



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

گرایش خاک و پی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

بررسی ظرفیت باربری توده سنگ با استفاده از روش آنالیز حدی

اساتید راهنما

دکتر حسن قاسم زاده

دکتر فرزین کلانتری

نگارش

سید میلاد معین السادات

مردادماه ۸۹

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل ظرفیت باربری نهایی فونداسیون نواری قرار گرفته بر بستر سنگی با در نظر گرفتن معیارهای تسلیم هوک-براون و موهر-کولمب مورد بررسی قرار گرفته است. روش مورد استفاده در تحقیق حاضر، روش آنالیز حدی مرز بالا است که از قوی‌ترین روش‌های تحلیلی برای بررسی ظرفیت باربری می‌باشد. با استفاده از روش آنالیز حدی، حل مرز بالا صورت گرفته و بار حدی پلاستیک محاسبه گردیده است. تابع تسلیم غیر خطی هوک-براون و همچنین تابع تسلیم موهر-کولمب در این آنالیز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از قانون جریان همراه، معیار غیر خطی می‌تواند بصورت مستقیم در آنالیز حدی مرز بالا استفاده گردد. توان اتلافی پلاستیک بصورت میداین سرعت قابل قبول و روابط بهینه سازی غیر خطی تعیین شده است. برای مدل‌سازی توده سنگ از روش اجزاء محدود بهره برده و روش فوق برنامه نویسی شده است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان مقایسه شده است که رضایتبخش می‌باشد.

همچنین تحلیل‌های متعددی بر روی ظرفیت باربری نهایی مصالح سنگی با در نظر گرفتن معیار تسلیم هوک-براون و موهر-کولمب صورت گرفت که نتایج بدست آمده به صورت نمودارهایی جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف معیار هوک-براون ارائه شده است. این نمودارها تأثیر پارامترهای مقاومتی سنگ در معیار هوک-براون از قبیل پارامتر GSI ، پارامتر m_i و پارامتر D را بر ظرفیت باربری نهایی توده سنگ نشان می‌دهند.

در انتها، تحلیل‌هایی با استفاده از معیار موهر-کولمب برای مصالح خاکی نیز انجام شده است که نتایج بدست آمده به صورت جداول طراحی جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ارائه شده است. این جداول تأثیر پارامترهای مقاومتی سنگ در معیار موهر-کولمب (c و ϕ) را بر ظرفیت باربری نهایی خاک نشان می‌دهند.

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل ظرفیت باربری نهایی فونداسیون نواری قرار گرفته بر بستر سنگی با در نظر گرفتن معیارهای تسلیم هوک-براون و موهر کولمب مورد بررسی قرار گرفته است. روش مورد استفاده در تحقیق حاضر، روش آنالیز حدی مرز بالا است که از قوی‌ترین روش‌های تحلیلی برای بررسی ظرفیت باربری می‌باشد. با استفاده از روش آنالیز حدی، حل مرز بالا صورت گرفته و بار حدی پلاستیک محاسبه گردیده است. تابع تسلیم غیر خطی هوک-براون و همچنین تابع تسلیم موهر-کولمب در این آنالیز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از قانون جریان همراه، معیار غیر خطی می‌تواند بصورت مستقیم در آنالیز حدی مرز بالا استفاده گردد. توان اتلافی پلاستیک بصورت میادین سرعت قابل قبول و فرمولاسیون بهینه سازی غیر خطی تعیین می‌گردد و برای مدل‌سازی توده سنگ از روش اجزاء محدود استفاده شده است و روش فوق برنامه نویسی گردیده است.

مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان بسیار رضایتبخش بوده است.

تحلیل‌های متعددی بر روی ظرفیت باربری نهایی مصالح سنگی با در نظر گرفتن معیار تسلیم هوک-براون و موهر-کولمب صورت گرفت که نتایج بدست آمده به صورت نمودار جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف معیار هوک-براون ارائه شده است. این نمودارها تأثیر پارامترهای مقاومتی سنگ در معیار هوک-براون از قبیل پارامتر GSI ، پارامتر m_i و پارامتر D را بر ظرفیت باربری نهایی توده سنگ نشان می‌دهند.

همچنین در انتها تحلیل با استفاده از معیار موهر-کولمب برای مصالح خاکی نیز انجام شده است که نتایج بدست آمده به صورت جداول طراحی جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ارائه شده است. این جداول تأثیر پارامترهای مقاومتی سنگ در معیار موهر-کولمب (c و ϕ) را بر ظرفیت باربری نهایی خاک نشان می‌دهند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- مقدمه	۹
۱-۱- مقدمه	۱۰
۱-۲- اهداف تحقیق	۱۱
۱-۳- معرفی بخشهای مختلف پایان نامه	۱۱
۲- مروری بر ادبیات فنی و مفاهیم پایه در روش آنالیز حدی	۱۳
۲-۱- مقدمه:	۱۴
۲-۲- تعریف روشهای خط-لغزش، تعادل حدی و آنالیز حدی	۱۶
۲-۲-۱- روش خط-لغزش و روش تعادل حدی:	۱۶
۲-۲-۲- روش آنالیز حدی:	۱۹
۲-۳- مفاهیم پایه در روش آنالیز حدی	۲۲
۲-۳-۱- معیار تسلیم	۲۲
۲-۳-۲- معیار تسلیم در روش آنالیز حدی	۲۳
۲-۳-۳- اصل هیل	۲۵
۲-۳-۴- اصل هم محور بودن	۲۶
۲-۳-۵- تابع پتانسیل خمیری و قانون جریان (Flow rule)	۲۷
۲-۳-۶- قانون جریان وابسته و غیر وابسته	۲۷

۲۸	۲-۳-۷-اصل نرمالیده و اعتبار آن در خاکها و سنگها
۲۹	۲-۳-۸-میدان های تنش و سرعت قابل قبول
۳۰	۲-۳-۹-اصل توان مجازی
۳۳	۲-۳-۱۰-قضایای حدی
۳۶	۲-۴-روشهای مختلف تعیین ظرفیت باربری نهایی در سنگ
۳۹	۳-پیشینه تحقیق
۴۰	۳-۱-مقدمه
	۳-۲-حلهای آنالیز حدی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی سنگ با استفاده از معیار تسلیم موهر-
۴۰	کولمب
	۳-۳-حلهای آنالیز حدی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی سنگ با استفاده از معیار تسلیم هوک-
۵۱	براون
۵۸	۴-روش تحلیل در تحقیق حاضر
۵۹	۴-۱-مقدمه
۵۹	۴-۲-تعریف
۶۰	۴-۳-معیار هوک-براون:
۶۰	۴-۳-۱-تعریف:
۶۳	۴-۳-۲-معیار موهر-کولمب:
۶۵	۴-۴-روش مرز بالای آنالیز حدی بر اساس تابع تسلیم غیر خطی :
۶۶	۴-۵-معیار تسلیم کلی:
۶۶	۴-۵-۱-مکانیزم اول: استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب
۶۸	۴-۵-۲-مکانیزم دوم: استفاده از معیار تسلیم هوک-براون

۶-۴- تثوری مرز بالای آنالیز حدی:	۷۱
۷-۴- توان اتلافی برای یک معیار تسلیم کلی:	۷۲
۸-۴- مسأله برنامه نویسی غیر خطی:	۷۳
۹-۴- مدل سازی با استفاده از اجزاء محدود:	۷۴
۱۰-۴- الگوریتم حل تکرار:	۷۷
۵- بررسی صحت نتایج الگوریتم تدوین شده	۸۲
۱-۵- مقدمه	۸۳
۲-۵- تشریح مسأله:	۸۳
۳-۵- کاربرد و نمودارهای طراحی:	۸۵
۶- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات	۹۴
۱-۶- نتیجه گیری	۹۵
۲-۶- ارائه پیشنهاد برای ادامه تحقیق	۹۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: رفتار تنش-کرنش ماده در حالت یک بعدی (۲).....	۲۳
شکل ۲-۲: نمودار شماتیک تنش-کرنش خاک در بارگذاری تک محوری (۳).....	۲۵
شکل ۳-۲: موقعیت تنش در داخل و روی سطح تسلیم (۴).....	۲۶
شکل ۴-۲: وضعیت بردار تنش و سرعت کرنش با فرض سطح تسلیم موهر-کولمب (۴).....	۳۱
شکل ۵-۲: اصول محاسبه کار نیروهای داخلی بر روی سطوح ناپیوستگی سرعت (۳).....	۳۳
شکل ۱-۳: مش بندی مثلثی خطی برای آنالیز حدی (۸).....	۴۱
شکل ۲-۳: المان مثلثی برای آنالیز حدی مرز بالا (۸).....	۴۲
شکل ۳-۳: المان مثلثی برای آنالیز حدی مرز پایین (۸).....	۴۳
شکل ۴-۳: ظرفیت باربری پی نواری صلب بر روی توده دارای ترکهای عمودی $(\delta = \varphi / 2)$ (۸) ...	۴۴
شکل ۵-۳: ظرفیت باربری پی نواری صلب بر روی توده دارای ترکهای عمودی و افقی $(\delta = \varphi / 2)$ (۸).....	۴۴
شکل ۶-۳: بارهای حدی برای نیم فضا تحت فشار ثابت (۹).....	۴۵
شکل ۷-۳: همگرایی ضریب بار حدی به ازای گامهای تکرار (۹).....	۴۶
شکل ۸-۳: کرنش پلاستیک به ازای $(\varphi = 0)$ (۹).....	۴۶
شکل ۹-۳: ضریب توان پلاستیک اتلافی به ازای $(\varphi = 0)$ (۹).....	۴۷
شکل ۱۰-۳: کرنش پلاستیک به ازای $(\varphi = 15)$ (۹).....	۴۷
شکل ۱۱-۳: ضریب توان پلاستیک اتلافی به ازای $(\varphi = 15)$ (۹).....	۴۷

- شکل ۳-۱۲: مثلث تنش خطی سه گره‌ای با سه مجهول تنش در هر گره (۱۰)..... ۴۸
- شکل ۳-۱۳: ظرفیت باربری برای فونداسیون بر روی توده سنگ بدون درزه- مقایسه میان حل مرز پایین و حل قطعی (۱۰)..... ۴۹
- شکل ۳-۱۴: ظرفیت باربری در مقابل جهت دسته درزه- یک دسته درزه (۱۰)..... ۴۹
- شکل ۳-۱۵: ظرفیت باربری در مقابل جهت دسته درزه- دو دسته درزه (۱۰)..... ۵۰
- شکل ۳-۱۶: ظرفیت باربری در مقابل جهت دسته درزه- دو و سه دسته درزه (۱۰)..... ۵۰
- شکل ۳-۱۷- نمایش معیار هوک-براون اصلاح شده در صفحهٔ موهر-کولمب (۱۱)..... ۵۱
- شکل ۳-۱۸- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی q_0 در مقابل سربار q_u (۱۱)..... ۵۲
- شکل ۳-۱۹- مثلث ۳ گره‌ای تنش خطی (۱۲)..... ۵۳
- شکل ۳-۲۰- تنش‌های نرمال و برشی بر روی صفحه (۱۲)..... ۵۴
- شکل ۳-۲۱- شرایط مرزی تنش (۱۲)..... ۵۵
- شکل ۳-۲۲- مش بندی مورد استفاده برای مرز پایین آنالیز حدی (۱۲)..... ۵۶
- شکل ۴-۱: تاثیر شاخص GSI بر معیار هوک-براون..... ۶۲
- شکل ۴-۲- تاثیر ضریب m_i بر معیار هوک-براون..... ۶۲
- شکل ۴-۳- تاثیر ضریب D بر معیار هوک-براون..... ۶۳
- شکل ۴-۴- منحنی هوک-براون و چند وجهی موهر کولمب (۱۳)..... ۶۴
- شکل ۵-۱: المان مثلثی سه گره‌ای برای آنالیز حدی مرز بالا..... ۸۴
- شکل ۵-۲: فونداسیون نواری بر روی فضای نیمه متناهی..... ۸۴
- شکل ۵-۳: مش بندی اجزاء محدود برای فضای نیمه متناهی..... ۸۵
- شکل ۵-۴- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیارهای موهر-کولمب و هوک-براون q_u نسبت به بار وارده q_0 ۸۶

شکل ۵-۵- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب q_u نسبت به GSI به ازای مقادیر مختلف m_i ۸۸

شکل ۵-۶- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب q_u نسبت به GSI به ازای مقادیر مختلف D ۸۸

شکل ۵-۷- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم هوک-براون q_u نسبت به GSI به ازای مقادیر مختلف m_i ۸۹

شکل ۵-۸- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم هوک-براون q_u نسبت به GSI به ازای مقادیر مختلف D ۸۹

شکل ۵-۹- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب q_u نسبت به D به ازای مقادیر مختلف GSI ۹۰

شکل ۵-۱۰- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم هوک-براون q_u نسبت به D به ازای مقادیر مختلف GSI ۹۱

شکل ۵-۱۱- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب q_u نسبت به m_i به ازای مقادیر مختلف GSI ۹۱

شکل ۵-۱۲- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم هوک-براون q_u نسبت به m_i به ازای مقادیر مختلف GSI ۹۲

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: محدوده خصوصیات گروه‌های انتخابی سنگها، اطلاعات از منابع مختلف (۷).....	۳۷
جدول ۱-۳ - مقایسه بار حدی مرز پایین برای دو معیار هوک-براون و موهر-کولمب (۱۲).....	۵۶
جدول ۲-۳ - مقایسه بار حدی مرز پایین برای دو معیار هوک-براون و موهر-کولمب (۱۲).....	۵۷
جدول ۳-۳ - بار تخریب مرز پایین برای سنگهای کربنات (۱۲).....	۵۷
جدول ۱-۵. مقایسه بار حدی مرز پایین برای دو معیار هوک-براون و موهر-کولمب (۱۲) با تخمین مرز بالا با استفاده از معیار هوک-براون.....	۸۷
جدول ۲-۵- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب به ازای مقادیر مختلف φ	۹۳
جدول ۳-۵- تخمین مرز بالای ظرفیت باربری نهایی با استفاده از معیار تسلیم موهر-کولمب به ازای مقادیر مختلف C.....	۹۳

☆ فصل اول

۱- مقدمه

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

تعیین ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌ها از مسائل مهم و رایج در مکانیک سنگ می‌باشد. همچنین برای احداث سدها و سازه های بلند نیاز به بستر سنگی داریم. لذا بررسی ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌های قرار گرفته بر بستر سنگی در حالات مختلف به روش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی امری مهم و ضروری می‌باشد.

روش آنالیز حدی یک ابزار قوی برای بررسی پایداری و همچنین تعیین ظرفیت باربری نهایی می‌باشد. در این روش با استفاده از تئوری های مرز بالا و مرز پایین حدی می توان به حل دقیق و جواب قطعی مسأله با دقت بسیار زیاد نزدیک شد. در واقع در این روش به جای حل دقیق مسأله با صرفنظر کردن از بعضی از معادلات تعادل و سازگاری مرزهای بالا و پایین برای جواب تعیین می‌گردد که جواب نهایی مقداری بین این دو مرز است.

در چند دهه اخیر با استفاده از روش آنالیز حدی برای ظرفیت باربری نهایی سنگها مطالعاتی صورت گرفته است که در بیشتر آنها از معیار تسلیم موهر-کولمب برای مدل سازی توده سنگ استفاده گردیده است. با وجود اینکه معیار موهر-کولمب معیار مناسبی برای مدل سازی خاک می-باشد ولیکن معیار هوک-براون برای مدل سازی سنگها از این معیار مناسب تر است. در سالهای اخیر و با گسترش بیشتر معیار هوک-براون برای سنگها مطالعاتی با استفاده از روش آنالیز حدی و با در نظر گرفتن این معیار برای ظرفیت باربری نهایی توده سنگها صورت پذیرفته است که در اغلب آنها از مدل خطی شده یا اصلاح شده هوک-براون برای مصالح سنگی استفاده شده است یا اینکه

معيار هوک-براون با استفاده از تقريب خطی به معيار موهر-کولمب تبديل شده و سپس از معيار تسليم جديد استفاده گرديده است.

۱-۲- اهداف تحقيق

در رساله حاضر با استفاده از روش آناليز حدی ظرفيت باربری نهایی فونداسیونهای سطحی بر روی سنگها محاسبه گرديده است. این امر با استفاده از دو مکانيسم کلی صورت پذيرفته است؛ در مکانيزم اول پارامترهای معيار تسليم هوک-براون به موهر-کولمب تبديل می گردند و سپس آناليز با استفاده از معيار موهر-کولمب انجام می گردد. در مکانيزم دوم معيار تسليم هوک-براون بطور مستقيم در معادلات وارد می شود و آناليز با استفاده از این معيار بصورت غير خطی صورت می پذيرد.

۱-۳- معرفی بخشهای مختلف پايان نامه

نتايج این تحقيق در شش فصل به شرح زیر تدوين يافته است:

فصل اول که فصل حاضر می باشد به مقدمه اختصاص دارد.

در فصل دوم مبانی تعیین ظرفيت باربری نهایی سنگ و روشهای مختلف مورد استفاده در این زمینه توضيح داده شده است. در ادامه ضمن تشریح مختصر روشهای خط-لغزش و تعادل حدی و مقایسه آنها با روش آناليز حدی، مفاهيم پایه در روشهای آناليز حدی و قضایای مرز بالا و مرز پایین بیان شده است.

در فصل سوم کارهای قبلی انجام شده در مورد تعیین ظرفيت باربری نهایی توده سنگها به خصوص با استفاده از معيار تسليم هوک-براون بیان شده و نتايج بدست آمده از این تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم روش مورد استفاده در تحقیق حاضر به همراه دو مکانیزم به کار گرفته شده و نحوه محاسبه ظرفیت باربری به تفصیل بیان شده است و معیار هوک-براون و پارامترهای مقاومتی استفاده شده در آن شرح داده شده است. الگوریتم مورد استفاده به همراه زیربرنامه‌های نرم‌افزار تدوین شده نیز به اختصار شرح داده شده است.

در فصل پنجم صحت الگوریتم حاضر بررسی شده و نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات موجود مقایسه شده است؛ و در نهایت نمودارهای کاربردی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده سنگ‌های مختلف و فونداسیون‌های مختلف ارائه شده است.

در نهایت در فصل ششم نتایج بدست آمده از این تحقیق جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات بعدی در این زمینه ارائه شده است.

☆ فصل دوم

۲- مروری بر ادبیات فنی و مفاهیم پایه در روش

آنالیز حدی

فصل دوم

مروری بر ادبیات فنی و مفاهیم پایه در روش آنالیز حدی

۲-۱- مقدمه:

به علت سادگی تمرین و همچنین بخاطر پیشرفت‌هایی که در تاریخ مطالعات مکانیک جامدات شکل پذیر انجام گرفته است، مسائل مکانیک خاک معمولاً به دو گروه مجزا تفکیک شده است:

۱- مسائل پایداری (در حالت حدی نهایی)

۲- مسائل الاستیسیته (در شرایط بهره برداری)

مسائل پایداری با شرایط شکست نهایی خاک مواجه‌اند. مسائلی از قبیل فشار زمین، ظرفیت باربری و پایداری شیروانی‌ها معمولاً در این دسته قرار می‌گیرند. مهم‌ترین نکته در این نوع مسائل تعیین بارهایی است که موجب شکست در توده خاک می‌شود. حل‌های این مسائل معمولاً با استفاده از تئوری پلاستیک کامل حاصل می‌گردد. از طرفی دیگر مسائل الاستیسیته با تنش و تغییر شکل در خاک سر و کار دارند و شکست خاک در آن‌ها تأثیرگذار نمی‌باشد. تعیین تنش در نقطه‌ای در توده خاک در زیر فونداسیون، یا زیر دیوار حائل، تغییر شکل‌های اطراف تونل‌ها و حفاری‌ها و تمامی مسائل نشست جزء این دسته‌اند. حل این نوع مسائل معمولاً با استفاده از تئوری الاستیسیته خطی حاصل می‌گردد. (۱)

آنالیز حدی^۱:

آنالیز کامل شامل مقادیر مختلف جریان پلاستیک بسیار پیچیده و از لحاظ تجربی غیر ممکن است و همچنین شکست با تخریب پلاستیک معمولاً در مسائل مکانیک خاک حالت کنترل کننده و حاکم است. با توجه به مواردی که در بالا ذکر گردید، گسترش روش‌هایی برای محاسبه بار تخریب با یک روش مستقیم و ساده، برای مهندسان امری ضروری است.

آنالیز حدی در ارتباط با گسترش و کاربرد این نوع روش‌ها می‌باشد. شاید مهم‌ترین ویژگی روش آنالیز حدی در این باشد که مهم نیست شرایط هندسی و یا بارگذاری مسأله چقدر پیچیده‌اند، همیشه امکان یافتن مقدار واقعی بار تخریب وجود دارد. وقتی این مسأله با خواص دیگر روش تجمیع می‌گردد، استفاده از آن به عنوان ابزاری کاربردی برای هر مهندس ضروری می‌نماید. دیگر خواص روش عبارتند از: ساده بودن اعمال آن، آشکار شدن شکل فیزیکی تخریب و اینکه نتایج حاصله از روش دارای دقت بسیار بالایی در مقایسه با دیگر نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

قبل از اینکه به توضیح روش آنالیز حدی بپردازیم لازم به ذکر است که این روش تنها روش ارزیابی بار تخریب برای مسائل پایداری مکانیک خاک نمی‌باشد. دیگر روش‌های استاندارد و معروف در حل‌های مکانیک خاک به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش خط-لغزش^۲ و روش تعادل حدی^۳. روش خط-لغزش سعی می‌کند ابتدا معادلات دیفرانسیل پایه را استخراج کند و سپس با تعیین شبکه‌های خط-لغزش حل‌های مسائل مختلف را ممکن سازد. روش تعادل حدی ابتدا سعی می‌کند حالت ساده شده شکست را بسازد و سپس با تعادل ساده حل مسائل مختلف را ممکن سازد. از آنجا که کلیه روش‌های ذکر شده از مفهوم پلاستیک کامل استفاده می‌کنند، رابطه میان این سه حل، با توجه به سه رویکرد متفاوتشان، شامل مفاهیم ویژه‌ای است که در زمینه علم مکانیک خاک خیلی معمول نیستند. سه روش نامبرده به اختصار شرح داده خواهند شد.

Limit analysis^۱
Slip line method^۲
Limit equilibrium method^۳

۲-۲- تعریف روش‌های خط-لغزش، تعادل حدی و آنالیز حدی

۲-۲-۱- روش خط-لغزش و روش تعادل حدی:

روش خط-لغزش:

جاری شدن جریان پلاستیک 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 منطقه نزدیک فونداسیون ارضاء شده‌اند. برای خاک‌ها، معیار کولمب به صورت گسترده برای شرایط تسلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ترکیب معیار 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 مسائل مشخص، انتقال این مجموعه معادلات به مختصات منحنی الخط ساده می‌باشد. بطوریکه جهات در هر نقطه در منطقه تسلیم بر جهات‌های شکست یا صفحه لغزش منطبق می‌باشد. این جهات‌های لغزش خط‌های لغزش و شبکه ایجاد شده منطقه خط-لغزش نامیده می‌شوند.

تفسیر روش خط-لغزش:

یکی از نقاط ضعف این روش در نظر نگرفتن رابطه تنش-کرنش در خاک است. با توجه به مکانیک جامدات شکل پذیر، این رابطه به عنوان شرط برای یک حل معتبر باید ارضاء گردد. اما در حل خط-لغزش تنها تعادل و شرایط تسلیم مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای شرایط تغییر شکل صفحه‌ای، دو معادله تعادل و شرط تسلیم پدیدار می‌گردند. در حالیکه در بیشتر مسائل 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 می-باشد، بطوریکه تمامی شرایط مرزی تنش را ارضاء نماید و مستقیماً به منطقه وابسته باشد، همانطور که به تعادل و شرایط تسلیم در تمامی نقاط داخل منطقه وابسته است. میدان تنشی که حاصل می-گردد 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 تنش همراهی 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 شده است 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 تئوری‌های آنالیز حدی موجود است. وقتی که در بخش بعدی قوانین دقیق آنالیز حدی ارائه می‌گردند، مشاهده خواهد گردید که شرایط مرز پایین آنالیز حدی دقیقاً در میدان تنش گسترده لازم می‌گردد. با این اصل که در بالا به آن اشاره شد، حل تنش گسترده تنها مرز پایینی از بار تخریب ارائه می‌دهد.

وقتیکه 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 انحراف‌های پیوسته سازگار است و شرایط مرزی جابجایی و مثبت بودن نرخ کار پلاستیک در همه جا را ارضاء می‌کند.

به شرط اینکه این وضعیت پیش بیاید، سپس، حل بدست آمده در بالا یک مرز بالا برای میزان تخریب با توجه به قانون مرز بالای آنالیز حدی، و بنابراین برابر جواب صحیح می‌باشد. بحث‌های تکمیلی بر روی این مورد در بخش‌های آتی در قوانین آنالیز حدی ارائه می‌گردد.

در اینجا، لازم است که در نظر داشته باشیم میدان تنش جزئی که از معادلات خط-لغزش بدست آمد الزماً نه حل صحیح است و نه مشخص است 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 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 مسأله می‌باشد. (۱)

روش تعادل حدی:

روش تعادل حدی از دیرباز برای بدست آوردن حل‌های تقریبی برای مسائل پایداری در مکانیک خاک استفاده می‌گردد. شاید بهترین راه برای شرح این روش چنین باشد: روشی تقریبی برای تشکیل میدان خط-لغزش و بطور عمومی شامل سطح تسلیمی فرضی از انواع سطح تسلیم‌های ساده، صفحه‌ای، دایره‌ای و حلزونی می‌باشد. با این فرض، هر مسأله پایداری تبدیل می‌شود به مسأله پیدا کردن خطرناک‌ترین حالت شکست یا سطح لغزش از میان شکل‌های انتخاب شده. 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 ارائه شود. به عنوان مثال، معادلات کلی تعادل ناشی شده از تنش‌ها، باید برای یک مسأله مفروض نوشته شوند. بنابراین، این روش ساده شده، حل مسائل مختلف را با روش استاتیکی ساده قابل حل می‌نماید.

در اینجا لازم به ذکر است که هیچ یک از معادلات مکانیک خاک در هیچ نقطه‌ای 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 وجود دارد همانگونه که حل‌ها نیازمند قوانین مرز پایین آنالیز حدی می‌باشند. 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 مرزبالای آنالیز حدی استفاده می‌کند، یعنی سطح تسلیمی فرض می‌شود و جواب حداقل جستجو می‌گردد، ولی این روش دقیقاً با ملزومات روش مرزبالا روبرو نمی‌گردد و نمی‌توان جواب آن‌را به عنوان مرز بالا تلقی کرد. این روش بطور اساسی توجه‌ای 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 آنالیز حدی نیست. ولیکن، هر مرز بالایی از آنالیز حدی قطعاً یک حل تعادل حدی می‌باشد. (۱)

۲-۲-۲- روش آنالیز حدی:

پیش از آنکه به طور کلی درباره روش آنالیز حدی بحث کنیم، باید به شرایط لازم برای یک جواب معتبر در مکانیک جامدات شکل‌پذیر بپردازیم. برای یک حل معتبر به سه شرط اساسی نیاز داریم: معادلات تعادل تنش، روابط تنش-کرنش و معادلات سازگاری کرنش و جابجایی. بطور کلی بی-نهایت حالت تنش شرایط مرزی تنش‌ها، معادلات تعادل و شرایط تسلیم را به تنهایی ارضاء می‌نمایند، و نیز تعداد بیشماری حالت جابجایی سازگار با تغییر شکل پیوسته، شرایط مرزی جابجایی را ارضاء می‌نمایند. همچنانکه در تئوری الاستیسیته، روابط تنش-کرنش به نحوی شکل می‌گیرند که تنش اعمالی با وضعیت جابجایی‌ها مطابقت داشته باشد و یک حل یکتا حاصل گردد. و به همین ترتیب در مصالح الاستیک-پلاستیک، وقتی نیرو به تدریج از مقدار صفر زیاد می‌گردد، قانون گسترش سه مرحله‌ای وجود دارد، به ترتیب واکنش مرحله الاستیک اولیه، مرحله میانی شامل جریان پلاستیک و در نهایت جریان پلاستیک نامحدود. حل کامل با استفاده از این روش، حتی برای ساده‌ترین مسائل، دشوار و طاقت فرسا به نظر می‌رسد. و روش‌های دیگری نیاز است تا ظرفیت باربری را از راهی مستقیم‌تر محاسبه کنند. روش آنالیز حدی بدون نیاز به آنالیز گام به گام الاستیک-پلاستیک، گزارش دقیقی از میزان بار تخریب ارائه می‌دهد.

در مقایسه با روش‌های خط-لغزش و تعادل حدی، روش آنالیز حدی شرایط ایده‌آلی برای خاک در نظر می‌گیرد. این ایده‌آل سازی، به نام نرمالیت (یا قانون جریان)، تئوری‌های حدی را برپایه آنالیز حدی برقرار می‌سازد. در چهارچوب این فرضیه، روش آنالیز حدی بسیار دقیق است و تکنیک‌های مورد استفاده در آن در مقایسه با روش تعادل حدی بسیار ساده‌تر است.

شرایط لازم برای شکل‌گیری حل‌های مرزپایین و مرز بالا در ادامه ذکر می‌گردند.

تئوری مرز پایین:

نیروهایی که تنها از توزیع تنش بدست می‌آیند از بار تخریب واقعی کوچکترند. این نیروها: (۱) معادلات تعادل، (۲) شرایط مرزی تنش و (۳) تجاوز نکردن از معیار تسلیم، را ارضاء می‌نمایند. توزیع تنشی که سه شرط بالا را ارضاء نماید به عنوان میدان تنش قابل قبول استاتیکی برای مسأله در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تئوری مرز پایین بصورت زیر بیان می‌گردد: اگر توزیع تنش قابل قبول استاتیکی پیدا شود، جریان پلاستیک غیرهمراه تحت بار پایین رخ نمی‌دهد. با توجه به این قانون مشخص است که تکنیک حل مرز پایین تنها تعادل و تسلیم را در نظر می‌گیرد و انرژی جنبشی خاک را مد نظر قرار نمی‌دهد.

تئوری مرز بالا:

نیروها، که از تساوی نرخ کار خارجی با نرخ توان اتلافی داخلی با حالت تغییر شکل (یا میدان سرعت) فرض شده بدست می‌آیند، نباید از بار تخریب واقعی کمتر باشند. این نیروها: (۱) شرایط مرزی سرعت و (۲) شرایط سازگاری سرعت و کرنش را ارضاء می‌نمایند. انرژی اتلافی در قانون جریان همراه با این شرایط تنها می‌تواند با استفاده از روابط ایده‌آل تنش/نرخ کرنش محاسبه گردد (یا همان قانون جریان). میدان سرعتی که شرایط بالا را ارضاء نماید به عنوان میدان سرعت قابل قبول جنبشی شناخته می‌شود. بنابراین، تئوری مرز بالا بیان می‌کند که اگر میدان سرعت قابل قبول جنبشی پیدا شد، جریان پلاستیک غیرهمراه باید قبلاً وقوع یافته باشد. تکنیک حل مرز بالا تنها سرعت یا حالت-های شکست و همچنین اتلاف انرژی را مد نظر قرار داده و توزیع تنش در معادلات قرار نمی‌گیرد، و توزیع تنش تنها در مناطقی که تغییر شکل رخ داده است تعیین می‌گردد.

با فراهم نمودن شرایط مناسب میداین تنش و سرعت، دو تئوری بالا بار نهایی تخریب را با توجه به دقت مورد نیاز مسأله محدود می‌نمایند.

مفهوم حل خط-لغزش:

میدان تنش جزئی حاصله از روش خط-لغزش شرایط تئوری مرز پایین را ارضاء نمی‌نماید. بخاطر اینکه خارج از شبکه خط-لغزش، تضمینی برای اینکه تنش‌ها با شرایط مرزی در تعادل باشند و همچنین از معیار تسلیم موجود فراتر نروند، وجود ندارد. با اینحال فرض کنید توزیع تنش جزئی در مناطق شبکه بندی خط-لغزش بتواند با شیوه قابل قبول استاتیکی به کل فضا تعمیم داده شود، در اینصورت روش خط-لغزش یک حل مرز پایین می‌باشد. گسترش قابل قبول استاتیکی میدان تنش جزئی، کاری بسیار دشوار می‌باشد زیرا هنوز هیچ روش عمومی برای گسترش این میدان‌های قابل قبول استاتیکی ارائه نشده است.

با استفاده از روابط تنش-کرنش یا قانون جریان، میدان سرعت همراه با میدان تنش جزئی در مناطق پلاستیک یا مناطق شبکه‌بندی شده خط-لغزش ایجاد می‌شود. اگر میدان سرعت ساخته شده شرایط مرزی سرعت را ارضاء نماید، آن میدان از لحاظ جنبشی قابل قبول است. حل خط-لغزش بالا به عنوان یک حل مرز بالا در نظر گرفته می‌شود. از اینرو بار تخریب واقعی بدست می‌آید.

اکنون سرعت و تنش در مناطق شبکه بندی خط-لغزش وقتی که تغییر شکل رخ می‌دهد سازگار هستند. تئوری یکتایی که توسط هیل (۱۹۵۱) ارائه گردید بیان می‌کند که محلی که تغییر شکل در هر حالتی اتفاق افتاد، تنش بدست آمده حالت واقعی دارد. اگرچه حالت بخصوص تغییر شکل بدست آمده لزوماً مقدار واقعی نیست.

مفهوم حل خط-لغزش با توجه به تئوری‌های مرز بالا و مرز پایین هم‌اکنون قابل جمع بندی می‌باشد. قابل قبول بودن حل میدان خط-لغزش بستگی به این دارد که آیا امکان یافتن میدان سرعت قابل قبول جنبشی و میدان تنش قابل قبول استاتیکی برای مسأله مورد نظر وجود دارد یا خیر. یک حل کامل می‌بایستی هر دو شرط بالا را ارضاء نماید. اغلب حل‌های میدان خط-لغزش که ارائه شده‌اند، شامل حل تنش برای مناطق شامل میدان‌های خط-لغزش و حالت سازگار تغییر شکل همراه با این میدان تنش جزئی هستند. از اینرو، این حل‌های خط-لغزش دقیقاً تنها حل مرز بالا هستند و به عنوان حل‌های ناقص تلقی می‌گردند. اگر این حل‌های تنش جزئی بتوانند با روشی قابل قبول استاتیکی به کل منطقه گسترش یابند، حل خط-لغزش به عنوان حلی پایین دست هم تلقی می‌شود و یک حل کامل است. (۱)

۲-۳- مفاهیم پایه در روش آنالیز حدی

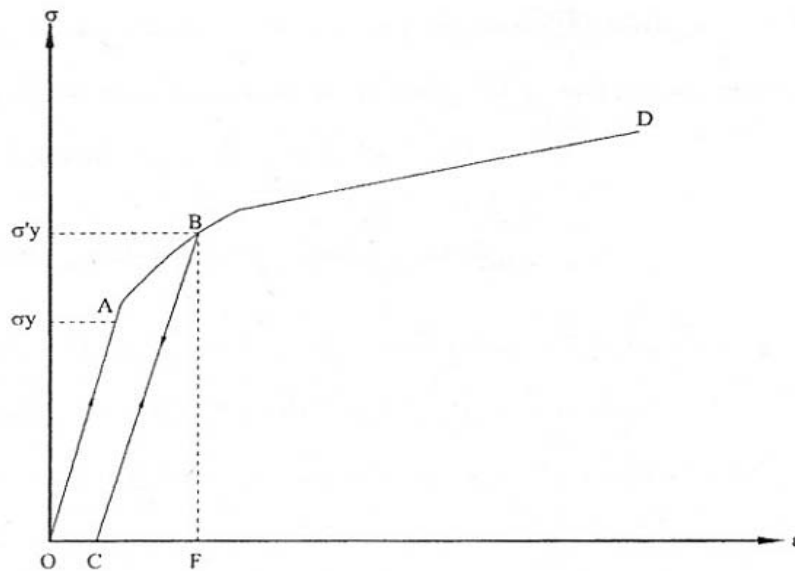
در بخش قبل در مورد روش آنالیز حدی و تفاوت‌های آن با روش‌های خط-لغزش و تعادل حدی و همچنین اهمیت، کاربرد، مزایا و نواقص آن بحث شد. روش تحلیل حدی شامل مباحث گسترده‌ای در مورد مصالح الاستو پلاستیک و مفاهیم حاکم بر آن است؛ که در این تحقیق امکان پرداختن به تمامی این مسائل نمی‌باشد؛ بنابراین برخی از مفاهیم آنالیز حدی که در تحقیق حاضر کاربردی نداشته توضیح داده نشده و یا به اختصار بیان می‌گردد. در این فصل مفاهیم و نظریه‌های اساسی حاکم در روش آنالیز حدی بر اساس اهمیت و کاربرد در تحقیق حاضر توضیح داده می‌شود.

۲-۳-۱- معیار تسلیم

شکل ۱-۲: رفتار تنش-کرنش ماده در حالت یک بعدی) رفتار تنش کرنش یک ماده را در حالت دو بعدی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، رفتار تا نقطه A به صورت کشسان و خطی بوده و بعد از آن از یک رابطه غیر خطی تبعیت می‌کند. در صورتی که از نقطه B باربرداری شود، با حذف کل بار وارده، کرنشی معادل OC باقی خواهد ماند. اگر از نقطه C، دوباره بارگذاری انجام شود، رفتار ماده تا نقطه B کشسان و خطی بوده و با افزایش بار از یک رابطه غیر خطی تبعیت می‌کند. به این گونه مصالح که حد تسلیم آنها ضمن باربرداری و بارگذاری‌های مجدد، افزایش یا کاهش می‌یابد؛ مصالح الاستیک-پلاستیک یا کشسان-خمیری گویند. قانونی که روند افزایشی سطح تنش تسلیم مصالح از آن تبعیت می‌کند؛ قانون سخت شوندگی و قانونی که روند کاهشی سطح تنش تسلیم مصالح از آن پیروی می‌کند؛ قانون نرم شدگی نام دارند. در این مصالح کرنش کل به صورت حاصل جمع کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک تعریف می‌شود.

همواره این سوال مطرح بوده است که ماده تحت چه شرایطی رفتار خمیری پیدا می‌کند. برای پاسخ به این پرسش باید رابطه‌ای بین تنش و کرنش خمیری تعریف شود که این رابطه تابع تسلیم یا سطح تسلیم نامیده می‌شود. تابع تسلیم در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = f(\sigma, k) \quad (1-2)$$



شکل ۲-۱: رفتار تنش-کرنش ماده در حالت یک بعدی (۲)

در این رابطه F تابع تسلیم، σ میدان تنش، k ضریب سخت شدگی می باشد. به ازای هر مقدار تنش در صورتی که $F < 0$ باشد، میدان تنش کشسان خواهد بود؛ اگر $F > 0$ باشد، میدان تنش خمیری حاصل می شود. در حالتی که $F = 0$ باشد؛ نمو تابع F مطرح می گردد. در این حالت اگر $\frac{\partial F}{\partial \sigma} > 0$ باشد، رفتار ماده سخت شونده بوده و اگر $\frac{\partial F}{\partial \sigma} < 0$ باشد، رفتار ماده نرم شونده بوده و اگر $\frac{\partial F}{\partial \sigma} = 0$ باشد رفتار ماده خمیری کامل^۱ خواهد بود. در مصالح خمیری کامل سطح تسلیم با تغییر تنش ثابت می ماند.

۲-۳-۲- معیار تسلیم در روش آنالیز حدی

همانطور که در بخش قبل بیان شد، خاک ها یا رفتار سخت شونده دارند و یا رفتار نرم شونده. نمودار تنش-کرنش اغلب خاکها مخصوصاً خاکهای متراکم و پیش تحکیم یافته که رفتار نرم شونده دارند، معمولاً به صورت شکل ۲-۲: نمودار شماتیک تنش-کرنش خاک در بارگذاری تک محوری است که از

^۱ Perfect Plastic