

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی اثر درجه اشباع بر روی پایداری گودبرداری در خاک های سیلتی

نگارنده: محمد کتابی

استاد راهنما:

دکتر سید مهدی حسینی

خرداد ۱۳۹۵

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی به عنوان استاد راهنما که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

همچنین از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر بذرافشان مقدم و جناب آقای دکتر نادری که طی دوران تحصیل از نقطه نظرات سازنده آن ها بهره مند گردیدم و سایر اساتیدم در طول این مقطع صمیمانه تشکر می کنم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه راهم بود.

بار الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل ببوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش، جهت رشد و

شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

محمد کتابی - ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب محمد کتابی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی اثر درجه اشباع بر روی پایداری گودبرداری در خاک های سیلتی تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پارامترهای مقاومت برشی خاک نقش مهمی در تحلیل پایداری گودبرداری ها و شیروانی های خاکی دارند. عموماً در تحلیل و محاسبه پایداری گودبرداری ها و شیروانی های خاکی در نواحی غیر اشباع از پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت اشباع استفاده می شود و از بخشی از پروفیل خاک در بالای سطح آب زیر زمینی که داری فشار آب حفره ای منفی است، صرف نظر می شود. وجود فشار آب حفره ای منفی در نواحی غیر اشباع سبب افزایش مقاومت برشی در این نواحی می شود و سطوح لغزش بحرانی هم عمدتاً از همین نواحی غیر اشباع می گذرد. هدف اصلی در این تحقیق، بررسی تاثیر در نظر گرفتن فشار آب حفره ای منفی نواحی غیر اشباع بر روی محاسبه ضریب اطمینان می باشد. به منظور تعیین ضریب اطمینان، اقدام به مدل سازی در نرم افزار Geo Studio 2012 با استفاده از معیار گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب شد. برای محاسبه ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع، از معادلات خطی و غیر خطی برآورد مقاومت برشی استفاده شده است. در این تحقیق، تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان تعیین شد و تاثیر تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی و عمق اولیه سطح آب زیر زمینی در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، مورد مطالعه پارامتریک قرار گرفت و همچنین تاثیر پارامترهای مقاومت برشی در محاسبه ضریب اطمینان، بررسی شد و نیز نشان داده شد: در نظر گرفتن درصد کمی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، سبب افزایش ضریب اطمینان به میزان قابل توجهی می شود.

برای بررسی موارد فوق، سه مدل در نظر گرفته شد و در هر سه مدل، عمق گودبرداری ۱۰ متر در نظر گرفته شد. در مدل ۱ که گودبرداری به صورت شیب دار و با شیب کم در نظر گرفته شده است و روش تعیین ضریب اطمینان در این مدل بر مبنای روش تنش المان محدود است، تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زمان تعیین شد و تاثیر پارامترهای تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی

و عمق اولیه سطح آب زیر زمینی، در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، بررسی شد. همچنین مقادیر ضریب اطمینان، با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، تعیین شد و نیز تاثیر پارامترهای مقاومت برشی در محاسبه ضرایب اطمینان برای این مدل بررسی شد. مدل ۲ به صورت شیب دار و با شیب تند و مدل ۳ با شیب قائم در نظر گرفته شدند و مقادیر ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع، در این دو مدل، با استفاده از روش تعادل حدی Morgenstern-Price و با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، تعیین شد. نتایج نشان داد: پارامترهای غیر اشباع، تاثیر عمده ای در افزایش مقدار ضریب اطمینان دارند و در نظر گرفتن آن ها حتی ممکن است موجب تغییر وضعیت گود از حالت ناپایدار به حالت پایدار بشود؛ مقدار ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع به مقدار پارامترهای مقاومت برشی به ویژه زاویه اصطکاک داخلی وابسته است؛ شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع وابسته است و تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی، تاثیر ناچیزی در شکل این منحنی دارد؛ مقدار ضریب اطمینان بسته به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، ممکن است در کوتاه مدت یا میان مدت به کم ترین مقدار خود برسد و همچنین شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، علاوه بر مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، به عمق اولیه سطح آب زیر زمینی نیز وابسته است.

کلمات کلیدی: تحلیل پایداری، گودبرداری، غیر اشباع، ضریب اطمینان، مکش بافتی.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- ضرورت تحقیق.....	۲
۱-۳- تعریف مسأله و اهداف تحقیق.....	۳
۱-۴- روش تحقیق.....	۵
۱-۵- فصل بندی پایان نامه.....	۸
فصل دوم: مروری برخی از کارهای انجام شده قبلی.....	۹
فصل سوم: مباحث تئوری مرتبط با خاک های غیر اشباع و معرفی روابط خطی و غیر خطی مقاومت برشی...۱۷	۱۷
۳-۱- مقدمه	۱۸
۳-۲- درجه اشباع	۱۹
۳-۳- آب حجمی موجود	۲۰
۳-۴- نظریه مکش در خاک	۲۰
۳-۵- منحنی مشخصه آب - خاک	۲۱
۳-۶- مقاومت برشی	۲۵

- ۲۵..... ۱-۶-۳- تعریف
- ۲۵..... ۲-۶-۳- معیار گسیختگی و پوش گسیختگی
- ۲۵..... ۳-۶-۳- معادله مقاومت برشی برای خاک های اشباع
- ۲۷..... ۴-۶-۳- معادلات مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع
- ۲۸..... ۱-۴-۶-۳- پوش گسیختگی خطی در خاک های غیر اشباع
- ۳۲..... ۲-۴-۶-۳- پوش گسیختگی غیر خطی در خاک های غیر اشباع
- ۳۲..... ۳-۴-۶-۳- برآورد توابع مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع
- ۳۲..... ۴-۴-۶-۳- ارتباط مشاهده شده بین SWCC و مقاومت برشی
- ۳۵..... ۵-۴-۶-۳- معرفی برخی از معادلات مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع
- ۳۵..... ۱-۵-۴-۶-۳- معادله خطی مقاومت برشی (Fredlund et al. (1978
- ۳۶..... ۲-۵-۴-۶-۳- معادله غیر خطی مقاومت برشی (Vanapalli et al. (1996
- ۳۷..... ۳-۵-۴-۶-۳- معادله غیر خطی مقاومت برشی (Fredlund et al. (1996
- ۳۸..... ۴-۵-۴-۶-۳- معادله غیر خطی مقاومت برشی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)
- ۳۹..... ۷-۳- ضریب هدایت هیدرولیکی (K)
- ۴۰..... ۸-۳- پروفیل مکش بافتی

فصل چهارم: روش های تعیین ضریب اطمینان و روابط مربوط به آن در حالت غیر اشباع در نرم افزار

۴۱..... Slope/w

۴۲..... ۱-۴- مقدمه

۴۳..... ۲-۴- اصول اولیه روش های تعادل حدی

۵۱..... ۳-۴- ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع (فشار آب حفره ای منفی)

۵۳..... ۴-۴- روش تنش المان محدود

۵۵..... ۵-۴- روش تعیین سطح لغزش فرضی

۵۵..... ۱-۵-۴- روش شبکه و شعاع برای سطح لغزش دایره ای

۵۶..... ۲-۵-۴- روش ورودی - خروجی

۵۷..... فصل پنجم: مدل سازی عددی

۵۸..... ۱-۵- معرفی نرم افزار Geo Studio 2012

۵۹..... ۲-۵- انواع مدل های رفتاری خاک

۶۱..... ۳-۵- پارامترهای مورد نیاز برای آنالیز

۶۷..... ۴-۵- مدل سازی

۶۹..... ۱-۴-۵- صحت سنجی نتایج نرم افزار در مدل سازی قسمتی از مسأله ۱

۷۱..... ۲-۴-۵- ساخت مدل مبنا ۱

- ۷۳..... ۱-۲-۴-۵- هندسه مدل ۱
- ۷۳..... ۲-۲-۴-۵- مشخصات خاک برای مدل مبنا ۱
- ۷۴..... ۳-۲-۴-۵- مش بندی مسأله برای کلیه مدل های ۱
- ۷۴..... ۴-۲-۴-۵- شرایط مرزی مسأله برای کلیه مدل های ۱
- ۷۶..... ۵-۲-۴-۵- خروجی نرم افزار برای مدل مبنا ۱
- ۷۸..... ۶-۲-۴-۵- نتایج مربوط به مدل مبنا
- ۷۹..... ۳-۴-۵- مطالعات پارامتریک برای مدل ۱
- ۱-۳-۴-۵- بررسی تاثیر عمق اولیه سطح آب زیر زمینی و تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی،
در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان
- ۸۰..... ۱-۱-۳-۴-۵- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 5m
- ۸۱..... ۱-۱-۳-۴-۵- خروجی نرم افزار برای Initial GWT depth = 5m و $K_{sat} = 1e-8$ m/s
- ۸۶..... ۲-۱-۳-۴-۵- خروجی نرم افزار برای Initial GWT depth = 5m و $K_{sat} = 1e-6$ m/s
- ۸۸..... ۳-۱-۳-۴-۵- خروجی نرم افزار برای Initial GWT depth = 5m و $K_{sat} = 1e-4$ m/s
- ۹۱..... ۲-۱-۳-۴-۵- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 10m
- ۲-۳-۴-۵- بررسی تاثیر در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک بر روی مقادیر
ضریب اطمینان با استفاده از معادلات غیر خطی در مدل ۱
- ۱۰۱..... ۳-۳-۴-۵- محاسبه ضریب اطمینان با استفاده از معادله خطی (Fredlund et al. (1978

- ۱۰۳.....۴-۳-۴-۵- بررسی تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی
- ۱۰۵.....۵-۳-۴-۵- بررسی تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر چسبندگی
- ۱۰۷.....۴-۴-۵- مدل ۲
- ۱۰۸.....۱-۴-۴-۵- صحت سنجی روند مدل سازی، عملکرد و نتایج نرم افزار
- ۱۱۰.....۲-۴-۴-۵- هندسه مدل ۲
- ۱۱۰.....۳-۴-۴-۵- مشخصات خاک برای مدل ۲
- ۱۱۱.....۴-۴-۴-۵- خروجی نرم افزار برای مدل ۲
- ۱۱۳.....۵-۴-۵- مدل ۳
- ۱۱۳.....۱-۵-۴-۵- هندسه مدل ۳
- ۱۱۴.....۲-۵-۴-۵- مشخصات خاک برای مدل ۳
- ۱۱۴.....۳-۵-۴-۵- خروجی نرم افزار برای مدل ۳
- ۱۱۷.....فصل ششم: مرور نتایج
- ۱۱۸.....۱-۶- خلاصه و مرور نتایج
- ۱۲۰.....۲-۶- پیشنهادات برای تحقیقات آینده
- ۱۲۱.....منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۳: توزیع تنش کل، فشار هوای حفره ای و فشار آب حفره ای در خاک غیراشباع [۱۱] ۱۹
- شکل ۲-۳: منحنی های مشخصه آب خاک متناظر با ماسه و سیلت و رس [۱۳] ۲۲
- شکل ۳-۳: منحنی مشخصه آب - خاک برای محیط متخلخل فرضی [۹] ۲۴
- شکل ۴-۳: تغییرات احتمالی آب هر ناحیه در منحنی مشخصه آب - خاک [۹] ۲۴
- شکل ۵-۳: پوش گسیختگی موهر - کولمب در خاک های اشباع [۱۱] ۲۶
- شکل ۶-۳: پوش گسیختگی خطی توسعه یافته موهر - کولمب برای خاک های غیر اشباع [۱۱] ۲۹
- شکل ۷-۳: مفهوم چسبندگی ظاهری با توجه به معادله خطی مقاومت برشی [۱۱] ۳۱
- شکل ۸-۳: پوش گسیختگی موهر - کولمب در مقادیر مکش مختلف [۱۱] ۳۱
- شکل ۹-۳: رابطه بین پوش مقاومت برشی غیراشباع و SWCC : (الف) پوش مقاومت برشی غیراشباع [۲] (ب) فرم کلی SWCC [۲۰] ۳۴
- شکل ۱۰-۳: پروفیل مکش بافتی، تحت شرایط مرزی جریان سطحی مختلف [۴] ۴۰
- شکل ۱-۴: نیروهای وارد بر یک قطعه از قطعات یک توده لغزنده [۲۶] ۴۴
- شکل ۲-۴: نیروهای وارده به یک قطعه از یک توده لغزنده با سطح لغزش دایره ای [۲۶] ۴۵
- شکل ۳-۴: مقادیر ضریب اطمینان بر اساس λ [۲۶] ۵۱
- شکل ۴-۴: روش ترسیم دایره لغزش فرضی در روش G-R [۲۶] ۵۶

شکل ۴-۵: روش ترسیم دایره لغزش فرضی در روش E-E [۲۶] ۵۶

شکل ۵-۱: منحنی تنش - کرنش در مدل های رفتاری [۲۹] (الف) الاستیک خطی، (ب) الاستیک - پلاستیک و (ج) کم

کلی اصلاح شده ۶۰

شکل ۵-۲: منحنی مشخصه آب - خاک مورد استفاده برای مدل سازی [۳۳] ۶۴

شکل ۵-۳: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=1e-4$ m/s و استفاده از

SWCC ۶۵

شکل ۵-۴: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=1e-6$ m/s و استفاده از

SWCC ۶۶

شکل ۵-۵: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=1e-8$ m/s و استفاده از

SWCC ۶۶

شکل ۵-۶: کانتورهای فشار آب حفره ای: (الف) پس از حذف چهارمین لایه (ب) در پایان روز ۸۰م ۶۹

شکل ۵-۷: کانتورهای فشار آب حفره ای: (الف) پس از حذف چهارمین لایه (ب) در پایان روز ۸۰م ۷۰

شکل ۵-۸: هندسه مدل ۱ ۷۳

شکل ۵-۹: مش بندی مسأله ۱ ۷۴

شکل ۵-۱۰: شرایط مرزی برای مدل ۱؛ (الف) شرایط مرزی مربوط به جا به جایی (ب) شرایط مرزی هیدرولیکی ۷۵

شکل ۵-۱۱: منحنی ضریب اطمینان - زمان در مدل مینا؛ $\phi^b = 15^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m ۷۶

شکل ۵-۱۲: منحنی ضریب اطمینان - زمان در مدل مینا؛ $\phi^b = 0^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m

۷۷.....

شکل ۵-۱۳: گوه گسیختگی در مدل مینا، در حالت پایدار؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m

۷۷.....

شکل ۵-۱۴: گوه گسیختگی در مدل مینا؛ $\phi^b = 0^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m

۷۷.....

شکل ۵-۱۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-8$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۱.....

شکل ۵-۱۶: گوه گسیختگی، کانتورهای فشار آب حفره ای و مقادیر ضریب اطمینان : (الف) پس از پایان گودبرداری،

(ب) در زمانی که کمترین ضریب اطمینان حاصل شده است (میان مدت)، (ج) حالت پایدار؛ $K_{sat} = 1e-8$ m/s و

۸۲..... Initial GWT depth = 5 m

شکل ۵-۱۷: خطوط فشار آب حفره ای صفر، (الف) مقایسه کوتاه مدت و بلند مدت (ب) مقایسه کوتاه مدت، میان مدت

و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-8$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۵.....

شکل ۵-۱۸: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-8$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۵.....

شکل ۵-۱۹: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۷.....

شکل ۵-۲۰: خطوط فشار آب حفره ای صفر در حالت کوتاه مدت و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-6$ m/s و

۸۷..... Initial GWT depth = 5 m

شکل ۵-۲۱: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۸.....

شکل ۵-۲۲: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

۸۹.....

شکل ۵-۲۳: خطوط فشار آب حفره ای صفر در حالت کوتاه مدت و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-4$ m/s و

۸۹..... Initial GWT depth = 5 m

- شکل ۲۴-۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5 m ۹۰
- شکل ۲۵-۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m ۹۱
- شکل ۲۶-۵: تغییرات خطوط فشار آب حفره ای و گوه گسیختگی؛ (الف) پس از پایان گود برداری (ب) پس از رسیدن به حالت پایدار؛ $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m ۹۲
- شکل ۲۷-۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m ۹۳
- شکل ۲۸-۵: پوش های مقاومت برشی، با توجه به روابط خطی و غیر خطی، در محدوده مکش بین ۰ تا حداکثر ۲۰۰ کیلو پاسکال ۹۴
- شکل ۲۹-۵: پروفیل های مختلف از مکش بافتی به صورت درصدی از پروفیل مکش بافتی در حالت هیدرواستاتیکی، در بالای سطح آب زیر زمینی ۹۵
- شکل ۳۰-۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) ۹۶
- شکل ۳۱-۵: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود؛ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) ۹۷
- شکل ۳۲-۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996) ۹۸
- شکل ۳۳-۵: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996) ۹۹

شکل ۵-۳۴: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)..... ۹۹

شکل ۵-۳۵: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود؛ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)..... ۹۹

شکل ۵-۳۶: مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از معادله خطی مقاومت برشی برای پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک ۱۰۱

شکل ۵-۳۷: تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زاویه اصطکاک داخلی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک ۱۰۳

شکل ۵-۳۸: تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر چسبندگی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک ۱۰۵

شکل ۵-۳۹: ابعاد، گوه گسیختگی و مقادیر ضریب اطمینان؛ (الف) Fredlund et al. (1978). $\phi^b=15^\circ$ (ب) رابطه غیر خطی Vanapalli et al. (1996)..... ۱۰۹

شکل ۵-۴۰: هندسه مدل ۲..... ۱۱۰

شکل ۵-۴۱: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی Vanapalli et al. (1996)..... ۱۱۱

شکل ۵-۴۲: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی Fredlund et al. (1996)..... ۱۱۲

شکل ۵-۴۳: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)..... ۱۱۲

شکل ۵-۴۴: هندسه مدل ۳..... ۱۱۳

شکل ۵-۴۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی Vanapalli et al. (1996)..... ۱۱۴

شکل ۵-۴۶: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی Fredlund et al. (1996)..... ۱۱۵

شکل ۵-۴۷: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)..... ۱۱۵

فهرست جداول

جدول ۵-۱: پارامترهای اصلی برای مدل سازی و واحد استاندارد آن ها ۶۱

جدول ۵-۲: مشخصات خاک برای مدل مینا ۱ ۷۳

جدول ۵-۳: بررسی نتایج مقاله فردلونند و همکاران ۲۰۱۴ [۲] ۱۰۸

جدول ۵-۴: مشخصات خاک برای مدل ۲ ۱۱۰

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

تعیین ضریب اطمینان در برابر شکست شیروانی های طبیعی و غیر طبیعی، یکی از متداول ترین مسائل کاربردی در مهندسی ژئوتکنیک است که به مقاومت برشی خاک وابسته است. تحلیل پایداری شیروانی ها بر اساس مفروضات مکانیک خاک کلاسیک برای خاک های زیر و بالای سطح آب زیر زمینی به ترتیب شرایط اشباع کامل و کاملاً خشک فرض می شود. این در حالی است که اغلب لایه های سطحی در بسیاری از مناطق در شرایط نیمه اشباع قرار دارند؛ به طور کلی خاک بالای سطح آزاد آب غیر اشباع است و در این شرایط غیر اشباع وجود مکش بافتی^۱ است که سبب افزایش مقاومت برشی خاک در این نواحی می شود که اغلب از آن صرف نظر می شود.

به طور کلی شیروانی ها به دو دسته تقسیم می شوند:

(۱) شیروانی های نامحدود^۲: شیب های خاکی که در طول زیاد و به صورت نامحدود از دوطرف امتداد یافته اند (مانند دامنه کوه ها).

(۲) شیروانی های محدود^۳: شیب های خاکی که دارای طول محدود و ارتفاع مشخص هستند (مانند تپه ها یا گودبرداری ها).

۱-۲- ضرورت تحقیق

پارامترهای مقاومت برشی خاک نقش مهمی در تحلیل پایداری گودبرداری ها و شیروانی های خاکی دارند. عموماً در تحلیل و محاسبه پایداری گودبرداری ها و شیروانی های خاکی در نواحی غیر اشباع از پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت اشباع استفاده می شود. این در حالی است که در بسیاری از

¹ Matric suction

² Infinite slope

³ Finite slope

مناطق خشک و نیمه خشک سطح آب زیر زمینی معمولاً در ترازهای پایین قرار گرفته و لایه های خاکی که در بالای تراز سطح آب زیر زمینی قرار گرفته اند، دارای فشار آب حفره ای منفی می باشند. وجود فشار آب حفره ای منفی در بالای تراز سطح آب زیر زمینی، سبب تغییرات درجه اشباع که تابعی از همین فشار آب حفره ای منفی (مکش بافتی) است می شود؛ در واقع در بالای تراز سطح آب زیر زمینی با توده های خاکی که در حالت غیر اشباع هستند روبرو هستیم و سطوح لغزش بحرانی هم عمدتاً از همین نواحی غیر اشباع می گذرد. به نظر می رسد، استفاده از پارامترهای مقاومت برشی اشباع و در نظر نگرفتن تاثیر وجود فشار آب حفره ای منفی (مکش بافتی) در نواحی غیر اشباع، در افزایش مقاومت برشی، به نوعی دست کم گرفتن مقاومت برشی خاک می باشد. در تحقیقات گذشته در این زمینه عمدتاً شیب افزایش مقاومت برشی نسبت به افزایش مکش بافتی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است، حال آنکه نتایج آزمایشات تعیین مقاومت برشی در حالت غیر اشباع نشانگر اینست که شیب افزایش مقاومت برشی نسبت به افزایش مکش بافتی به صورت غیر خطی است و نیز عمدتاً از پروفیل مکش بافتی^۱ در حالت هیدرواستاتیکی در عمق خاک برای در نظر گرفتن تاثیر مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی استفاده شده است.

۳-۱- تعریف مسأله و اهداف تحقیق

در این پایان نامه سعی بر آنست که به بررسی تاثیر فشار آب حفره ای منفی یا مکش بافتی که در ناحیه ی غیر اشباع خاک وجود دارد بر روی پایداری گودبرداری ها بپردازیم؛ در این راستا سه گود با هندسه متفاوت نسبت به هم، با عمق حفاری ۱۰ متر، مدل سازی شده اند.

^۱ Matric suction profile

در مدل ۱ که گودبرداری به صورت شیب دار، با شیب کم در نظر گرفته شده است و روش تعیین ضریب اطمینان در این مدل بر مبنای روش تنش المان محدود^۱ است، اهداف زیر دنبال شده است:

- تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان تعیین شده است.
- تاثیر تغییرات ضریب نفوذپذیری که تابعی از مکش بافتی است، در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، بررسی شده است.
- تاثیر عمق اولیه سطح آب زیر زمینی در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، بررسی شده است. همچنین موارد زیر در مدل ۱ با در نظر گرفتن عمق سطح آب زیر زمینی در تراز ۲۰ متری نسبت به سطح زمین، بررسی شده اند:
- مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، با استفاده از روابط غیر خطی برآورد مقاومت برشی، محاسبه شده است.
- مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، با استفاده از رابطه خطی برآورد مقاومت برشی، محاسبه شده است.
- تاثیر پارامترهای مقاومت برشی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی، در محاسبه ضرایب اطمینان، بررسی شده است.

تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان به منظور بررسی این مورد که آیا اضافه فشار آب حفره ای نسبت به حالت پایدار در حین گودبرداری در زیر ناحیه گودبرداری یا اطراف آن ایجاد می شود یا خیر؟ و اگر ایجاد می شود، فرآیند از بین رفتن این اضافه فشار آب حفره ای با گذشت زمان تا رسیدن به حالت پایدار، بر روی مقدار ضریب اطمینان، چگونه تاثیر می گذارد. همان طور که انتظار می رود، مقدار

¹ Finite element stress method

ضریب نفوذپذیری در این حالت به شدت تاثیر گذار است. نحوه مدل سازی در فصل پنجم توضیح داده شده است.

در مدل های ۲ و ۳ که دارای هندسه متفاوت نسبت به مدل ۱ می باشند، با در نظر گرفتن عمق سطح آب زیر زمینی در تراز ۲۰ متری نسبت به سطح زمین، مقادیر ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع در این دو مدل، با استفاده از روش تعادل حدی Morgenstern-Price و با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، تعیین شده است.

هدف از بررسی موارد در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، اینست که بررسی کنیم در نظر گرفتن درصدی کم از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، چه مقدار می تواند در افزایش ضریب اطمینان تاثیر گذار باشد.

۴-۱- روش تحقیق

برای تعیین ضریب اطمینان در این پایان نامه از نرم افزار Geo Studio 2012 (ویرایش ۲۰۱۵) استفاده شده است.

مدل ۱ به صورت شیب دار، با شیب کم در نظر گرفته شده است.

تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان تعیین و تاثیر پارامترهای ضریب نفوذپذیری و عمق اولیه سطح آب زیر زمینی در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، در این مدل بررسی شد، در این حالت توزیع اولیه فشار آب حفره ای در عمق خاک در بالا و پایین سطح افقی آب زیر زمینی به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته شده است و با انجام آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای^۱ و استفاده از مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک، مقادیر تنش ها و مقادیر فشار آب حفره ای در نواحی اشباع و غیر

¹ Coupled Stress-Pore Water Pressure Analysis

اشباع در طول گودبرداری و پس از اتمام آن تا رسیدن به حالت پایدار^۱ در نرم افزار Sigma/w محاسبه شده است و از آن ها برای محاسبه ضریب اطمینان در نرم افزار Slope/w استفاده شده است؛ در واقع با استفاده از این آنالیز، اجازه داده می شود رژیم اولیه فشار آب حفره ای که به صورت هیدرواستاتیکی است، تغییر نکند؛ اجازه توسعه فشار آب حفره ای منفی در اطراف ناحیه گودبرداری داده می شود و اجازه داده می شود، اضافه فشار آب حفره ای با گذشت زمان از بین برود تا به حالت پایدار برسد و مقادیر ضریب اطمینان در زمان های مختلف، مطابق با توزیع های مختلف فشار آب حفره ای تا رسیدن به حالت پایدار، محاسبه می شود.

برای تعیین ضرایب اطمینان در پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی و نیز بررسی تاثیر پارامتر های مقاومت برشی در پروفیل های مختلف مکش بافتی، بر روی مقدار ضریب اطمینان، سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته شده است. در این حالات بحث زمان و تغییرات ضریب اطمینان با زمان مطرح نمی شود و شرایط پایدار را در نظر می گیریم. برای بررسی این موارد ابتدا مقادیر تنش ها به وسیله نرم افزار Sigma/w محاسبه می شود و سپس توسط نرم افزار Slope/w، ضرایب اطمینان محاسبه شده است و تاثیر وجود فشار آب حفره ای منفی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف به صورت مستقیم در نرم افزار Slope/w با افزایش مقاومت برشی لحاظ می شود. در واقع هدف از بررسی این موارد اینست که بررسی کنیم که در نظر گرفتن درصدی کم از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، چه مقدار می تواند در افزایش ضریب اطمینان تاثیر گذار باشد. مبنای تعیین ضریب اطمینان در مدل ۱، روش تنش المان محدود است.

در مدل های ۲ و ۳ که دارای هندسه متفاوت نسبت به هم هستند، سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته شده است و مقادیر ضریب اطمینان، با در نظر گرفتن پروفیل

¹ Steady-State

های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، با استفاده از روش تعادل حدی Morgenstern-Price، توسط نرم افزار Slope/w، محاسبه شده است. برای مدل های ۲ و ۳ نیز بحث زمان و تغییرات ضریب اطمینان با زمان مطرح نمی شود و شرایط پایدار را در نظر می گیریم. مدل ۲ به صورت شیب دار، با شیب تند و مدل ۳ با شیب قائم در نظر گرفته شده اند. خروجی نهایی برای تمام مدل ها در دو حالت؛ نظر نگرفتن تاثیر فشار آب حفره ای منفی (مکش بافتی) در مقاومت برشی خاک و استفاده از پارامترهای مقاومت برشی در حالت اشباع (حالت متداول) و در نظر گرفتن تاثیر فشار آب حفره ای منفی (مکش بافتی) در افزایش مقاومت برشی خاک، بدست آمده است؛ توزیع مکش بافتی و توزیع مقادیر درجه اشباع متناظر با آن از روی منحنی مشخصه آب - خاک^۱ نوعی خاک سیلتی، در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه ضرایب اطمینان در زمان های مختلف و مطالعات پارامتریک برای موارد مرتبط با زمان در حالات غیر اشباع، رابطه خطی مقاومت برشی (Fredlund et al. (1978) به کار برده شده است و هنگامی که تاثیر در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، مورد مطالعه قرار می گیرد از روابط غیر خطی؛ (Vanapalli et al. (1996)، (Fredlund et al. (1996) و خلیلی و خباز^۲ (۱۹۹۸) نیز در تعیین ضریب اطمینان استفاده شده است. برای تعیین ضرایب اطمینان در همه حالات، از معیار گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب^۳ استفاده شده است.

پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی به صورت درصد های مختلفی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در بالای سطح آب زیر زمینی، در مقاومت برشی خاک، در نظر گرفته شده اند.

¹ Soil-Water Characteristic Curve

³ Mohr-Coulomb

² Khalili and Khabbaz

۱-۵- فصل بندی پایان نامه

فصول این تحقیق مطابق زیر است:

- در فصل اول، مقدمه و کلیات؛ ضرورت تحقیق، تعریف مسأله و اهداف تحقیق، روش تحقیق و فصل بندی پایان نامه بیان شده است.
- در فصل دوم به مرور برخی از کارهای انجام شده قبلی پرداخته می شود.
- در فصل سوم به بررسی مباحث تئوری مرتبط با خاک غیر اشباع و معرفی روابط خطی و غیر خطی مقاومت برشی پرداخته می شود.
- در فصل چهارم به معرفی روش های تعیین ضریب اطمینان و روابط مربوط به آن در حالت غیر اشباع، در نرم افزار Slope/w پرداخته می شود.
- در فصل پنجم، مدل سازی انجام می شود.
- در فصل ششم نیز به مرور نتایج پرداخته می شود.

فصل دوم: مروری برخی از کارهای انجام شده قبلی

۲-۱- در این فصل به مرور بخشی از کارهای انجام شده در رابطه با محاسبه ضریب اطمینان شیروانی ها در حالت غیر اشباع و برخی از مباحث تئوری مرتبط به برآورد مقاومت برشی در حالت غیر اشباع پرداخته می شود:

(Tsiampousi et al. (2012) در پژوهش خود با مدل سازی یک شیروانی گودبرداری شده و تعیین ضرایب اطمینان در زمان های مختلف به این نتیجه رسیده اند که در خاک های غیر اشباع ممکن است پایداری شیروانی های گودبرداری شده در کوتاه مدت و یا میان مدت بحرانی تر از بلند مدت باشد. شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان به مقدار زیادی به مقدار ضریب نفوذپذیری خاک در حالت اشباع بستگی دارد، شکل این منحنی نیز علاوه بر مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع به عمق اولیه سطح آب زیر زمینی نیز بستگی دارد. در این مقاله توزیع اولیه فشار آب حفره ای در بالا و پایین سطح افقی آب زیر زمینی به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته شده است [۱].

(Zhang et al. (2014) در پژوهش خود با بیان این که در فرم خطی معادله توسعه یافته موهر-کولمب هنگامی که مقدار زاویه ϕ^b (زاویه افزایش مقاومت برشی نسبت به افزایش مکش بافتی) نا مشخص باشد، گاهی اوقات مقدار $\phi^b = 15^\circ$ در مطالعه پایداری شیروانی، برای بررسی تاثیر مکش بافتی روی پایداری یک شیروانی، در نظر گرفته می شود و در بسیاری موارد با در نظر گرفتن $\phi^b = 0^\circ$ تاثیر مکش بافتی نادیده گرفته می شود، به بررسی آنالیز پایداری شیروانی ها پرداختند. در این مقاله، نتایج مطالعه با استفاده از آنالیز دو بعدی پایداری شیروانی توأم با برآورد مقاومت برشی به وسیله معادلات غیر خطی

و خطی با استفاده مستقیم و غیر مستقیم از SWCC¹ و همچنین با در نظر گرفتن توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ارائه شده است. تاثیرات استفاده از معادلات غیر خطی و خطی بر آورد مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع با استفاده از سه مسئله که اولی شامل شیروانی های نامحدود، دومین مسئله مربوط به شیروانی با شیب تند و سومین مسئله مربوط به شیروانی با شیب کم می باشد، نشان داده شده است و در نهایت چند توصیه برای مسائل مهندسی بر اساس نتایج حاصل از این مسائل به منظور استفاده از معادله خطی ارائه شده است [۲].

Rahardjo et al. (2014) در پژوهش خود ضمن بیان اینکه نگرانی اصلی مرتبط با گودبرداری پلکانی معادن، مربوط به پایداری شیروانی در زمان گودبرداری است، به بررسی کاربرد تئوری مکانیک خاک غیر اشباع بر روی آنالیز عددی پایداری شیروانی ها پرداختند. آنالیز های پایداری شیروانی ها با در نظر گرفتن پروفیل های مختلفی از مکش بافتی به منظور نشان دادن تاثیر مکش بافتی در حفظ پایداری شیروانی ها انجام شده است. در این مقاله دو نوع آنالیز برای نشان دادن تاثیر مکش بافتی بر روی پایداری شیروانی های خاکی انجام شده است؛ در حالت اول، مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از مکش بافتی و بر حسب درصدی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی و استفاده از معادله خطی تعیین شده است و نشان داده شده است که در نظر گرفتن درصدی کم از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی (۲۵٪)، سبب بهبود پایداری شیروانی به میزان قابل توجهی می شود و همچنین کمترین ضریب اطمینان زمانی بدست می آید که مکش بافتی برابر صفر در نظر گرفته می شود. در حالت دوم، تغییرات در مقدار فشار آب حفره ای منفی در طول بارش و پس از آن محاسبه

¹ Soil-Water Characteristic Curve

شده است. در این حالت توزیع اولیه فشار آب حفره ای منفی به صورت هیدرواستاتیکی با محدودیت حداکثر ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. تغییرات پروفیل مکش با استفاده از نرم افزار Seep/w در زمان بارش و پس از آن تعیین شده و مقدار تغییرات ضریب اطمینان با استفاده از نرم افزار Slope/w در زمان بارش و پس از آن، با انجام آنالیز تعادل حدی محاسبه شده است؛ در این حالت نیز از معادله خطی مقاومت برشی با در نظر گرفتن $\phi^b = 50\% \phi'$ استفاده شده است که کمترین ضریب اطمینان در پایان بارش باران مشاهده شده است [۳].

(Hamdhan and Schweiger (2011) در مقاله خود به ارزیابی تاثیرات پارامترهای هیدرولیکی خاک و بارندگی بر روی پایداری شیروانی خاکی پرداختند. مقاومت برشی خاک غیر اشباع بر اساس مفاهیم تنش موثر Bishop و در نظر گرفتن مکش تعیین شده است. توزیع اولیه مکش بافتی در عمق خاک را بر اساس توزیع هیدرواستاتیکی و توزیع درجه اشباع اولیه را متناظر با ۴ نوع SWCC که نماینده خاک های sand، silt، sandy clay و clay بودند در نظر گرفتند.

در این مقاله، با انجام آنالیز تنش موثر بر پایه مدل رفتاری موهر-کولمب، توسط نرم افزار Plaxis، به بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک و بارندگی، بر روی مقدار ضریب اطمینان، پرداخته شده است. آنها به این نتیجه رسیدند: پایداری شیروانی های خاکی غیر اشباع تحت تاثیر توزیع فشار آب حفره ای منفی (مکش) قرار دارند و وجود مکش در مقاومت برشی سبب افزایش ضریب اطمینان می شود؛ پارامترهای هیدرولیکی تاثیر عمده ای بر روی پایداری در طی بارش باران دارند؛ برای خاک های با نفوذپذیری کم، ضریب اطمینان کاهش چشمگیری در طی نفوذ باران نمی یابد با این وجود در خاک های با نفوذپذیری زیاد، نفوذ باران سبب کاهش عمده ای در مقدار ضریب اطمینان می شود و علت آن کاهش مکش بافتی در طی نفوذ باران است [۴].

افروشته و همکاران (۱۳۹۲) در مقاله خود سعی کردند تا با ذکر یک نمونه مطالعاتی و اعمال اثر پارامتر های مقاومتی غیر اشباع خاک با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب در نرم افزار Slope/w 2007 ، مقایسه ای بین ضرایب اطمینان پایداری شیروانی در حالت اشباع و غیر اشباع انجام بدهند. این تحقیق با توجه به اهمیت بررسی پایداری شیروانی خاکی انجام گرفته است. در این مقاله، یک شیروانی به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شده و پارامترهای هندسی شیروانی و پارامتر های مقاومت خاکی آن بصورت دقیق در نرم افزار Geo Studio2007 مدل شده است.

نتایج این تحقیق نشان دهنده افزایش ضریب اطمینان از حدود ۱۱ تا ۵۶ درصد برای خاک غیر اشباع است. این افزایش نشان دهنده این نکته است که گذر خاک از حالت اشباع به غیر اشباع باعث افزایش ضریب اطمینان می گردد؛ این موضوع در اثر تغییر در پارامترهای موثر در مقاومت برشی خاک های غیر اشباع می باشد. در این مقاله شیب افزایش مقاومت برشی نسبت به افزایش مکش بافتی، ϕ^b ، ثابت در نظر گرفته شده است [۵].

تاج آبادی پور و سلطانی (۱۳۹۲) در مقاله خود به این نتیجه رسیدند که در خاک های غیر اشباع پارامتر بسیار مهم، مقاومت برشی است که تابعی از درجه اشباع می باشد و روابط آن بسیار پیچیده و کاملاً متفاوت با روابط مربوط به حالت اشباع می باشد. با استفاده از نرم افزار Slope/w، پایداری شیروانی خاکی در دو حالت غیر اشباع و اشباع مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع به دلیل افزایش مقاومت برشی زیادتر از حالت اشباع است و همچنین با کاهش درجه اشباع، مقدار مکش بافتی موجود در ساختار آن بیشتر می شود و مقدار ضریب اطمینان افزایش می یابد [۶].

منصور زاده و همکاران (۱۳۸۶) در مقاله خود به بررسی تاثیر درجه اشباع خاک بر ضریب اطمینان خاکریز پرداخته اند و نتیجه گیری کردند، کاهش درجه اشباع سبب افزایش ضریب اطمینان می شود که دلیل آن وجود مکش بافتی در ساختار خاک غیر اشباع می باشد که این امر سبب استحکام بیشتر خاک و نیز افزایش مقاومت برشی خاک می شود همچنین با افزایش درجه اشباع، مکش بافتی موجود در ساختار آن کمتر می شود و بنابراین ضریب اطمینان در برابر پایداری کاهش می یابد [۷].

(Vanapalli and Fredlund 2000) در پژوهش خود ضمن بیان اینکه چندین روش در سال های اخیر برای پیش بینی مقاومت برشی با استفاده مستقیم و غیر مستقیم از SWCC و همچنین استفاده از پارامترهای مقاومت برشی اشباع ارائه شده است، مقایسه ای بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده مقاومت برشی غیر اشباع با استفاده روابط پیش بینی مقاومت برشی در محدوده مکش کم و زیاد انجام دادند. سه نوع خاک با خواص دانه بندی، درصد رس و نشانه خمیری مختلف در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند. پیش بینی مقاومت برشی با استفاده از رابطه های غیر خطی؛ Vanapalli et al. (1996)، Fredlund et al. (1996)، Oberg and Sallfors (1997)، خلیلی و خباز (۱۹۹۸) و Bao et al. (1998) انجام شد. آن ها با بررسی و مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده مقاومت برشی با استفاده از روابط نام برده به این نتایج رسیدند: معادله غیر خطی Fredlund et al. (1996) مطابقت خوبی بین مقادیر مقاومت برشی اندازه گیری شده و پیش بینی شده در محدوده مکش بین ۰ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال برای هر سه نوع خاک مورد بررسی فراهم می کند، همچنین این معادله پیش بینی بهتری را نسبت به سایر معادلات ارائه می کند، مقادیر پیش بینی شده با استفاده از این رابطه با مقادیر اندازه گیری شده در مکش های بالا نیز با یکدیگر مطابقت دارند؛ معادلات غیر خطی Vanapalli et al. (1996) و Bao et al. (1998) نیز مطابقت خوبی بین مقادیر مقاومت برشی اندازه گیری شده و

پیش بینی شده در محدوده مکش بین ۰ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال برای هر سه نوع خاک مورد بررسی فراهم می کنند؛ معادله (Oberg and Sallfors (1997) برای مقادیر مکش کم و زیاد بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده مقاومت برشی، مطابقت خوبی ندارد؛ معادله غیر خطی خلیلی و خباز در مقادیر مکش کم برای دو نوع خاک از سه نوع خاک برآورد منطقی ارائه می کند، ولی برای مقادیر مکش بالا با مقادیر اندازه گیری شده مطابقت نمی کند [۸].

Vanapalli et al. (1996) در پژوهش خود ضمن بیان اینکه رفتار غیر خطی پوش مقاومت برشی در برابر مکش بافتی به منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) مربوط می شود، یک مدل تحلیلی تجربی، بر اساس پارامترهای مقاومت برشی اشباع و SWCC، برای پیش بینی رفتار غیر خطی مقاومت برشی در برابر مکش ارائه کردند. آن ها همچنین بیان کردند که برای مسائل مهندسی با مکش بافتی کمتر از ۵۰۰ کیلو پاسکال مقدار زاویه اصطکاک داخلی موثر را می توان ثابت در نظر گرفت [۹].

سجودی و همکاران (۱۳۹۲) در مقاله خود با بررسی چند مقاله و پایان نامه و کتاب پیرامون تاثیر مکش بافتی بر روی رفتار مکانیکی خاک های غیر اشباع، ضمن بیان این که تفاوت اساسی بین خاک اشباع و غیر اشباع در مکش بافتی موجود در خاک های غیر اشباع می باشد؛ به گونه ای که رفتار خاک های غیر اشباع به میزان زیادی به مقدار مکش بافتی درون آن وابسته است به این نتایج رسیدند که: ۱- مکش کل درون خاک از دو جزء مکش بافتی و مکش اسمزی تشکیل شده است و مکش بافتی به میزان زیادی به رطوبت نسبی درون خاک بستگی دارد. این در حالی است که مکش اسمزی سهم کمی از مکش کل خاک را به خود اختصاص می دهد به همین دلیل به طور نسبی می توان گفت که کل مکش درون خاک با مکش بافتی برابر است. ۲- مکش بافتی با درصد رطوبت و درجه اشباع رابطه معکوس دارد و با افزایش درصد رطوبت و یا درجه اشباع، مکش بافتی کاهش می یابد. ۳- به دلیل وجود مکش

بافتی در خاک های غیر اشباع، رفتار مکانیکی این خاک ها، بخصوص در ضریب نفوذپذیری و مقاومت برشی، کاملا با خاک های اشباع متفاوت شده است. ۴- با توجه به انجام آزمایش سه محوری بر روی خاک های غیر اشباع، مشاهده می شود که با افزایش مکش بافتی چسبندگی خاک افزایش می یابد؛ این در حالی است که افزایش مکش بافتی هیچ تاثیری بر روی زاویه اصطکاک خاک ندارد؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت، مکش بافتی بر روی مقاومت برشی خاک تاثیر گذار است [۱۰].

فصل سوم: مباحث تئوری مرتبط با خاک های غیر

اشباع و معرفی روابط خطی و غیر خطی مقاومت

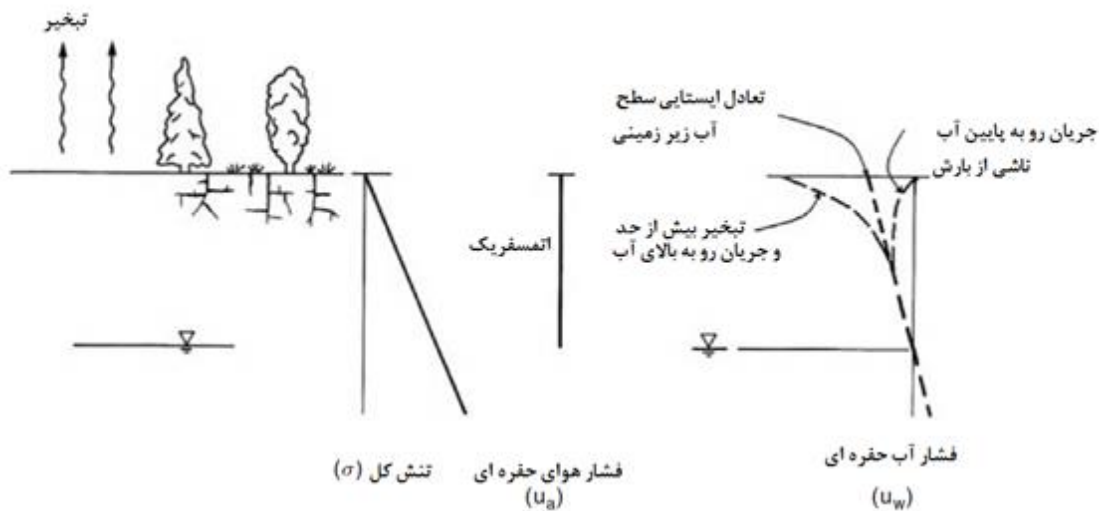
برشی

علم مکانیک خاک بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، دلالت دارد. با استفاده از تعاریف مکانیک خاک می توان رفتار گونه های مختلفی از خاک ها را بررسی نمود. خاک ها در حالت کلی یا در حالت کاملاً اشباع بوده و تمامی فضای حفرات آن ها توسط آب و یا یک سیال پر شده است و یا اینکه درون فضای حفرات آن ها هوا نیز وجود دارد. علم مکانیک خاک کلاسیک که بنیان گذار آن Carl Terzaghi می باشد به بررسی رفتار مکانیکی خاک ها در حالت کاملاً اشباع می پردازد. از این گونه خاک ها می توان به انواع خاک های ماسه ای، لای و رس اشاره نمود. در بررسی رفتار مکانیکی خاک ها در عمل حالات بسیاری وجود دارد که نمی توان برای تحلیل مسئله از روابط مکانیک خاک کلاسیک استفاده نمود؛ در اغلب این گونه حالات، مسئله شامل بیش از دو فاز می باشد. بر پایه مطالب فوق مکانیک خاک را به دو بخش مکانیک خاک های کاملاً اشباع و مکانیک خاک های غیر اشباع تقسیم می کنیم. در مکانیک خاک اشباع، خاک شامل دو فاز دانه های جامد خاک و آب بوده، در صورتی که در مکانیک خاک غیر اشباع، خاک دارای سه فاز آب، هوا و دانه های جامد خاک می باشد [۱۱].

تفاوت اساسی بین خاک های اشباع و غیر اشباع در مکش بافتی موجود در خاک های غیر اشباع می باشد. به گونه ای که رفتار خاک های غیر اشباع به میزان زیادی به مقدار مکش بافتی درون آن وابسته است و مکش بافتی نیز تا حد بسیار زیادی به درجه اشباع خاک وابسته است و با افزایش درصد رطوبت و یا درجه اشباع، مکش بافتی کاهش می یابد [۱۰].

یکی از شاخص های موثر بر روی حالت اشباع و یا غیر اشباع بودن لایه های خاک در طبیعت، اثر آب و هوا می باشد. آب درون خاک به وسیله تبخیر و یا جذب توسط ریشه ی گیاهان از داخل آن خارج می گردد. چنین رفتاری باعث ایجاد یک جریان از سمت پایین به بالا درون توده خاک می شود (مطابق شکل ۳-۱). همچنین به واسطه بارش باران و پدیده های طبیعی مشابه آن، آب به درون لایه های زمین

نفوذ کرده و باعث ایجاد یک جریان به سمت پایین می گردد. جریان های آب درون خاک به میزان زیادی بر روی فشار آب حفره ای درون خاک تاثیر می گذارد [۱۱].



شکل ۱-۳: توزیع تنش کل، فشار هوای حفره ای و فشار آب حفره ای در خاک غیر اشباع [۱۱]

۲-۳- درجه اشباع^۱

به نسبت حجم آب موجود در خاک به حجم کل حفرات آن اصطلاحاً درجه اشباع گفته و آن را با علامت S بر حسب درصد بیان می کنیم:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (1-3)$$

در صورتی که $S = 0$ باشد خاک در حالت کاملاً خشک بوده و زمانی که $S = 100\%$ باشد خاک را کاملاً اشباع اطلاق می کنیم. در حالتی که درجه اشباع محیط بین صفر تا ۱۰۰ درصد قرار داشته باشد، خاک را اصطلاحاً غیر اشباع می گوئیم.

¹ Degree of saturation

۳-۳- آب حجمی موجود^۱

به نسبت حجم آب به حجم کل در یک نمونه خاک اصطلاحاً آب حجمی موجود گفته و آن را با θ نشان

می دهیم:

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2-3)$$

مقدار θ را بر حسب درجه اشباع، پوکی و نسبت تخلخل می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\theta = \frac{V_v}{V} \times S = S \times n \quad (3-3)$$

از مقدار آب حجمی موجود در بررسی نمودارهای مشخصه آب - خاک در خاک های غیر اشباع استفاده

می کنیم.

۳-۴- نظریه مکش^۲ در خاک

در مکانیک خاک غیر اشباع حالت انرژی آزاد آب درون خاک را اصطلاحاً مکش گفته و آن را با ψ نشان

می دهیم [۱۱].

مکش کل درون خاک از دو جزء مکش بافتی و مکش اسمزی^۳ تشکیل شده است. مکش بافتی تفاوت

بین فشار منفذی هوا و فشار منفذی آب است و به وسیله نیروی کشش بین مولکول های آب در سطح

بین آب و هوا ایجاد می شود. مکش بافتی درون خاک ها را می توان مشابه حالت مویبندی در نظر

گرفت. در خاک ها حفرات با شعاع کوچک رفتار مشابهی با لوله مویبندی داشته و باعث می شوند تا آب

از سطح تراز آب زیر زمینی به سمت بالا کشیده شود. مقدار فشار آبی که به واسطه خاصیت مویبندی

به سمت بالا کشیده می شود نسبت به فشار هوا دارای مقدار منفی می باشد. در خاک ها در صورتی که

¹ Volumetric water content

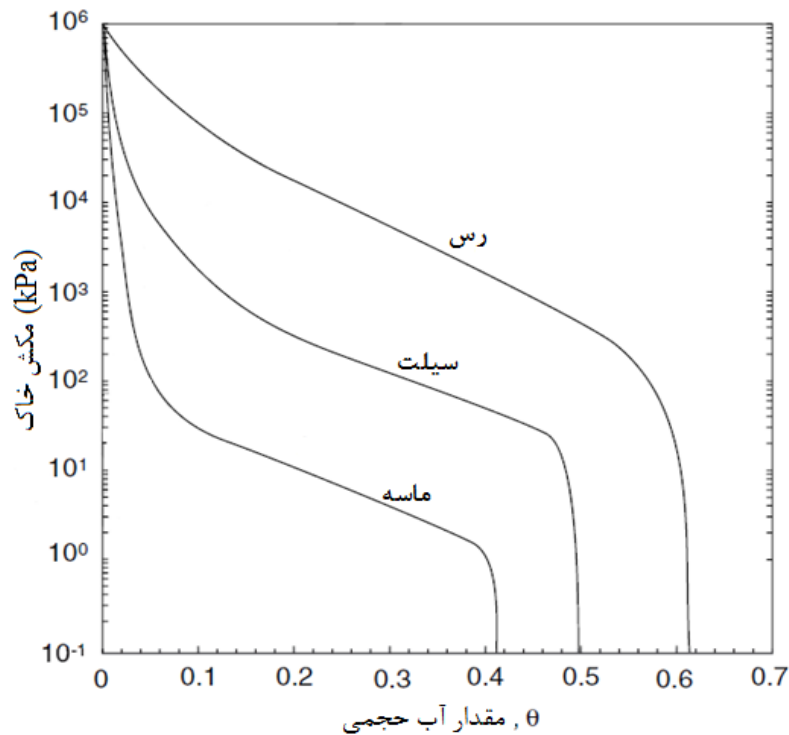
³ Osmotic Suction

² Suction

شعاع هلالی سطح تداخل آب و هوا کوچک باشد این عمل باعث می شود تا مقدار مکش بافتی درون خاک افزایش یابد و در نتیجه ارتفاع صعود مویبگی آب درون خاک به میزان زیادی افزایش یابد [۱۱]. به طور معمول آب درون حفرات خاک شامل نمک های محلول می باشد. در این حالت فشار بخار آب نسبت به فشار بخار آب خالص کاهش یافته و این عمل باعث کاهش مقدار رطوبت نسبی درون خاک می گردد. در واقع هر چه میزان نمک های محلول آب درون خاک بیشتر باشد از میزان رطوبت نسبی خاک کاسته شده و باعث افزایش و یا به وجود آمدن مکش اسمزی درون خاک می گردد [۱۱]. در کل مقدار مکش اسمزی درون خاک ناچیز و قابل چشم پوشی است در صورتی که مقدار آب حجمی موجود تغییر نماید، مکش بافتی درون خاک نیز تغییر خواهد نمود، اگر چه تغییر در مقدار آب حجمی موجود خاک تاثیر چندانی بر روی مقدار مکش اسمزی نخواهد داشت. به طور کلی برای خاک های دانه ای مکش موجود در خاک عمدتاً ناشی از پتانسیل مویبگی است در حالی که در مورد خاک های ریز دانه علاوه بر پتانسیل مویبگی، پتانسیل جذب آب و پتانسیل اسمزی نیز در ایجاد مکش نقش دارند [۱۲]. مجموع پتانسیل مویبگی و جذب آب، پتانسیل اسکلت (مکش بافتی) نامیده می شود [۱۲].

۳-۵- منحنی مشخصه آب - خاک

منحنی مشخصه آب - خاک از جمله مفاهیم اساسی در مکانیک خاک غیر اشباع می باشد و با استفاده از آن رابطه بین مکش بافتی و میزان آب حجمی موجود درون خاک (ویا درجه اشباع) بیان می شود. این منحنی با علامت اختصاری SWCC نشان داده می شود. با استفاده از منحنی های مشخصه آب - خاک می توان به مطالعه رفتار تغییر حجم، جریان و وضعیت تنش ها در خاک پرداخت. در شکل ۳-۲ منحنی مشخصه آب - خاک برای خاک های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: منحنی های مشخصه آب - خاک متناظر با ماسه و سیلت و رس [۱۳]

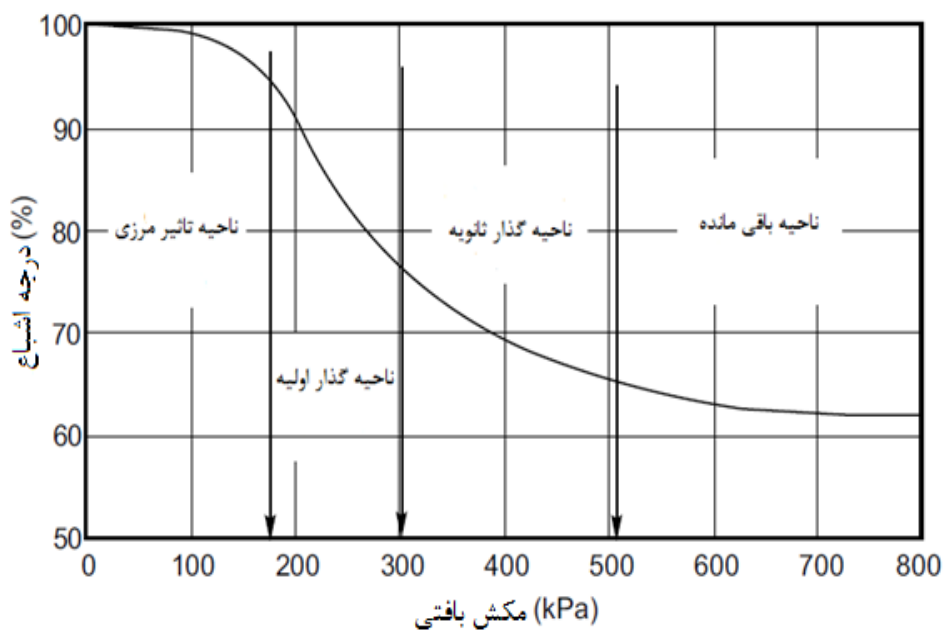
در صورتی که توده خاک را صلب فرض نموده و مقدار تخلخل همواره ثابت بماند، می توان در نمودار های مشخصه آب - خاک به جای مقدار آب حجمی موجود درون نمونه از مقدار درجه اشباع در مقابل مکش بافتی استفاده نمود. شکل نمودار مشخصه آب - خاک برای اغلب خاک ها به صورت S می باشد با توجه به شکل ۳-۲ مشاهده می شود که با افزایش میزان آب حجمی موجود درون خاک مقدار مکش بافتی کاهش یافته و هرچه مقدار آب حجمی موجود درون خاک کمتر باشد مقدار مکش بافتی متناظر با آن افزایش می یابد.

White et al. (1970) ([۱۴] و [۹]) مفاهیم اصلی برای نواحی مختلف کاهش اشباع را ارائه کردند و نویسندگان این مفاهیم را تا حدودی اصلاح کرده اند؛ شکل ۳-۳ نتایج بدست آمده را نشان می دهند؛ همان طور که در شکل مشخص است سه مرحله کاهش اشباع روی هر نمودار وجود دارد: مرحله تاثیر مرزی، دو مرحله گذار (تغییر از یک حالت به حالت دیگر) که از دو مرحله گذار اولیه و ثانویه تشکیل

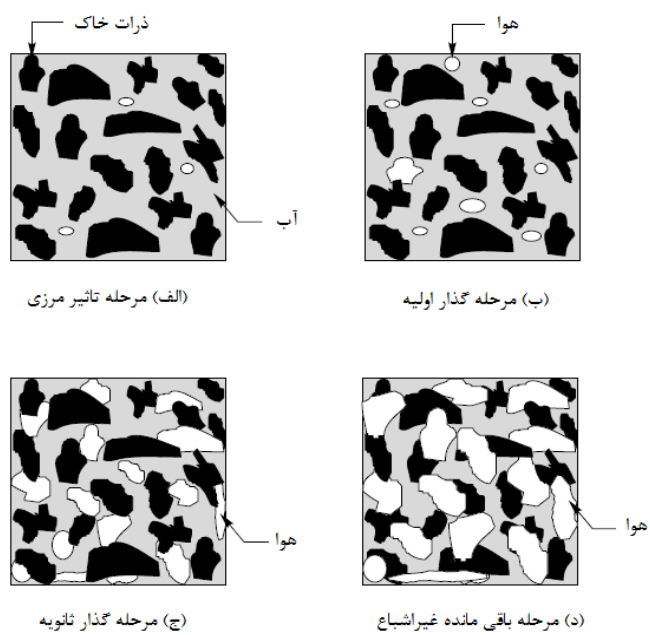
می شود و مرحله باقی مانده غیر اشباع. شکل ۳-۴ تغییرات آب ناحیه کاهش اشباع را برای مراحل مختلف روی SWCC نشان می دهد. در مرحله تاثیر مرزی همه خلل و فرج خاک با آب پر شده است (شکل ۳-۴-الف)؛ خاک در این مرحله در اصل اشباع است. اولین نقطه ی مهم روی منحنی مشخصه آب - خاک، مقدار ورودی هوا است که با نماد AEV یا $(u_a - u_w)_b$ نشان داده می شود؛ مقدار مکش نقطه ای را مشخص می کند که هوا وارد بزرگترین حفرات خاک می شود یا می توان این گونه تعریف کرد، مقدار فشار هوایی که نخستین بار وارد بزرگترین حفرات خاک می شود. در مرحله گذار نمونه خاک شروع به غیر اشباع شدن می کند (از حالت اشباع خارج می شود)؛ با افزایش مکش در این مرحله مقدار آب در خاک (درجه اشباع) کاهش قابل توجهی می یابد (۳-۴-ب و ۳-۴-ج). سرانجام به ناحیه ای می رسیم که با افزایش زیاد مکش تغییرات ناچیزی در مقدار آب (درجه اشباع) اتفاق می افتد؛ این مرحله را مرحله باقی مانده غیر اشباع می گویند. مقدار درجه اشباع در آغاز این مرحله را مقدار درجه اشباع ماندگار^۱ گویند. مقدار آب در این مرحله کم است (شکل ۳-۴-د) [۹].

نتایج آزمایشات بعدی مشخص کرد، رابطه ی روشنی بین مقاومت برشی و نرخ تغییرات آن با منحنی مشخصه آب - خاک وجود دارد و اکثر روابط برآورد مقاومت برشی با توجه به این منحنی ارائه می شوند که به توضیح آن ها می پردازیم.

¹ residual degree of saturation



شکل ۳-۳: منحنی مشخصه آب - خاک برای محیط متخلخل فرضی [۹]



شکل ۳-۴: تغییرات احتمالی آب هر ناحیه در منحنی مشخصه آب - خاک [۹]

۳-۶- مقاومت برشی

۳-۶-۱- تعریف

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز دهد. بخش مقاومت برشی با بررسی معیار گسیختگی موهر-کولمب برای یک خاک اشباع شروع می شود.

۳-۶-۲- معیار گسیختگی و پوش گسیختگی

پوش مقاومت برشی خاک اندازه ای از توانایی خاک برای تحمل تنش های برشی اعمال شده، است در نتیجه پوش مقاومت برشی توصیفی از شرایط گسیختگی است و خاک هنگامی دچار گسیختگی می شود که تنش برشی اعمالی از مقاومت برشی خاک بیشتر باشد. معیار گسیختگی حداکثر ترکیبات تنشی که خاک می تواند تحمل کند را توصیف می کند و خط مماس بر دوائر موهر در حالت گسیختگی، پوش گسیختگی نامیده می شود [۱۱].

۳-۶-۳- معادله مقاومت برشی برای خاک های اشباع

Carl Terzaghi رابطه زیر را با استفاده از اصل تنش موثر و پوش گسیختگی موهر-کولمب برای بیان مقاومت برشی خاک های اشباع بیان نمود [۱۱]:

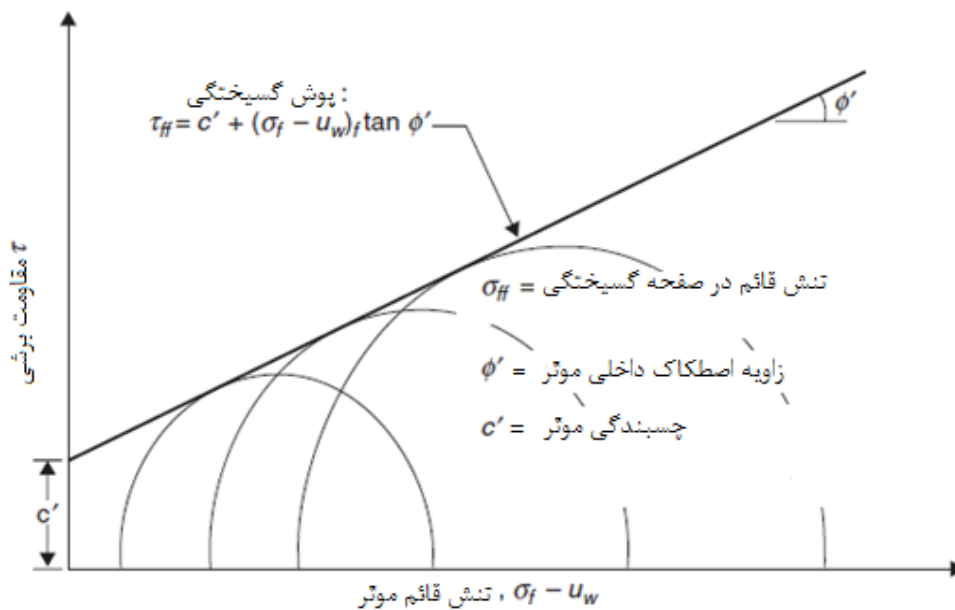
$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_{ff} - u_w)_f \tan \phi' \quad (۳-۴)$$

که در آن c' چسبندگی موثر و ϕ' زاویه اصطکاک داخلی موثر خاک می باشند. رابطه ۳-۴ پوش گسیختگی برشی در خاک های اشباع بوده و در شکل ۳-۵ نشان داده شده است این رابطه یک رابطه

خطی بین مقاومت برشی و تنش موثر را تعریف می کند. پوش گسیختگی موهر-کولمب را می توان با رسم مماس بر دوائر مور متناظر با حالت گسیختگی، ترسیم نمود.

رابطه ۳-۴ بر پایه متغیر تنش $(\sigma - u_w)$ بیان گردیده است. برای بیان مقاومت برشی در محیط های غیر اشباع لازم است تا از دو متغیر تنش استفاده شود. تئوری مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع از گسترش و تعمیم تئوری مقاومت برشی خاک های اشباع حاصل شده اند.

در اوایل دهه ۱۹۷۰، Fredlund et al به بررسی رفتار مقاومت برشی خاک های غیر اشباع بر پایه دو متغیر حالت تنش $(\sigma - u_a)$ و $(u_a - u_w)$ پرداختند و بر پایه نتایج مطالعات خود رابطه ای بر پایه دو متغیر حالت تنش برای بیان پوش گسیختگی برشی در خاک های غیر اشباع بیان نمودند.



شکل ۳-۵: پوش گسیختگی موهر-کولمب در خاک های اشباع [۱۱]

۳-۶-۴- معادلات مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع

رابطه تشکیل دهنده مقاومت برشی یک معادله ریاضی در رابطه با اجزای برشی و نرمال از تانسورهای تنش فراهم می کند.

تعمیم معادله مقاومت برشی برای خاک غیر اشباع با استفاده از دو متغیر حالت تنش $(u_a - u_w)$ و $(\sigma - u_a)$ می تواند به صورت زیر نوشته شود [۱۱]:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) f_1 \quad (۵-۳)$$

τ : مقاومت برشی، c' : چسبندگی موثر، σ_n : تنش قائم کل در صفحه گسیختگی و ϕ' : زاویه اصطکاک داخلی موثر

f_1 : تابعی که رابطه بین مقاومت برشی و مکش خاک را تعریف می کند. مشتق آن نسبت به مکش بافتی $(df_1/d(u_a - u_w))$ ، میزان تغییرات آبی مقاومت برشی نسبت به مکش بافتی را می دهد.

شکل معادله (۵-۳) امکان می دهد که پوش مقاومت برشی با توجه مکش بافتی، بسته به نتایج آزمون های آزمایشگاهی به صورت خطی یا منحنی باشد.

تحت شرایط مکش کم (کمتر از مقدار ورودی هوا)، مشتق f_1 نزدیک به مقدار $\tan \phi'$ می باشد. برای مکش های بیش از عدد ورودی هوا، پوش مقاومت برشی تبدیل به منحنی می شود؛ به طور کلی برای مکش های بیش از عدد ورودی هوا، یک انحنای تدریجی در پوش مقاومت برشی تا شرایط مکش باقی مانده ظاهر می شود [۱۱].

Nishimura and Fredlund. (2001) نشان دادند که در شرایط مکش های بالا (یعنی مقادیر مکش

بیش از مکش باقی مانده در خاک)، برای چندین خاک با محتوای سیلت و رس مختلف مشتق تابع f_1 به سمت صفر میل می کند [۱۵].

Donald (1956) و Gan and Fredlund (1996) نشان دادند، برای خاک های ماسه ای در مقادیر مکش بالاتر از مکش باقی مانده در خاک، حتی ممکن است (مشتق تابع f_1) شیب منفی شود [۱۶] و [۱۷].

۳-۶-۴-۱- پوش گسیختگی خطی در خاک های غیر اشباع

همان طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، پوش گسیختگی برای خاک اشباع از ترسیم دوائر موهر مربوط به شرایط گسیختگی در دو بعد بدست می آید. خط مماس بر دوائر موهر در این حالت پوش گسیختگی نامیده می شود.

Fredlund et al. (1978) بر پایه مطالعات گسترده خود، رابطه زیر را برای بیان مقاومت برشی خاک های غیر اشباع با استفاده از دو متغیر حالت تنش $(u_a - u_w)$ و $(\sigma - u_a)$ بیان نمودند [۱۸]:

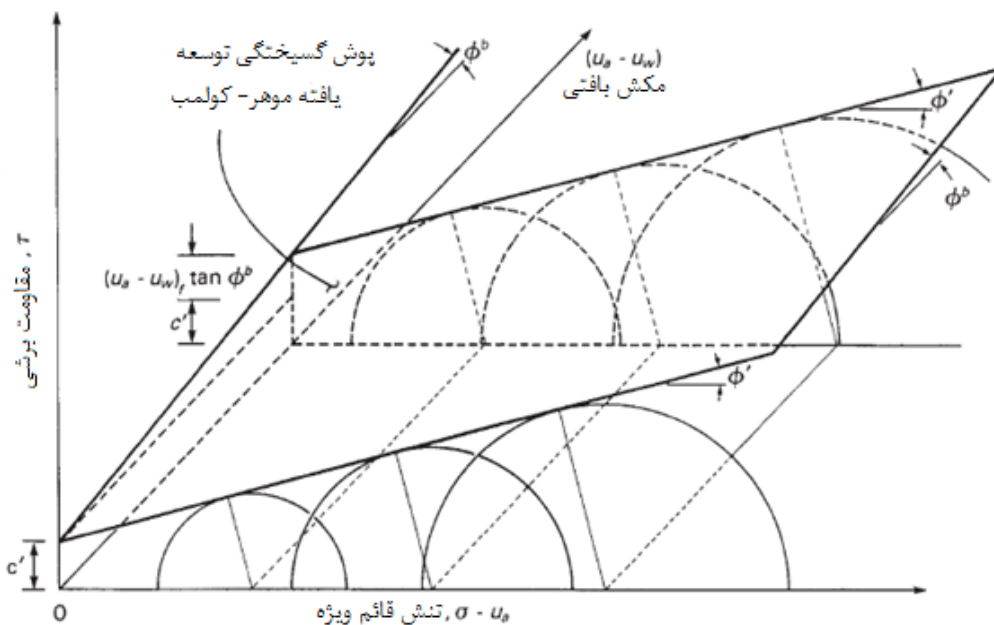
$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (۶-۳)$$

که در آن c' محل تقاطع پوش گسیختگی موهر-کولمب در صفحه تنش های قائم ویژه - تنش های برشی متناظر با مکش بافتی صفر با محور تنش های برشی می باشد و به آن اصطلاحاً چسبندگی موثر می گوئیم، $(\sigma - u_a)_f$ و $(u_a - u_w)_f$ نیز به ترتیب مکش بافتی و تنش های قائم ویژه متناظر با حالت گسیختگی و ϕ^b زاویه اصطکاک متناظر با متغیر $(u_a - u_w)$ می باشد.

در حالتی که خاک در حالت اشباع کامل باشد، مقدار u_a و u_w با هم برابر بوده در نتیجه رابطه ۳-۶ با رابطه ۳-۴ برابر خواهد شد.

در حالتی که خاک در وضعیت غیر اشباع قرار داشته باشد پوش گسیختگی برشی با توجه به رابطه ۳-۶ بایستی در فضای سه بعدی مطابق شکل ۳-۶ ترسیم شود. مقادیر ϕ^b و ϕ' و c' در شکل ۳-۶ نشان داده شده اند. پوش گسیختگی برشی در خاک های غیر اشباع که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، با رسم خطوط مماس بر دوائر موهر-کولمب در مقادیر مکش بافتی مختلف، بدست می آید؛ شکل این

پوش می تواند به صورت یک صفحه مسطح و یا ممکن است تا حدودی منحنی باشد که با توجه به رابطه ۳-۶ شکل پوش گسیختگی یک صفحه خواهد بود. این صفحه به وسیله پارامترهای ϕ^b و c' و ϕ' در فضای سه بعدی تنش های قائم ویژه - تنش های برشی - مکش بافتی مشخص می شود. تاثیر تنش های قائم ویژه و مکش بافتی بر روی مقاومت برشی خاک های غیر اشباع متفاوت از هم بوده و برای همین امر از دو پارامتر ϕ^b و ϕ' برای بیان نحوه تاثیر آن ها استفاده می شود. با توجه به نتایج آزمایش های مختلف مقدار ϕ^b همواره کوچکتر و یا مساوی مقدار ϕ' می باشد.



شکل ۳-۶: پوش گسیختگی خطی توسعه یافته موهر- کولمب برای خاک های غیر اشباع [۱۱]

مطابق شکل ۳-۷، تقاطع صفحه گسیختگی برشی با صفحه مکش بافتی - تنش برشی یک خط خواهد بود. این خط بیان گر این مطلب می باشد که مقاومت برشی خاک با افزایش مکش بافتی افزایش می یابد. شیب این خط برابر مقدار $\tan \phi^b$ می باشد. با توجه به شکل ۳-۷ معادله این خط را می توان با رابطه زیر بیان نمود:

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7-3)$$

که در آن C محل تقاطع پوش گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب با محور تنش برشی (متناظر با تنش قائم ویژه صفر) در یک مقدار مکش بافتی معین می باشد و به آن اصطلاحاً چسبندگی ظاهری اطلاق می شود.

با استفاده از مفهوم چسبندگی ظاهری و رابطه ۷-۳، معادله پوش گسیختگی برشی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\tau_f = C + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (8-3)$$

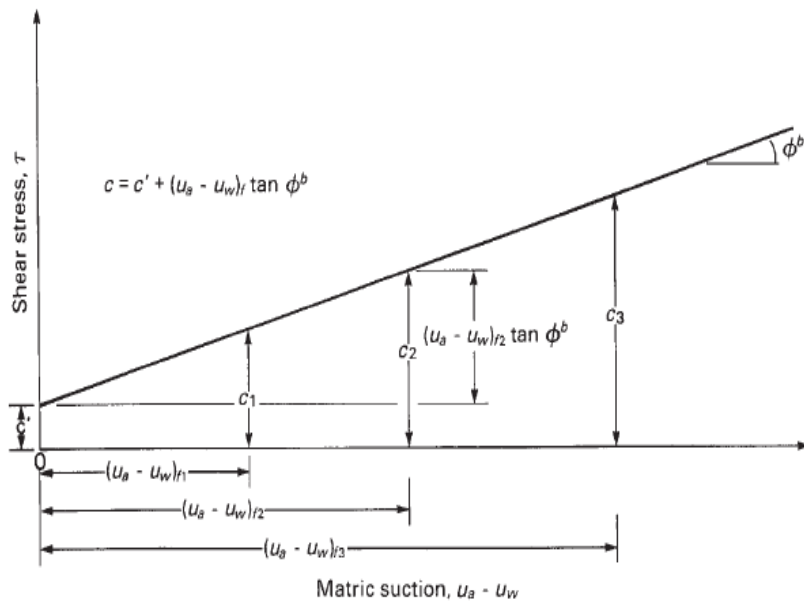
با توجه به رابطه ۸-۳ می توان پوش گسیختگی توسعه یافته برشی موهر-کولمب را در صفحه تنش های قائم ویژه - تنش برشی، با ترسیم خطوط متناظر با مقادیر مکش بافتی مختلف نشان داد. این حالت در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.

مقدار زاویه ϕ' در حالت غیر اشباع تحت مقادیر مکش (درجه اشباع) مختلف، ثابت در نظر می شود. البته این فرض ثابت بودن فرض منطقی و قابل قبولی است چرا که نتایج آزمایش های محققان مختلف، نشان از تغییرات ناچیزی در مقدار این زاویه با تغییرات مکش در بازه مکش بین ۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال دارد و مسائل مهندسی هم معمولاً در این بازه مکش بافتی قرار می گیرند [۹].

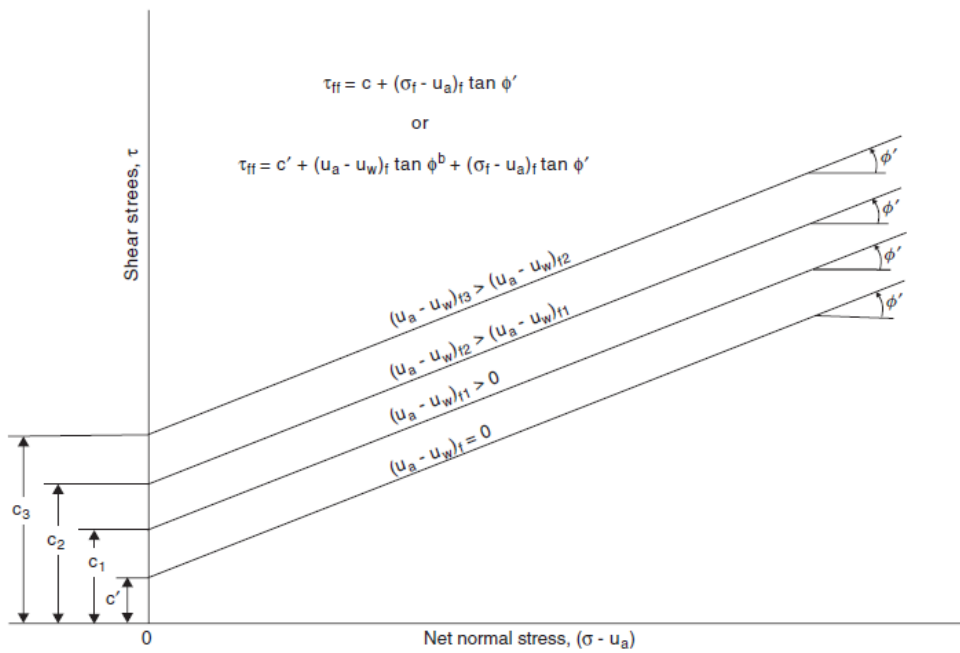
معادله ۸-۳ همان معادله ۶-۳ است که از جاگذاری معادله ۷-۳ حاصل شده است و شکل ۸-۳ ارائه ای از شکل دو بعدی پوش گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب، می باشد.

تبدیل حالت غیر اشباع به اشباع می تواند با کاربرد پوش گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب در شکل ۶-۳ نشان داده شود. هنگامی که خاک اشباع شود، مکش بافتی به سمت صفر می رود و پوش گسیختگی

توسعه یافته سه بعدی به پوش گسیختگی دو بعدی τ در برابر $(\sigma - u_w)$ ، تبدیل می شود.



شکل ۳-۷: مفهوم چسبندگی ظاهری با توجه به معادله خطی مقاومت برشی [۱۱]



شکل ۳-۸: پوش گسیختگی موهر-کولمب در مقادیر مکش مختلف [۱۱]

۳-۶-۴-۲- پوش گسیختگی غیر خطی در خاک های غیر اشباع

تئوری خطی مقاومت برشی برای خاک غیر اشباع، با کاربرد پوش گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب ارائه شد. برای طیف وسیعی از انواع خاک ها نتایج آزمایشگاهی نشان داد که رابطه افزایش مقاومت برشی در برابر مکش بافتی به یک رابطه خطی محدود نمی شود [۱۱].

۳-۶-۴-۳- برآورد توابع مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع

خواص غیر اشباع از جمله مقاومت برشی از توابع ریاضی غیر خطی که مکش بافتی را در نظر می گیرند، تبعیت می کند. اندازه گیری دقیق مقاومت برشی در خاک های غیر اشباع وقت گیر و پرهزینه است در نتیجه بر روی برآورد توابع مقاومت برشی غیر اشباع تاکید می شود [۱۱].

نشان داده شده است که مقاومت برشی یک خاک غیر اشباع به تغییرات درجه اشباع مربوط می شود، به همین دلیل عمدتاً توابع مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع با توجه به SWCC ارائه می شوند بنابراین معادلات تخمینی مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع، از پارامترهای مقاومت برشی اشباع و منحنی مشخصه آب - خاک (SWCC) به صورت مستقیم و غیر مستقیم استفاده می کنند. در روش های برآورد مقاومت برشی، عمدتاً دو متغیر حالت تنش و SWCC به کار می روند [۱۱].

۳-۶-۴-۴- ارتباط مشاهده شده بین SWCC و مقاومت برشی

Donald در سال ۱۹۵۶ یک سری از آزمایشات برش مستقیم روی نوعی ماسه انجام داد، این احتمالاً اولین مجموعه از آزمایش های مقاومت برشی انجام شده است که همراه با آن منحنی دفع SWCC اندازه گیری شد. نتایج این آزمایش نشان دهنده این بود که با افزایش مکش بافتی، مقاومت برشی افزایش می یابد با این حال در هر مورد از آزمایش ها نقطه ای وجود دارد که مقاومت برشی در مقادیر

مکش بافتی پس از آن ثابت و یا حتی شروع به کاهش می کند. این نقطه ی کلیدی نشان دهنده شرایط مکش باقی مانده است. اولین انحراف از زاویه اصطکاک داخلی موثر، ϕ' در صفحه مقاومت برشی - مکش بافتی پوش گسیختگی، درست قبل از مقدار AEV رخ داد. این نتایج ارتباط بین منحنی مشخصه آب - خاک (SWCC) و مقاومت برشی خاک در حالت غیر اشباع را نشان می داد [۱۶].

هنگامی که مقدار مکش بافتی از مقدار AEV بیشتر می شود، پوش مقاومت برشی تبدیل به منحنی می شود. پوش مقاومت برشی برای اکثر خاک ها با اندازه ذرات سیلت به سمت یک خط تقریباً افقی در نزدیکی شرایط مکش باقی مانده خم می شود. در خاک های رسی نیز مشاهدات آزمایشگاهی نشان دهنده افزایش مقاومت برشی حتی بعد از مکش باقی مانده می باشد [۱۱].

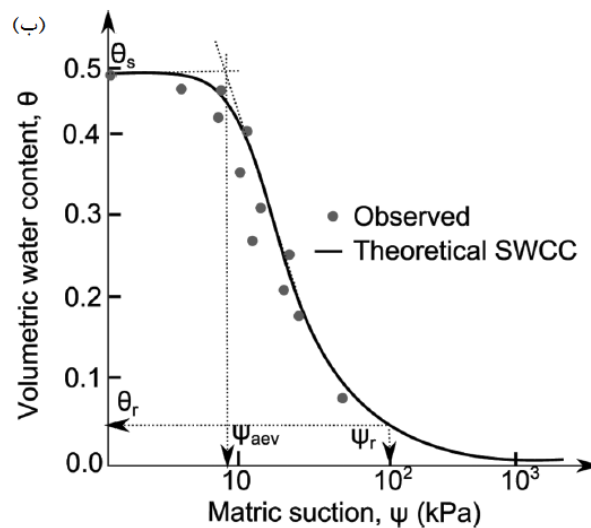
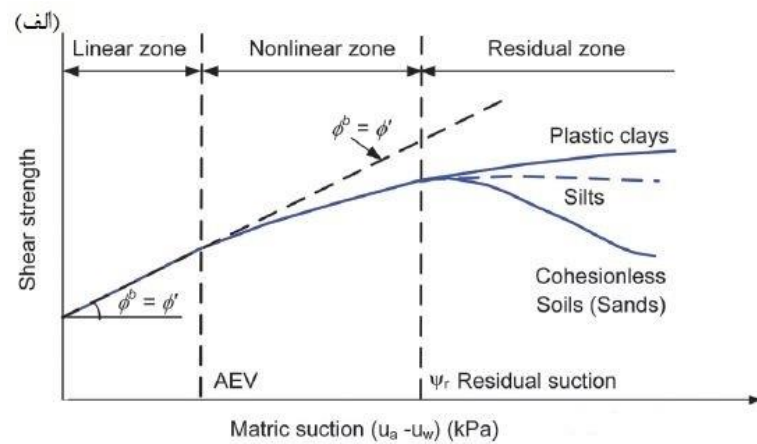
Nishimura and Fredlund (2002) با انجام آزمایش های فشاری محدود نشده^۱ روی دو نوع خاک سیلت و کائولن^۲ تحت مقادیر مکش بافتی بیش از مکش باقی مانده به همان نتایج ذکر شده قبلی رسیدند. در این آزمایش ها افزایش کمی در مقاومت برشی در مقادیر مکش بیش از مکش بافتی باقی مانده برای هر دو خاک مشاهده شد. شیب افزایش مقاومت برشی در برابر مکش بافتی در مسیر خشک شدن برای سیلت برابر ۰,۰۲ درجه و برای کائولن ۰,۳ درجه، اندازه گیری شد به عبارت دیگر پوش گسیختگی در صفحه مقاومت برشی - مکش بافتی در مقادیر مکش بیش از مکش بافتی باقی مانده، افقی است. در مسیر تر شدن هم این شیب اندازه گیری شد و در این مسیر هم نمودار پوش گسیختگی برای مقادیر مکش بیش از مکش باقی مانده به صورت افقی بود [۱۹].

آزمایش های دیگر هم روی خاک های سیلتی عمدتاً نشان دهنده همین نتایج بودند؛ Fredlund et al. 2012 پیشنهاد می کنند، برای خاک های با درصد سیلت و رس قابل توجه، منطقی است که نرخ افزایش مقاومت برشی در مقادیر مکش بیش از مکش ماندگار صفر در نظر گرفته شود [۲] و [۱۱].

¹ Unconfined compression test

² Kaolin

شکل ۳-۹ شمای کلی از پیش بینی مقاومت برشی در مورد انواع خاک ها را با توجه به آزمایش های مقاومت برشی که در این سال ها روی خاک های مختلف انجام شده است نشان می دهد:



شکل ۳-۹: رابطه بین پوش مقاومت برشی غیر اشباع و SWCC: (الف) پوش مقاومت برشی غیر اشباع [۲] (ب) فرم کلی SWCC [۲۰]

یکی از پرکاربردترین معادلاتی که برای ترسیم تئوری منحنی مشخصه آب - خاک کاربرد دارد، معادله Fredlund-Xing (1994) است که برای توسعه تابع مقدار آب حجمی برای همه فشار های منفی ممکن بین صفر تا یک میلیون کیلو پاسکال استفاده می شود. این معادله به فرم زیر است [۱۱]:

$$\Theta_w = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right)} \right] \frac{\Theta_s}{\left\{ \ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \right\}^m} \quad (9-3)$$

که در آن Θ_w ، مقدار آب حجمی، Θ_s مقدار آب حجمی در حالت اشباع، e عدد نپر (۲,۷۱۸۲۸)، ψ مقدار فشار آب حفره ای منفی، ψ_r مقدار مکش مربوط به مقدار آب حجمی باقی مانده و نقطه ای است که در آن با افزایش مکش، کاهش موثری در مقدار آب حجمی اتفاق نمی افتد، n , m , a پارامترهای مربوط به برازش منحنی هستند، واحد a کیلو پاسکال و نقطه عطف منحنی مشخصه آب - خاک است و به طور کلی کمی بزرگتر از مقدار ورودی هوا است، پارامتر n شیب منحنی مشخصه را کنترل می کند و پارامتر m مقدار مکش مربوط به آب حجمی باقی مانده را کنترل می کند.

۳-۶-۴-۵- معرفی برخی از معادلات مقاومت برشی برای خاک های غیر اشباع

هر دو شکل خطی و غیر خطی معادلات برآورد مقاومت برشی غیر اشباع در پیش بینی مقاومت برشی، در مسائل مهندسی به کار می روند. در این پایان نامه نیز برای محاسبه ضریب اطمینان از هر دو فرم خطی و غیر خطی معادلات برآورد مقاومت برشی در حالت غیر اشباع استفاده می شود.

۳-۶-۴-۵-۱- معادله خطی مقاومت برشی (Fredlund et al. (1978)

Fredlund et al. (1978) معادله مقاومت برشی بر اساس دو متغیر حالت تنش برای خاک های غیر

اشباع ارائه کردند [۱۸].

شکل این معادله به صورت خطی و پایه و اساس معادلات غیر خطی که بعداً مطابق معیار گسیختگی

موهر-کولمب ارائه شد، بود.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (10-3)$$

در این معادله، مقدار مقاومت برشی، c' پارامتر چسبندگی موثر در حالت اشباع، $(\sigma - u_a)$ تنش قائم ویژه در صفحه گسیختگی، σ تنش قائم کل، u_a فشار هوای حفره ای، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی موثر، $(u_a - u_w)$ مکش بافتی، u_w فشار آب حفره ای و زاویه ϕ^b نشان دهنده میزان افزایش در مقاومت برشی نسبت به متغیر مکش بافتی، می باشد. تجزیه و تحلیل مجموعه اطلاعات تحقیقات منتشر شده، متوسط ۱۵ درجه را برای ϕ^b نشان می دهد [۲۱].

۳-۶-۴-۵-۲- معادله غیر خطی مقاومت برشی (Vanapalli et al. (1996)

Vanapalli et al. (1996) معادله غیر خطی زیر را با استفاده از نرمال سازی SWCC بین شرایط مقدار آب حجمی اشباع و ماندگار خاک ارائه کردند [۹]:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [(\tan \phi') \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)] \quad (11-3)$$

یا

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [(\tan \phi') \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right)] \quad (12-3)$$

که در آن θ_w مقدار آب حجمی، و θ_s مقدار آب حجمی در حالت اشباع، θ_r مقدار آب حجمی ماندگار، S درجه اشباع، S_r درجه اشباع ماندگار می باشد.

پارامتر $\tan \phi^b$ در معادله خطی (Fredlund et al. (1978) با توجه به معادله غیر خطی Vanapalli et al. (1996) از شرایط اشباع تا شرایط مکش باقی مانده به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tan \phi^b = (\tan \phi') \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = (\tan \phi') \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right) \quad (13-3)$$

مطابق معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) مقدار ترم ϕ^b در شرایط مکش بافتی بیش از مکش بافتی باقی مانده، صفر در نظر گرفته می شود.

۳-۶-۴-۵-۳- معادله غیر خطی مقاومت برشی Fredlund et al. (1996)

Fredlund et al. (1996) معادله غیر خطی زیر را که SWCC در پارامتر بدون بعد θ_d گنجانده شده

است، ارائه کردند، شکل این معادله غیر خطی به صورت زیر است [۲۲]:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \theta_d^K \tan \phi' \quad (۱۴-۳)$$

که در آن θ_d پارامتر بدون بعد مربوط به SWCC که به صورت $\frac{\theta_w}{\theta_s}$ (که در آن θ_w مقدار آب حجمی و

θ_s مقدار آب حجمی در حالت اشباع می باشد) تعریف می شود، است.

پارامتر θ_d برابر مقدار درجه اشباع (S) می باشد، بنابراین رابطه (۱۴-۳) را می توان به صورت زیر باز

نویسی کرد:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) S^K \tan \phi' \quad (۱۵-۳)$$

K: پارامتر برازش مورد استفاده برای بدست آوردن بهترین برازش بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش

بینی شده می باشد.

پارامتر $\tan \phi^b$ در معادله خطی Fredlund et al. (1978) با توجه به معادله غیر خطی Fredlund et

al. (1996) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tan \phi^b = \theta_d^K \tan \phi' = S^K \tan \phi' \quad (۱۶-۳)$$

مشخص است که ϕ^b یک مقدار واحد نیست.

Garven and Vanapalli (2006) رابطه تجربی بین پارامتر برازش K و نشانه خمیری I_p بر اساس

اطلاعات ۱۰ خاک ارائه کردند. این رابطه چندین بار مورد بازنگری قرار گرفت اما رابطه زیر براساس

جدید ترین نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است [۲۳].

$$K = -0.0016I_p^2 + 0.0975I_p + 1 \quad (۱۷-۳)$$

۳-۶-۴-۵-۴- معادله غیر خطی مقاومت برشی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)

خلیلی و خباز (۱۹۹۸) فرض کردند که جزء مکش مقاومت برشی با حاصل ضرب مکش خاک در متغیر

λ' کاهش می یابد. این معادله غیر خطی به صورت زیر می باشد [۲۴]:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \lambda' \tan \phi' \quad (۱۸-۳)$$

پارامتر λ' به صورت زیر تعریف می شود:

$$\lambda' = 1.0 \quad (u_a - u_w) \leq AEV \quad (۱۹-۳)$$

$$\lambda' = \left(\frac{u_a - u_w}{AEV} \right)^{-0.55} \quad (u_a - u_w) > AEV$$

که در آن AEV، مقدار فشار ورودی هوا است که در مقادیر مکش پس از آن، خاک از حالت اشباع خارج می شود. مطابق معادله (۱۹-۳) در مکش های کمتر از AEV مقدار λ' برابر ۱ می باشد؛ بنابراین نرخ افزایش جزء مکش مقاومت برشی تا مقدار عدد ورودی هوا ثابت و پس از آن بدون تاثیری از مقدار مکش باقی مانده شروع به کاهش می کند. این رابطه برای انواع خاک ها به کار می رود و همانطور که از رابطه مشخص است نرخ افزایش مقاومت برشی در برابر مکش بافتی از AEV تاثیر می پذیرد.

با توجه به مطالب گفته شده، فرم کلی معادلات خطی و غیر خطی را نیز می توان مشابه رابطه ۳-۲۰ در نظر گرفت که تنها تفاوت آن ها نسبت به هم در پارامتر چسبندگی ظاهری است که به صورت خطی و غیر خطی نسبت به افزایش مکش بافتی، تغییر می کند.

$$\tau = (c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + c(\psi)) \quad (۲۰-۳)$$

که در آن $c(\psi)$ ، مقدار چسبندگی ظاهری ناشی از وجود مکش بافتی است.

۳-۷- ضریب هدایت هیدرولیکی (K)

توانایی یک خاک به حمل یا هدایت آب تحت شرایط اشباع و غیر اشباع توسط توابع هدایت هیدرولیکی منعکس می شود. در خاک های اشباع تمام فضای خالی بین ذرات جامد با آب پر شده است. در خاک های غیر اشباع به دلیل وجود هوا بین ذرات جامد و آب مقدار نفوذ پذیری کاهش می یابد و هنگامی که مقدار فشار منفی (مکش بافتی) بیشتر شود منافذ بیشتری از خاک توسط هوا پر شده و نفوذپذیری کاهش بیشتری می یابد. با توجه به این توضیحات روشن است که توانایی آب برای جریان یافتن در پروفیل خاک بستگی به این امر دارد که چقدر آب در داخل خاک وجود دارد که این به وسیله تابع مقدار آب حجمی مشخص می شود. در واقع اندازه گیری تابع هدایت هیدرولیکی فرآیندی وقت گیر و گران قیمت است. اما تابع می تواند به آسانی با استفاده از منحنی مشخصه آب - خاک و مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع (K_{sat}) تخمین زده شود. در نظر گرفتن یک تابع ثابت در حالت غیر اشباع می تواند منجر به نتایج غیر واقعی شود. در نظر گرفتن حتی یک منحنی تقریبی هدایت هیدرولیکی منجر به نتایج واقعی تر می شود [۲۵].

روش توسعه تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع مبتنی بر پایه انتگرال گیری در طول منحنی مشخصه آب - خاک می باشد. یکی از معادلات حاکم در این روش با توجه به مدل Fredlund et al. (1994) به فرم زیر است [۱۱]:

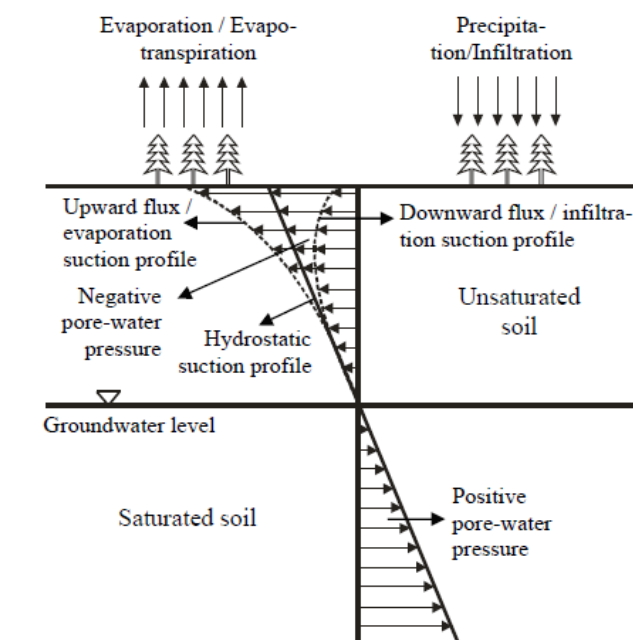
$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta(\psi)}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta_s}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})} \quad (۳-۲۱)$$

که در این رابطه k_w مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی برای یک مقدار مشخص آب حجمی یا فشار آب حفره ای منفی، k_s ضریب هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع، Θ_s مقدار آب حجمی در حالت اشباع، y متغیر کمکی انتگرال گیری نشان دهنده لگاریتم فشار آب حفره ای منفی، i شماره

قطعه که متناظر با کاهش درجه اشباع افزایش می یابد، زشمارنده بین i تا N ، N تعداد قطعات (بازه ها)، ψ مکش مربوط به قطعه زام و Θ' مشتق اول معادله ۳-۹.

۳-۸- پروفیل مکش بافتی

پروفیل مکش بافتی در یک لایه افقی از خاک غیر اشباع به طور کلی به چند عامل؛ خواص خاک که توسط SWCC و نفوذپذیری خاک مشخص می شود؛ فاکتورهای زیست محیطی از جمله نرخ های نفوذ بارش، تبخیر و شرایط مرزهای زهکشی از جمله موقعیت سطح آب زیر زمینی، بستگی دارد. پروفیل مکش بافتی هنگامی که جریانی از سطح زمین وجود نداشته باشد به یک شرایط تعادل هیدرواستاتیکی خواهد رسید. اگر رطوبت از سطح زمین توسط فرآیند تبخیر خارج شود این پروفیل از حالت هیدرواستاتیکی به سمت چپ کشیده می شود و اگر رطوبت وارد سطح آب زیر زمینی بشود این پروفیل به سمت راست کشیده می شود [۴].



شکل ۳-۱۰: پروفیل مکش بافتی، تحت شرایط مرزی جریان سطحی مختلف [۴]

فصل چهارم: روش های تعیین ضریب اطمینان و
روابط مربوط به آن در حالت غیر اشباع در نرم افزار

Slope/w

برای تعیین ضریب اطمینان در این پایان نامه از نرم افزار Slope/w 2012 (ویرایش ۲۰۱۵) استفاده شده است. این برنامه از مجموعه نرم افزار Geo Studio 2012 برای پایداری سطوح شیب دار و تعیین ضریب اطمینان (FOS) از طریق روش های تعادل حدی از قبیل Spencer, Junbu, Ordinary, Bishop و Morgenstern – Price و روش تنش المان محدود استفاده می کند [۲۶].

در این پایان نامه از هر دو روش تعادل حدی و روش تنش المان محدود استفاده می شود. مبنای تعیین ضریب اطمینان در مدل ۱ بر اساس تنش المان محدود و مدل های ۲ و ۳، بر اساس روش تعادل حدی Morgenstern – Price است.

چهارچوب کلی روش های تعادل حدی با وجود اختلاف و تفاوت در روند تحلیل و نتایج بدست آمده، یکسان بوده و مبنای نظری آن ها استفاده از قطعه های عمودی برش خورده از سطح لغزش شیروانی می باشد که هر روش با توجه به فرضیه ها و اصول کلی خود به تحلیل پایداری قطعه ها بر اساس تعادل گشتاور و نیرو و همچنین چگونگی تاثیر نیروهای افقی (برشی) و قائم در روند محاسبات می پردازد [۲۷]. تفاوت اصلی در میان روش های تعادل حدی اینست که چه معادلات استاتیکی در نظر گرفته و ارضا می شوند و کدام نیروهای درون قطعه ای برشی و نرمال را شامل می شوند و رابطه بین نیروهای درون قطعه ای چگونه در نظر گرفته می شود [۲۸].

در تحلیل و تعیین ضرایب اطمینان پایداری شیروانی های خاکی با استفاده از روش های تعادل حدی، به علت حساسیت و لزوم توجه بیشتر به دلیل ساخت انواع سازه ها بر روی آن ها، توصیه می شود که از روش هایی مانند روش Morgenstern – Price و Spencer که هر دو تعادل گشتاور و نیروها را ارضا کرده و اثر تمام نیروهای وارد بر قطعه ها اهم از نیروهای افقی و قائم را در نظر می گیرند، استفاده شود تا ضرایب اطمینان بدست آمده در شرایط واقعی نیز بتوانند به راحتی پاسخگوی نیاز پایداری شیروانی

خاکی باشند. این روش ها به دلیل در نظر گرفتن اثر هم زمان تمامی نیروها، معمولاً ضرایب اطمینان پایین تری را نتیجه داده و دارای درصد خطای کمتری نسبت به سایر روش ها هستند [۲۷].

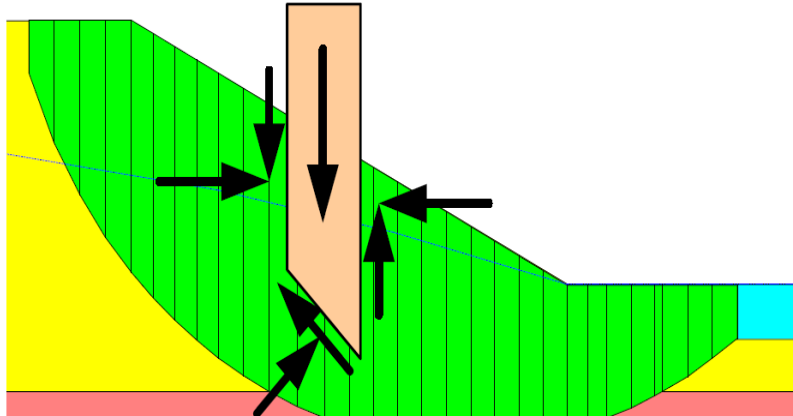
نرم افزار Slope/w از یک سری روش ترسیمی برای محاسبه ضریب اطمینان استفاده می کند. روش تعادل حدی قطعه برای پایداری گود را می توان با گنجاندن مکش بافتی با استفاده از معادلات خطی و غیر خطی مقاومت برشی، برای خاک غیر اشباع تعمیم داد و با استفاده از این معادلات و فرمول بندی آن ها برای خاک غیر اشباع می توان ضریب اطمینان گود را در حالت غیر اشباع تعیین کرد.

در زیر ضمن ارایه خلاصه ای از نرم افزار، روش های تعادل حدی و روش تنش المان محدود برای محاسبه ضریب اطمینان، فرمول بندی این روش ها بر اساس تعمیم معیار گسیختگی موهر-کولمب و در نظر گرفتن سهم مکش بافتی در مقاومت برشی، ارایه می شود.

۲-۴- اصول اولیه روش های تعادل حدی

در طول سال ها، روش های مختلفی برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری یک شیروانی ارائه شده است. در واقع این روش ها مشابه هم هستند که نقطه اشتراک اکثر آن ها استفاده از روش قطعه و عمده تفاوت این روش ها در محاسبه نیروی بین قطعه ای است. نیروهای برشی و نرمال وارد بر وجوه یک قطعه توسط یک تابع موسوم به تابع درون قطعه ای^۱ به یکدیگر مرتبط و محاسبه می شوند که روش های مختلف حالت مختلفی را برای این تابع در نظر می گیرند. شکل زیر نیروهای وارد بر یک قطعه از قطعات یک توده لغزنده را نشان می دهد [۲۶].

^۱ Interslice force function



شکل ۴-۱: نیروهای وارد بر یک قطعه از قطعات یک توده لغزنده [۲۶]

۴-۲-۱ - تئوری

در این قسمت به توضیح تئوری به کار رفته در برنامه Slope/w پرداخته می شود. ابتدا متغیرهای به کار رفته تعریف می شود و در ادامه خلاصه ای از فرمول های عمومی تعادل حدی (GLE) که بعنوان زمینه ای برای کلیه روش های معمول قطعات در حالت تعادل حدی به کار می رود، ارائه می شود و معادلات مربوطه از جمله معادله نیروی نرمال و معادلات ضریب اطمینان اخذ می شود و در آخر جنبه های تئوری مربوط به خاک با فشار آب حفره ای منفی (خاک غیر اشباع) و روابط ضریب اطمینان برای معادلات خطی و غیر خطی مقاومت برشی، در این حالت، ارائه می شود [۲۶].

۴-۲-۲ - تعریف متغیرها

Slope/w با استفاده از تئوری تعادل حدی نیروها و لنگرها، ضریب اطمینان در برابر شکست را محاسبه می کند [۲۶].

یک ضریب اطمینان تعریف شده است به عنوان ضریبی که توسط آن، مقاومت برشی خاک بایستی کاهش یابد تا اینکه توده خاک به سوی یک حالت تعادل حدی در طول سطح لغزش انتخابی رسانده شود [۲۶].

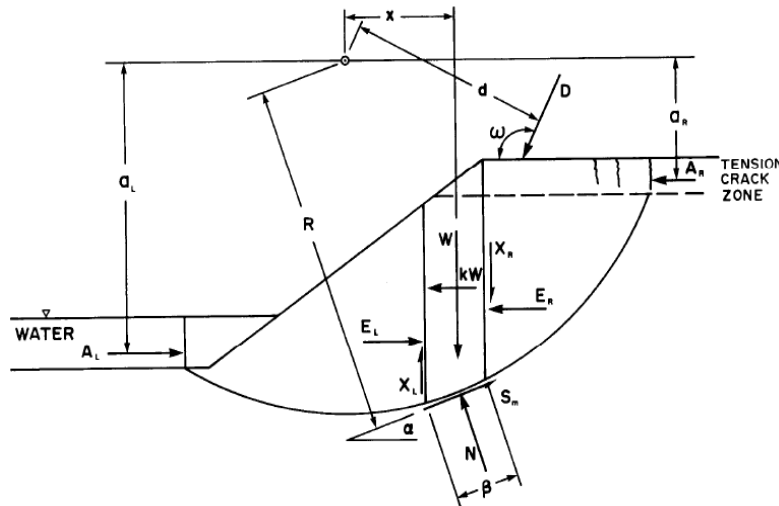
برای آنالیز تنش موثر، مقاومت برشی خاک به صورت زیر تعریف می شود:

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (1-4)$$

که در این رابطه، s : مقاومت برشی، c' : چسبندگی موثر، ϕ' : زاویه اصطکاک داخلی موثر، σ_n : تنش قائم کل و u : فشار آب حفره ای، می باشد.

آنالیز پایداری شامل عبور یک سطح لغزش از میان توده زمین و تقسیم هر قسمت محاط شده به قطعات قائم می باشد. این سطح لغزش می تواند دایروی یا غیر دایروی باشد [۲۶].

شکل زیر نیروهای وارده بر یک سطح لغزش فرضی را نشان می دهد:



شکل ۴-۲: نیروهای وارده به یک قطعه از یک توده لغزنده با سطح لغزش دایره ای [۲۶]

متغیرها به صورت زیر تعریف می شوند [۲۶]:

W : وزن کل یک قطعه به عرض b و ارتفاع h

N : نیروی قائم کل وارد بر پای قطعه

S_m : نیروی برشی ایجاد شده (بسیج شده) در پای هر قطعه

E : نیروی نرمال (قائم) افقی درون قطعه ای

X: نیروی برشی بین قطعات

D: بار متمرکز خارجی

Kw: نیروی افقی لرزه ای اعمال شده در مرکز ثقل هر قطعه

R: شعاع سطح لغزش دایروی و یا بازوی لنگر نیروی برشی ایجاد شده (S_m) پای هر قطعه برای هر شکلی از سطح لغزش.

f: فاصله عمودی نیروی نرمال (عمودی وارد بر سطح قطعه)

x: فاصله افقی از خط مرکزی هر قطعه تا مرکز دوران

e: فاصله عمودی از مرکز ثقل هر قطعه تا مرکز دوران

d: فاصله عمودی بار نقطه ای از مرکز دوران

h: ارتفاع قطعه که به صورت فاصله عمودی از مرکز پای هر قطعه تا بالاترین خط در هندسه قطعه تعریف می شود بالاترین خط عموماً سطح زمین در نظر گرفته می شود.

a: فاصله عمودی برآیند نیروی خارجی آب تا مرکز دوران

A: برآیند نیروهای خارجی آب. زیروند های L و R، مشخص می کند که نیروی برآیند آب طرف چپ شیروانی وارد می شود یا طرف راست آن وارد می شود.

ω : زاویه بار متمرکز با افق می باشد و این زاویه در خلاف جهت حرکت عقربه ساعت نسبت به سطح افقی اندازه گیری می شود.

α : زاویه بین خط مماس بر مرکز پای هر قطعه و خط افقی می باشد.

مقدار نیروی ایجاد شده (بسیج شده) در پای هر قطعه در شرایط تعادل حدی برابر است با:

$$S_m = \frac{S \beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u) \tan \phi')}{F} \quad (2-4)$$

که در این رابطه، σ_n : تنش قائم میانگین در پای هر قطعه $(\sigma_n = \frac{N}{\beta})$ ، F : ضریب اطمینان و β : طول پای هر قطعه می باشد.

فرضیاتی در تحلیل این مسائل مطرح است از جمله آن ها اینست که اکثر روش ها نقطه اعمال نیروی عمودی وارد بر سطح (N) در محور مرکزی عبوری از پای قطعه در نظر می گیرند. فرض دیگر در مورد اندازه، جهت و یا نقطه ی اعمال نیروهای بین قطعه ای است [۲۶].

۴-۲-۳- فرمول بندی عمومی تعادل حدی

فرمول بندی روش عمومی تعادل حدی توسط D.G.Fredlund در دهه ۱۹۷۰ انجام شد. این روش چهار چوب و مبنایی برای سایر روش های موجود، جهت تحلیل پایداری شیروانی های خاکی، می باشد و پایه و اساس فرمول بندی سایر روش ها محسوب می شود. در این روش، سطح لغزش شیروانی با استفاده از برش های قائم به یک سری قطعات عمودی تقسیم شده و تعادل و پایداری هر قطعه بر اساس نیروی وزن و نیروهای وارد بر قطعه، اهم از نیروهای بین قطعات و گشتاور آن ها تأمین می گردد [۲۶]. فرمول بندی عمومی تعادل حدی ضریب اطمینان را از هردو معادلات تعادل لنگر و تعادل نیروهای افقی محاسبه می کند. نیروهای برشی بین قطعات نیز در این روش توسط معادله ارائه شده توسط Morgenstern – Price در نظر گرفته می شود.

همه روش های معمول قطعات به کار رفته می تواند بعنوان مورد خاصی از راه حل روش عمومی تعادل حدی محسوب شود [۲۶].

فرمول بندی عمومی تعادل حدی (GLE) معادلات استاتیکی زیر را برای تعیین ضریب اطمینان به کار می گیرد [۲۶]:

- مجموع نیروها در جهت قائم برای هر قطعه به منظور محاسبه نیروی نرمال (N) در پای هر قطعه به کار می رود.
- مجموع نیروها در جهت افقی برای هر قطعه به منظور محاسبه نیروی نرمال بین قطعه ای (E) به کار می رود.
- مجموع لنگرها حول یک نقطه برای همه ی قطعات به منظور محاسبه ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر به کار می رود. (F_m)
- مجموع نیروها در جهت افقی برای همه ی قطعات به منظور محاسبه ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیرو به کار می رود. (F_f)

۴-۲-۴- ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر

مطابق شکل ۲-۴، برای استخراج معادله ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر برای همه قطعات حول نقطه می توان نوشت [۲۶]:

$$\sum W_x - \sum S_m R - \sum N_f + \sum k_w e \pm \sum D_d \pm \sum A_a = 0 \quad (3-4)$$

پس از جا گذاری مقدار S_m از رابطه (۲-۴)، ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر برابر است با:

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum W_x - \sum N_f + \sum k_w e \pm \sum D_d \pm \sum A_a} \quad (4-4)$$

از آنجایی که مقدار نیروی N تابعی از ضریب اطمینان است لذا این معادله یک معادله غیر خطی است.

۴-۲-۵- ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیرو

مطابق شکل ۲-۴ برای استخراج معادله ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیرو در جهت افق برای همه قطعات می توان نوشت [۲۶]:

$$\sum (E_L - E_R) - \sum (N \sin \alpha) + \sum (S_m \cos \alpha) - \sum kw + \sum D \cos \omega \pm \sum A = 0 \quad (5-4)$$

ترم $\sum (E_L - E_R)$ مجموع نیروهای نرمال درون قطعات را بیان می کند و بنابراین هنگامی که برای کل توده در نظر می گیریم، مجموع آن ها بایستی صفر شود.

پس از جا گذاری مقدار S_m از رابطه (۲-۴)، ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیروی افقی برابر است با:

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha + \sum kw - \sum D \cos \omega \pm \sum A} \quad (6-4)$$

۴-۲-۶- نیروی نرمال در پای قطعه

نیروی نرمال در پای هر قطعه از تعادل مجموع نیروها در جهت قائم برای هر قطعه بدست می آید [۲۶].

$$(X_L - X_R) - W + N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - D \sin \omega = 0 \quad (7-4)$$

پس از جا گذاری مقدار S_m از رابطه (۲-۴)، داریم:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{(c' \beta \sin \alpha - u\beta \sin \alpha \tan \phi')}{F} + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha + \tan \phi'}{F}} \quad (8-4)$$

معادله نیروی نرمال از آنجایی که به مقدار ضریب اطمینان بستگی دارد یک معادله غیر خطی است.

۴-۲-۷- نیروهای بین مقاطع

نیروهای بین مقاطع شامل نیروهای برشی و نرمال وارد بر قطعات عمودی می باشد.

نیروهای نرمال بین مقاطع با توجه به یک روند همگرایی از انتهای سمت چپ سطح لغزش تعیین می

شوند، با توجه به تعادل نیروها در جهت افق برای هر قطعه می توان نوشت [۲۶]:

$$(E_L - E_R) - N \sin \alpha + S_m \cos \alpha - kw + D \cos \omega = 0 \quad (9-4)$$

پس از جا گذاری مقدار S_m از رابطه (۴-۲)، مقدار نیروی نرمال در قسمت راست هر قطعه برابر است با:

$$E_R = E_L + \frac{(c'\beta - u\beta \tan \phi') \cos \alpha}{F} + N \left(\frac{\tan \phi' \cos \alpha}{F} - \sin \alpha \right) - kw + D \cos \omega \quad (۴-۱۰)$$

از آن جا که نیروی نرمال بین قطعات در قسمت چپ اولین مقطع صفر است ($E_L = 0$)، لذا با محاسبه مقدار نیروی نرمال بین قطعات برای این قطعه، امکان محاسبه نیروی نرمال برای کل قطعات فراهم می شود.

پس از آن که نیروی نرمال بین مقاطع شناخته شد، نیروی برشی بین مقاطع به عنوان درصدی از نیروی نرمال با توجه به معادله تجربی Morgenstern-Price قابل محاسبه است:

$$X = E \lambda f(x) \quad (۴-۱۱)$$

λ : درصدی از تابع، $f(x)$ که برای حل معادلات ضریب اطمینان استفاده می شود.

$f(x)$: یک تابع است که مقادیر متغیر X/E را در سراسر سطح لغزش توصیف می کند.

فرمول بندی GLE مقادیر ضریب اطمینان F_m و F_f را در محدوده ای از مقادیر λ محاسبه می کند. با محاسبات این مقادیر، مقدار تغییرات ضریب اطمینان مطابق شکلی مشابه شکل ۴-۳ است.

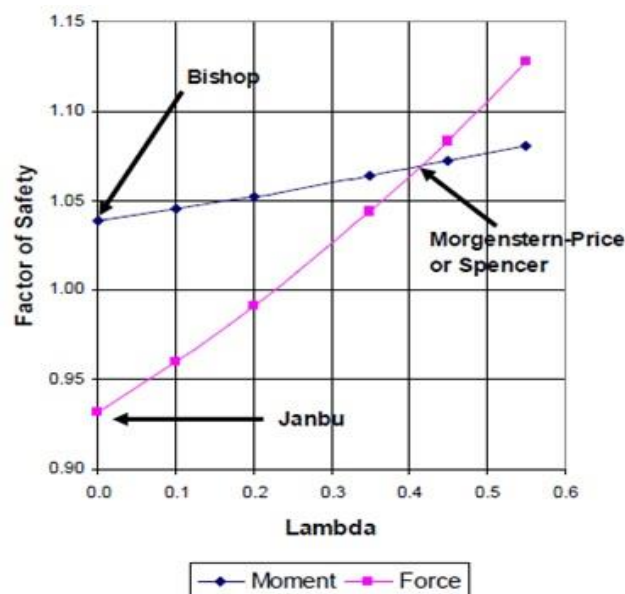
روش Ordinary، اولین روش ایجاد شده است این روش همه ی نیروهای بین قطعات را نادیده می گیرد و فقط تعادل لنگر را ارضا می کند [۲۶].

روش ساده شده Bishop، از نیروهای برشی درون قطعه ای صرف نظر کرده و فقط تعادل لنگر را ارضا می کند و صرف نظر کردن از نیروهای برشی بین مقاطع به این معنی است که λ صفر است. روش ساده شده Junbo از نیروهای برشی درون قطعه ای صرف نظر کرده و فقط تعادل نیرو را ارضا می کند در این حالت نیز مقدار λ برابر صفر است.

طی مراحل مختلف تکرار، با تغییر ضریب مقیاس λ ، نسبت نیروی برشی به نیروی نرمال بین قطعه ای طوری تغییر می کند که هر دو ضریب اطمینان به یک مقدار ثابت میل کند. بدین صورت هر دو معادله

لنگر و نیرو در جهت افقی، ارضا خواهند شد و ضریب اطمینان حاصله ضریب اطمینان Morgenstern-Price می باشد [۲۶].

روش Morgenstern-Price مبتنی بر تعادل نیروها و گشتاور می باشد و مشابه روش Spencer می باشد با این تفاوت که بر خلاف روش Spencer که تنها از یک تابع ثابت در محاسبات تعادل پایداری شیروانی خاکی استفاده می کند، این روش می تواند از توابع $f(x)$ متنوعی بهره گیرد [۲۶].



شکل ۳-۴: مقادیر ضریب اطمینان بر اساس λ [۲۶]

۳-۴- ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع (فشار آب حفره ای منفی)

همان طور که در قسمت های قبلی گفته شد در مناطق بالاتر از سطح آب زیر زمینی، فشار آب حفره ای در خاک نسبت به فشار هوای حفره ای منفی است؛ بنابراین فرم اصلاح شده مدل موهر-کولمب بایستی برای توصیف مقاومت برشی خاک در حالت غیر اشباع (فشار آب حفره ای منفی) استفاده شود. در این فرم اصلاح شده می توان روش تعادل حدی متعارف را با گنجاندن مکش بافتی توسط معادلات خطی و غیر خطی مقاومت برشی در خاک غیر اشباع تعمیم داد و به کار برد. فرمول های زیر مطابق

روش کلی تعادل حدی با گنجاندن سهم مکش بافتی در مقاومت برشی خاک با استفاده از روابط خطی

و غیر خطی مقاومت برشی بر اساس مدل اصلاح شده موهر-کولمب می باشند [۲] و [۲۶]:

مقاومت برشی در حالت غیر اشباع با استفاده از معادله خطی برابر است با:

$$S = (c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b) \quad (12-4)$$

برای نیروی برشی بسیج شده S_m در پای هر قطعه می توان نوشت:

$$S_m = \frac{S \beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b)}{F} \quad (13-4)$$

مقدار نیروی نرمال N در هر قطعه برابر است:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) + (-c' + u_a \tan \phi' - (u_a - u_w) \tan \phi^b) \frac{\beta \sin \alpha}{F} + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha + \tan \phi'}{F}} \quad (14-4)$$

مقدار ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر:

$$F_m = \frac{\sum \left\{ c' \beta R + \left[N - u_a \beta + (u_a - u_w) \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right] R \tan \phi' \right\}}{\sum W_x - \sum N_f + \sum k_w e \pm \sum D d \pm \sum A a} \quad (15-4)$$

مقدار ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیرو:

$$F_f = \frac{\sum \left\{ c' \beta \cos \alpha + \left[(N - u_a \beta) + (u_a - u_w) \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right] \tan \phi' \cos \alpha \right\}}{\sum N \sin \alpha + \sum k_w - \sum D \cos \omega \pm \sum A} \quad (16-4)$$

فرمول های بالا می تواند برای معادلات غیر خطی مقاومت برشی با استفاده از چسبندگی ظاهری

$(C(\psi))$ ایجاد شده ناشی از مکش بافتی در حالت غیر اشباع، به شکل زیر باز نویسی شود:

برای نیروی برشی بسیج شده S_m در پای هر قطعه می توان نوشت:

$$S_m = \frac{S \beta}{F} = \frac{\beta(c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + c(\psi))}{F} \quad (17-4)$$

مقدار نیروی نرمال N در هر قطعه برابر است:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) + u_a \tan \phi' \frac{\beta \sin \alpha}{F} - [c' + c(\psi)] \frac{\beta \sin \alpha}{F} + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha + \tan \phi'}{F}} \quad (18-4)$$

مقدار ضریب اطمینان با توجه به تعادل لنگر:

$$F_m = \frac{\sum \{ [c' + c(\psi)] \beta R + (N - u_a \beta) \tan \phi' R \}}{\sum W_x - \sum N_f + \sum k_w e \pm \sum D d \pm \sum A a} \quad (19-4)$$

مقدار ضریب اطمینان با توجه به تعادل نیرو:

$$F_f = \frac{\sum \{ [c' + c(\psi)] \beta \cos \alpha + (N - u_a \beta) \cos \alpha \tan \phi' \}}{\sum N \sin \alpha + \sum k_w - \sum D \cos \omega \pm \sum A} \quad (20-4)$$

مقدار $C(\psi)$ ، تابعی از مدل های غیر خطی مقاومت برشی، که در فصل قبل توضیح داده شد، است. روابط (۱۹-۴) و (۲۰-۴) می تواند بعنوان روابط کلی هم برای روابط خطی و هم روابط غیر خطی به کار رود. این رابطه همچنین برای خاک در حالت اشباع نیز به کار می رود؛ مشخص است که در این حالت مقدار $C(\psi)$ برابر صفر می باشد.

۴-۴- روش تنش المان محدود

همان طور که قبل توضیح داده شد فرمول بندی تمام روش های موجود در نرم افزار Slope/w به جز یک مورد بر پایه تعادل حدی استوار است؛ تنها در یک روش نرم افزار Slope/w تنش های محاسبه شده از تحلیل المان محدود را به کار می برد که این روش، روش تنش المان محدود گفته می شود که در این روش ابتدا تنش های موجود با استفاده از نرم افزار Sigma/w محاسبه شده و پس از آن Slope/w از آن ها برای محاسبه ضریب اطمینان استفاده می کند. با استفاده از تنش های σ_x ، σ_y و τ_{xy} تنش های نرمال و برشی بسیج شده وسط هر قطعه محاسبه می شود [۲۶].

هم چنین این قابلیت وجود دارد که مقادیر فشار آب حفره ای محاسبه شده توسط Seep/w و Sigma/w را در برنامه Slope/w وارد کرد.

ضریب اطمینان یک شیروانی با استفاده از روش تنش المان محدود به صورت نسبت مجموع نیروی برشی مقاوم در دسترس S_r در طول یک سطح لغزش به مجموع نیروی برشی بسیج شده S_m در طول سطح لغزش تعریف می شود و به فرم معادله زیر بیان می شود:

$$\text{S.F.} = \frac{\sum S_r}{\sum S_m} \quad (21-4)$$

نیروی مقاوم در دسترس در هر قطعه به صورت حاصل ضرب مقاومت برشی خاک در وسط هر قطعه در طول پای هر قطعه محاسبه می شود بنابراین با توجه به فرم اصلاح شده معادله مقاومت برشی موهر-کولمب برای خاک غیر اشباع، مقدار نیروی مقاوم در دسترس به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_r = S\beta \quad (22-4)$$

$$S = (c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + c(\psi)) \quad (23-4)$$

که در آن، S : مقاومت برشی موثر خاک در مرکز پای یک قطعه، β : طول پای یک قطعه، $c(\psi)$: مقدار چسبندگی ظاهری ناشی از وجود مکش بافتی در ساختار خاک و σ_n : تنش نرمال در مرکز پایه یک قطعه می باشد.

به طور مشابه نیروی برشی بسیج شده (ایجاد شده) هر قطعه از حاصل ضرب تنش برشی بسیج شده τ_m در وسط پایه هر قطعه، در طول پایه هر قطعه محاسبه می شود.

$$S_m = \tau_m \beta \quad (24-4)$$

مقادیر σ_n و τ_m توسط نرم افزار Sigma/w محاسبه می شوند.

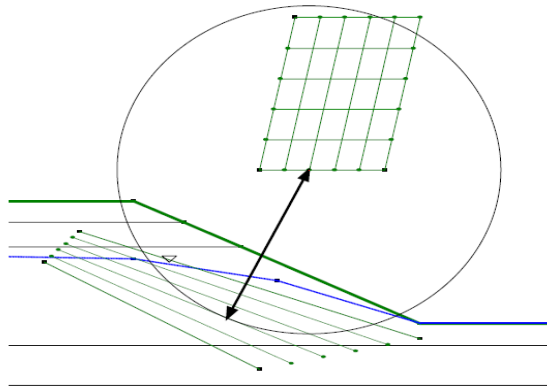
۴-۵- روش تعیین سطح لغزش فرضی

نرم افزار Slope/w از یک سری روش ترسیمی برای محاسبه ضریب اطمینان استفاده می کند و در این روش ها نیاز است تا سطح لغزش مورد نیاز برای یافتن ضریب اطمینان برای نرم افزار تعریف شود [۲۶]. تعیین موقعیت سطح لغزش بحرانی با کمترین ضریب اطمینان یکی از مسائل کلیدی در پایداری شیب های خاکی است. راه های مختلف زیادی برای تعریف شکل و موقعیت آزمایشی سطح لغزش وجود دارد. در این قسمت روش هایی متداولی، که معمولا برای تعیین سطوح لغزشی که احتمال ناپایداری (پتانسیل گسیختگی) دارند به کار می روند به اختصار توضیح داده می شوند.

۴-۵-۱- روش شبکه و شعاع برای سطح لغزش دایره ای^۱

این روش با تعریف یک شعاع و یک مرکز، دایره ای ترسیم می کند که با عبور این دایره از شیروانی مورد نظر ضریب اطمینان پایداری در قطعه حاصل شده از این تقاطع محاسبه می شود. برای تعریف مرکز دایره یک شبکه بندی با تعداد خانه های دلخواه واقع در سمت مورد نظر رسم می شود که نقاط تقاطع خطوط در این شبکه مراکز دایره هاست. شعاع دایره با ترسیم خطوطی درون شیروانی تعریف می شود بدین ترتیب که نزدیک ترین فاصله مرکز دایره تا این خطوط، شعاع دایره مورد نظر خواهد بود [۲۶].

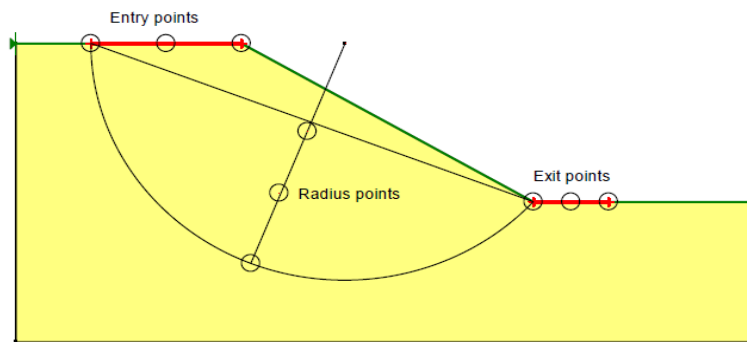
¹ Grid and radius for circular slips



شکل ۴-۴: روش ترسیم دایره لغزش فرضی در روش G-R [۲۶]

۴-۵-۲- روش ورودی - خروجی^۱

در این روش با تعریف یک سطح ورودی و یک سطح خروجی، نرم افزار به صورت خودکار دایره هایی برای محاسبه ضریب اطمینان ترسیم می کند. روش کار به این صورت است که نرم افزار ابتدا خطی را از یکی از نقطه های ورودی به یکی از نقطه های خروجی به صورت مستقیم وصل می کند سپس عمود منصف این خط ترسیم می شود، یکی از روش های ترسیم یک دایره داشتن سه نقطه از آن دایره است که با روش فوق این سه نقطه در دسترس خواهد بود (یک نقطه ورودی، یک نقطه خروجی و یک نقطه روی عمود منصف ترسیم شده) [۲۶].



شکل ۴-۵: روش ترسیم دایره لغزش فرضی در روش E-E [۲۶]

¹ Entry and exit method

فصل پنجم: مدل سازی عددی

۵-۱- معرفی نرم افزار Geo Studio 2012

نرم افزار Geo Studio 2012 بسته ای از نرم افزارهای ژئوتکنیکی است که به خاطر شرکت سازنده ی آن به Geo Slope نیز معروف است. این نرم افزار، یک برنامه کامل ژئوتکنیکی برای تحلیل و طراحی است که قادر به انجام تحلیل پایداری، آنالیز تراوش پایدار و ناپایدار، آنالیز تنش - کرنش و جابه جایی ها، تحلیل دینامیکی و شبیه سازی بار زلزله و ... می باشد که از ماژول های مختلفی تشکیل شده است. از جمله مهم ترین ماژول های این نرم افزار؛ Sigma/w، Slope/w و Seep/w است. برنامه Sigma/w یک برنامه اجزای محدود است که برای انجام آنالیزهای تنش و تغییر شکل در سازه های خاکی به کار می رود. فرمول بندی جامع آن، انجام آنالیز مسائل ساده تا خیلی پیچیده را ممکن ساخته است برای مثال انجام آنالیز ساده تغییر شکل الاستیک یا انجام آنالیز بسیار پیچیده تنش موثر غیر خطی الاستیک - پلاستیک را ممکن ساخته است. یکی از ویژگی های Sigma/w قابلیت وارد کردن شرایط مرحله ای برای محاسبه تغییرات مرحله ای در پارامترهایی نظیر کرنش و فشار آب حفره ای است. هنگامی که در Sigma/w، خواص مواد با توجه به پارامترهای موثر وارد می شوند Sigma/w از حالت تنش کل خارج می شود و می تواند تنش موثر در طول تحلیل در هر فشار آب حفره ای مشخص و در هر مرحله بار گذاری یا بار برداری محاسبه کند؛ از جمله مهم ترین آنالیز هایی که در این برنامه انجام می شود آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای (تحکیم) می باشد که نیازمند حل هم زمان معادلات تغییر شکل و تراوش می باشد، در این آنالیز ویژگی های هیدرولیکی و شرایط مرزی قابل اعمال شدن است. حل هم زمان معادلات؛ تنش ها، جا به جایی ها و فشار منفذی آب را ارائه می کند. تغییر تدریجی در فشار منفذی آب با توجه به تراوش در هر مرحله بار گذاری در محاسبه تنش موثر و تغییر شکل به کار می رود. این آنالیز زمانی به کار می رود که نیاز به شبیه سازی ایجاد یا از بین رفتن اضافه فشار آب حفره

ای در بارگذاری ها یا بار برداری های مرحله ای می باشد، در این حالت خواص مواد با توجه به پارامتر های موثر وارد می شوند [۲۹].

برنامه Seep/w نیز یک برنامه اجزای محدود است که برای تحلیل مسائل مربوط به جریان آب در خاک در حالت اشباع و غیر اشباع به کار می رود [۲۵].

برنامه Slope/w نیز در فصل قبل توضیح داده شد [۲۶].

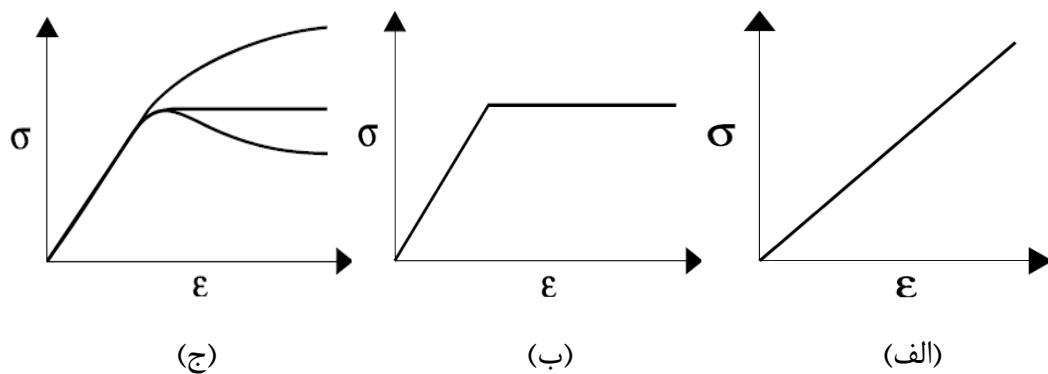
۵-۲- انواع مدل های رفتاری خاک

رفتار مکانیکی خاک ها با استفاده از یک رابطه تنش و کرنش تخمین زده می شود. بعنوان مثال قانون هوک با قابلیت ارتجاعی خطی همسانگرد، ساده ترین رابطه تنش - کرنش موجود می باشد که برای بیان آن تنها به دو پارامتر ورودی یعنی مدول یانگ (E) و نسبت پواسون (ν) نیاز است [۳۰]. رفتار خاک ها علاوه بر جنس آن ها به درجه بیش تحکیمی و اهداف تجزیه و تحلیل و ... وابسته است. از آنجا که یک مدل رفتاری مشخص بر تمام شرایط خاک حاکم نیست به همین دلیل دانشمندان کوشیده اند تا به جهت تخمین هر چه دقیق تر رفتار خاک در شرایط گوناگون مدل های رفتاری مختلفی پیشنهاد نمایند.

در این پایان نامه با توجه به نوع آنالیز، که آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای است (در این تحقیق، مواردی که نیازمند محاسبه ضریب اطمینان با گذشت زمان است از این نوع آنالیز استفاده می شود). سه نوع مدل رفتاری در نرم افزار وجود دارد که عبارتند از:

- الاستیک خطی (Linear Elastic)
- الاستیک - پلاستیک (Elastic - Plastic)
- کم کلی اصلاح شده (Modified Cam - Clay)

سایر مدل های رفتاری در این نوع آنالیز کاربردی ندارند و نمی توان از آن ها استفاده کرد [۲۹]. رفتار الاستیک خطی خاک ها را می توان با ویژگی هایی مثل برگشت پذیر بودن (از بین رفتن کرنش در اثر بار گذاری) رابطه خطی تغییرات تنش و کرنش ارزیابی کرد. رفتار الاستیک در ماسه ها بیشتر دیده می شود. محدوده رفتار الاستیک با افزایش درجه بیش تحکیمی، افزایش می یابد. مدل رفتاری الاستیک خطی از نقطه نظر تئوری فاقد شرایط تسلیم بوده و سطح تسلیم برای آن تعریف نمی شود. اساس مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک بر این اصل استوار است که کرنش ها و نمو آن ها به یک بخش الاستیک و پلاستیک قابل تقسیم است. در این مدل رفتاری، مصالح با رسیدن به یک سطح تسلیم ثابت از فاز الاستیک وارد فاز پلاستیک می شوند. در مدل کم کلی اصلاح شده، کلاهیک سطح تسلیم بر خلاف مدل موهر - کولمب در فضای تنش های اصلی ثابت نیست و می تواند به وسیله توسعه کرنش های پلاستیک افزایش یابد. در اشکال زیر نمودار تنش - کرنش مدل های رفتاری الاستیک خطی، الاستیک - پلاستیک و کم کلی اصلاح شده به جهت مقایسه نشان داده شده اند.



شکل ۵-۱: منحنی تنش - کرنش در مدل های رفتاری [۲۹] (الف) الاستیک خطی، (ب) الاستیک - پلاستیک و (ج) کم کلی اصلاح شده.

در این پایان نامه از مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک برای انجام آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای استفاده شده است؛ در این نوع آنالیز، خواص مواد با توجه به پارامترهای موثر وارد می شوند.

۵-۳- پارامترهای مورد نیاز برای آنالیز

با توجه به انتخاب نوع آنالیز و انتخاب مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک به پارامترهای زیر برای انجام مدل سازی نیاز است که این پارامترها در جدول ۵-۱ نشان داده شده اند که در ادامه به تشریح نحوه انتخاب آن ها پرداخته شده است.

جدول ۵-۱: پارامترهای اصلی برای مدل سازی و واحد استاندارد آن ها.

واحد	تعریف	پارامتر
KPa	مدول الاستیسیته موثر	E'
درجه	زاویه اصطکاک داخلی موثر	ϕ'
KPa	چسبندگی موثر	c'
درجه	زاویه اتساع	ψ
-	ضریب پواسون موثر	ν'
$\frac{KN}{m^3}$	مقدار وزن مخصوص	γ
-	منحنی مشخصه آب - خاک	SWCC
$\frac{m}{s}$	ضریب هدایت هیدرولیکی	K

۵-۳-۱- مدول الاستیسیته (E)

مدول الاستیسیته مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در مکانیک خاک شیب اولیه نمودار تنش - کرنش را با E_0 و شیب مماس در ۵۰ درصد مقاومت نهایی را با E_{50} نشان می دهند که به مدول الاستیسیته سکانتی معروف است.

برای رس های بیش تحکیم یافته و برخی سنگ ها با دامنه الاستیک خطی گسترده استفاده از E_0 به واقعیت نزدیک تر است؛ در حالی که برای دیگر خاک ها استفاده از E_{50} مناسب تر است. در مورد گود

برداری ها با توجه به اینکه مسئله از نوع بار برداری است لذا بایستی از مدول بار برداری، E_{ur} به جای مدول سکانتی استفاده کرد. هر دو مدول با افزایش تنش های محصور کننده، افزایش می یابند؛ بنابراین لایه های عمیق از لایه های سطحی از سختی بیشتری برخوردارند [۳۰].

مقدار مدول E_{ur} بیش از E_{50} است و بعنوان مقادیر متوسط برای انواع مختلف خاک ها، $E_{ur} \approx 3E_{50}$ در نظر گرفته می شود [۳۰].

مقدار مدول سکانتی خاک های سیلتی در شرایط زهکشی شده عموماً بین ۲ تا ۲۰ مگا پاسکال می باشد [۳۱].

۵-۳-۲- زاویه اصطکاک داخلی موثر (ϕ')

مقدار زاویه اصطکاک داخلی موثر برای خاک های سیلتی عموماً در محدوده ۲۶ درجه تا ۳۵ درجه می باشد [۳۲].

۵-۳-۳- ضریب پواسون (ν)

در آزمایشات سه محوری زهکشی شده استاندارد نرخ کاهش حجم در آغاز بار گذاری نسبتاً زیاد بوده و در نتیجه ضریب پواسون بدست آمده پایین است. در برخی موارد مانند شرایط بار برداری استفاده از این مقادیر پایین نسبت پواسون (بین ۰,۱۵ تا ۰,۲۵) ممکن است واقع بینانه باشد. اما هنگامی که مدل موهر-کولمب به کار می رود مقادیر بالاتری توصیه می شود [۳۰].

در اغلب کاربردهای عملی مقدار ضریب پواسون در محدوده ۰,۳ تا ۰,۴ در نظر گرفته می شود [۳۰]. مقادیر معمول برای سیلت ها در محدوده ۰,۳ تا ۰,۳۵ می باشد [۳۱].

۵-۳-۴- زاویه اتساع (ψ)

به جز رس های بیش تحکیم یافته، بقیه رس ها تمایل چندانی به اتساع از خود نشان نمی دهند ($\psi = 0$). برای خاک های چسبنده خوب دانه بندی شده، مقدار زاویه اتساع کم است و اغلب برابر صفر در نظر گرفته می شود. اما در مورد خاک های ماسه ای مسأله متفاوت است؛ در این نوع خاک ها مقدار زاویه اتساع وابسته به وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک است [۳۰].

زاویه اتساع برای خاک هایی که زاویه اصطکاک داخلی آن ها کمتر از ۳۰ درجه می باشد اغلب برابر صفر در نظر گرفته می شود [۳۰].

۵-۳-۵- وزن مخصوص (γ)

مقدار جرم مخصوص خشک خاک (ρ_d) مورد مطالعه، برابر ۱,۵۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب است و مقدار چگالی بخش جامد آن (G_s)، ۲,۶۹ و مقدار نشانه خمیری (PI) برابر ۷ است. نام گذاری خاک در طبقه بندی آشتو، A-4 و در طبقه بندی خاک در روش متحد، M-L می باشد [۳۳]. با توجه به این مقادیر و استفاده از روابط وزنی - حجمی مقدار وزن مخصوص خاک در حالت اشباع محاسبه می شود.

$$\gamma_d = \rho_d g = 1521 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 = 14921.01 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = 14.92 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

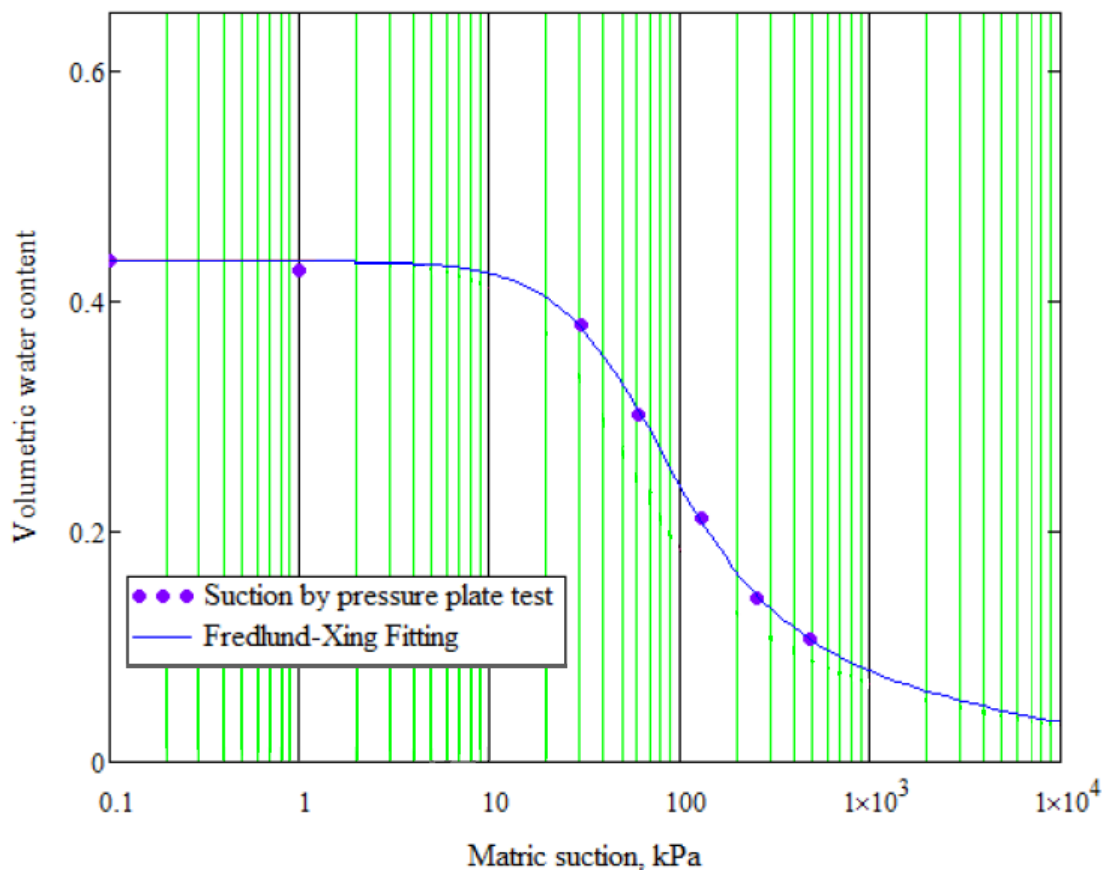
$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.69 \times 9.81}{14.92} - 1 = 0.769$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + Se) \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.69 + 1 \times 0.769) \times 9.81}{1.769} \approx 19.20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

بنابراین مقدار وزن مخصوص در ناحیه اشباع برابر مقدار $19.20 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ در نظر گرفته می شود. به منظور ساده سازی در مدل سازی مقدار وزن مخصوص در ناحیه غیر اشباع برای مدل ۱، نیز برابر همین مقدار در نظر گرفته می شود.

۵-۳-۶- منحنی مشخصه آب - خاک (SWCC)

منحنی مشخصه استفاده شده در این پایان نامه با استفاده از آزمایش صفحه فشار اندازه گیری شده است و با استفاده از معادله Fredlund-Xing. (1994) ترسیم شده است. نام گذاری خاک در طبقه بندی آشتو، A-4 و در طبقه بندی خاک در روش متحد، M-L می باشد و پارامترهای مربوط به آن مطابق زیر است [۳۳]:

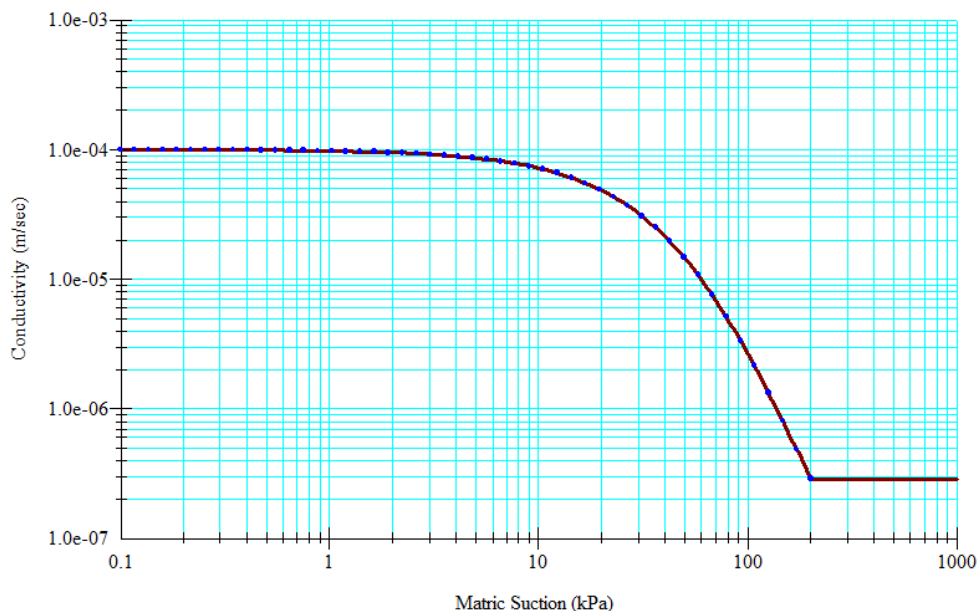


شکل ۵-۲: منحنی مشخصه آب - خاک مورد استفاده برای مدل سازی [۳۳].

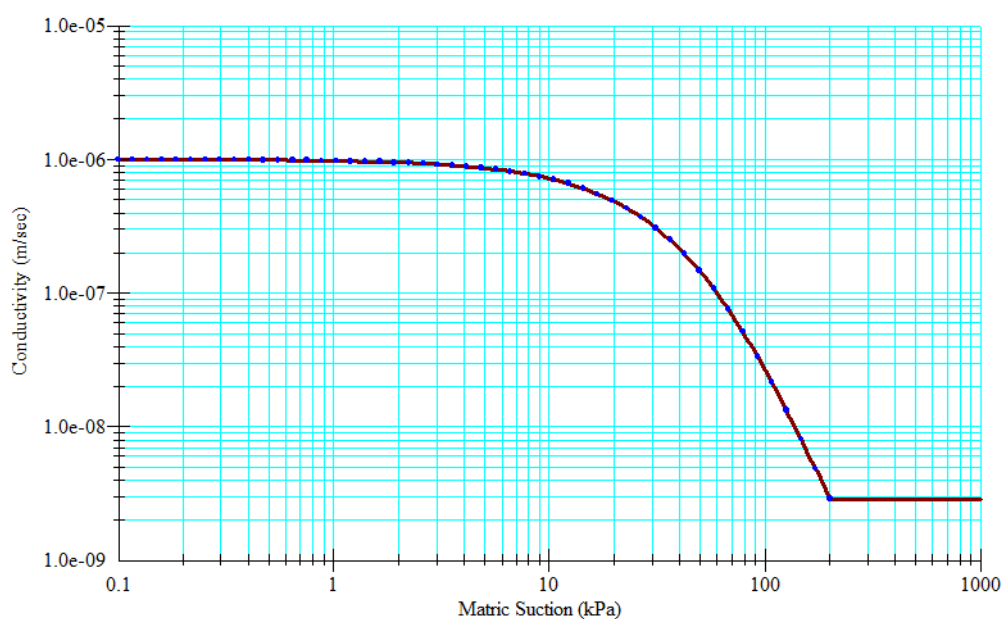
پارامترهای این نمودار؛ $a=49.9$ Kpa، $n=1.66$ ، $m=1.03$ ، $AEV=16.7$ Kpa، $\theta_s=0.435$ و $\theta_r=0.053$ می باشند.

۵-۳-۷- ضریب هدایت هیدرولیکی (K)

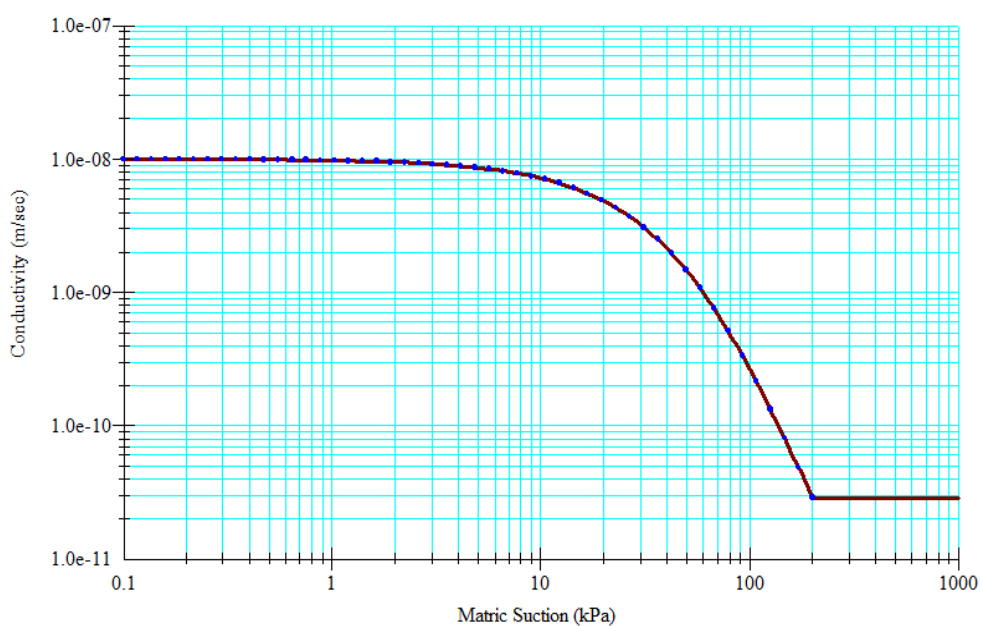
نرم افزار Seep/w (Sigma/w) توانایی تخمین تابع هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع را بر اساس Fredlund et al. (1994) و SWCC دارد [۲۵]. تخمین تابع هدایت هیدرولیکی با استفاده از مدل Fredlund et al. (1994) و نرم افزار Seep/w انجام شده است. مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع خاک سیلتی مورد مطالعه، مشخص نیست به همین دلیل مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، فرض می شود. مقدار ضریب نفوذپذیری خاک های سیلتی عموماً در حالت اشباع در محدوده $10^{-6} \frac{m}{s}$ تا $10^{-8} \frac{m}{s}$ قرار می گیرد [۳۱]. در این پایان نامه مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع برای مدل مبنا، $K_{sat}=10^{-6} \frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده و برای حالتی که سطح اولیه آب زیر زمینی در عمق ۵ متری نسبت به سطح زمین است علاوه بر در نظر گرفتن این مقدار، دو مقدار $K_{sat}=10^{-4} \frac{m}{s}$ و $K_{sat}=10^{-8} \frac{m}{s}$ مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرند. بنابراین با در نظر گرفتن این سه مقدار، برای مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع و استفاده از SWCC در نرم افزار Seep/w، خروجی این برنامه با توجه به مدل Fredlund et al. (1994) برای برآورد تابع هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع، مطابق اشکال ۵-۳ تا ۵-۵ می باشد:



شکل ۵-۳: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=10^{-4} m/s$ و استفاده از SWCC.



شکل ۴-۵: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=1e-6$ m/s و استفاده از SWCC.



شکل ۵-۵: تابع برآورد هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع با در نظر گرفتن $K_{sat}=1e-8$ m/s و استفاده از SWCC.

در برآورد توابع هیدرولیکی، مقدار مکش ماکزیمم ۲۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

۵-۴- مدل سازی

برای بررسی تاثیر در نظر گرفتن مکش بافتی موجود در نواحی غیر اشباع در محاسبه ضریب اطمینان، سه گود با عمق حفاری ۱۰ متر و با هندسه متفاوت، مدل سازی می شود. در مدل ۱ که به صورت شیب دار، با شیب کم در نظر گرفته شده است، تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان تعیین شد و تاثیر پارامترهای ضریب نفوذپذیری و عمق اولیه سطح آب زیر زمینی در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، بررسی شد، در این حالت توزیع اولیه فشار آب حفره ای در عمق خاک در بالا و پایین سطح افقی آب زیر زمینی به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته شده است و با انجام آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای و استفاده از مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک، مقادیر تنش ها و مقادیر فشار آب حفره ای در نواحی اشباع و غیر اشباع در طول گودبرداری و پس از اتمام آن تا رسیدن به حالت پایدار در نرم افزار Sigma/w محاسبه شده است و از آن ها برای محاسبه ضریب اطمینان در نرم افزار Slope/w استفاده شده است؛ در واقع با استفاده از این آنالیز، اجازه داده می شود رژیم اولیه فشار آب حفره ای که به صورت هیدرواستاتیکی است، تغییر نکند؛ اجازه توسعه فشار آب حفره ای منفی در اطراف ناحیه گودبرداری داده می شود و اجازه داده می شود، اضافه فشار آب حفره ای نسبت به حالت پایداری که قرار است به آن برسد با گذشت زمان از بین برود تا به حالت پایدار برسد و مقادیر ضریب اطمینان در زمان های مختلف، مطابق با توزیع های مختلف فشار آب حفره ای تا رسیدن به حالت پایدار، محاسبه می شود. در این حالات از معادله خطی (Fredlund et al. (1978 برای برآورد مقاومت برشی در نواحی غیر اشباع استفاده شده است.

برای بررسی موارد؛ تاثیر در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، تاثیر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در پروفیل های مختلف از مکش بافتی، در محاسبه ضریب اطمینان، سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته

می شود در این حالات بحث زمان و تغییرات ضریب اطمینان با زمان مطرح نمی شود و شرایط پایدار را در نظر می گیریم. در این حالات مقادیر تنش ها به وسیله نرم افزار Σ/w محاسبه می شود و سپس توسط نرم افزار $Slope/w$ ، ضرایب اطمینان محاسبه شده است و تاثیر وجود فشار آب حفره ای منفی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف به صورت مستقیم در نرم افزار $Slope/w$ با افزایش مقاومت برشی لحاظ می شود. در واقع هدف از بررسی این موارد اینست که بررسی کنیم که در نظر گرفتن درصدی کم از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، چه مقدار می تواند در افزایش ضریب اطمینان تاثیر گذار باشد.

مدل ۲ به صورت شیب دار، با شیب تند و مدل ۳ با شیب قائم در نظر گرفته شده اند و برای این دو مدل سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته می شود و مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، با توجه به روش تعادل حدی Morgenstern-Price، توسط نرم افزار $Slope/w$ محاسبه شده است. در این حالات بحث زمان و تغییرات ضریب اطمینان با زمان مطرح نمی شود و شرایط پایدار را در نظر می گیریم. پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی به صورت درصد های مختلفی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در بالای سطح آب زیر زمینی، در مقاومت برشی خاک، در نظر گرفته شده است، در این حالت از معادلات غیر خطی مقاومت برشی استفاده می شود.

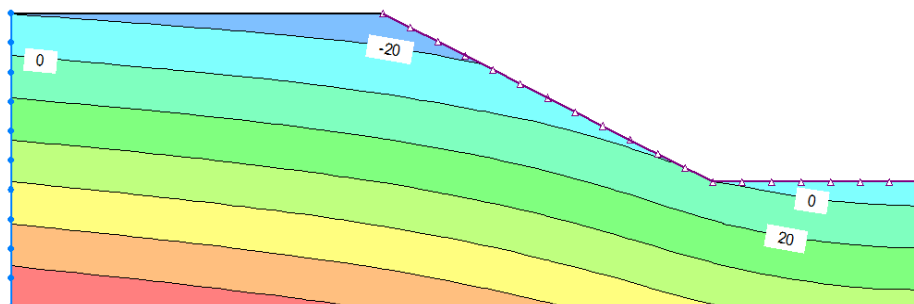
فشار هوای حفره ای برابر مقدار اتمسفریک در نظر گرفته می شود ($u_a = 0$).

خروجی نهایی برای تمام مدل ها با حالت متداول؛ یعنی حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک صرف نظر می شود (در معادله خطی برآورد مقاومت برشی $\phi^b = 0^\circ$ است)، مقایسه می شود.

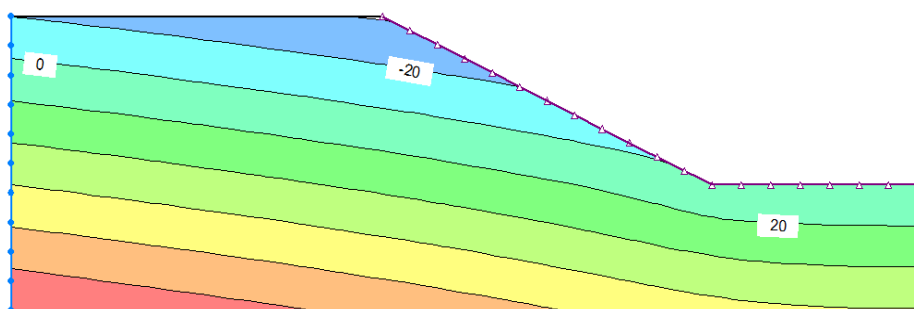
۵-۴-۱- صحت سنجی نتایج نرم افزار در مدل سازی قسمتی از مسأله ۱

در این قسمت به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده در رابطه با امکان ایجاد شدن فشار آب حفره ای منفی در هنگام بار برداری، مدل موجود در سایت مربوط به نرم افزار (www.geo-slope.com) دوباره مدل سازی شد که با نتایج ارائه شده آن مدل کاملا منطبق است. مدل ذکر شده مربوط به گودبرداری زیر سطح آب زیر زمینی تحت عنوان Excavation below watertable است که تقریبا مشابه یک قسمت از مدل سازی در تحقیق انجام شده در این پایان نامه است و آن محاسبه کانتورهای فشار آب حفره ای پس از به اتمام رسیدن گودبرداری در نرم افزار Sigma/w است که از آن ها در محاسبه ضریب اطمینان در نرم افزار Slope/w استفاده می شود. سطح اولیه آب زیر زمینی به صورت افقی و در عمق ۲ متری نسبت به سطح زمین است و عمق گودبرداری ۸ متر می باشد.

شکل زیر کانتورهای فشار آب حفره ای در مدل موجود در سایت مربوط به نرم افزار می باشد.



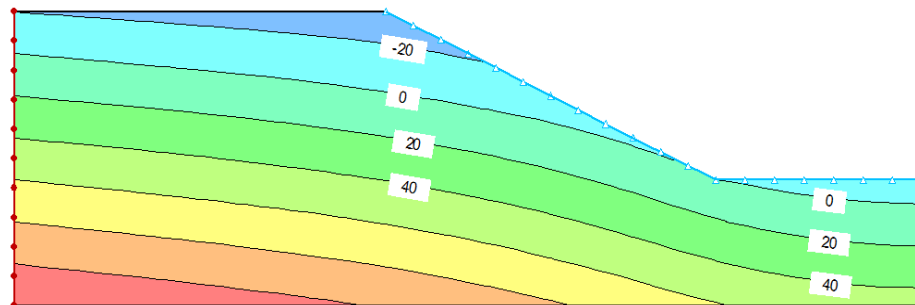
(الف)



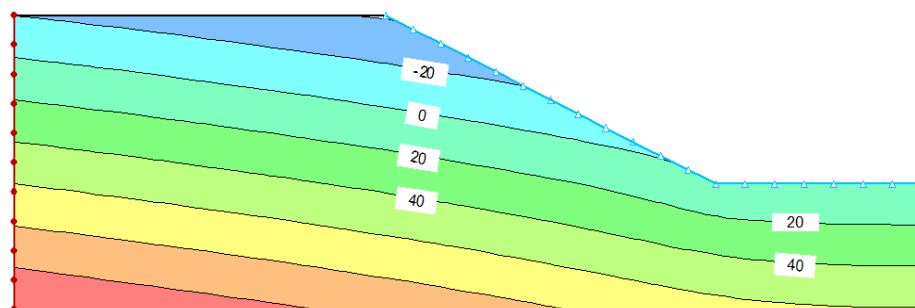
(ب)

شکل ۵-۶: کانتورهای فشار آب حفره ای: (الف) پس از حذف چهارمین لایه (ب) در پایان روز ۸۰ ام

کانتورهای محاسبه شده توسط نگارنده این پایان نامه در نرم افزار به صورت زیر است:



(الف)



(ب)

شکل ۵-۷: کانتورهای فشار آب حفره ای: (الف) پس از حذف چهارمین لایه (ب) در پایان روز ۸۰ ام

عکس العمل فشار حفره ای تا حدی تحت تاثیر مدول بالک می باشد. این مدول مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$K_b = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۱-۵)$$

هنگامی $\nu = 1/3$ باشد، مدول بالک برابر مدول سختی خاک (E) می باشد. به لحاظ فیزیکی به این معنی است که سختی خاک بعلاوه آب برابر سختی دانه های جامد خاک می باشد.

اگر ما فرض کنیم که آب به صورت کامل غیر قابل تراکم است، $\nu = 0.5$ و K_b بی نهایت می شود. تحت شرایط محیطی درون آب مقداری حباب هوا وجود دارد بنابراین تراکم پذیر است و حتی در شرایط کاملا اشباع مقدار مدول بالک یک مقدار محدود دارد و توصیه می شود مقدار ضریب پواسون در مسائل

این چینی (مشابه مثال فوق) $1/3$ در نظر گرفته شود. البته می توان با انتخاب مقادیر دیگری از ضریب پواسون تاثیر در نظر گرفتن مقادیر مختلف مدول بالک بررسی شود.

مقدار ضریب پواسون در مسأله فوق (بررسی صحت قسمتی از مدل سازی) و نیز در این پایان نامه $1/3$ در نظر گرفته شده است؛ البته در عمده مسائل مهندسی نیز بین 0.3 تا 0.4 در نظر گرفته می شود.

۵-۴-۲- ساخت مدل مبنا ۱

اصولا در تکنیک های عددی، روش مرسوم برای انجام مطالعات پارامتریک ساخت یک مدل بعنوان، مدل مبنا می باشد. خصوصیات مدل مبنا ۱ به شرح زیر است:

۱- برای گودبرداری در مدل ۱ فرض می شود؛ عملیات گودبرداری به صورت شیب دار با شیب کم (با شیب ۲ واحد در جهت افق، ۱ واحد در جهت قائم) انجام می شود و در مدل سازی هنگامی که مطالعه پارامتریک نسبت به ضریب نفوذپذیری و عمق اولیه سطح آب زیر زمینی انجام می شود، فرض می شود عملیات گودبرداری از سطح زمین که افقی است، آغاز می شود و عملیات گودبرداری در ۱۰ مرحله و طی ۶۰ روز انجام می شود و در هر مرحله ناحیه ای به ضخامت ۱ متر حذف شده و آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای انجام شده و پس از محاسبه مقادیر تنش ها و فشار آب حفره ای در نرم افزار Sigma/w در زمان های مختلف، توسط نرم افزار Slope/w مقادیر ضریب اطمینان با گذشت زمان محاسبه می شود.

۲- عمق گودبرداری ۱۰ متر در نظر گرفته می شود.

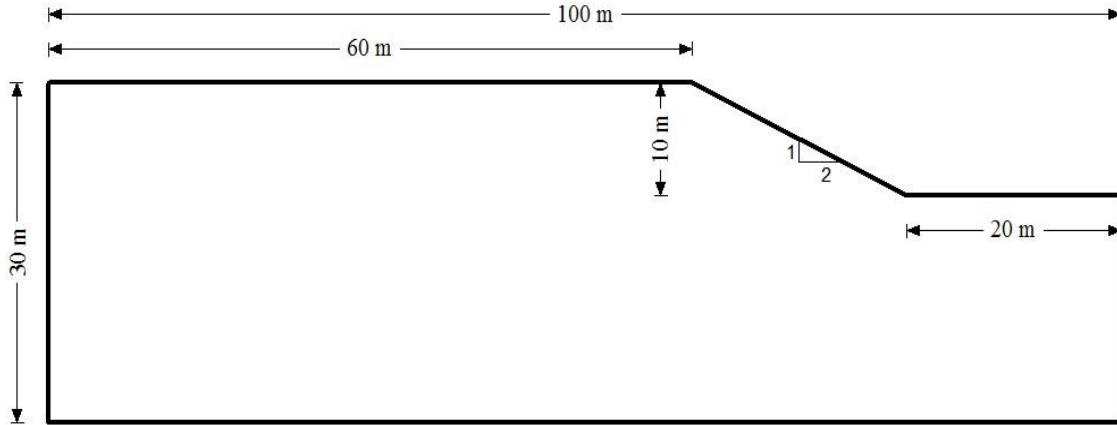
۳- سطح اولیه آب زیر زمینی به صورت افقی و در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته می شود (Initial GWT depth = 20 m).

¹ Initial groundwater table (GWT) depth

- ۴- مقدار توزیع اولیه مکش بافتی در عمق خاک برای مدل مبنا به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته می شود و برای در نظر گرفتن تاثیر مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی در نواحی غیر اشباع از رابطه خطی مقاومت برشی (Fredlund et al. (1978) استفاده می شود؛ در این حالت $\phi^b = 15^\circ$ در نظر گرفته می شود. علت استفاده از رابطه خطی مقاومت برشی در مدل مبنا، نتایج مقاله (Zhang et al. (2014) است؛ آنها به این نتیجه رسیدند: "اگر مقدار هوای ورودی (AEV) بین ۱۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال باشد، عموماً مقدار ϕ^b می تواند برابر 15° در نظر گرفته شود." [۲]؛ البته بار دیگر در قسمت ۳-۳-۴-۵ صحت استفاده از این معادله با توجه به نتایج استفاده از معادلات غیر خطی، بررسی می شود.
- ۵- مقدار ضریب نفوذپذیری برای مدل مبنا $K_{sat}=1e-6$ m/s و تغییرات آن با توجه به تغییرات مکش بافتی مطابق شکل ۴-۵ در نظر گرفته می شود.
- ۶- روش تعیین ضریب اطمینان مبتنی به روشی است که در Geo Studio به روش تنش المان محدود شناخته می شود.
- ۷- برای تعیین سطح لغزش بحرانی فرضی از روش Entry and Exit استفاده شده است.

۵-۴-۲-۱- هندسه مدل ۱

هندسه مسأله برای مدل ۱ به شکل زیر می باشد:



شکل ۵-۸: هندسه مدل ۱.

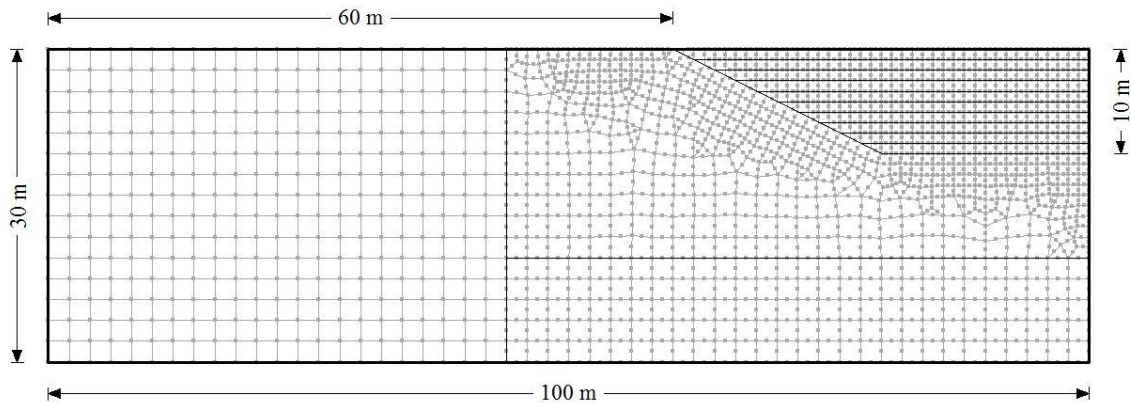
۵-۴-۲-۲- مشخصات خاک برای مدل مینا ۱

جدول ۵-۲: مشخصات خاک برای مدل مینا ۱.

Model	الاستیک - پلاستیک
$E' \text{ (KPa)}$	15000
$\phi' \text{ (degree)}$	30
$C' \text{ (KPa)}$	5
$\psi \text{ (degree)}$	0
ν'	1/3
$\gamma \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \right)$	19.20
SWCC	شکل ۵-۲
$K \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$	شکل ۵-۴

۵-۴-۲-۳- مش بندی مسأله برای کلیه مدل های ۱

مش بندی مسأله مطابق شکل زیر می باشد:



شکل ۵-۹: مش بندی مسأله ۱.

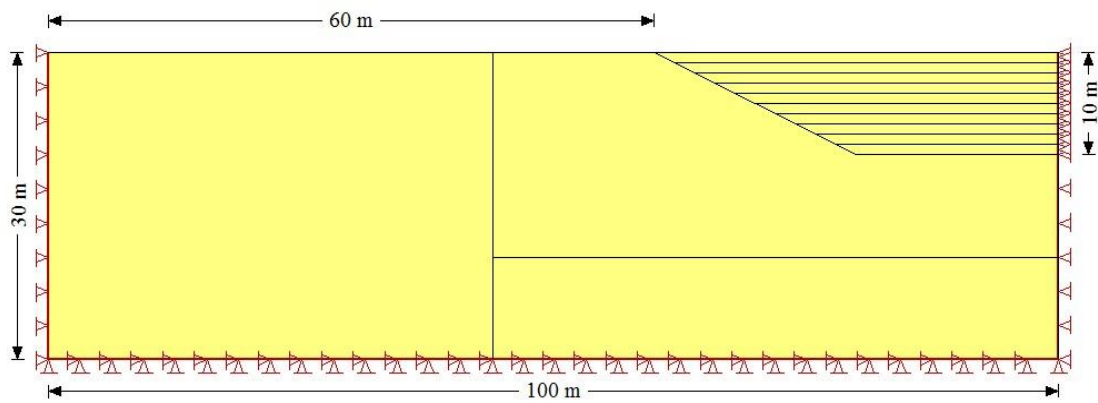
۵-۴-۲-۴- شرایط مرزی مسأله برای کلیه مدل های ۱

مشخص کردن شرایط در مرزهای یک مسأله یکی از اجزای کلیدی در آنالیز عددی است و بدون این شرایط امکان حل مسأله وجود ندارد. انواع شرایط مرزی تحت عنوان جا به جایی، نیرو، فشار آب و... بعنوان شرایط مرزی می تواند لحاظ شود؛ شرایط مرزی باید به نحوی لحاظ شود که به شرایط واقعی مسأله نزدیک باشد.

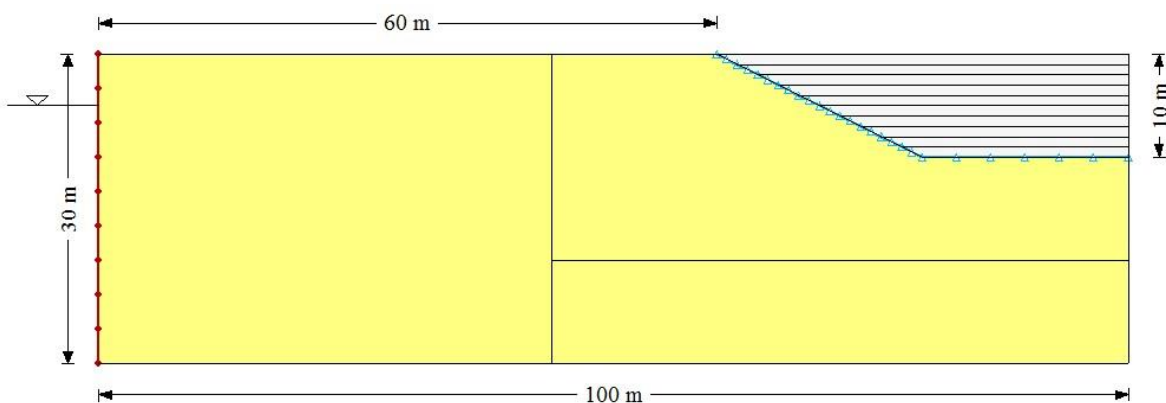
در این پایان نامه دو نوع شرایط مرزی تعریف شده است، نوع اول شرایط مرزی، از نوع جا به جایی است. در این شرط، از جا به جایی افقی مرزهای چپ و راست مسأله جلوگیری شده است و همچنین از جا به جایی در جهت افقی و قائم در مرز پایین جلوگیری شده است.

شرایط مرزی هیدرولیکی در مرزهای راست در هر مرحله گودبرداری متحرک است. این شرط مرزی هیدرولیکی که مربوط به جبهه تراوش است در هر مرحله گودبرداری اعمال می شود؛ چون مقدار فشار آب حفره ای در جبهه حفاری نامشخص است و ممکن است منفی باشد بنابراین یک الگوریتم خاص

برای ایجاد شرط مرزی صحیح مورد نیاز است که برنامه Seep/w این الگوریتم را دارا است؛ در این گونه مسائل در واقع ما می دانیم که فشار آب حفره ای در نواحی که تراوش اتفاق می افتد برابر صفر است. برای ایجاد شرط مرزی هیدرولیکی در مرزهای حفاری باید یک شرط مرزی بدون جریان با پتانسیل تراوش اعمال کرد. شرط هیدرولیکی مربوط به جبهه تراوش مربوط به حالتی است که سطح آب زیر زمینی در داخل ناحیه گودبرداری قرار می گیرد (Initial GWT depth = 5 m). برای شرط مرزی هیدرولیکی در سمت چپ فرض می شود، که شرایط هیدرولیکی در مرز چپ در همه مراحل گودبرداری ثابت می ماند. (در این مسأله سطح آب زیر زمینی در مرز چپ در تمام مراحل آنالیز ثابت در نظر گرفته می شود).



(الف)



(ب)

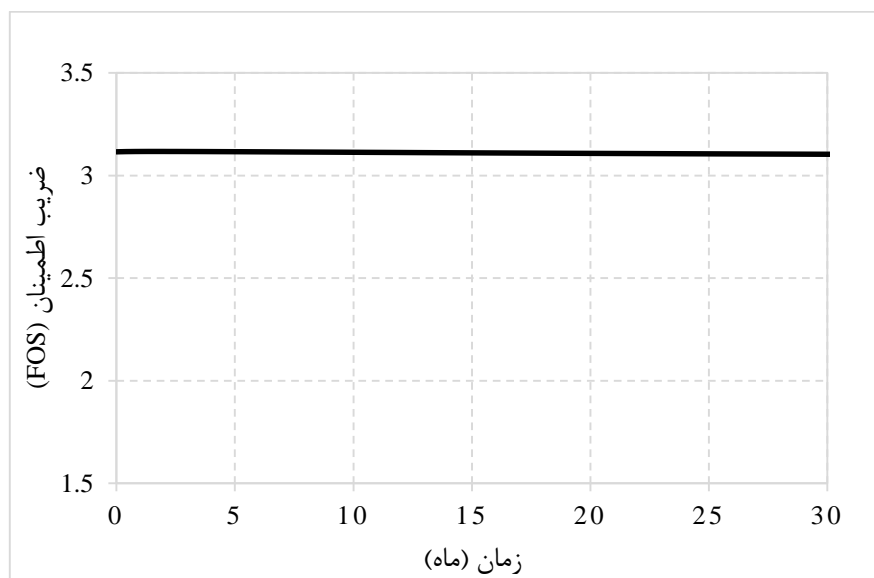
شکل ۵-۱۰: شرایط مرزی برای مدل ۱؛ (الف) شرایط مرزی مربوط به جا به جایی، (ب) شرایط مرزی هیدرولیکی.

۵-۴-۲-۵- خروجی نرم افزار برای مدل مبنا ۱

همان طور که در ابتدای این قسمت ذکر شد برای مدل مبنا، سطح اولیه آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین در نظر گرفته شده و توزیع اولیه مکش بافتی در عمق خاک به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته می شود. برای در نظر گرفتن تاثیر مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی خاک در حالت غیر اشباع، از رابطه خطی مقاومت برشی Fredlund et al. (1978) استفاده می شود. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زمان در دو حالت؛ ۱- در نظر گرفتن جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه خطی Fredlund et al. (1978) $(\phi^b = 15^\circ)$ -۲ با صرف نظر از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، محاسبه می شود $(\phi^b = 0^\circ)$.

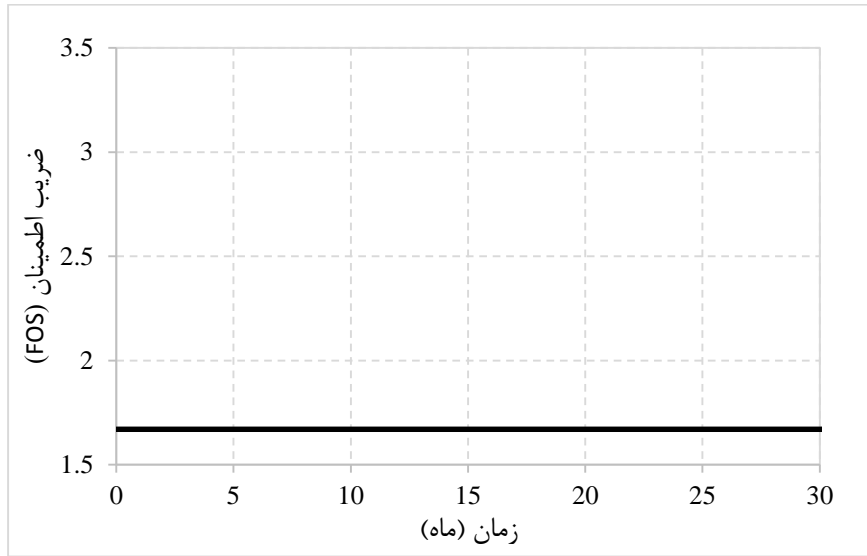
منحنی ضریب اطمینان - زمان، بر مبنای روش تنش المان محدود، به شکل زیر است:

الف) منحنی ضریب اطمینان - زمان، $(\phi^b = 15^\circ)$:

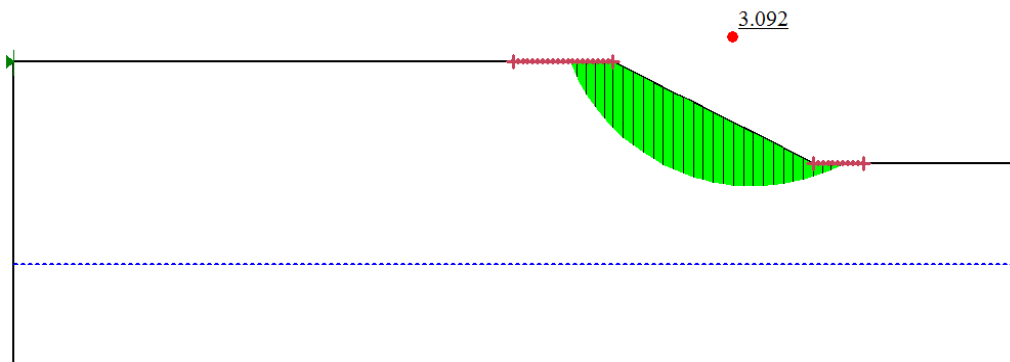


شکل ۵-۱۱: منحنی ضریب اطمینان - زمان در مدل مبنا؛ $\phi^b = 15^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20m

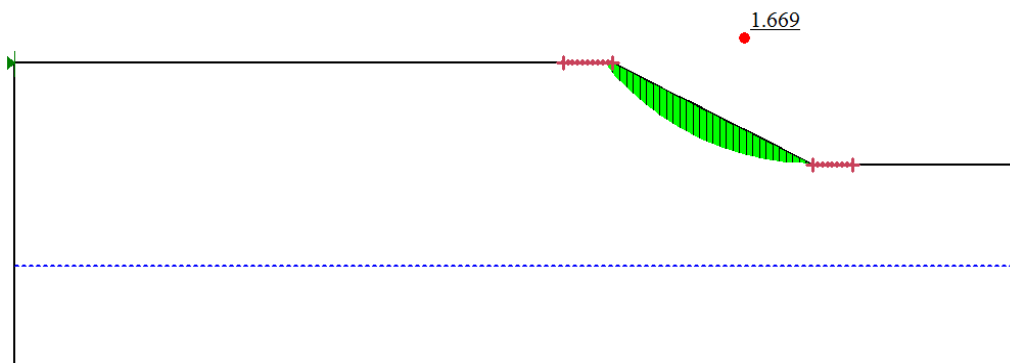
ب) منحنی ضریب اطمینان - زمان، $(\phi^b = 0^\circ)$:



شکل ۵-۱۲: منحنی ضریب اطمینان - زمان در مدل مینا؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m



شکل ۵-۱۳: گوه گسیختگی در مدل مینا، در حالت پایدار؛ $\phi^b = 15^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20m



شکل ۵-۱۴: گوه گسیختگی در مدل مینا؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 20 m

۵-۴-۲-۶- نتایج مربوط به مدل مبنا

با توجه به اشکال فوق، منحنی ضریب اطمینان - زمان، با گذشت زمان تقریباً ثابت می باشد؛ در این حالت مقدار ناچیزی اضافه فشار آب حفره ای منفی ناشی از بار برداری و توسعه فشار منفی در اطراف ناحیه گودبرداری ایجاد می شود که با توجه به ناچیز بودن این اضافه فشار منفی تقریباً تاثیری در مقدار ضریب اطمینان ندارد و می توان گفت این منحنی با گذشت زمان ثابت می باشد.

مقدار ضریب اطمینان، در حالتی که جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک در نظر گرفته می شود پس از اتمام گودبرداری ۳,۱۱۵ و در حالت پایدار به ۳,۰۹۲ می رسد و در حالتی که از جزء مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی خاک صرف نظر می شود (حالت متداول)، برابر ۱,۶۶۹ می شود؛ مشخص است در این حالت چون فشار آب حفره ای منفی در مقاومت برشی خاک در نظر گرفته نمی شود ($\phi^b = 0^\circ$) لذا ضریب اطمینان با گذشت زمان ثابت است. با توجه به این اعداد در حالت پایدار، ضریب اطمینان در حالتی که جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک در نظر گرفته می شود به مقدار ۸۵,۲۶ درصد افزایش می یابد.

۵-۴-۳- مطالعات پارامتریک برای مدل ۱

مطالعات پارامتریک در این قسمت شامل موارد زیر است:

- ۱- عمق اولیه سطح آب زیر زمینی مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد.
- ۲- ضریب نفوذپذیری برای حالتی که سطح اولیه آب زیر زمینی در عمق ۵ متری نسبت به سطح زمین فرض می شود، مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد. در این قسمت علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی مطابق اشکال ۳-۵ تا ۵-۵، تاثیر ثابت فرض کردن ضریب نفوذپذیری در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان نیز، بررسی می شود.
- ۳- مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، محاسبه می شود؛ در این بخش تاثیر مکش بافتی در افزایش ضریب اطمینان با در نظر گرفتن روابط غیر خطی (Vanapalli et al. (1996)، Fredlund et al. (1996) و خلیلی و خباز (۱۹۹۸)، مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرند.
- ۴- ضرایب اطمینان با استفاده از معادله خطی (Fredlund et al. (1978) با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی محاسبه می شود و با نتایج معادلات غیر خطی مقایسه می شود.
- ۵- مقدار زاویه اصطکاک داخلی مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد.
- ۶- مقدار چسبندگی خاک مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد.

۵-۴-۳-۱- بررسی تاثیر عمق اولیه سطح آب زیر زمینی و تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت

به تغییرات مکش بافتی، در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان

در این بخش عمق اولیه سطح آب زیر زمینی مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد و تاثیر آن در محاسبه ضریب اطمینان مشخص می شود.

تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان، برای Initial GWT depth = 20m (حالتی که عمق اولیه سطح آب زیر زمینی ۲۰ متر می باشد)، در بخش قبلی محاسبه شد.

در این قسمت نیز، توزیع اولیه مکش بافتی را به صورت هیدرواستاتیکی در عمق خاک در نظر می گیریم و با استفاده از مدل سازی مرحله ای و انجام آنالیز هم زمان تنش - فشار آب حفره ای، خروجی نرم افزار بدست می آید.

در این بخش برای Initial GWT depth = 5m و Initial GWT depth = 10m، با در نظر گرفتن

$K_{sat} = 1e-6 \frac{m}{s}$ و تغییرات آن با مکش بافتی مطابق شکل ۵-۴، مدل سازی انجام می شود.

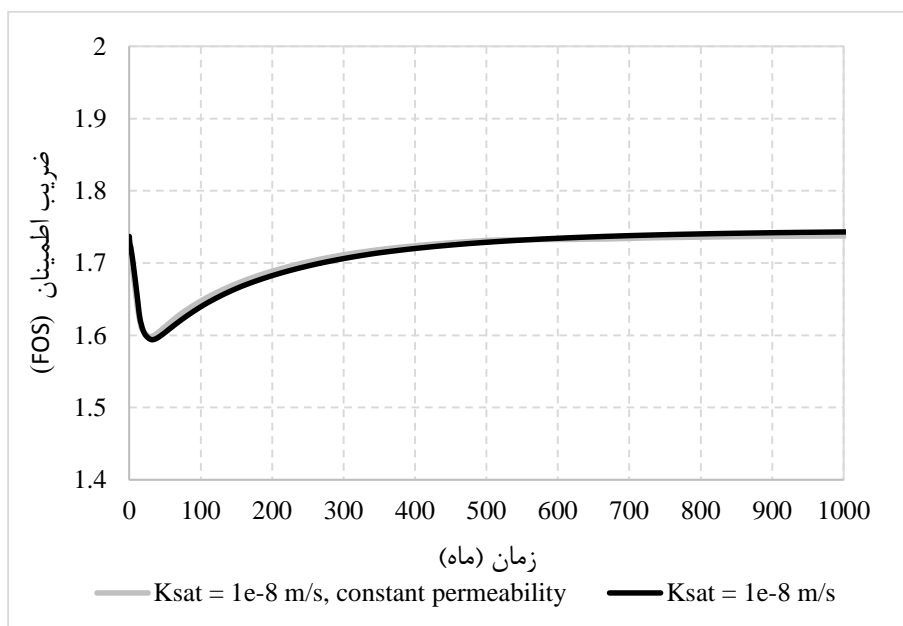
برای Initial GWT depth = 5m، مقدار ضریب نفوذپذیری مورد مطالعه پارامتریک قرار می گیرد؛ مطالعه پارامتریک ضریب نفوذپذیری با در نظر گرفتن تغییرات آن نسبت به تغییرات مکش بافتی، مطابق اشکال ۵-۳ تا ۵-۵ و همچنین صرف نظر کردن از تغییرات آن نسبت به تغییرات مکش بافتی انجام می شود. (یعنی در حالت دوم ضریب نفوذپذیری را ثابت و برابر مقدار آن در حالت اشباع در نظر می گیریم). در همه حالات فوق تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زمان در دو حالت؛ ۱- در نظر گرفتن جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه خطی (Fredlund et al. (1978) ($\phi^b = 15^\circ$) ۲- با صرف نظر از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، محاسبه می شود ($\phi^b = 0^\circ$).

۵-۴-۳-۱-۱- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 5m

۵-۴-۳-۱-۱-۱- خروجی نرم افزار برای $K_{sat} = 1e-8 \text{ m/s}$ و Initial GWT depth = 5m

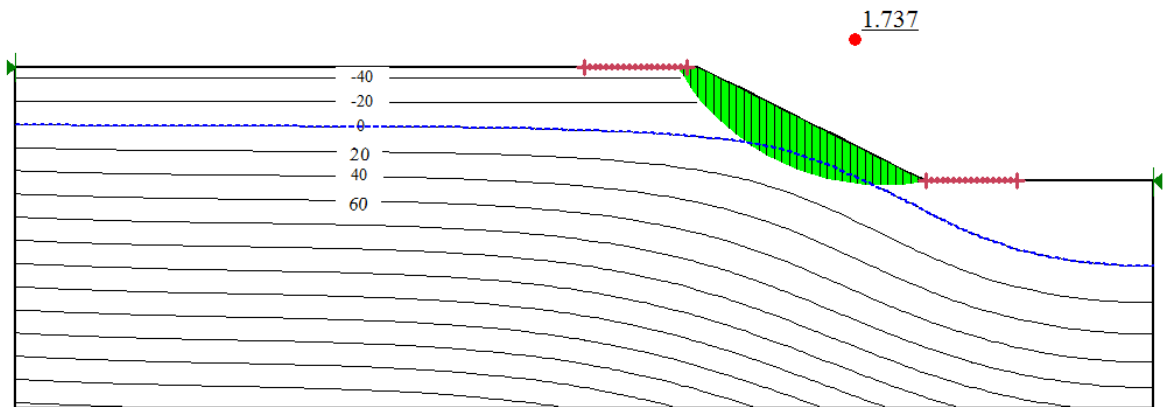
الف) منحنی ضریب اطمینان - زمان، $(\phi^b = 15^\circ)$:

به منظور بررسی تاثیر در نظر گرفتن تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی، در نتایج، یکبار فرض می شود تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی مطابق مدل Fredlund et al. (1994) یعنی شکل ۵-۵ می باشد و یکبار هم مقدار ضریب نفوذپذیری ثابت و برابر مقدار آن در حالت اشباع فرض می شود. مقدار تغییرات ضریب اطمینان در زمانی که فرض می شود تغییرات ضریب نفوذپذیری مطابق شکل ۵-۵ است به رنگ سیاه و هنگامی که ثابت در نظر گرفته می شود به رنگ خاکستری در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است.

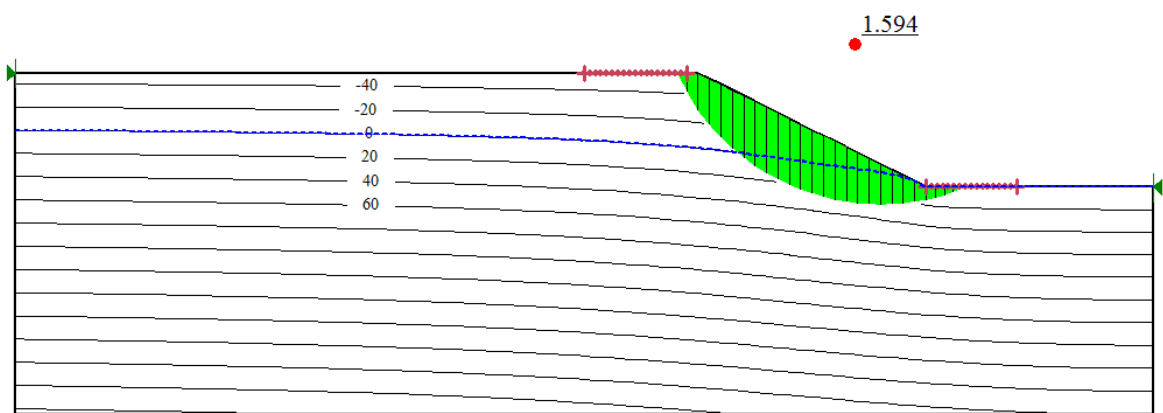


شکل ۱۵-۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-8 \text{ m/s}$ و Initial GWT depth = 5m.

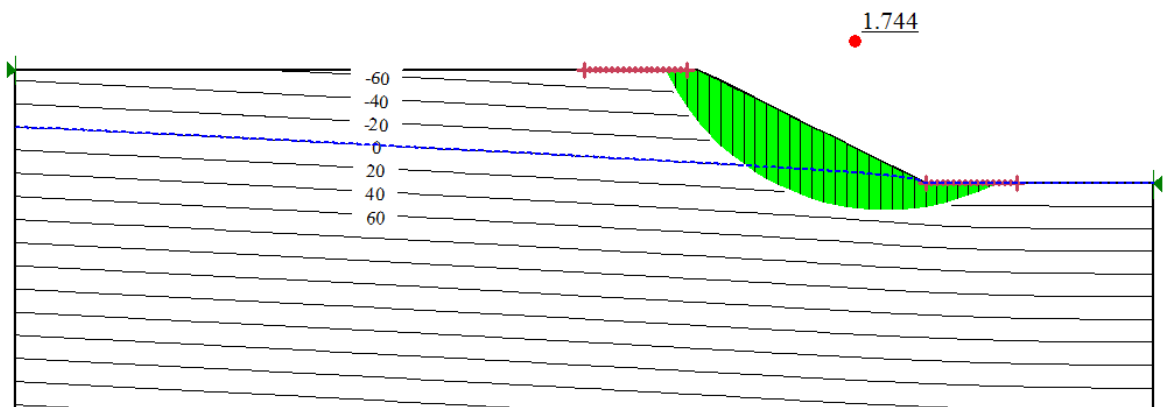
در اشکال زیر گوه گسیختگی، تغییرات کانتورهای فشار آب و مقادیر ضریب اطمینان در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت مشاهده می شود. این اشکال مطابق با حالتی است که ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی متغیر یعنی مطابق شکل ۵-۵ در نظر گرفته می شود.



(الف)



(ب)



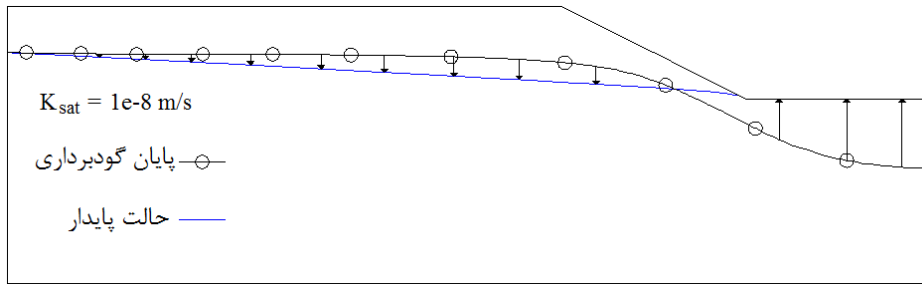
(ج)

شکل ۵-۱۶: گوه گسیختگی، کانتورهای فشار آب حفره ای و مقادیر ضریب اطمینان: (الف) پس از پایان گودبرداری، (ب) در زمانی که کمترین ضریب اطمینان حاصل شده است (میان مدت)، (ج) حالت پایدار؛ $K_{sat} = 1e-8$ m/s و Initial GWT depth = 5m

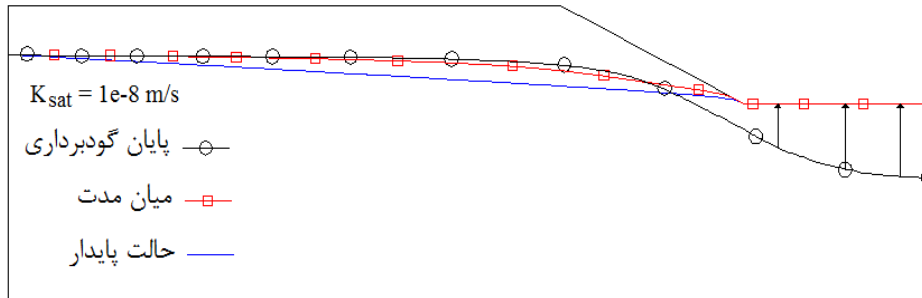
بررسی نمودار شکل ۵-۱۵:

هنگامی که در خاک های اشباع با نفوذپذیری کم بار گذاری شود ابتدا تمام یا بخشی از بار تبدیل به فشار حفره ای می شود و پس از آن همچنان که خاک تحکیم می یابد فشار حفره ای کم می شود. عکس آن نیز درست است؛ هنگامی که در خاک های با نفوذپذیری کم بار برداری می شود، بار برداری می تواند سبب منفی شدن فشار آب حفره ای شود و این فشار منفی با گذشت زمان همچنان که خاک متورم می شود، افزایش می یابد؛ با توجه به این موضوع، در طی گودبرداری، مقداری فشار منفی ناشی از بار برداری در زیر ناحیه گودبرداری ایجاد می شود و با گذشت زمان، طی فرآیند تورم این فشار منفی از بین می رود و فشار حفره ای به حالت تعادل می رسد. این حالت که بار برداری در خاک های با نفوذپذیری کم ممکن است سبب ایجاد فشار حفره ای منفی شود در شکل ۵-۱۶-الف مشاهده می شود. با توجه به اشکال ۵-۱۶، مقدار ضریب اطمینان پس از پایان عملیات گود برداری ۱,۷۳۷، سپس کاهش می یابد و در میان مدت به ۱,۵۹۴ می رسد و در نهایت افزایش می یابد و در بلند مدت به ۱,۷۴۴ می رسد (این مقادیر مربوط به خط سیاه می باشند). بنابراین ضریب اطمینان در این حالت در میان مدت بحرانی تر از کوتاه مدت و بلند مدت می باشد. برای مشخص شدن علت کاهش ضریب اطمینان در میان مدت باید به تغییرات خطوط فشار آب حفره ای صفر در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت توجه کرد. تغییرات خطوط فشار آب حفره ای صفر در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت در اشکال ۵-۱۷ مشاهده می شود؛ با توجه به تغییرات خط فشار صفر در این اشکال مشخص می شود که در طول زمان با رخ دادن فرآیند تورم در زیر ناحیه گودبرداری، فشار منفی ناشی از بار برداری از بین می رود که به کاهش تنش موثر و مقاومت برشی در این ناحیه می انجامد و نیز هم زمان با رخ دادن فرآیند تورم در زیر ناحیه گودبرداری، ناحیه پشت گودبرداری تحکیم می یابد که منجر به افزایش تنش موثر و افزایش مقاومت برشی در این ناحیه می شود. فرآیندهای تحکیم و تورم به صورت همزمان اتفاق می افتد؛ با توجه به

اشکال ۵-۱۷-الف و ۵-۱۷-ب می توان شکل منحنی ۵-۱۵ را توجیه کرد؛ در این اشکال بایستی به تغییرات خطوط فشار آب حفره ای صفر در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت به صورت هم زمان توجه کرد؛ با دقت در این اشکال مشاهده می شود فرآیند تورم سریع تر از فرآیند تحکیم رخ داده است که این را با مقایسه خط سیاه که نماینده خط فشار آب حفره ای صفر پس از پایان گودبرداری و خط قرمز که نماینده خط فشار آب حفره ای صفر در حالت میان مدت (حالتی که کمترین ضریب اطمینان حاصل شده) است، می توان متوجه شد. با توجه به این شکل مشاهده می شود در میان مدت، فرآیند تورم در زیر ناحیه گودبرداری رخ داده و فشار منفی ناشی از بار برداری از بین می رود و تنش موثر و مقاومت برشی در این ناحیه کاهش می یابد؛ همزمان با این اتفاق، فرآیند تحکیم با سرعت کمتری در پشت شیروانی در حالت رخ دادن است که این حالت نیز در شکل مشخص است و تا زمان میان مدت، پشت شیب ناحیه گودبرداری، مقدار کمی تحکیم می یابد. بنابراین مقدار ضریب اطمینان پس از اتمام گودبرداری شروع به کاهش می کند و این روند تا زمان میان مدت ادامه می یابد. پس از این تورم اولیه، ناحیه ی پشت شیروانی تحکیم می یابد و خط فشار آب حفره ای صفر به حالت پایدار نزدیک می شود و تنش موثر و مقاومت برشی در پشت شیروانی افزایش می یابد و مقدار ضریب اطمینان با گذشت زمان افزایش می یابد که با توجه به کم بودن هدایت هیدرولیکی، فرآیند تحکیم با گذشت زمان زیادی انجام می شود.



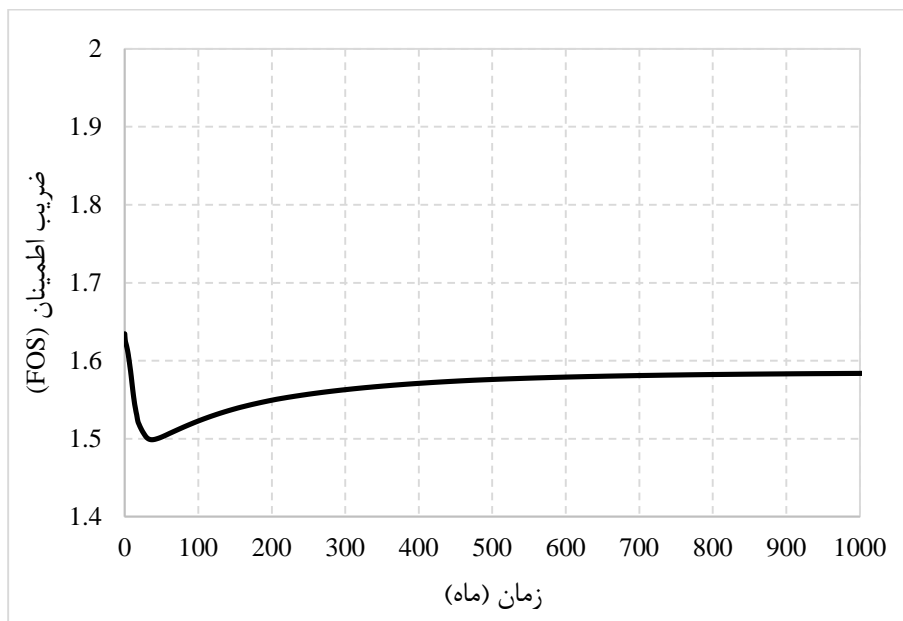
(الف)



(ب)

شکل ۵-۱۷: خطوط فشار آب حفره ای صفر، (الف) مقایسه کوتاه مدت و بلند مدت (ب) مقایسه کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-8 \text{ m/s}$ و Initial GWT depth = 5m

ب) منحنی ضریب اطمینان - زمان، $(\phi^b = 0^\circ)$:



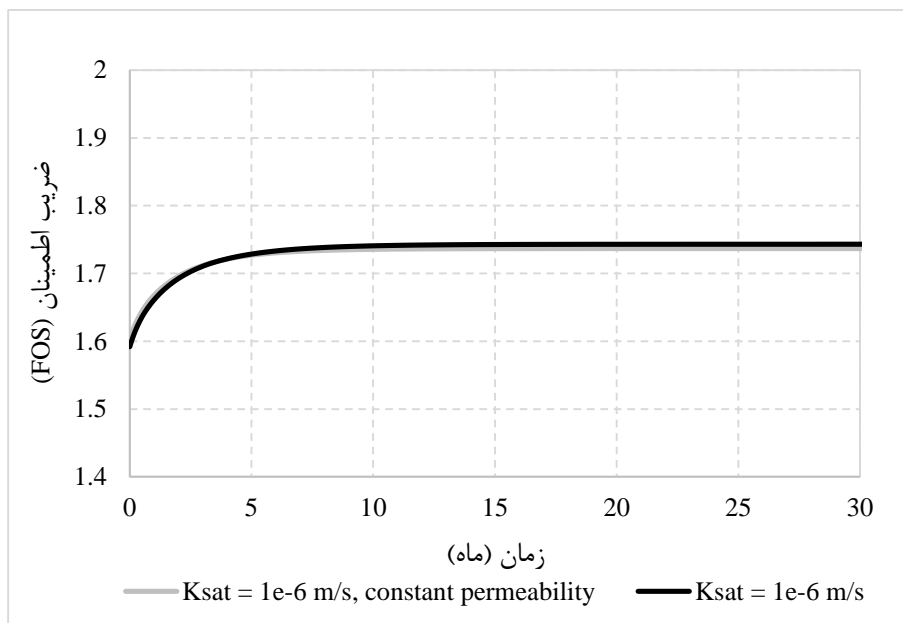
شکل ۵-۱۸: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-8 \text{ m/s}$ و Initial GWT depth = 5m

همان طور که در شکل ۵-۱۸ مشاهده می شود ضریب اطمینان پس از پایان گودبرداری ۱,۶۳۵ و در ادامه به دلیل رخ دادن فرآیند تورم در زیر ناحیه گودبرداری، مقدار تنش موثر و مقاومت برشی در این ناحیه کم می شود، بنابراین ضریب اطمینان کم می شود و در میان مدت به کمترین مقدار و به عدد ۱,۴۹۹ می رسد و تا این زمان مشابه حالت قبل پشت شیروانی مقدار کمی تحکیم می یابد و پس از آن تورم اولیه، با تحکیم پشت شیب ناحیه گودبرداری، مقدار تنش موثر و مقاومت برشی در این ناحیه افزایش می یابد که منجر به افزایش ضریب اطمینان شده که ضریب اطمینان در حالت پایدار به عدد ۱,۵۸۴ می رسد. در این حالات در محاسبه ضرایب اطمینان، از مکش بافتی موجود در نواحی غیر اشباع در افزایش مقاومت برشی خاک صرف نظر شده است ($\phi^b = 0^\circ$).

۵-۴-۳-۱-۲- خروجی نرم افزار برای $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 5m

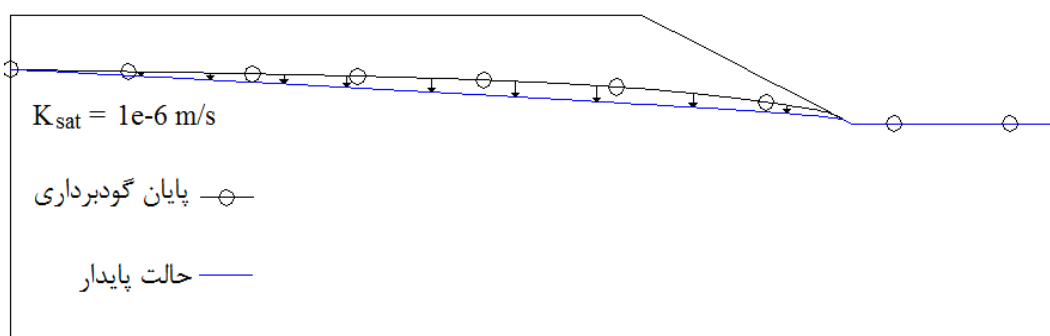
الف (منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 15^\circ$):

در این قسمت نیز به منظور بررسی تاثیر در نظر گرفتن تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی در نتایج، یکبار فرض می شود تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی مطابق مدل Fredlund et al. (1994) یعنی شکل ۵-۴ می باشد و یکبار هم مقدار ضریب نفوذپذیری ثابت و برابر مقدار آن در حالت اشباع، در نظر گرفته می شود. تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زمان، هنگامی که تغییرات ضریب نفوذپذیری مطابق شکل ۵-۴ در نظر گرفته می شود به رنگ سیاه و هنگامی که ثابت در نظر گرفته می شود به رنگ خاکستری در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل کمترین ضریب اطمینان، مربوط به پس از پایان گودبرداری است و تغییرات ضریب اطمینان روند صعودی دارد و با گذشت زمان افزایش می یابد.



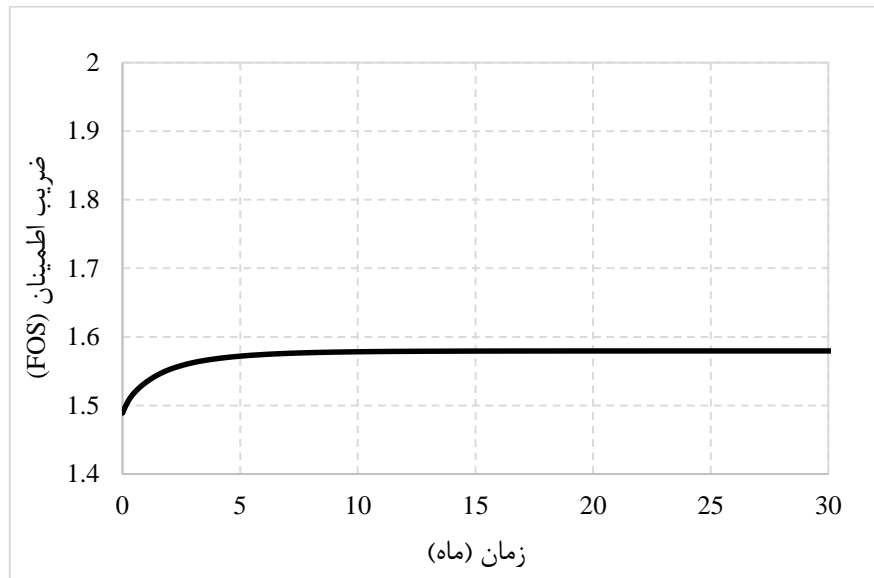
شکل ۵-۱۹: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $K_{sat} = 1e-6 \text{ m/s}$ و $\phi^b = 15^\circ$ و Initial GWT depth = 5 m

با توجه به تغییرات خطوط فشار آب حفره ای که در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است روند صعودی بودن ضریب اطمینان نسبت به زمان توجیه می شود؛ در این شکل مشخص است که با گذشت زمان در پشت شیروانی فرآیند تحکیم رخ داده است و اضافه فشار آب حفره ای که نسبت به حالت پایدار دارد از بین می رود و با افزایش مقدار تنش موثر و مقاومت برشی، مقدار ضریب اطمینان افزایش می یابد.



شکل ۵-۲۰: خطوط فشار آب حفره ای صفر در حالت کوتاه مدت و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-6 \text{ m/s}$ و Initial GWT depth= 5 m

ب) منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 0^\circ$):



شکل ۵-۲۱: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 5 m.

در این حالت کمترین ضریب اطمینان در کوتاه مدت و برابر ۱,۴۸۹ است و این ضریب در بلند مدت به ۱,۵۸۰ می رسد و علت افزایش ضریب اطمینان با گذشت زمان نیز مطابق قسمت (الف) همین بخش است و تنها اختلاف با آن اینست که در این حالات در محاسبه ضرایب اطمینان، از مکش بافتی موجود در نواحی غیر اشباع در افزایش مقاومت برشی خاک صرف نظر شده است ($\phi^b = 0^\circ$).

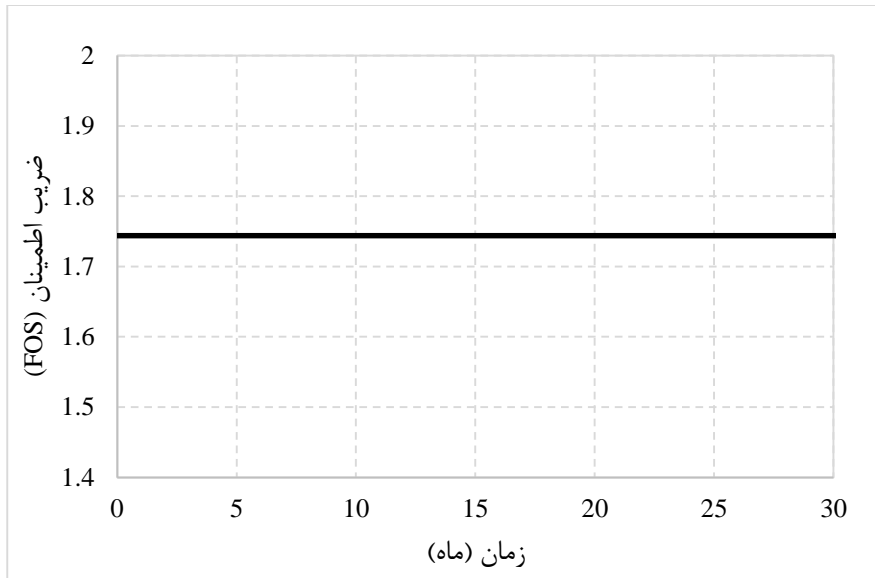
۵-۴-۳-۱-۱-۳- خروجی نرم افزار برای $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5m

الف) منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 15^\circ$):

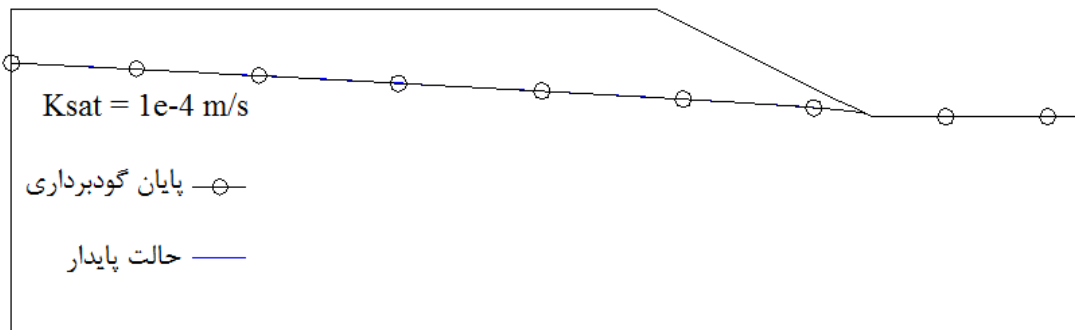
در این حالت تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی مطابق شکل ۵-۳ در نظر گرفته می شود.

همان طور که در شکل ۵-۲۲ مشخص است مقدار ضریب اطمینان با گذشت زمان ثابت مانده است و برابر ۱,۷۴۴ می باشد. علت ثابت ماندن هم اینست که نفوذپذیری زیاد است و گودبرداری تحت شرایط

زهکشی شده انجام می شود این را با توجه به شکل ۵-۲۳ می توان متوجه شد، همانطور که در این شکل مشخص است خط فشار آب حفره ای صفر پس از پایان گودبرداری بر روی خط فشار آب حفره ای صفر در حالت پایدار منطبق شده است.

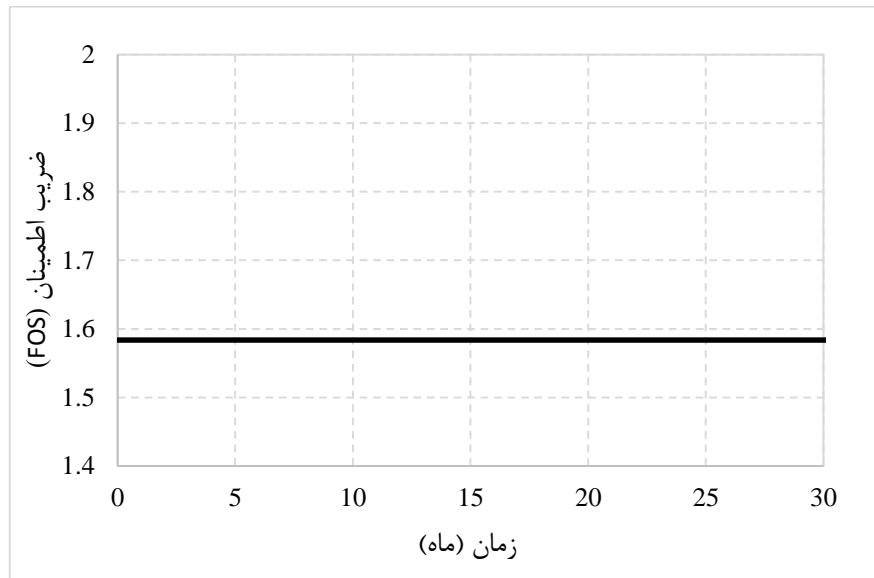


شکل ۵-۲۲: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ ، $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5m.



شکل ۵-۲۳: خطوط فشار آب حفره ای صفر در حالت کوتاه مدت و بلند مدت؛ $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5m.

ب) منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 0^\circ$):



شکل ۵-۲۴: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-4$ m/s و Initial GWT depth = 5 m

در این حالت مقدار ضریب اطمینان برابر ۱,۵۸۴ می باشد و علت ثابت ماندن ضریب اطمینان با گذشت زمان نیز مطابق قسمت (الف) همین بخش است و تنها اختلاف با آن اینست که در این حالات در محاسبه ضرایب اطمینان، از مکش بافتی موجود در نواحی غیر اشباع در افزایش مقاومت برشی خاک صرف نظر شده است ($\phi^b = 0^\circ$).

با توجه به نتایج این بخش می توان گفت:

- با توجه به اشکال ۵-۱۵، ۵-۱۹ در نظر گرفتن تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی تاثیری ناچیزی در شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان دارد و شکل این منحنی وابسته به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع است.

- با توجه به مطالعات این بخش مشخص شد مقدار ضریب اطمینان بسته به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع می تواند در میان مدت یا کوتاه مدت، به کمترین مقدار خود برسد یا اینکه با گذشت زمان ثابت باشد که علل آن توضیح داده شد.

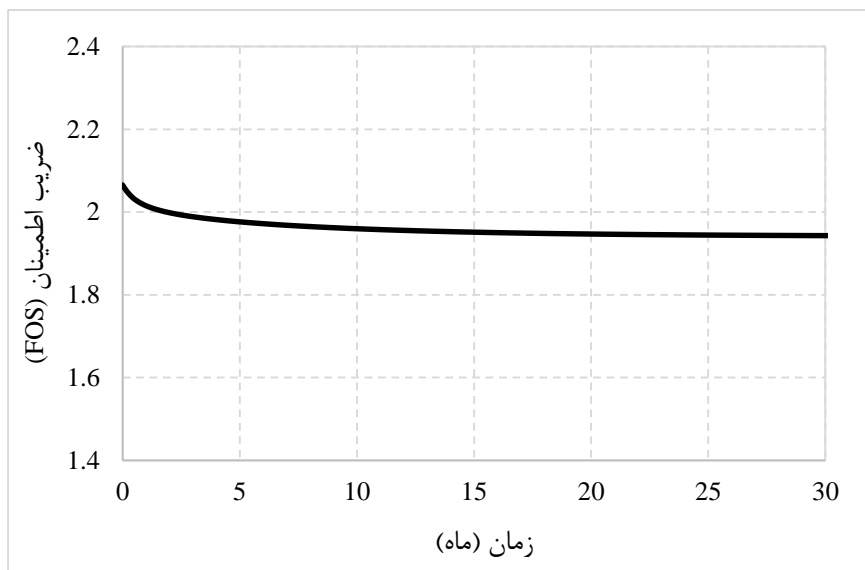
نتایج این قسمت با نتایج Tsiamposi et al. (2012) مطابقت می کند [۱].

- با مقایسه نمودارهای اشکال فوق اختلاف ضریب اطمینان در دو حالتی که جزء مکش بافتی در مقاومت برشی در نظر گرفته می شود و از جزء مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی صرف نظر می شود، مشخص می شود؛ در نظر گرفتن جزء مکش بافتی در مقاومت برشی، در این حالات (Initial GWT depth = 5 m) سبب افزایش کمی در ضریب اطمینان می شود؛ علت آن هم اینست که عمده گوه گسیختگی از ناحیه اشباع می گذرد.

۵-۴-۳-۱-۲- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 10m

مقدار ضریب نفوذپذیری برای این بخش مطابق شکل ۴-۵ در نظر گرفته شده است. (مطابق مدل مینا)

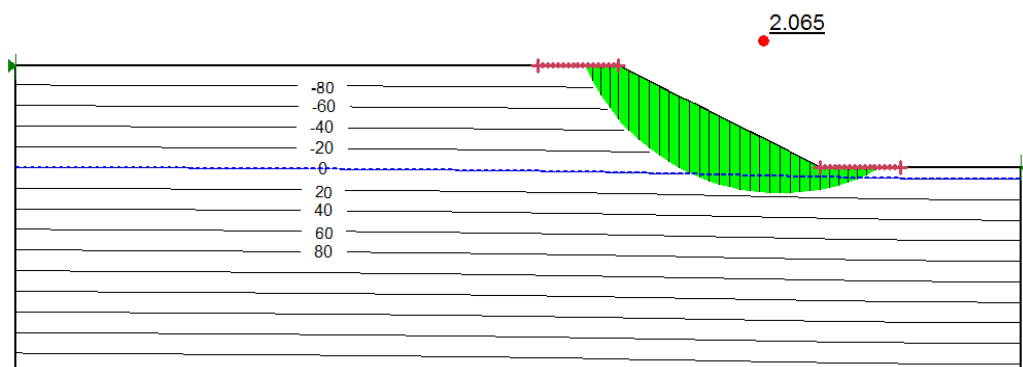
الف) منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 15^\circ$):



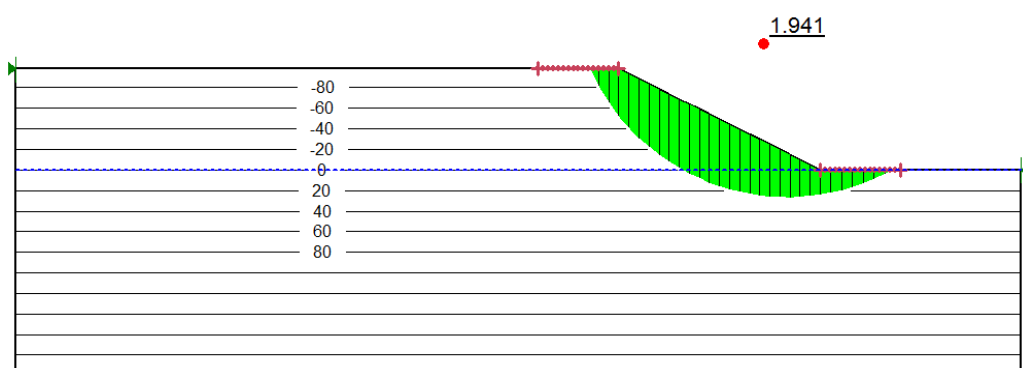
شکل ۴-۵: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 15^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m.

با توجه به شکل ۵-۲۵ بیشترین ضریب اطمینان برابر ۲,۰۶۵ و پس از پایان گودبرداری می باشد و مقدار ضریب اطمینان پس از رسیدن به حالت پایدار برابر ۱,۹۴۱ می باشد. تغییرات خطوط فشار آب حفره ای و همچنین گوه گسیختگی در کوتاه مدت و بلند مدت در اشکال ۵-۲۶ نشان داده شده اند.

با توجه به اشکال ۵-۲۶، مشخص است پس از پایان گودبرداری، مقداری اضافه فشار منفی ناشی از بار برداری و توسعه اضافه فشار منفی در زیر ناحیه گودبرداری و در پشت شیب ایجاد شده که با گذشت زمان، طی فرآیند تورم این اضافه فشار منفی از بین می رود و تنش موثر و مقاومت برشی در این نواحی کاهش یافته؛ به همین دلیل مقدار ضریب اطمینان با گذشت زمان، کاهش می یابد.



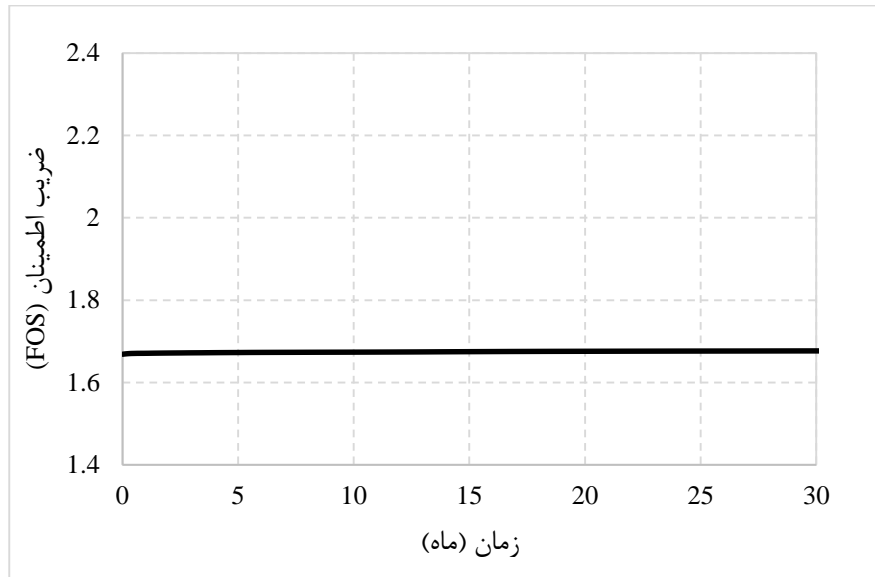
(الف)



(ب)

شکل ۵-۲۶: تغییرات خطوط فشار آب حفره ای و گوه گسیختگی؛ (الف) پس از پایان گود برداری (ب) پس از رسیدن به حالت پایدار؛ $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m

ب) منحنی ضریب اطمینان - زمان، ($\phi^b = 0^\circ$):



شکل ۵-۲۷: منحنی ضریب اطمینان - زمان؛ $\phi^b = 0^\circ$ و $K_{sat} = 1e-6$ m/s و Initial GWT depth = 10 m

در این حالت تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان مطابق شکل ۵-۲۷ است؛ همان طور که مشخص است، تغییرات ضریب اطمینان در این حالت با گذشت زمان تقریباً ثابت است.

مطالعه عمق سطح آب زیر زمینی برای اعماق ۵، ۱۰ و ۲۰ متر نسبت به سطح زمین، منجر به نتایج زیر شد:

- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 20 m، با گذشت زمان تقریباً ثابت است و تغییر نمی کند.
- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 10 m (عمق اولیه سطح آب زیر زمینی برابر با عمق گودبرداری باشد)، هنگامی که جزء مکش بافتی در مقاومت برشی در نظر گرفته می شود، روند نزولی دارد اما تغییرات آن نسبت به زمان کم است و زمانی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود این منحنی تقریباً با گذشت زمان ثابت است.

- منحنی ضریب اطمینان - زمان برای Initial GWT depth = 5 m (عمق اولیه سطح آب زیر زمینی کمتر از عمق گودبرداری باشد)، بسته به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، ممکن است در کوتاه مدت یا میان مدت به کمترین مقدار خود برسد یا اینکه با گذشت زمان ثابت بماند.

نتایج این قسمت با نتایج (Tsiampousi et al. (2012) مطابقت می کند [۱].

۵-۴-۳-۲- بررسی تاثیر در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت

برشی خاک بر روی مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از معادلات غیر خطی در مدل ۱

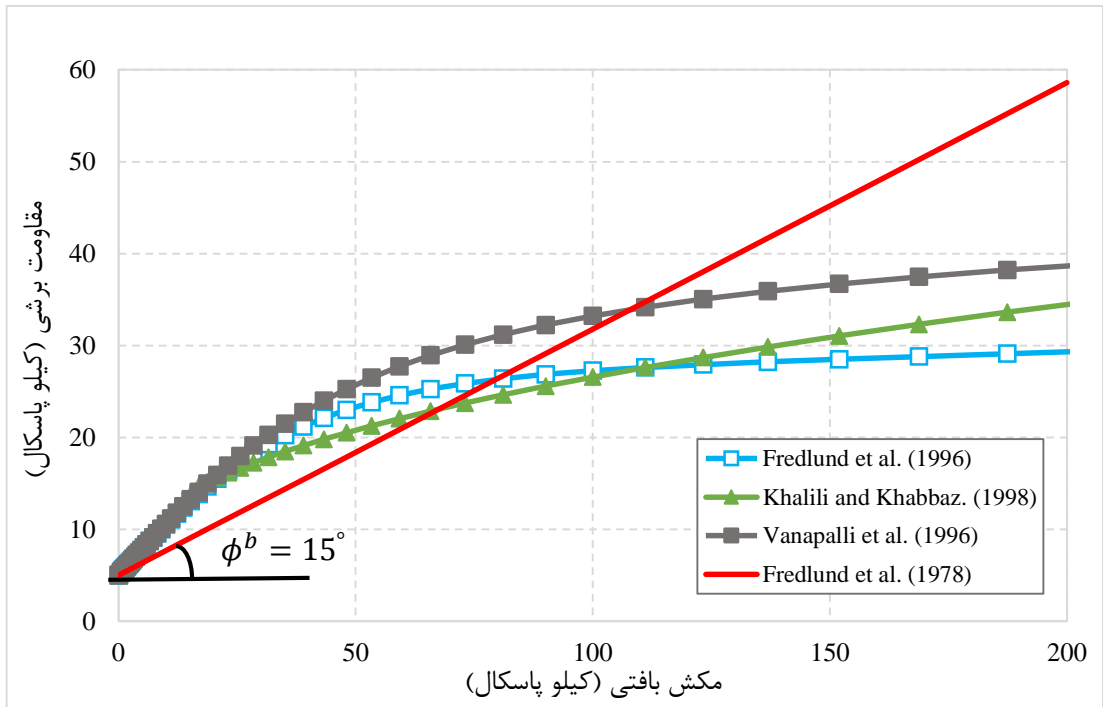
موضوع مهم برای بررسی پایداری شیروانی های خاکی غیر اشباع اینست که بدست آوردن پروفیل مکش درجا آسان نیست اما در بیشتر کارهای مهندسی حدود یک صد کیلو پاسکال در نظر گرفته می شود [۲]. با توجه به این موضوع، در این بخش توزیع مکش بافتی بر حسب درصدی از توزیع مکش در حالت هیدرواستاتیکی محدود شد و پروفیل های مختلفی از توزیع مکش بافتی بر حسب درصدی از توزیع هیدرواستاتیکی را در مقاومت برشی خاک در نظر می گیریم تا روند تغییرات ضریب اطمینان با توجه به این مشخص شود؛ در واقع در این بخش می خواهیم بررسی کنیم که در نظر گرفتن درصدی کم از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، چه مقدار می تواند در افزایش ضریب اطمینان تاثیر گذار باشد. این کار توسط (Rahardjo et al. (2014) و با استفاده از معادله خطی و با در نظر گرفتن سه مقدار $\phi^b = 75\% \phi'$ و $\phi^b = 50\% \phi'$ و $\phi^b = 25\% \phi'$ انجام شده است [۳]؛ بنابراین ما در این تحقیق از معادلات غیر خطی استفاده می کنیم. مطالعه تغییرات ضریب اطمینان با توجه به سه معادله غیر خطی؛ (Vanapalli et al. (1996)، Fredlund et al. (1996) و خلیلی و خباز (۱۹۹۸) در نظر گرفته می شود تا اختلاف آن ها نیز مشخص شود. در این قسمت برای مدل سازی، ابتدا مقادیر

تنش ها به وسیله نرم افزار Sigma/w محاسبه می شود و سپس توسط نرم افزار Slope/w، ضرایب اطمینان محاسبه شده است و تاثیر وجود فشار آب حفره ای منفی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف به صورت مستقیم در نرم افزار Slope/w با افزایش مقاومت برشی لحاظ می شود؛ در این حالت بحث تغییرات ضریب اطمینان با زمان مطرح نمی شود و شرایط پایدار را در نظر می گیریم.

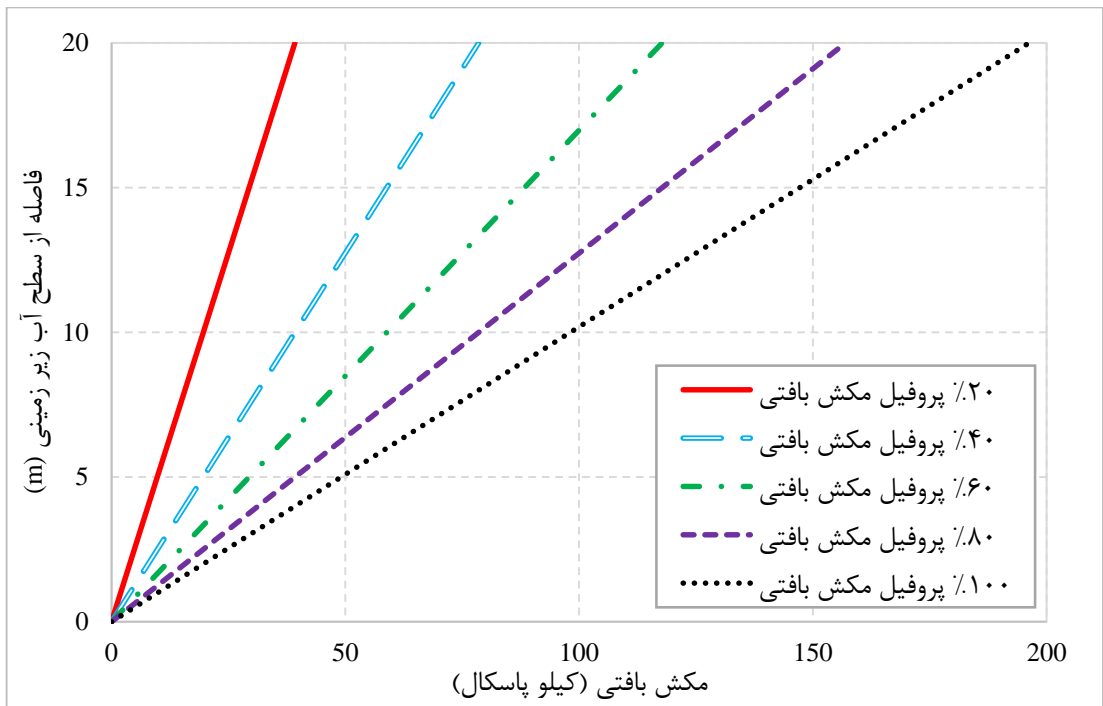
پوش مقاومت برشی با توجه به معادله خطی (Fredlund et al. (1978) و سه معادله غیر خطی (Vanapalli et al. (1996)، Fredlund et al. (1996) و خلیلی و خباز (۱۹۹۸) مطابق شکل ۵-۲۸ است. مقدار K، پارامتر مربوط به معادله غیر خطی (Fredlund et al. (1996) با توجه به معادله ۳-۱۷ برابر است:

$$K = -0.0016 \times (7)^2 + 0.0975 \times 7 + 1 = 1.60$$

پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی به صورت درصد های مختلفی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در بالای سطح آب زیر زمینی، در مقاومت برشی خاک، در نظر گرفته شده اند که این پروفیل ها در شکل ۵-۲۹ نشان داده شده اند.



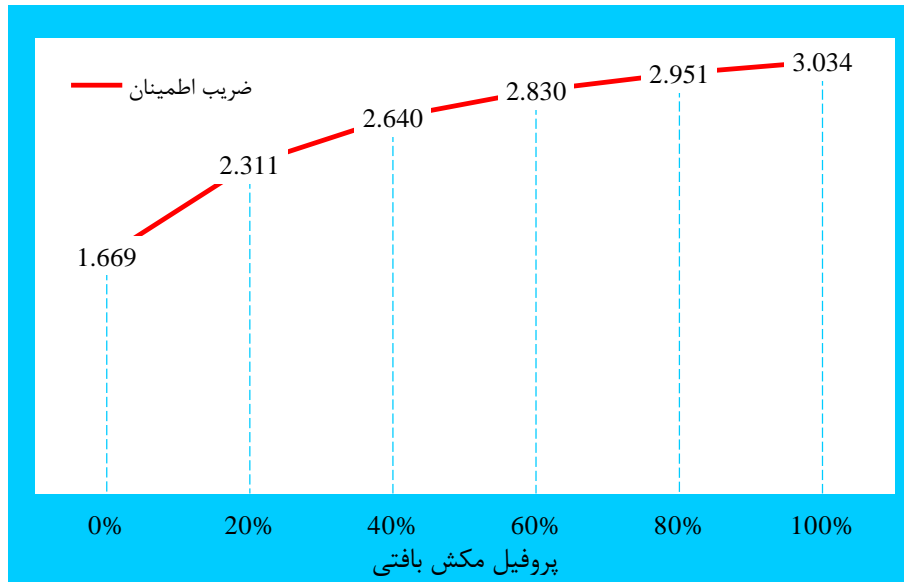
شکل ۵-۲۸: پوش های مقاومت برشی با توجه به روابط خطی و غیر خطی، در محدوده مکش بین ۰ تا حداکثر ۲۰۰ کیلو پاسکال.



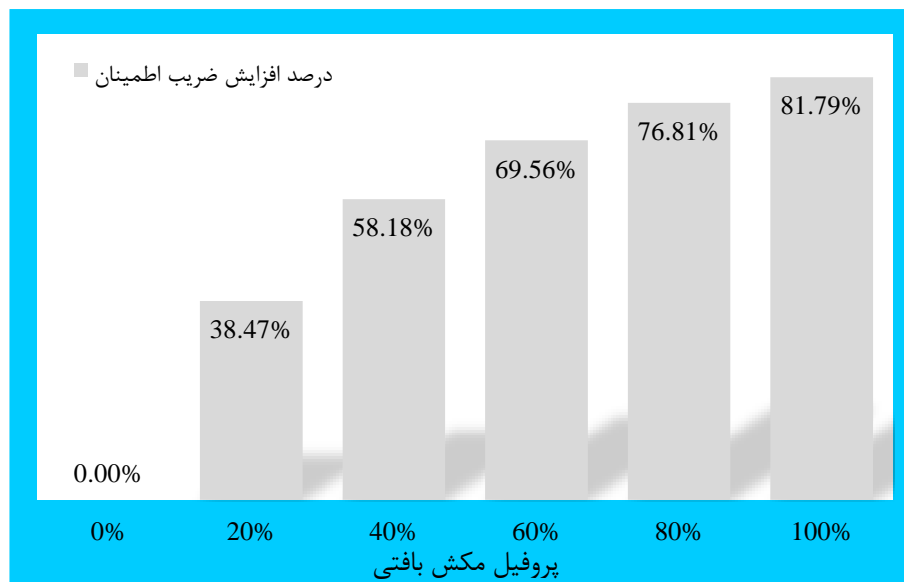
شکل ۵-۲۹: پروفیل های مختلف از مکش بافتی به صورت درصدی از پروفیل مکش بافتی در حالت هیدرواستاتیکی، در بالای سطح آب زیر زمینی.

الف) مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) با در نظر

گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



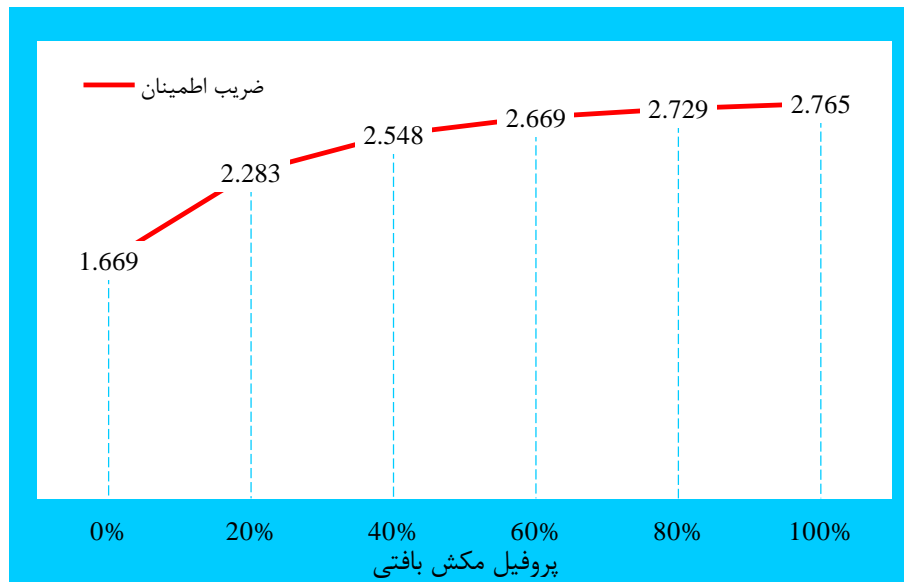
شکل ۵-۳۰: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996).



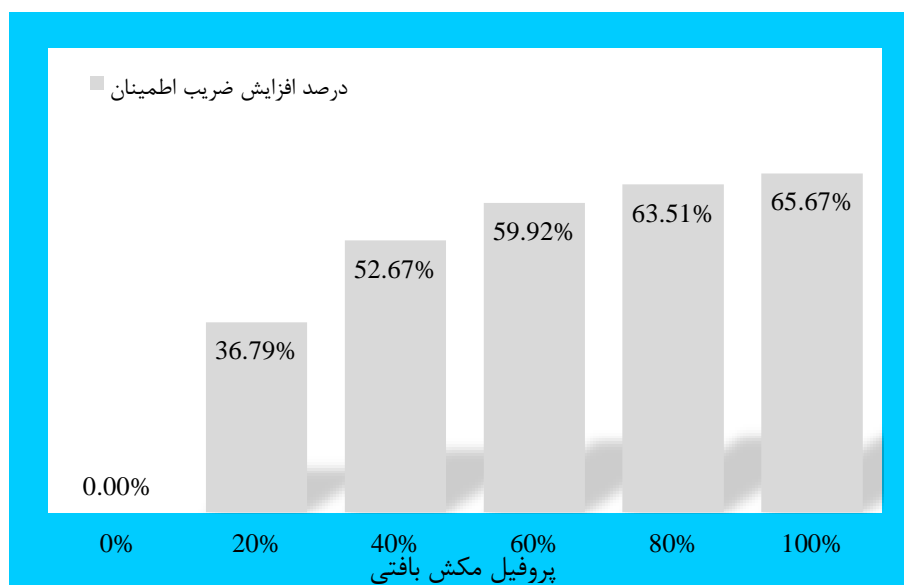
شکل ۵-۳۱: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود؛ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996).

ب) مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی Fredlund et al. (1996) با در نظر

گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



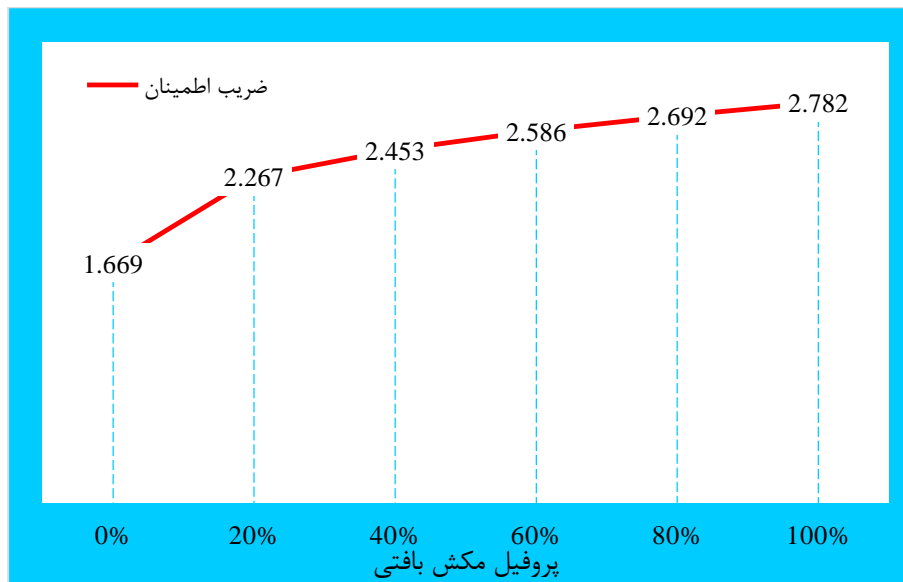
شکل ۵-۳۲: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی Fredlund et al. (1996).



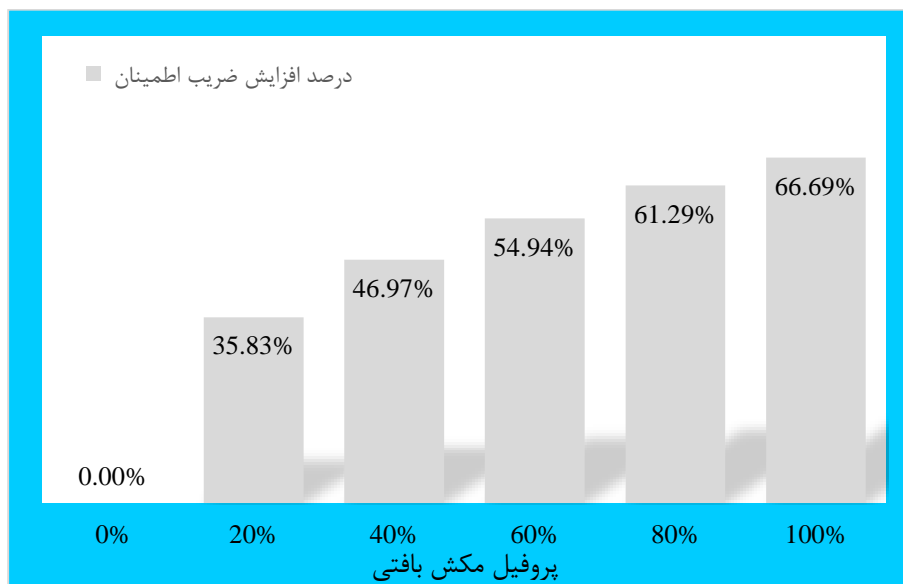
شکل ۵-۳۳: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود؛ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی Fredlund et al. (1996).

ج) مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸) با در نظر

گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۳۴-۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۱ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸).



شکل ۳۵-۵: درصد افزایش ضریب اطمینان در مدل ۱؛ نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر می شود؛ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸).

معادلات غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) و Fredlund et al. (1996) از دسته معادلاتی هستند که به طور مستقیم به SWCC مربوط می شوند و معادله غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸) از دسته معادلاتی است که به صورت غیر مستقیم به SWCC مربوط می شود که از هر سه معادله استفاده شد. با توجه به مقاله (Vanapalli and Fredlund. (2000) که برای سه نوع خاک با نشانه خمیری و درصد رس متفاوت به این نتیجه رسیدند که معادله غیر خطی (Fredlund et al. (1996) از دیگر معادلات غیر خطی از جمله معادلات غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) و خلیلی و خباز (۱۹۹۸) که در این تحقیق نیز استفاده شده است، پیش بینی بهتری را برای مقاومت برشی ارائه می کند [۸]. با توجه به این و با توجه به پوش های برآورد مقاومت برشی در حالت غیر خطی (شکل ۵-۲۸) مشاهده می شود؛ معادله غیر خطی (Fredlund et al. (1996) در محدوده مکش های کم تا حدود یک صد کیلو پاسکال (که در عمده کارهای مهندسی در نظر گرفته می شود) تقریباً یک حالت متوسطی از برآورد مقاومت برشی نسبت به دو معادله غیر خطی دیگر ارائه می کند، لذا با توجه به این دو دلیل به نظر می رسد ارائه ضریب اطمینان مطابق این معادله منطقی تر باشد. مبنای مطالعه پارامتریک برای پارامترهای مقاومت برشی، یعنی پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، این معادله در نظر گرفته می شود که نتایج آن در بخش های بعدی آمده است.

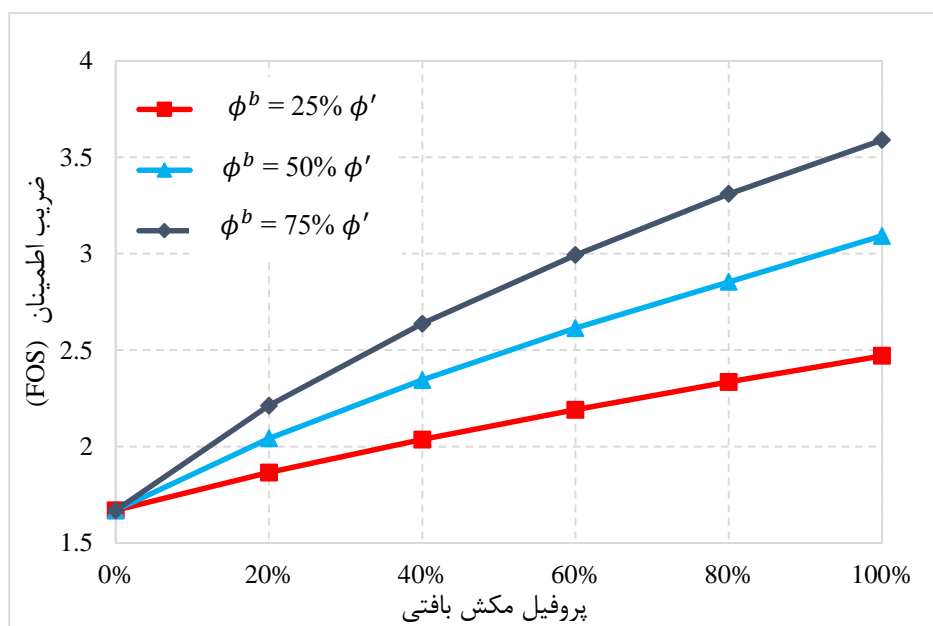
با توجه به اشکال ۵-۳۱، ۵-۳۳ و ۵-۳۵، به ازای در نظر گرفتن ۲۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، ۳۸،۴۷ درصد با توجه به رابطه غیر خطی Vanapalli et al. (1996)، ۳۶،۷۹ درصد با توجه به رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996) و ۳۵،۸۳ درصد با توجه به رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸) در مقدار ضریب اطمینان، نسبت به حالتی که از جزء مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی صرف نظر می شود، افزایش می یابد و این نشان می دهد حتی در نظر

گرفتن درصدی کم (۲۰ درصد) از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، سبب افزایش ضریب اطمینان به میزان قابل توجهی می شود.

علت اینکه نرخ افزایش ضریب اطمینان کم می شود اینست که با توجه به روابط غیر خطی مقاومت برشی، این پوش غیر خطی است و نرخ افزایش مقاومت برشی در برابر مکش بافتی، با افزایش مکش بافتی کاهش می یابد [۱۱].

۵-۳-۳- محاسبه ضریب اطمینان با استفاده از معادله خطی (Fredlund et al. (1978)

مقادیر ضریب اطمینان با در نظر گرفتن مقدار زاویه ϕ^b بر حسب درصدی از مقدار زاویه اصطکاک داخلی، برای پروفیل های مختلفی از توزیع مکش بافتی، تعیین شده است.



شکل ۵-۳۶: مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از معادله خطی مقاومت برشی برای پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک.

در شکل ۵-۳۶ روند تغییرات ضریب اطمینان با استفاده از معادله خطی مقاومت برشی نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقدار AEV بیش از ۱۰ کیلو پاسکال است و با توجه به مقاله Zhang et al.

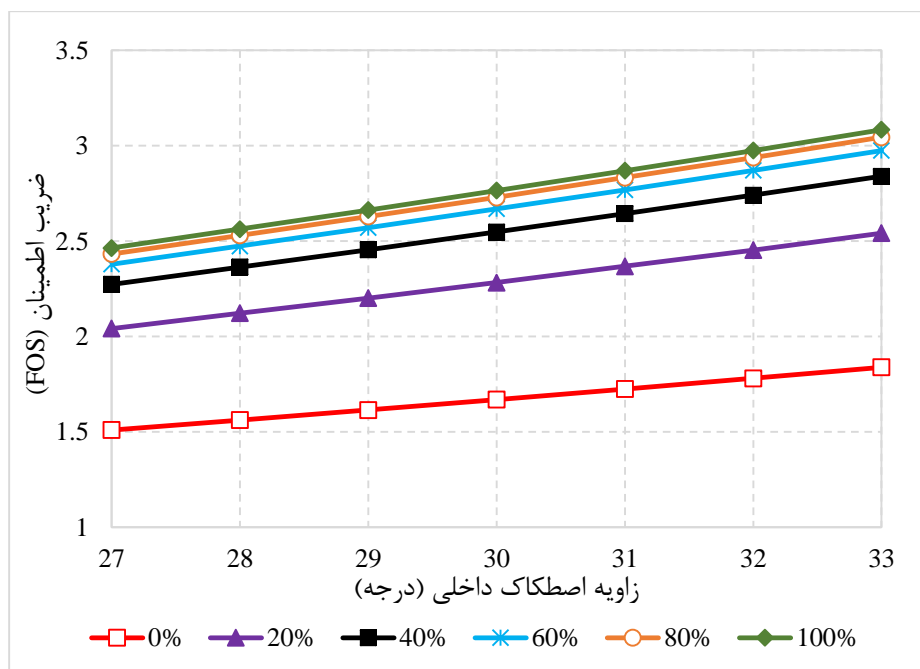
(2014) که به این نتیجه رسیدند: " اگر مقدار هوای ورودی (AEV) بین ۱۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال باشد، عموماً مقدار ϕ^b می تواند برابر 15° در نظر گرفته شود. " [۲]؛ لذا مطابق شکل ۵-۳۶، مقدار ضریب اطمینان به ازای $\phi^b = 15^\circ$ معادل مقادیر ضریب اطمینان با توجه به مقادیر $\phi' = 50\%$ ϕ^b می باشد؛ با توجه به این مقادیر و مقادیر محاسبه شده با استفاده از معادلات غیر خطی در قسمت قبل، مقادیر ضریب اطمینان به ازای $\phi^b = 15^\circ$ در محدوده مکش های کم از مطابقت خوبی با نتایج معادلات غیر خطی برخوردار می باشد و استفاده از معادله خطی با $\phi^b = 15^\circ$ در محدوده این مکش ها در حاشیه اطمینان است. با توجه به اینکه در بیشتر کارهای مهندسی، مکش بافتی حدود یک صد کیلو پاسکال در نظر گرفته می شود لذا با توجه به این موضوع و شکل ۵-۳۶، حتی به ازای $\phi' = 25\%$ ϕ^b و استفاده از معادله خطی در این گونه از مسائل نیز موجب افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب اطمینان می شود هرچند که این مقدار افزایش در این تحقیق از معادلات غیر خطی کمتر است.

با توجه به شکل ۵-۲۸، مقاومت برشی ارائه شده توسط معادله خطی تا مقدار مکش بافتی حدود ۶۷،۴ کیلو پاسکال، به ازای $\phi^b = 15^\circ$ ، از همه معادلات غیر خطی برآورد مقاومت برشی کمتر است؛ با توجه به این موضوع و اینکه در حالت کلی، عمق سطح آب زیر زمینی برای مسائل بررسی شده در این تحقیق در سه عمق مختلف؛ ۵m، 10m و 20m می باشند و در بخش محاسبه تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان هدف بررسی شکل منحنی ضریب اطمینان نسبت به زمان و پارامترهای تاثیر گذار بر روی آن می باشد، بنابراین به منظور ساده سازی در مدل سازی، از معادله خطی با $\phi^b = 15^\circ$ استفاده شده است. برای حالاتی که Initial GWT depth = 5m و 10m است، به این دلیل که عمده گوه گسیختگی در این حالات از نواحی اشباع و نواحی غیر اشباع دارای مکش بافتی کمتر از ۶۷،۴ کیلو پاسکال می گذرد، استفاده از این معادله در حاشیه اطمینان است، هر چند استفاده از معادلات غیر خطی هم سبب افزایش کمی در مقدار ضریب اطمینان نسبت به این حالت می شود؛ چون که همانطور که ذکر شد در

این حالات عمده گوه گسیختگی از ناحیه اشباع می گذرد. برای حالتی که Initial GWT depth = 20 m می باشد با توجه به پوش مقاومت برشی و نتایج معادلات غیر خطی استفاده از معادله خطی با $\phi^b = 15^\circ$ در بخش محاسبه تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان فرض محافظه کارانه نیست ولی چون هدف بررسی شکل منحنی ضریب اطمینان نسبت به زمان می باشد به منظور ساده سازی از این معادله با در نظر گرفتن $\phi^b = 15^\circ$ استفاده شده است.

۴-۳-۴-۵- بررسی تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

در این قسمت فرآیند مدل سازی مشابه بخش قبل انجام می شود. به منظور مطالعه پارامتریک برای زاویه اصطکاک داخلی، تغییرات ضریب اطمینان با توجه به مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در محدوده 30 ± 3 درجه و با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف مکش بافتی با استفاده از معادله غیر خطی Fredlund et al. (1996) محاسبه شده است. با توجه به توضیحات، خروجی مدل مطابق شکل زیر است.



شکل ۳۷-۵: تغییرات ضریب اطمینان نسبت به زاویه اصطکاک داخلی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک.

علت استفاده از معادله غیر خطی (Fredlund et al. (1996) در بخش ۲-۳-۴-۵ توضیح داده شده است. هر چند در حالت کلی اختلاف آن با توجه به بخش ۲-۳-۴-۵ با نتایج معادله خلیلی و خباز (۱۹۹۸) کم می باشد.

با توجه به شکل ۳۷-۵ روند تغییرات ضریب اطمینان با توجه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، تقریباً به صورت خطی است. با توجه به شکل ۳۷-۵، مقدار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقدار ضریب اطمینان به ویژه در حالتی که توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی در نظر گرفته می شود تاثیر قابل توجهی دارد که البته این موضوع نیز در معادلات برآورد مقاومت برشی مشخص است.

ضریب اطمینان با تغییرات مقدار زاویه اصطکاک داخلی از ۲۷ درجه به ۳۳ درجه؛ به ازای صرف نظر کردن از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۱٫۸ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۲۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۴٫۵ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۴۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۴٫۹ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۶۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۵ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۸۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۵٫۱ درصد و به ازای در نظر گرفتن ۱۰۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۵٫۲ درصد؛ افزایش می یابد.

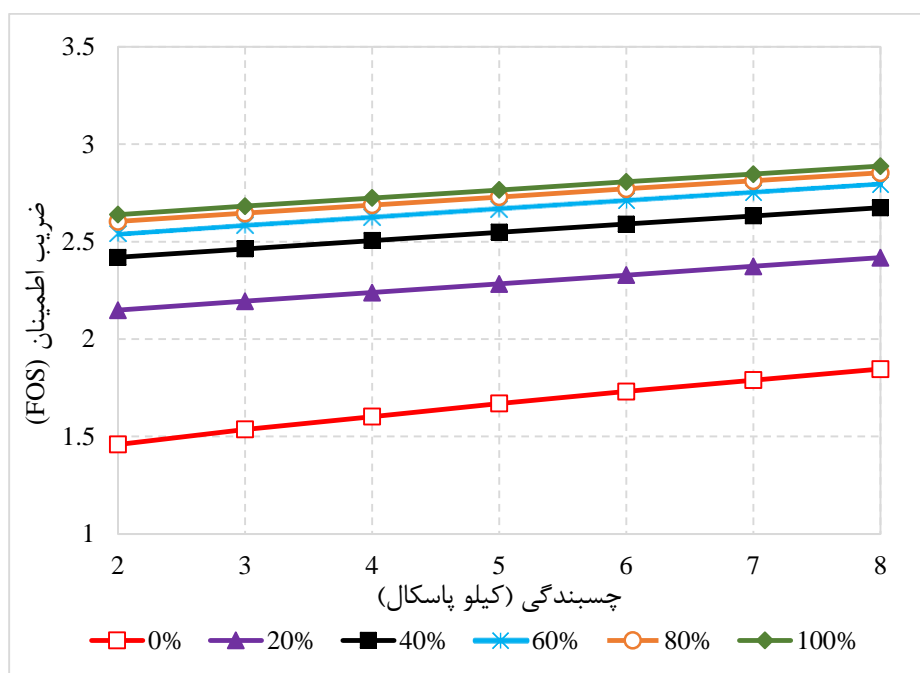
با توجه به شکل ۳۷-۵ مشخص است که مقدار ضریب اطمینان با در نظر گرفتن حداقل ۲۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، به میزان قابل توجهی در محدوده مقادیر زاویه اصطکاک داخلی، ۲۷ تا ۳۳ درجه، افزایش می یابد.

۵-۴-۳-۵- بررسی تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر چسبندگی

در این قسمت فرآیند مدل سازی مطابق قسمت قبل و بخش ۵-۴-۳-۲ انجام می شود.

به منظور مطالعه پارامتریک برای پارامتر چسبندگی، تغییرات ضریب اطمینان با توجه به مقادیر این پارامتر در محدوده 3 ± 5 کیلو پاسکال و در نظر گرفتن پروفیل های مختلفی از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی و استفاده از معادله غیر خطی (Fredlund et al. (1996 محاسبه شده است. خروجی

مدل مطابق شکل زیر است:



شکل ۵-۳۸: تغییرات ضریب اطمینان نسبت به تغییرات پارامتر چسبندگی با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک.

با توجه به شکل ۵-۳۸ روند تغییرات ضریب اطمینان، با در نظر گرفتن درصدهای مختلفی از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، نسبت به تغییرات پارامتر چسبندگی مشخص می شود. ضریب اطمینان با تغییرات مقدار پارامتر چسبندگی از ۲ کیلو پاسکال تا ۸ کیلو پاسکال؛ به ازای صرف نظر کردن از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی، ۲۶٫۵ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۲۰ درصد از توزیع

هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۱۲,۶ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۴۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۱۰,۵ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۶۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۹,۹ درصد؛ به ازای در نظر گرفتن ۸۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی، ۹,۶ درصد و به ازای در نظر گرفتن ۱۰۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی ۹,۴ درصد؛ افزایش می یابد.

با توجه به شکل ۵-۳۸، تاثیر مقدار پارامتر چسبندگی با افزایش درصد توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، کم می شود؛ مقدار پارامتر چسبندگی تاثیر زیادی در افزایش ضریب اطمینان در حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک صرف نظر می شود، دارد ولی تاثیر آن در افزایش ضریب اطمینان در حالتی که مکش بافتی در مقاومت برشی خاک در نظر گرفته می شود نسبت به حالتی که از آن صرف نظر می شود، کمتر است.

تاثیر تغییرات یک واحد پارامتر زاویه اصطکاک داخلی در تغییرات ضریب اطمینان در حالتی که مکش بافتی در مقاومت برشی در نظر گرفته می شود به مراتب بیشتر از تاثیر تغییرات یک واحد پارامتر چسبندگی در همین شرایط است.

با توجه به شکل ۵-۳۸ مشخص است که مقدار ضریب اطمینان با در نظر گرفتن حداقل ۲۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، به میزان قابل توجهی در محدوده مقادیر پارامتر چسبندگی، ۲ تا ۸ کیلو پاسکال، افزایش می یابد.

گودبرداری در مدل ۲ به صورت شیب دار، با شیب ۶۰ درجه نسبت به افق در نظر گرفته می شود. سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین و به صورت افقی، در نظر گرفته می شود. مقدار ضریب اطمینان بر اساس آنالیز مبتنی بر تعادل حدی و با استفاده از روش Morgenstern-price تعیین می شود و برای تعیین سطح لغزش بحرانی فرضی از روش Entry and Exit استفاده شده است. در تحلیل و تعیین ضرایب اطمینان پایداری شیروانی های خاکی با استفاده از روش های تعادل حدی، بعلت حساسیت و لزوم توجه بیشتر بعلت ساخت انواع سازه ها بر روی آن ها، توصیه می شود از روش هایی مانند روش Morgenstern-price و یا روش Spencer که هر دو تعادل لنگر و نیرو را ارضا کرده و اثر تمام نیروهای وارد بر قطعه ها، اهم از نیروهای افقی و قائم را در نظر می گیرند، استفاده شود. این روش ها بدلیل در نظر گرفتن اثر همزمان تمامی نیروها ضریب اطمینان کمتری را نتیجه داده و دارای درصد خطای کمتری نسبت به سایر روش ها هستند [۲۷].

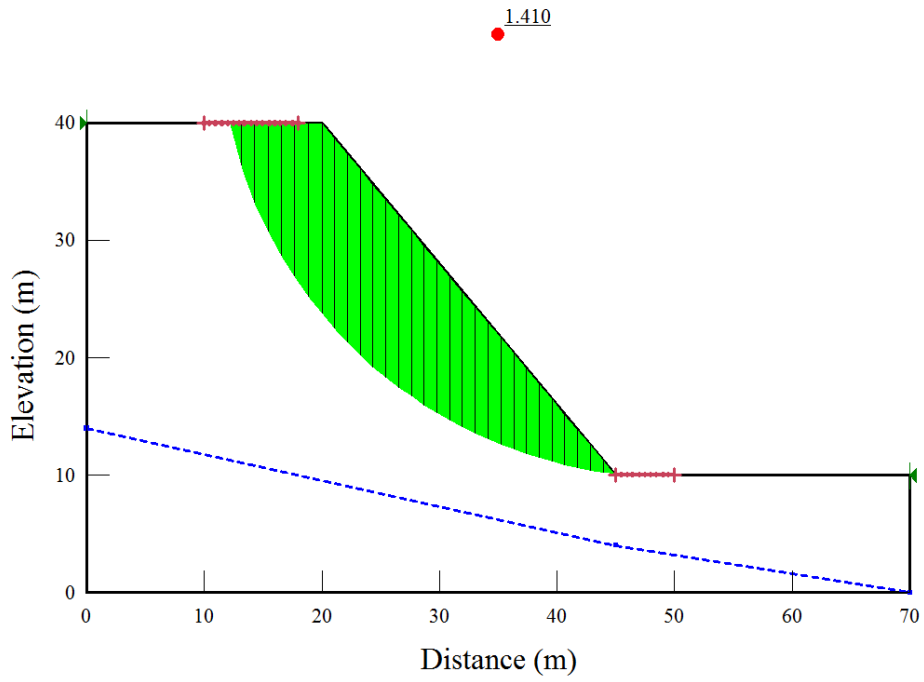
ضرایب اطمینان با در نظر گرفتن پروفیل های مختلفی از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از روابط غیر خطی؛ Vanapalli et al. (1996)، Fredlund et al. (1996) و خلیلی و خباز (۱۹۹۸) تعیین و با حالتی که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک صرف نظر می شود، مقایسه می شود.

۵-۴-۴-۱- صحت سنجی روند مدل سازی، عملکرد و نتایج نرم افزار

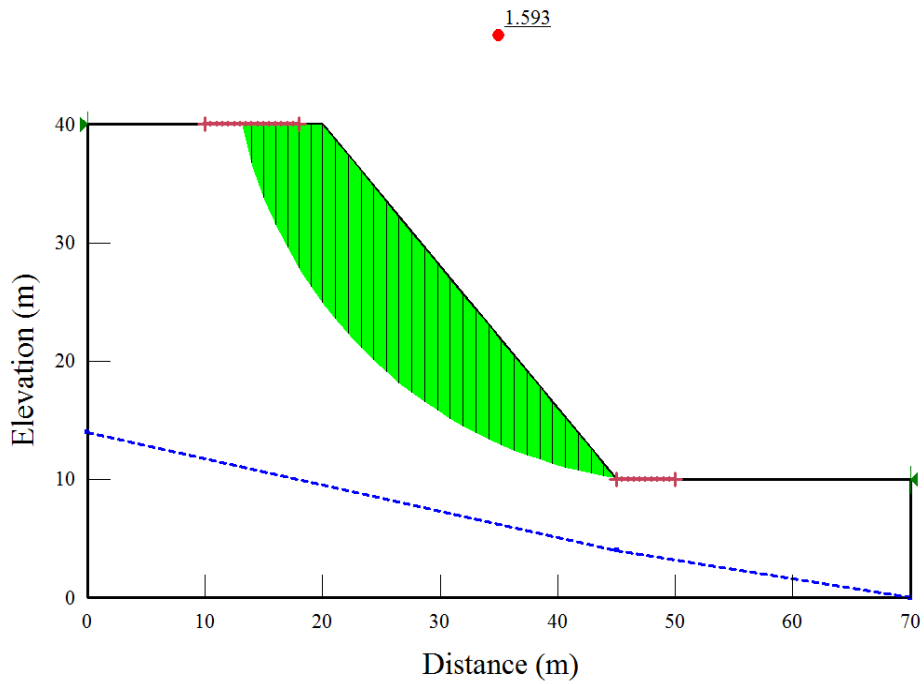
برای تایید صحت روند مدل سازی و نتایج نرم افزار، ابتدا شیروانی موجود در مقاله (Zhang et al. (2014) که دارای شیب ۵۰ درجه نسبت به افق می باشد و توزیع مکش بافتی در آن به صورت هیدرواستاتیکی در نظر گرفته شده است، با استفاده از پارامترهای اشباع و نیز روابط خطی (Fredlund et al. (1978) غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) و غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸) برای در نظر گرفتن حالت غیر اشباع مدل سازی شد و نتایج حاصله که با نرم افزار Geo Studio بدست آمده است، با نتایج موجود در آن مقاله که با نرم افزار SV Slope 2009 مدل سازی شده است، از مطابقت خوبی برخوردار است (اختلاف ها کمتر از ۱ درصد است)، نتایج در جدول ۳-۵ نشان داده شده است. ابعاد، گوه گسیختگی و مقادیر ضریب اطمینان برای معادلات خطی (Fredlund et al. (1978) و غیر خطی (Vanapalli et al. (1996) در شکل ۵-۳۹، آمده است.

جدول ۳-۵: بررسی نتایج مقاله (Zhang et al. (2014) [۲].

درصد اختلاف	ضریب اطمینان با استفاده از Geo Studio	ضریب اطمینان در مقاله مربوطه	معادله مورد استفاده
-۰,۴۵	۰,۸۹۴	۰,۸۹۸	$\phi^b = 0^\circ$ و Fredlund et al. (1978)
-۰,۲۸	۱,۴۱۰	۱,۴۱۴	$\phi^b = 15^\circ$ و Fredlund et al. (1978)
-۰,۳۷	۱,۶۳۲	۱,۶۳۸	خلیلی و خباز (۱۹۹۸)
-۰,۱۳	۱,۵۹۳	۱,۵۹۵	Vanapalli et al. (1996)



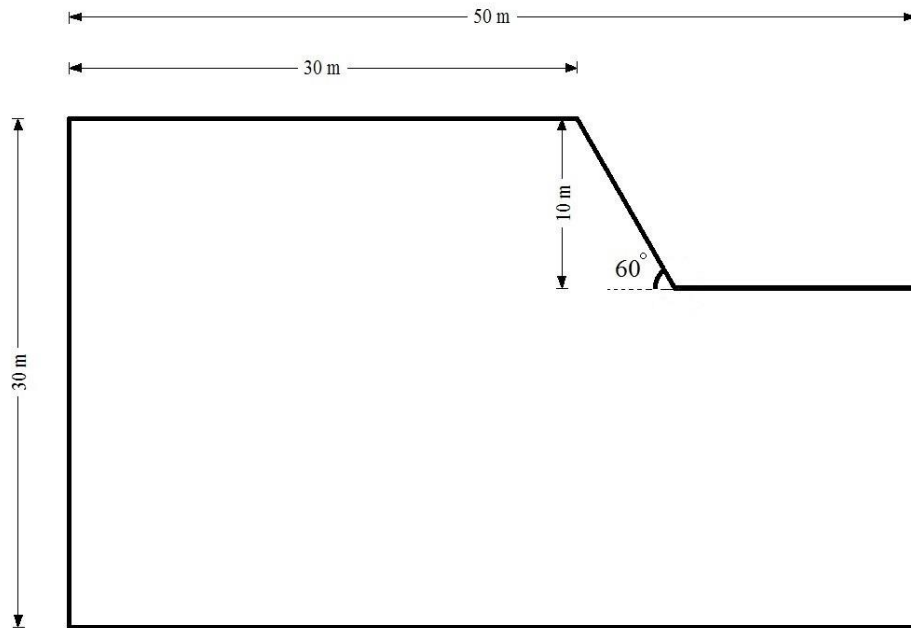
(الف)



(ب)

شکل ۵-۳۹: ابعاد، گوه گسیختگی و مقادیر ضریب اطمینان؛ (الف) رابطه خطی Fredlund et al. (1978) $\phi^b = 15^\circ$ (ب) رابطه غیر خطی Vanapalli et al. (1996).

۲-۴-۴-۵- هندسه مدل ۲



شکل ۴-۵: هندسه مدل ۲.

۲-۴-۴-۵- مشخصات خاک برای مدل ۲

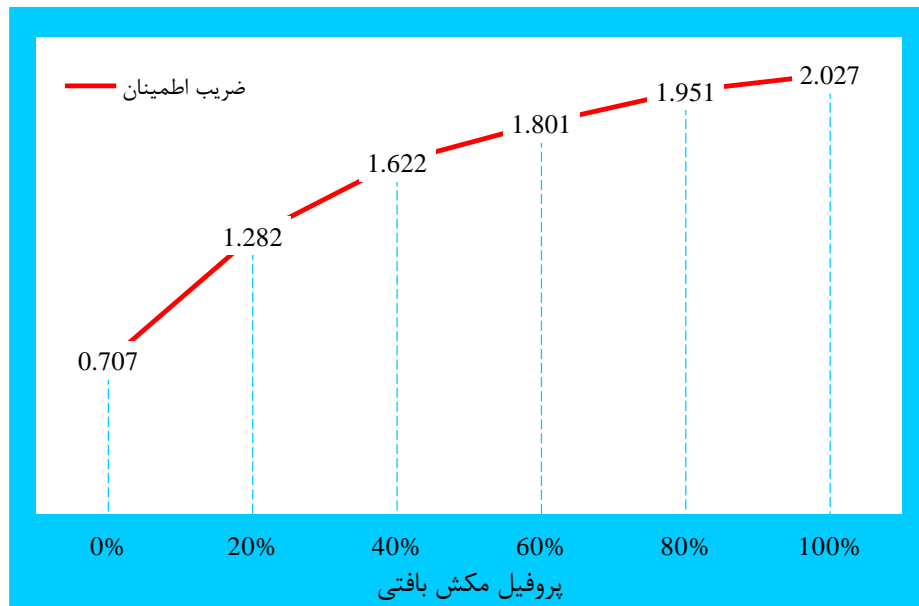
جدول ۴-۵: مشخصات خاک برای مدل ۲.

نوع آنالیز	تعدادل حدی (M-P)
ϕ' (degree)	30
C' (KPa)	5
γ_{sat} ($\frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$)	19.20
γ_{unsat} ($\frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$)	با توجه به SWCC
SWCC	شکل ۲-۵

۴-۴-۴-۵- خروجی نرم افزار برای مدل ۲

۴-۴-۴-۵-۱- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996)

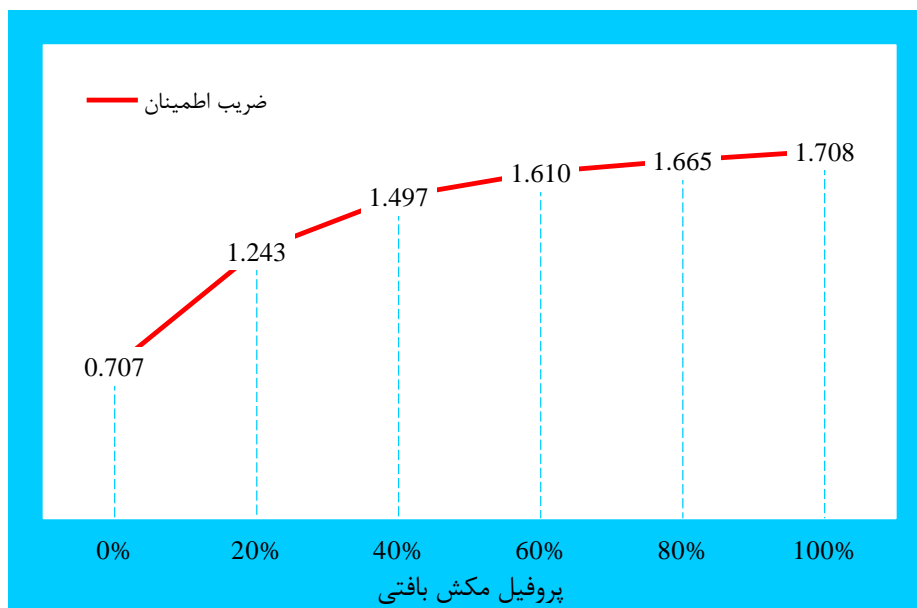
با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۴-۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996).

۴-۴-۴-۵-۲- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996)

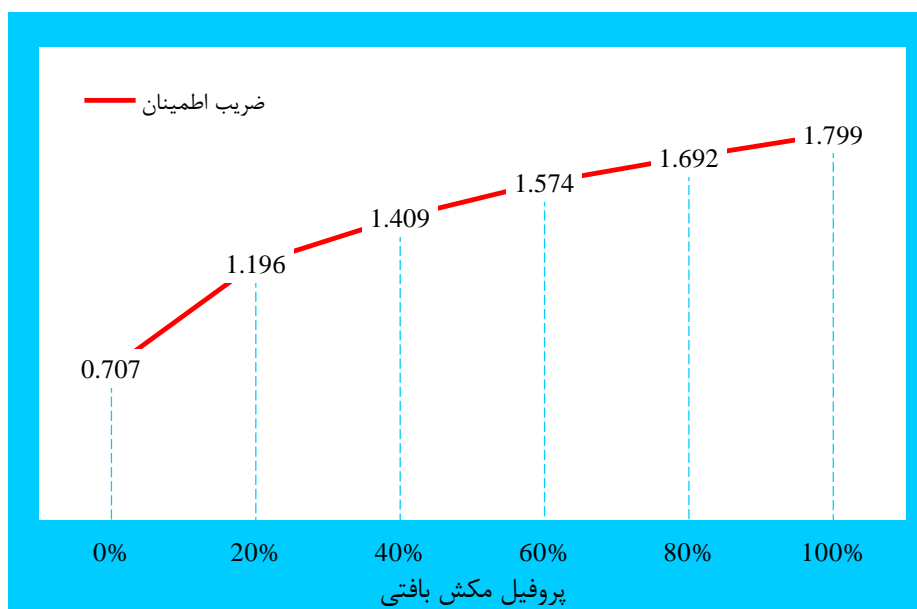
با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۵-۴۲: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996).

۵-۴-۳-۴-۴-۵- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)

با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



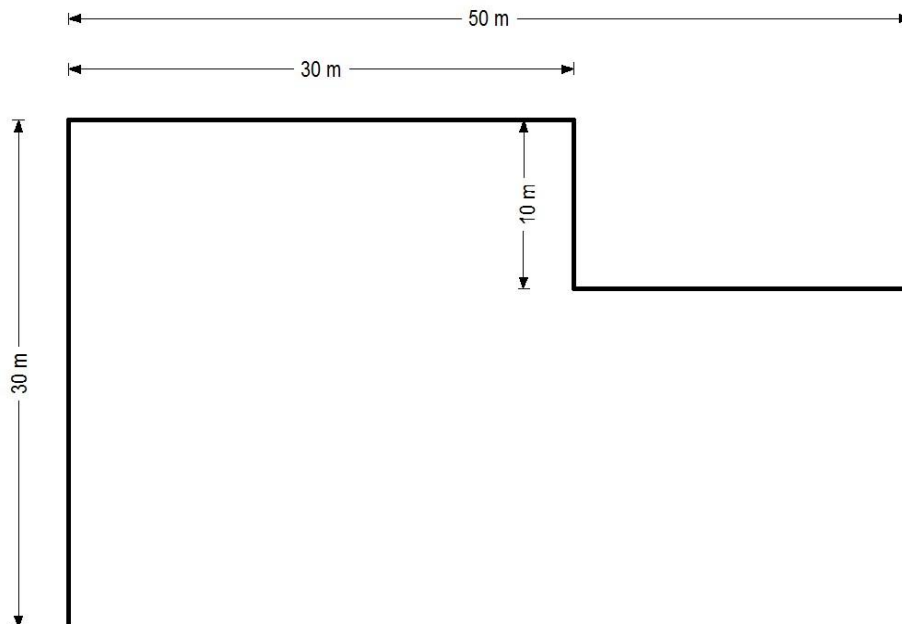
شکل ۵-۴۳: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۲ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸).

با توجه به اشکال ۵-۴۱ تا ۵-۴۳، به ازای در نظر گرفتن حداقل ۲۰ درصد از توزیع هیدرواستاتیکی مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، موجب افزایش ضریب اطمینان به میزان قابل توجهی می شود. با توجه به این موضوع اگر ضریب اطمینان بحرانی را ۱ در نظر بگیریم، در نظر گرفتن همین مقدار مکش کم در افزایش مقاومت برشی خاک، موجب تبدیل وضعیت شیروانی از حالت ناپایدار به حالت پایدار می شود که در مدل ۲ این اتفاق افتاده است.

۵-۴-۵- مدل ۳

گودبرداری در مدل ۳، با شیب قائم در نظر گرفته می شود. سطح آب زیر زمینی در عمق ۲۰ متری نسبت به سطح زمین و به صورت افقی، در نظر گرفته می شود. مقادیر ضریب اطمینان بر اساس آنالیز مبتنی بر تعادل حدی و با استفاده از روش Morgenstern-price تعیین می شود.

۵-۴-۵-۱- هندسه مدل ۳



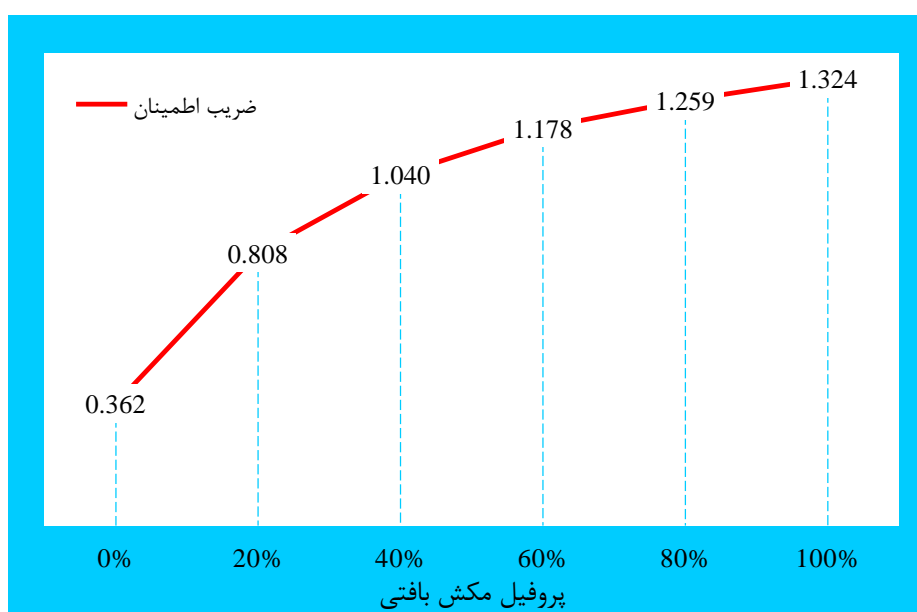
شکل ۵-۴۴: هندسه مدل ۳.

۴-۵-۲- مشخصات خاک برای مدل ۳ مطابق جدول ۴-۵ می باشد.

۴-۵-۳- خروجی نرم افزار برای مدل ۳

۴-۵-۳-۱- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996

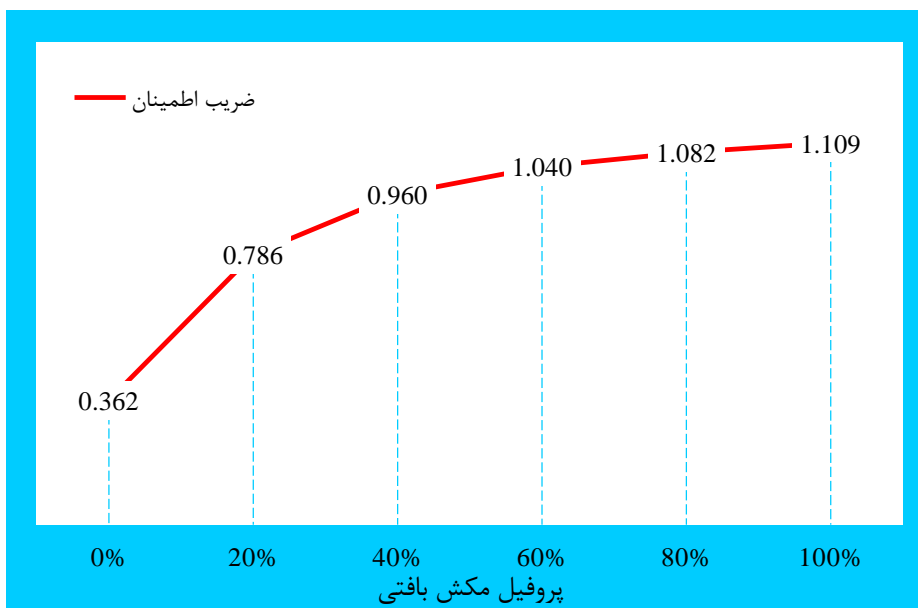
با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۴-۵: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Vanapalli et al. (1996.

۴-۵-۳-۲- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996

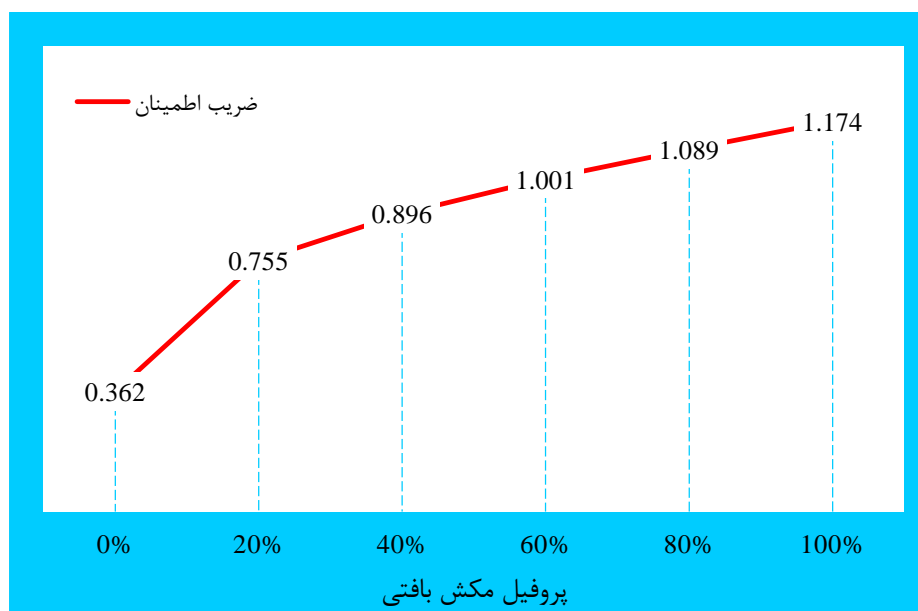
با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۵-۴۶: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی (Fredlund et al. (1996).

۵-۴-۵-۳- مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸)

با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک



شکل ۵-۴۷: مقادیر ضریب اطمینان در مدل ۳ با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه غیر خطی خلیلی و خباز (۱۹۹۸).

در شکل های ۵-۴۵ تا ۵-۴۷؛ روند تغییرات ضریب اطمینان به ازای در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، نشان داده شده است.

هدف از بررسی پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مدل ۱ این بود که نشان بدهیم، در نظر گرفتن درصدی کم (۲۰٪) از پروفیل مکش بافتی در افزایش مقاومت برشی خاک، موجب افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب اطمینان، نسبت به حالتی که از آن در مقاومت برشی خاک صرف نظر می شود (حالت متداول)، شده است. در مدل ۲ نیز نشان دادیم: در نظر گرفتن درصدی کم (۲۰٪) از پروفیل مکش بافتی در مقاومت برشی خاک، موجب تبدیل وضعیت شیروانی از حالت ناپایدار به حالت پایدار می شود و در مدل ۳ نیز روند تغییرات ضریب اطمینان در شیروانی های قائم با در نظر گرفتن پروفیل های مختلف از توزیع مکش بافتی در مقاومت برشی، نشان داده شده است؛ در این حالت نیز هر چند مقادیر ضریب اطمینان کم می باشد ولی به هر حال فارق از بحث پایداری در این مدل، مشاهده می شود در نظر گرفتن جزء مکش بافتی در مقاومت برشی خاک سبب افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب اطمینان در این مدل می شود.

با توجه به نتایج مدل های ۲ و ۳ به نظر می رسد، در نظر نگرفتن تاثیر مکش بافتی در عمق خاک در نواحی غیر اشباع، در افزایش مقاومت برشی خاک، به نوعی دست کم گرفتن مقاومت برشی و ضریب اطمینان در نواحی غیر اشباع می باشد و با در نظر گرفتن جزء مکش در مقاومت برشی می توان از اعمال ضریب اطمینان دور از واقعیت و هزینه اضافی برای پایدار سازی شیب های خاکی جلوگیری کرد.

فصل ششم: مرور نتایج

۶-۱- خلاصه و مرور نتایج

مهم ترین پارامتر تاثیر گذار در پایداری شیروانی ها و گودبرداری ها در خاک های غیر اشباع، مقاومت برشی است. در مکانیک خاک غیر اشباع، مقاومت برشی تابعی از درجه اشباع و مکش بافتی می باشد. همان طور که در نتایج این پایان نامه هم مشخص شد وجود مکش بافتی در ساختار خاک غیر اشباع سبب استحکام بیشتر خاک و افزایش مقاومت برشی خاک می شود و مقدار ضریب اطمینان با توجه به معیار گسیختگی اصلاح شده موهر-کولمب بیشتر می شود. همان طور که در فصل ۳ توضیح داده شد، برای در نظر گرفتن جزء مکش و درجه اشباع با توجه به معیار های گسیختگی توسعه یافته موهر-کولمب، روابط خطی و غیر خطی مختلفی ارائه شده است که در این پایان نامه به برخی از این روابط اشاره شد و مدل سازی بر اساس آن ها در نرم افزار انجام شده است. در برخی از این روابط درجه اشباع به صورت مستقیم در برخی دیگر به صورت غیر مستقیم وارد شده است.

موضوع مهم برای بررسی پایداری شیروانی های خاکی غیر اشباع اینست که بدست آوردن پروفیل مکش درجا آسان نیست اما در بیشتر کارهای مهندسی حدود یک صد کیلو پاسکال در نظر گرفته می شود [۲]. کم ترین ضریب اطمینان برای هر سه مدل مربوط به حالتی است که از جزء مکش بافتی در مقاومت برشی صرف نظر کرده و از پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت اشباع استفاده می شود.

با توجه به خروجی های مدل ۱ می توان به نتایج زیر دست یافت:

- نتایج نشان دهنده تاثیر عمده پارامترهای غیر اشباع در بهبود وضعیت پایداری گودبرداری ها دارد.

- مقدار ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع به مقدار پارامترهای مقاومت برشی به ویژه زاویه اصطکاک داخلی وابسته است.

- شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع وابسته است و تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به تغییرات مکش بافتی، تاثیر ناچیزی در شکل این منحنی می گذارد.
 - مقدار ضریب اطمینان بسته به مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع ممکن است در کوتاه مدت یا میان مدت به کم ترین مقدار خود برسد.
 - شکل منحنی ضریب اطمینان - زمان، علاوه بر مقدار ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، به عمق اولیه سطح آب زیر زمینی نیز وابسته است.
با توجه به خروجی مدل های ۲ و ۳ می توان گفت:
 - نتایج این دو مدل نشان دهنده تاثیر عمده پارامترهای غیر اشباع در افزایش مقدار ضریب اطمینان می باشد و در نظر گرفتن آن ها حتی ممکن است موجب تغییر وضعیت از حالت ناپایدار به حالت پایدار، بشود.
- در غالب پروژه های اجرایی، ضرورت تعیین ضریب اطمینان گسیختگی در حالت بحرانی بسیار ضروری می باشد اما اعمال ضریب اطمینان دور از واقعیت، هزینه اقتصادی سنگینی را برای پایداری شیروانی ها و گودبرداری ها به همراه خواهد داشت. در حالت واقعی، پروفیل خاک همواره در اثر تغییر رطوبت ناشی از شرایط آب و هوایی دچار تغییر در درصد اشباع خاک می گردد ولی در بدترین شرایط نیز می توان جایی برای اعمال پارامترهای مقاومتی خاک غیر اشباع در نظر گرفت.

۶-۲- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- ۱- تعیین ضریب اطمینان در گودبرداری ها بر مبنای توسعه مدل های رفتاری مربوط به خاک های غیر اشباع.
- ۲- بررسی تاثیر بارش باران بر روی پروفیل مکش بافتی و بررسی پایداری شیروانی های خاکی در طی زمان بارش و پس از آن.

منابع

[1] Tsiamposi, A., Zdravkovic, L and Potts, D. M. (2012). "Variation with time of the factor of safety of slopes excavated in unsaturated soils". *Computers and Geotechnics*, vol. 48, 167–178.

[2] Zhang, L. L., Fredlund, D. G., Fredlund, M. D., and Wilson, G. W. (2014). "Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis". *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 51, 1384-1398.

[3] Rahardjo, H., Satyanga, A., and Mercer, K. (2014). "Application of unsaturated soil mechanics to open pit slope stability". *Australian center for geomachanics*, vol. 42, 1-7.

[4] Hamdhan, I. N., and Schweiger, H. F. (2011). "Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil with Fully Coupled Flow-Deformation Analysis". *Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice, Proceedings of the IAMG 2011 conference*, Salzburg, Austria, 1-18.

[۵] افروشته ا، سلطانی ف و سید النگی ح. (۱۳۹۲). «مقایسه ضریب اطمینان پایداری یک شیروانی خاکی در حالت اشباع و غیر اشباع با استفاده از یک نمونه مطالعاتی». موسسه آموزش عالی خاوران مشهد.

[۶] تاج آبادی پور م، سلطانی ف. (۱۳۹۲). «آنالیز پایداری شیروانی های خاکی غیر اشباع». اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی.

[۷] منصور زاده م، وفائیان م و میر محمد صادقی م. (۱۳۸۶). «کاربرد نظریه خاک غیراشباع در بررسی پایداری خاکریزها». *پژوهشنامه حمل و نقل*، سال پنجم، شماره دوم.

[8] Vanapalli, S.K., and Fredlund, D.G. (2000). "Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength". *Proceedings of the GeoDenver 2000 Conference*, ASCE, Denver, 3–8.

[9] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. (1996). "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction". *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392.

[۱۰] سجودی ح، اکرامی نسب ن، زمانی ابیانه م، محمود نیا م. (۱۳۹۲). «تاثیر مکش بافتی بر روی رفتار مکانیکی خاکهای غیر اشباع». هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان.

[11] Fredlund, D.G., Rahardjo, H., and Fredlund, M.D. (2012). "*Unsaturated soil mechanics in engineering practice*". John Wiley & Sons.

[۱۲] سجودی ح، اکرامی نسب ن، زمانی ابیانه م، محمود نیا م. (۱۳۹۲). «تئوری خاک های غیر اشباع و بررسی جریان آب در این نوع خاک ها». هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان.

[13] NING LU.(2004). “*Unsaturated soil mechanics*”. John Wiley & Sons, pp. 42.

[14] White, N.F., Duke, H.R. Sunada, D.K., and Corey, A.T. (1970). “Physics of desaturation in porous materials”. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol 96, 165–191

[15] Nishimura, T., and Fredlund, D. G. (2001). “Failure envelope of a desiccated, unsaturated silty soil”. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Istanbul, 615–618.

[16] Donald, I. B. (1956). “Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures”. *In Proceedings of the Second Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Christchurch, New Zealand. 200–205.

[17] Gan, J. K. M., and Fredlund, D. G. (1996). “Shear strength characteristics of two saprolitic soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, 595–609.

[18] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978). “The shear strength of unsaturated soils”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, 313–321.

[19] Nishimura, T., and Fredlund, D. G. (2002). “Hysteresis effects resulting from drying and wetting under relatively dry conditions”. *Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002*, Recife, Brazil, 301–305.

[20] Khalili, N., Russell, A.R., and Khoshghalb, A. (2014). “*Unsaturated Soils: Research & Applications*”. CRC Press.

[21] Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). “*Soil mechanics for unsaturated soils*”. Wiley, New York.

[22] Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., and Barbour, S.L. (1996). “The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil water characteristic curve”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, 440-448.

[23] Garven, E.A., and Vanapalli, S.K. (2006). “Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils”. *In Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*.

Edited by G.A. Miller, C.E. Zapata, S.L. Houston, and D.G. Fredlund. American Society of Civil Engineers, Vol. 2, 2570–2581.

[24] Khalili, N., and Khabbaz, M. H. (1998). “A unique relationship for X for the determination of the shear strength of unsaturated soils”. *Geotechnique*, Vol. 48, 681–687.

[25] GEO-SLOPE International Ltd. (2012). “*Seepage Modeling with SEEP/W 2012*”. Canada.

[26] GEO-SLOPE International Ltd. (2012). “*Stability Modeling with SLOPE/W 2012*”. Canada.

[۲۷] مهدوی، قربان بیگی، ساداتی ح. (۱۳۸۹). «بررسی روش های تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی در نرم افزار Slope/w». سومین همایش ملی مقاوم سازی و مدیریت شهری.

[28] Krahn, J. (2003). “The Limits of Limit Equilibrium Analysis”. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, 643-660.

[29] GEO-SLOPE International Ltd. (2012). “*Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2012*”. Canada.

[30] PLAXIS 3D Foundation Material Models Manual version 1.5.

[31] Yu Ou, C. (2006). “*Deep Excavation Theory and Practice*”. Taylor & Francis Group, London, UK.

[32] DAS, B. M., Emeritus, D., and Sobhan. K. (2014). “*Principles of Geotechnical Engineering*”. Cengage Learning, Usa, pp. 430.

[33] Wang, C. (2014). “Soil Suction Characterization and New Model for Predicting Suction in Residual Soils”. PhD thesis, North Carolina State University.

ABSTRACT

The soil shear strength parameters have important role in the stability analysis of soil excavations and slopes.

Saturated shear strength parameters are generally used in the analysis. The portion of the soil profile above the groundwater table where the pore water pressure are negative is usually ignored.

The main objective of this study is to investigating the effect of negative pore water pressure on calculating the factor of safety in unsaturated zones. A computer software program, Geo Studio 2012, was used in order to determining the factor of safety using the extended Mohr-Coulomb failure criteria. Both linear and nonlinear forms of the unsaturated shear strength equation will be used in the study of the effect of unsaturated shear strength on the computed factor of safety.

Variation with time of the factor of safety was determined and the effect of variation of permeability with matric suction and the initial depth of the groundwater table in the shape of the Fs-time curve is examined in a parametric study and the effect of shear strength parameters, in calculating the factor of safety, was evaluated and also was demonstrated; considering the low percentage of hydrostatic distribution matric suction would be significantly increase the factor of safety, illustrating the benefit of considering matric suction in the stability analysis.

According to the modeling results, unsaturated parameters have significant effect to increasing the factor of safety. The value of factor of safety in unsaturated state depends on shear strength parameters, spetial angle of internal friction. The shape of the Fs-time curve depends largely on the saturated value of soil permeability and the initial depth of the groundwater table. The variation of permeability with matric suction did not significantly affect the analysis results, and the factor of safety depending on the saturated value of soil permeability.

Keywords: Stability analysis, Excavation, Unsaturated, Factor of safety, Matric suction.



Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis in Geotechnical Engineering

**Assessment of degree of saturation on stability of excavation in silty
soils**

By: Mohammad Ketabi

Supervisor:

Dr. Seyed Mahdi Hosseini

June 2016