش جزئی در تعادل است و همچنین در هیچ نقطه‌ای از معیار تسلیم فراتر نمی‌رود. میدان تنشی که گسترش داده می‌شود میدان تنش گسترده نام می‌گیرد. میدان تنش گسترده توزیع تنش را در کل محیط وابسته تعیین می‌کند. حتی اگر چنین میدان تنشی را بتوان یافت، تضمینی برای اینکه این حل تنش گسترده جواب صحیح را ارائه دهد وجود ندارد. خوشبختانه، جواب این سوال مهم در نظریه‌های تحلیل حدی موجود است. وقتی که در بخش بعدی قوانین دقیق تحلیل حدی ارائه می‌گردند، مشاهده خواهد گردید که شرایط مرز پایین تحلیل حدی دقیقاً در میدان تنش گسترده نیاز می‌باشند.

توزیع تنش جزئی در حل خط - لغزش برای حل مرز پایین قابل قبول است، نیاز است که روابط تنش - کرنش برای کنترل همخوانی تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در مناطق ساخته شوند. اگر حل درست باشد، حالت تغییر مکان همراه با تغییر شکل‌های پیوسته سازگار است و شرایط مرزی جابجایی و مثبت بودن نرخ کار پلاستیک را در همه جا ارضاء می‌کند. در این شرایط حل بدست آمده در بالا یک مرز بالا برای میزان تخریب با توجه به قانون مرز بالای تحلیل حدی و بنابراین برابر جواب صحیح می‌باشد. بحث‌های تکمیلی بر روی این مورد در بخش‌های آتی در قوانین تحلیل حدی ارائه می‌گردد.

در اینجا؛ لازم است که در نظر داشته باشیم میدان تنش جزئی که از معادلات خط - لغزش

بدست آمد؛ الزاماً نه حل صحیح است و نه مشخص است که مرز بالا یا پایین است. در واقع اگر میدان‌های سرعت یا جابجایی سازگار بتوانند با فرض یک روابط تنش - کرنش به یک میدان تنش جزئی مربوط شوند، حل خط - لغزش یک حل مرز بالا می‌باشد و در عین حال، اگر توزیع تنش جزئی در منطقه ی پلاستیک بتواند به کل جسم تعمیم داده شود و معادلات تعادل، شرایط تسلیم و شرایط تنش‌های مرزی هم ارضاء گردند، حل خط - لغزش یک حل مرز پایین و در عین حال یک جواب صحیح برای مساله می‌باشد. [۴]

۲-۳- روش تعادل حدی:

روش تعادل حدی از دیرباز برای بدست آوردن حل‌های تقریبی برای مسایل پایداری در مکانیک خاک استفاده شده است. این روش را می‌توان روشی تقریبی برای تشکیل میدان خط - لغزش دانست و بطور عمومی شامل سطح تسلیمی فرضی از انواع سطح تسلیم‌های ساده، صفحه‌ای، دایره‌ای و حلزونی می‌باشد. با این فرض، هر مساله پایداری تبدیل به مساله پیدا کردن خطرناک‌ترین حالت شکست یا سطح لغزش از میان سطوح انتخاب شده می‌گردد. اگر چه این حل ممکن است کاملاً دقیق نباشد ولی اغلب اوقات جواب‌های قابل قبولی حاصل می‌گردد. در این روش، همچنین لازم است که فرضیاتی کافی درباره توزیع تنش در سطح تسلیم ارایه شود. به عنوان مثال؛ معادلات کلی تعادل ناشی از تنش‌ها؛ باید برای یک مساله مفروض نوشته شوند. لذا، این روش ساده شده حل مسایل مختلف را با روش استاتیکی ساده میسر می‌نماید. [۴]

در اینجا لازم به ذکر است که هیچ یک از معادلات مکانیک خاک در هیچ نقطه داخل یا خارج سطح تسلیم صریحاً ارضاء نمی‌گردند. از آنجا که توزیع تنش داخل یا خارج سطح تسلیم بطور دقیق تعیین نمی‌گردد، بطور قطع نمی‌توان اذعان داشت که توزیع تنش قابل قبول مطابق قوانین مرز پایین تحلیل حدی وجود دارد. توزیع تنش قابل قبول، توزیع تنشی است که تعادل، شرایط مرزی تنش‌ها و شرایط تسلیم را ارضاء نماید. اگرچه روش تعادل حدی از فلسفه اولیه مرز بالای تحلیل

حدی استفاده می‌کند، یعنی سطح تسلیمی فرض می‌شود و جواب حداقل جستجو می‌گردد، ولی این روش دقیقاً با ملزومات روش مرز بالا را بطور دقیق رعایت نمی‌نماید و نمی‌توان جواب آن را به عنوان مرز بالا تلقی کرد. این روش بطور اساسی توجهی به انرژی جنبشی خاک ندارد و شرایط تعادل تنها از جهت حدی ارضاء می‌گردند.

واضح است که جواب حاصله از روش تعادل حدی الزاماً جواب مرز بالا یا مرز پایین تحلیل حدی نیست. ولیکن، هر مرز بالایی از تحلیل حدی قطعات یک حل تعادل حدی می‌باشد. [۴]

۲-۳-۱- محدودیت‌های روش تعادل حدی

تعادلی که معادلات تعادل را ارضا می‌کنند (روش‌های کامل^۱) عموماً دقیق‌تر از روش‌هایی هستند که معادلات تعادل را ارضا نمی‌کنند (روش‌های ناقص^۲) و به همین دلیل این روش‌ها در طراحی ترجیح داده می‌شوند. اما، روش‌های ناقص اغلب به اندازه کافی دقیق بوده و برای بیشتر کاربردهای عملی و تحلیل‌های مقدماتی مفید هستند. در تمامی روش‌های مربوط به تعادل حدی ضریب اطمینان به دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک اعمال می‌شوند. از ضعف‌های روش تعادل حدی می‌توان موارد زیر را نام برد: [۱]

- ۱- در طول سطح احتمالی لغزش فرض بر ثابت بودن ضریب اطمینان است. اگرچه در حقیقت این مقدار در تمام طول سطح یکسان نیست، اما مقدار میانگین محاسبه شده با فرض ثابت بودن ضریب اطمینان مقدار درستی را برای پایداری شیروانی‌ها در خاک‌های شکل‌پذیر به دست می‌دهد. برای شیروانی‌ها با خاک ترد، فرض ثابت بودن آن در طول سطح لغزش باعث

1. Complete Method
2. Incomplete Method

- خواهد شد ضریب اطمینان بیش از مقدار واقعی بدست آید.
- ۲- ویژگی های تنش- کرنش به طور صریح در نظر گرفته نمی شوند. اگر خاک دارای رفتار تنش- کرنش ترد باشد، آنگاه به محض بسیج شدن مقاومت برشی حداکثر، تنش در این نقطه گسیختگی کاهش یافته و تنش ها به نقطه مجاور انتقال می یابند، که این باعث گسیختگی می شود. در حالت های شدید این منجر به گسیختگی پیشرونده شده و باعث فروریختن شیروانی می شود.
- ۳- توزیع تنش اولیه درون شیروانی به طور صریح در نظر گرفته نشده اند.
- ۴- نیروهای قائم منفی یا نیروهای بزرگ نامعقول در طول کف قطعه ها ممکن است تحت شرایط خاصی از محاسبات بدست آیند.
- ۵- در بعضی شرایط خاص راه حل های سعی و خطا و چرخه ای ممکن است همگرا نشوند. [۱]

۲-۴- مفاهیم پایه پلاستیسیته^۱ و گسیختگی^۲

۲-۴-۱- تغییر شکل تسلیم و گسیختگی

سیستم نیروهای سطحی و حجمی وارده بر یک جسم، باعث تغییر در تنش ها و کرنش های داخل آن خواهد شد. این تغییرات در کرنش معمولاً قسمتی الاستیک است که تغییر شکلی برگشت پذیر است، اما پس از به تسلیم رسیدن کرنش پلاستیک، تغییر شکلی غیرقابل بازگشت، در ماده بوجود می آید. با افزایش نیروی اعمالی به جسم، تنش در بخش هایی از جسم به حداکثر مقدار

1 . Plasticity

2 . Collapse

مقاومتی ماده می‌رسد. با افزایش بیشتر نیرو بخش‌های بیشتری از ماده به حداکثر مقدار مقاومتی خود می‌رسند. اگر گسترش این بخش‌ها در جسم برای شکل‌گیری ناپایداری کافی باشد تسلیم نامحدود رخ می‌دهد. تا زمانی که جسم پیوستگی خود را حفظ کند، تغییر شکل ادامه خواهد یافت. این تسلیم نامحدود، گسیختگی نامیده می‌شود و سیستم نیروهایی که باعث این تغییر شکل‌ها می‌شود را بار گسیختگی^۱ می‌نامند.

به منظور تعیین تنش و جابه‌جایی تا لحظه گسیختگی، درک شرایط تعادل و سازگاری کرنش همراه با رفتار تنش-کرنش مصالح ضروری است. اما در عمل رفتار تنش-کرنش خاک بسیار پیچیده است و وابسته به تاریخچه بارگذاری است. [۱]

اغلب مدل‌های رفتاری رابطه تنش-کرنش را در خاک ساده‌تر از واقعیت در نظر می‌گیرند. اگر چه باور غالب بر این است که اینکار برای طفره از پیچیدگی‌های ریاضی است، اما در واقعیت چنین نیست زیرا حل کامل آن نیازمند اطلاعات جامعی از رفتار خاک، قبل و بعد از بار وارده بر آن است، که در عمل نمی‌توانیم آن را بدست آوریم. خوشبختانه، بیشتر مسائل به جواب دادن به دو سوال زیر حل خواهند شد:

۱. جابجایی‌های سازه تحت بارهای سرویس چه میزان هستند؟

۲. آیا بارهای سرویس کمتر از بارهای گسیختگی هستند؟

این سوالات به ما امکان آن را می‌دهند که بار وارده را طوری تعیین کنیم که کمتر از بار گسیختگی باشد، سول اول را اغلب با فرض رفتار الاستیک خطی (رابطه تنش-کرنش خطی فرض می‌شود) با دقت کافی می‌توان پاسخ داد. اما اگر کرنش‌های پلاستیک عمده‌ای تحت بارهای سرویس رخ دهد، تحلیل‌های پیچیده جابجایی ضرورت پیدا می‌کند.

برای پاسخ به سوال دوم تعیین بار گسیختگی الزامی است، در این تحقیق روش‌های پیش‌بینی

1 . Collpase load

بار گسیختگی ارائه می شوند. [۱]

۲-۴-۲- شرایط کرنش مسطح

با اعمال سیستم نیروهای خارجی به جسم، مولفه‌های تنش و مولفه‌های کرنش در سه بعد تغییر می‌کند. در اکثر سازه‌ها نظیر خاکریزها، دیوارهای حایل و تیرهای خاکی طول چندین برابر بعد عرضی (سطح مقطع) است. در چنین حالتی مقدار کرنش جانبی ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به این شرایط شرایط کرنش مسطح گفته می‌شود. فرض شرایط کرنش مسطح خطای ناچیزی را در محاسبات وارد می‌کند. در این مطالعه بارهای گسیختگی فقط برای حالت کرنش مسطح بدست خواهد آمد، اما اصولی که به تحلیل‌های گسیختگی منتج می‌شوند در سه بعد قابل اعمالند. [۱]

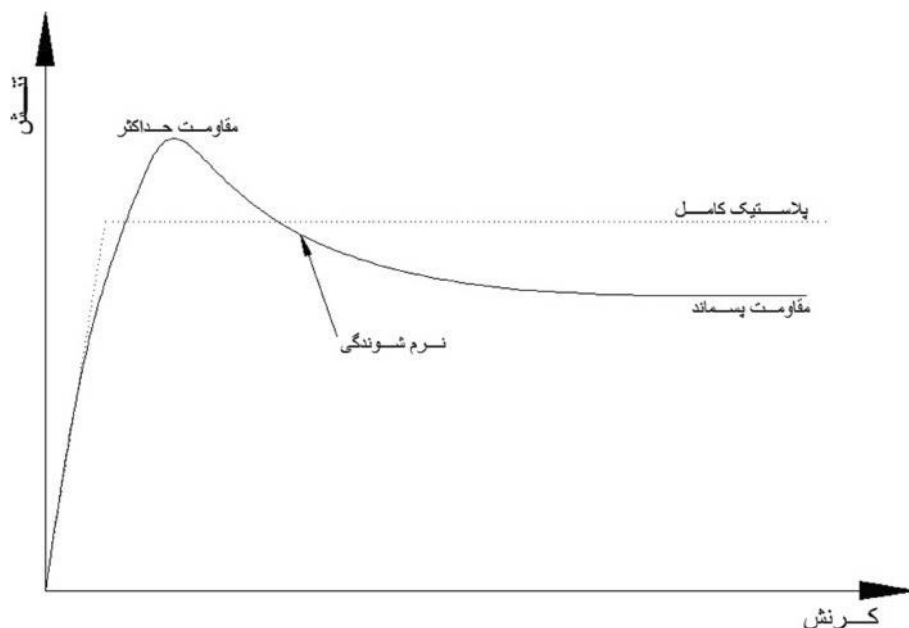
۲-۴-۳- نرم شوندگی^۱ و پلاستیسیته کامل^۲

رفتار تنش کرنش واقعی خاک مشابه با منحنی توپر نشان داده شده در شکل (۱-۲) است. با افزایش کرنش برشی، مقاومت برشی تا مقدار پیک^۳ افزایش می‌یابد و سپس به مقدار تقریباً ثابت پسماند افت می‌کند. اگر کرنش برشی و تنش ماده حین مقادیر پیک و پسماند باشد، نرم شدگی کار رخ داده است.

تمام روش‌های تحلیل مورد بحث در این فصل فرض می‌شود که شرایط تسلیم مستقل از مقدار کرنش‌اند، بنابراین منحنی تنش-کرنش بصورت نشان داده شده با خط چین در شکل (۱-۲)

1 . Softening
2 . Perfect Plasticity
3 . Peak g

در می‌آید، مصالحی که دارای این شکل تسلیم هستند، را پلاستیک کامل می‌نامند شرایط تسلیم و گسیختگی در این حالت یکسان‌اند. [۱]



شکل (۱-۲): نمودار تنش - کرنش برای حالت نرم شونده و غیر سخت شونده

برای آن که بار گسیختگی پیش بینی شده قابل اطمینان باشد، میانگین مقاومت خاک در واقعیت بایستی با مدل خاک در ناحیه پلاستیک تقریباً یکسان باشد. واضح است که اگر کرنش خاک در بار گسیختگی تقریباً یکنواخت باشد، بیشتر بخش‌های خاک مقاومت یکسان از خود نشان می‌دهند. در این حالت بیشترین مقاومت میانگین نزدیک مقدار پیک خواهد بود. اما در ساختارهای مشابه، بیشتر خاک‌ها قبل از گسیختگی تحت کرنش‌های پلاستیک عمده قرار خواهند گرفت. در چنین حالاتی مقاومت میانگین در ناحیه پلاستیک به مقدار پسماند نزدیک خواهد بود. بنابراین در انتخاب مقادیر برای اختصاص به پارامترهای تعریف کننده شرط تسلیم مدل خاک به مقداری آگاهی نیاز است. این مقادیر همانند ویژگی‌های خاک وابسته به مکانیزم گسیختگی سازه خواهند بود. [۱]