

پایداری استاتیکی سدهای خاکی

ضریب اطمینان در تحلیل پایداری سدهای خاکی، کمیتی است که حاشیه ایمنی سازه را در مقابل وقوع گسیختگی برشی نشان می دهد. با این تعریف، مقاومت برشی بسیج شده^۲ با رابطه زیر بیان می شود:

$$\tau_m = \frac{c'}{F} + \frac{(\sigma - u) \tan \phi'}{F} \quad (1-12)$$

که در آن:

τ_m = مقاومت برشی بسیج شده

c' = چسبندگی مؤثر مصالح

ϕ' = زاویه اصطکاک درونی مؤثر مصالح

σ = تنش عمود بر سطح گسیختگی

u = فشار آب منفذی در سطح مورد بررسی

F = ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی

در تحلیل پایداری با روش متعارف تعادل حدی، فرض بر این است که ضریب اطمینان یکسانی به چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی خاک اعمال شده و مقاومت برشی به طور یکنواخت در امتداد سطح لغزش پتانسیل بسیج می شود.

جدول ۱۲-۱- حداقل ضریب اطمینان قابل قبول در تحلیل پایداری سدهای خاکی [۲۰]

حداقل ضریب اطمینان قابل قبول				شرایط تحلیل پایداری
شیب پایین دست		شیب بالا دست		
با زلزله	بدون زلزله	با زلزله	بدون زلزله	
۱/۰	۱/۲۵	۱/۰	۱/۲۵	انتهای مرحله ساخت
-	-	۱/۲۵	۱/۵	نشت دائم، مخزن نیمه پر
۱/۲۵	۱/۵	-	-	نشت دائم، مخزن پر
-	-	۱/۰	۱/۲۵	افت ناگهانی سطح آب

همان طور که جدول ۱۲-۱ نشان می دهد، ضریب اطمینان قابل قبول در تحلیل پایداری سدهای خاکی بین ۱/۰ الی ۱/۵ است که در مقایسه با ضریب اطمینان مورد استفاده در سازه های بتنی یا فولادی کمتر است. علل انتخاب ضریب اطمینان کمتر در سازه های خاکی را می توان به شرح زیر بیان کرد:

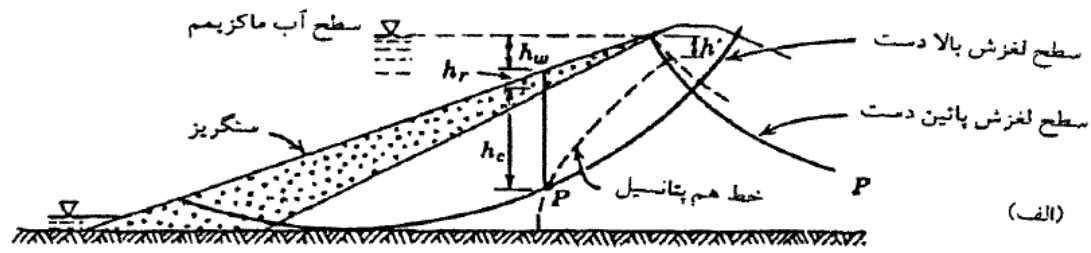
الف- ارقامی که به عنوان پارامترهای مقاومت برشی مصالح خاکی انتخاب می شوند، معمولاً بسیار نزدیک یا معادل مقادیر حداقل اند، در صورتی که ارقام واقعی در هنگام وقوع گسیختگی بمراتب بیشتر از ارقام حداقل خواهند بود.

ب - معمولاً ضریب اطمینان پایداری سازه های خاکی با گذشت زمان افزایش می یابد، زیرا خاک مصالحی است که بر اثر پدیده تحکیم، مقاومت برشی آن با زمان افزایش می یابد، بنابراین ضریب اطمینان پایداری آن نیز با زمان اضافه می شود.

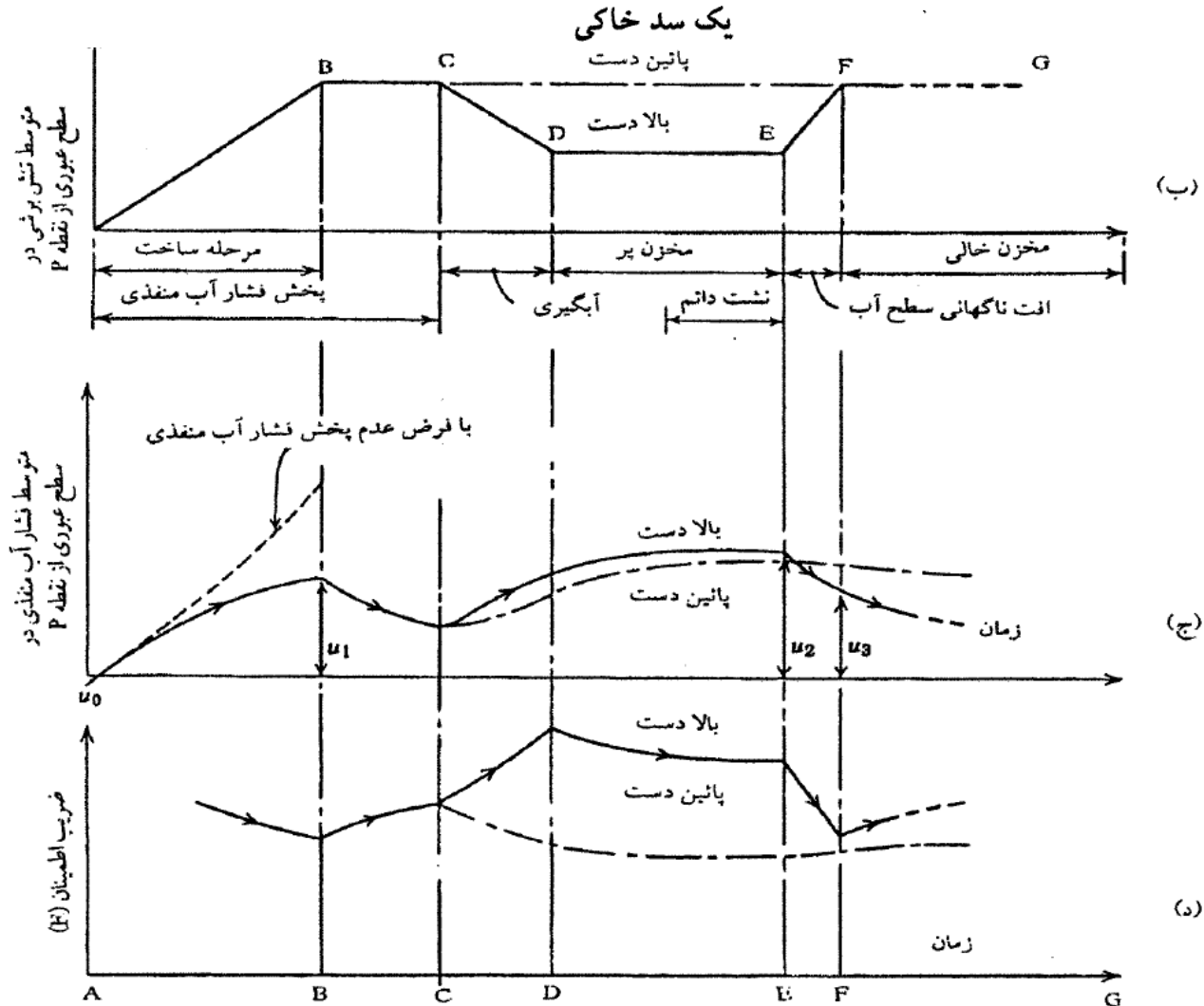
ج - نیروهایی که در محاسبات طراحی به کار گرفته می شوند، عموماً در بالاترین حد می باشند، در حالی که در عمل نیروهای مؤثر کمتر از مقادیر حداکثر انتخاب شده، خواهند بود.

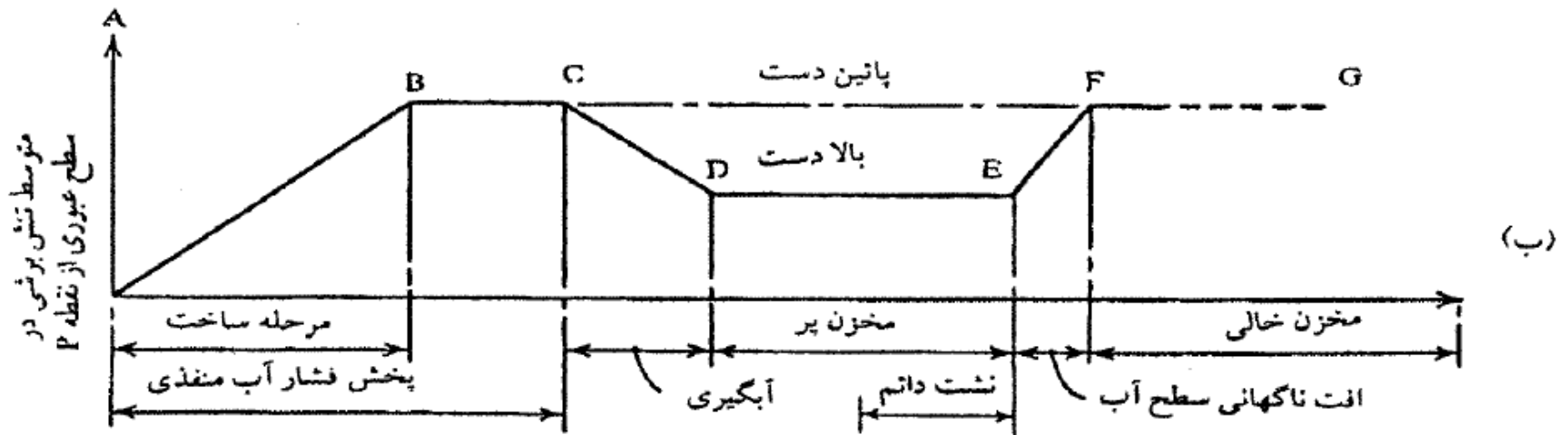
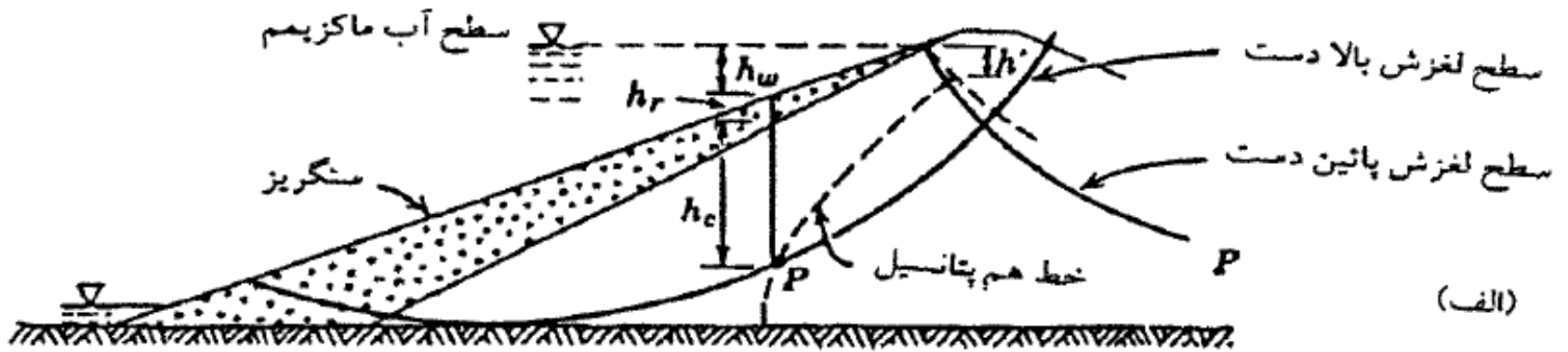
د - در سازه‌های خاکی سنگین مثل سدهای خاکی، برخلاف سازه‌های بتنی و فولادی، قسمت اعظم بارهای وارده را بار مرده که با اطمینان بیشتری قابل پیش‌بینی است، تشکیل می‌دهد، درحالی‌که در سایر سازه‌ها، بار زنده قسمت مهمی از مجموع بارهای وارده به سازه را تشکیل می‌دهد که پیش‌بینی آن با دشواری بیشتری صورت می‌گیرد.

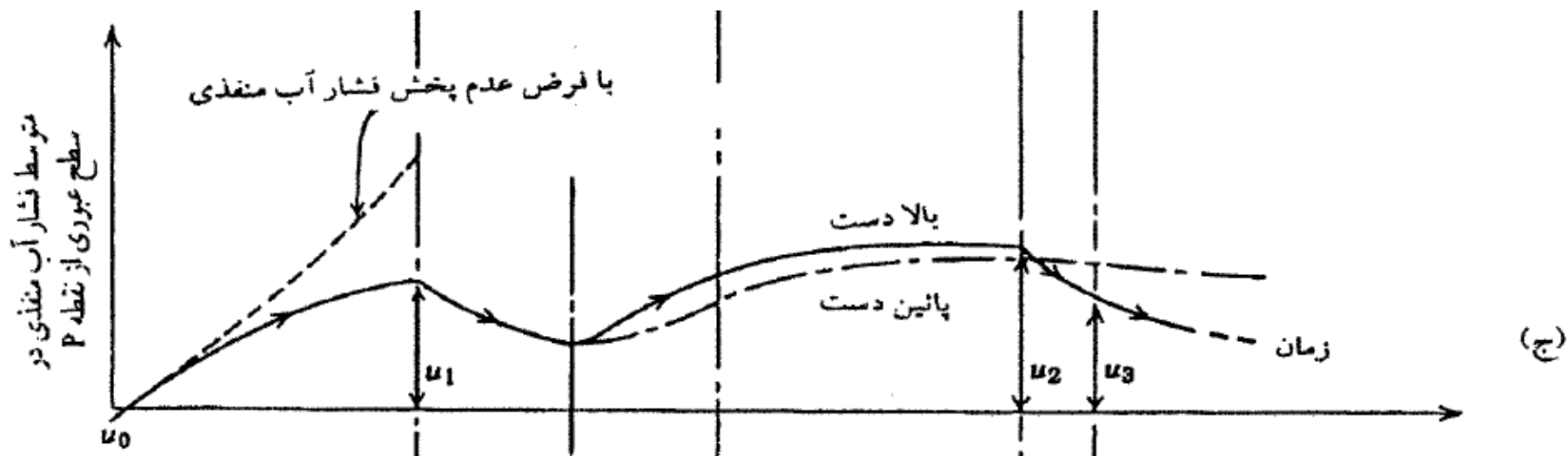
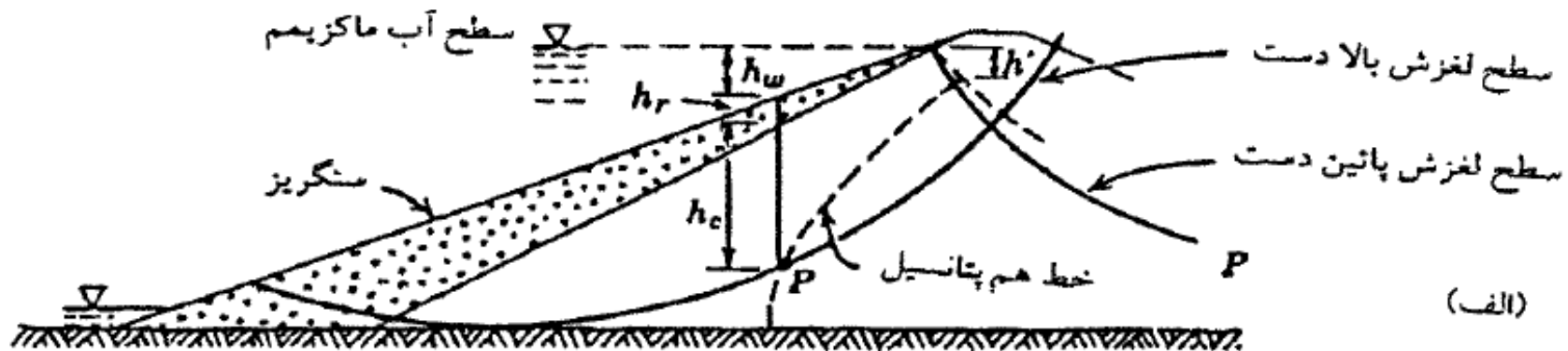
شکل ۱۲-۱، تغییرات محتمل در ضریب اطمینان پایداری شیب یک سد خاکی را در طول دوران مختلف از مرحله ساخت تا بهره‌برداری نشان می‌دهد. قسمت (الف) شکل مقطع عرضی یک سد خاکی غیرهمگن را نشان می‌دهد که در آن یک سطح لغزش فرضی از داخل هسته و پوسته عبور نموده است.

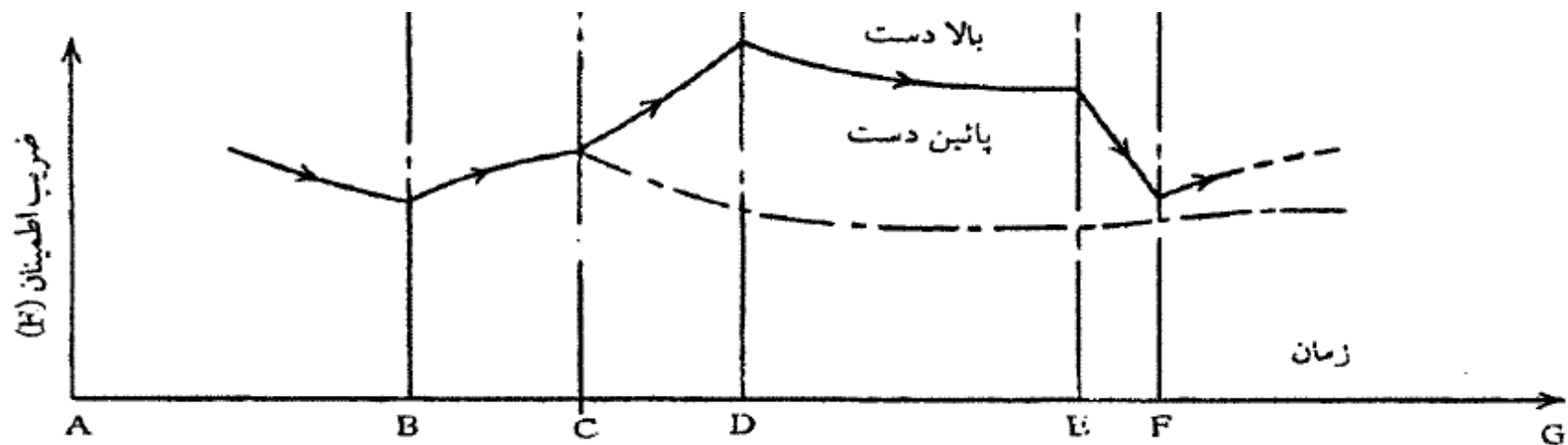
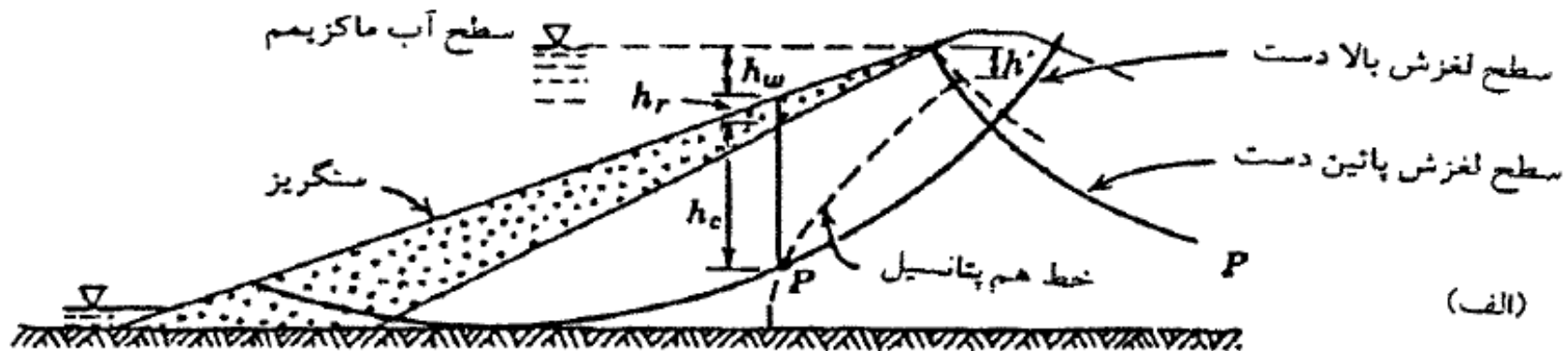


شکل ۱۲-۱- تغییرات تنش برشی، فشار آب منفذی و ضریب اطمینان در هنگام و پس از ساخت









(د)

در روی این سطح گسیختگی فرضی نقطه‌ای مانند P فرض و تغییرات عوامل مختلف شامل متوسط تنش برشی، متوسط فشار آب منفذی و ضریب اطمینان در آن، در مراحل زمانی مختلف ترسیم شده است (قسمت‌های "ب"، "ج" و "د" شکل ۱۲-۱). همان‌طور که در قسمت (ب) مشاهده می‌شود، متوسط تنش برشی در نقطه P در طی مرحله ساخت متناسب با افزایش ارتفاع سد، افزایش می‌یابد و با پایان مرحله ساخت به مقدار ثابتی می‌رسد (مرحله ساخت از زمان A تا B). در مرحله B تا C، یعنی تا قبل از شروع آبیگری، این تنش تقریباً ثابت باقی می‌ماند، در حالی که فشار آب منفذی به دلیل پخش آن کاهش می‌یابد. در مرحله C، آبیگری آغاز و تا مرحله D که سد پر می‌شود، ادامه می‌یابد. در این دوره (مرحله C تا D)، متوسط تنش برشی در شیب بالادست کاهش پیدا می‌کند، در حالی که در شیب پایین دست مقدار آن ثابت است. مرحله D تا E، مرحله پر بودن مخزن سد را نشان می‌دهد که طی آن بتدریج نشت از بدنه آغاز و در مرحله خاصی به نشت پایدار^۱ تبدیل می‌شود. از مرحله E تا F، تخلیه سریع مخزن رخ می‌دهد که طی آن به دلیل حذف آب از روی شیب بالادست، تنش برشی در نقطه P افزایش یافته و به مقدار اولیه می‌رسد. در کلیه مراحل پر و خالی شدن مخزن، این تنش برای شیب پایین دست تغییر چندانی نمی‌کند. در مرحله F تا G که مخزن سد خالی است، تغییری در تنش نقطه P در هیچ‌یک از دو سطح شیب‌دار حاصل نمی‌شود.

قسمت (ج) شکل ۱۲-۱، تغییرات متوسط فشار آب منفذی در نقطه P را برای هریک از دو قسمت بالادست و پایین دست بدنه و در همان مراحل زمانی فوق نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، از مرحله A تا B با فرض عدم پخش فشار آب منفذی، این فشار به صورت خطی و متناسب با افزایش ارتفاع سد در مرحله ساخت افزایش می یابد (قسمت خط چین) و در صورت پخش فشار آب منفذی، روند تغییرات افزایشی ولی با شدت کمتر مطابق خط پر خواهد بود. از مرحله B تا C که مرحله وقفه پس از ساخت سد است، به علت ایجاد امکان برای پخش فشار منفذی، مقدار آن رو به کاهش گذاشته و در مرحله C تا D به علت آبیگری سد، این کمیت برای هر دو قسمت بدنه سد مجدداً افزایش می یابد. البته باید توجه داشت که در این مرحله و مرحله بعد، میزان افزایش فشار آب منفذی برای شیب بالادست بیشتر از شیب پایین دست است. در طی مرحله بهره برداری (مرحله D تا E) که مخزن پر است، فشار آب منفذی تا حدودی افزایش یافته و بتدریج به مقدار ثابتی می رسد و در مرحله E تا F (مرحله افت ناگهانی سطح آب)، این فشار در شیب بالادست بسرعت کاهش پیدا می کند، در حالی که در شیب پایین دست مقدار آن تغییر چندانی نمی یابد.

در قسمت (د) شکل ۱۲-۱، تغییرات ضریب اطمینان در مراحل مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از مرحله A تا B به علت افزایش ارتفاع سد و فشار آب منفذی، ضریب اطمینان کاهش یافته و در انتهای مرحله ساخت به حداقل می‌رسد. در مرحله B تا C، یعنی مرحله پایان ساخت و تا قبل از شروع آبیگری، به علت توزیع فشار آب منفذی و کاهش مقدار آن، ضریب اطمینان بتدریج افزایش می‌یابد. از مرحله C تا D، که مرحله آبیگری است، با توجه به اعمال نیروی نشست^۱ مثبت بر روی شیب بالادست، ضریب اطمینان افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود می‌رسد، در حالی که در همین مرحله در شیب پایین دست به علت جهت منفی نیروی نشست (جهت مثبت و منفی نیروی نشست از دیدگاه افزایش یا کاهش پایداری مطرح می‌گردد)، ضریب اطمینان کاهش پیدا می‌کند. در مرحله D تا E، که مرحله بهره‌برداری از سد بوده و مخزن آن پر است، در هر دو شیب بالادست و پایین دست به دلیل افزایش فشار آب منفذی، مقداری کاهش در ضریب اطمینان مشاهده می‌شود. در مرحله E تا F، یعنی در مرحله افت ناگهانی سطح آب مخزن، با حذف نیروی نشست مثبت از روی شیب

بالادست، ضریب اطمینان آن بشدت کاهش می یابد، در صورتی که در شیب پایین دست به سبب ادامه نشت و عدم تغییر فشار آب منفذی، تغییر چندانی در ضریب اطمینان مشاهده نمی شود. از مرحله F تا G ، که در آن مخزن سد خالی است، به علت کاهش تدریجی فشار آب منفذی، ضریب اطمینان در شیب بالادست با شدت بیشتر و در شیب پایین دست با شدت کمتری افزایش می یابد. بدین ترتیب همان طور که مشاهده می شود، در مراحل مختلف ساخت و بهره برداری از سد، ضریب اطمینان ارقام مختلفی به خود گرفته و منحنی تغییرات آن دارای نقاط ماکزیمم و مینیمم است. بنابر همین تغییرات است که در تحلیل پایداری شیب های بالادست و پایین دست سدهای خاکی، لازم است پایداری در مراحل بحرانی که در آن ضریب اطمینان به حداقل می رسد، کنترل شود.

۱۲-۳- مراحل بحرانی پایداری سدهای خاکی

الف) شیب بالادست

- مرحلهٔ انتهای ساخت (مرحلهٔ B)
- مرحلهٔ افت ناگهانی سطح آب (مرحلهٔ F)

ب) شیب پایین دست

- مرحلهٔ انتهای ساخت (مرحلهٔ B)
- مرحلهٔ نشست دائم (مرحلهٔ E)

۱۲-۴- روش‌های تحلیل پایداری شیب

1- Limit Equilibrium Methods

2- Stress - Strain Method

الف) روش‌های تعادل حدی^۱

ب) روش تنش - تغییر شکل^۲

به طور کلی روش های تعادل حدی، بر اساس مبانی زیر تحلیل می شوند [۷]:

- I- فرض یک سطح لغزش محتمل در شیب بالادست یا پایین دست سد
- II- در دست بودن پارامترهای مقاومت برشی خاک متشکله بدنه سد و پی آن
(ترجیحاً بر اساس تنش مؤثر)
- III- در دست بودن مقدار فشار منفذی و توزیع آن در بدنه سد در صورت استفاده از تنش مؤثر
- IV- پذیرش فرضیاتی در مورد چگونگی توزیع و مقدار تنش های داخلی در امتداد و بالای سطح لغزش
- V- کاربرد علم استاتیک برای تحلیل تعادل توده خاک در امتداد سطح لغزش فرض شده

تاکنون روش‌های متعددی بر اساس مبانی فوق به منظور ارزیابی پایداری شیب‌های خاکی ارائه شده که تقریباً همه آنها بر مبنای روش قطعات^۱ استوارند. روش‌های تعادل حدی پایداری شیب ارائه شده تاکنون به ترتیب قدمت شامل روش‌های فلنیوس^۲ (۱۹۳۹)، تیلور^۳ (۱۹۴۸)، بیشاپ^۴ (۱۹۵۵)، مورگان اشترن و پرایس^۵ (۱۹۶۵)، اسپنسر^۶ (۱۹۶۷)، یانبو^۷ (۱۹۷۳) و شارما^۸ (۱۹۸۹) بوده است [۷، ۱۶ و ۲۳].

تفاوت اصلی این روش‌ها در موارد زیر است:

- الف) فرضیات به عمل آمده در مورد شکل صفحه لغزش (مدور، لگاریتمی، غیر قوسی و ...)
- ب) کاربرد علم استاتیک در ارزیابی تعادل و پایداری (استفاده از مجموع نیروها، مجموع لنگرها و ...)

شش روش

اصلی که در حال حاضر بیشترین کاربرد را در تهیه نرم افزارهای محاسباتی کنترل پایداری شیب دارا می باشند، به شرح زیرند [۲۳]:

- روش معمولی (روش فلنیوس، یا روش دایره سوئدی)

- روش ساده شده بیشاپ

- روش اسپنسر

- روش ساده شده یانبو

- روش پیچیده یانبو

- روش مورگان اشترن - پرایس

معیار اصلی در تعیین مقاومت برشی توده خاک در سطح گسیختگی (سطح لغزش)، کاربرد صحیح و دقیق تنش‌های اعمال شده است. بدین علت، اغلب محققان اعتقاد دارند که مقاومت برشی واقعی توده خاک وابسته به تنش‌های مؤثر است، از این رو ارزیابی دقیق و قابل اعتماد مقاومت برشی در سطح لغزش صرفاً با داشتن توزیع فشار منفذی در سطح لغزش و محاسبه تنش‌های مؤثر و در نتیجه مقاومت بسیج شده ناشی از این نوع تنش در سطح مذکور امکان پذیر است. بدیهی است که قابلیت اعتماد روش تنش مؤثر به دقت در تعیین یا پیش‌بینی فشار منفذی در بدنه سد در شرایط واقعی بستگی دارد.

در روش "تنش کل"، پارامترهای مقاومت برشی در مقابل تنش کل از طریق روش‌های آزمایشگاهی با فرض شبیه‌سازی شرایط صحرائی به دست می‌آیند. در این شرایط، انتظار می‌رود که اثر فشارهای منفذی در پارامترهای برشی انعکاس یابد. در این روش برای محاسبه پایداری و تعیین پارامترهای مقاومت برشی، از تنش‌های کل به دست آمده با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مناسب استفاده می‌شود. استفاده از روش تنش کل عدم اطمینان موجود در برآورد فشار منفذی را کاهش داده یا بکلی از بین می‌برد. مع ذلک باید توجه داشت که پارامترهای مقاومت برشی در روش تنش کل بشدت به روش آزمایش بستگی دارند.

برای شرایط نشت دائم، شبکه جریان ترسیم شده می تواند به خوبی و با قابلیت اعتماد مطلوب توزیع فشار منفذی در مقطع سد را نمایش دهد. از این رو در چنین شرایطی، استفاده از روش تنش مؤثر تقریباً مورد قبول اغلب مهندسان و محققان است.

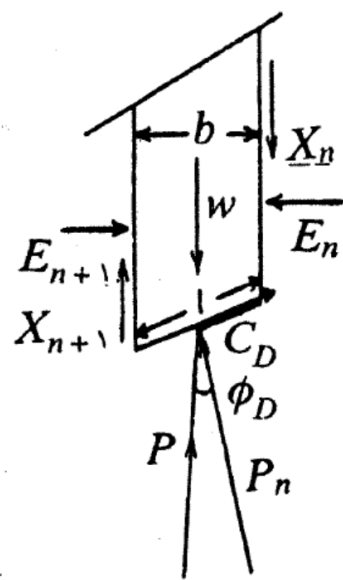
در شرایط افت ناگهانی سطح آب، اگرچه در بیشتر موارد اندازه گیری صحرائی فشار منفذی برای انجام محاسبات کفایت می کند، لیکن تراکم پذیری خاک و شدت زهکش شدن آن به عنوان عوامل مهم و جدید بر ارقام حاصله مؤثرند. در حالی که اغلب طراحان سد برای این حالت نیز استفاده از روش تنش مؤثر را ترجیح می دهند، برخی دیگر استفاده از روش تنش کل را ارجح می شمارند.

برای شرایط انتهای مرحله ساخت، روش هیلف - بیشاپ (فصل یازدهم)، مبانی نظری لازم برای برآورد فشار منفذی را به دست داده و دقت آن با اندازه گیری های صحرائی به اثبات رسیده است. باید توجه داشت که در این حالت، فشار منفذی بشدت به رطوبت خاکریزی و تراکم پذیری خاک حساس است و دقت محاسبات به میزان نزدیکی شرایط نمونه های مورد آزمایش در آزمایشگاه به شرایط و خصوصیات خاکریز در صحرا بستگی دارد. با توجه به عدم اطمینان مذکور، روش متداول آن است که پایداری به کمک روش تنش کل نیز کنترل شود. بدین منظور، نمونه های آزمایشگاهی متراکم شده با شرایط صحرائی، تحت شرایط زهکشی نشده مورد آزمایش قرار گرفته و پارامترهای تنش کل تعیین می گردند. به طور کلی سازمان عمران آمریکا (USBR) در چنین شرایطی استفاده از روش تنش مؤثر را ترجیح می دهد، در حالی که سازمان مهندسی ارتش آمریکا استفاده از روش تنش کل را ارجح می داند.

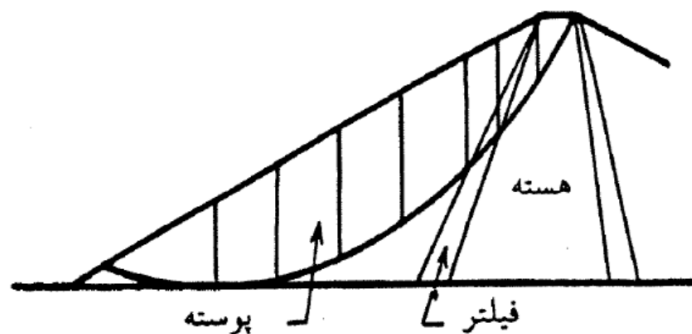
در خاک‌های ریزدانه، سطح لغزش تقریباً همواره به صورت دایره‌ای فرض می‌شود. این فرض با توجه به مشاهدات متعددی که در خصوص شکل سطح لغزش واقعی در خاک‌های همگن ریزدانه در کشور سوئد صورت گرفته، اتخاذ شده است. اگرچه در این زمینه استفاده از سطوح لغزش قوسی غیرمدور (مانند قوس لگاریتمی) نیز توسط برخی از طراحان مورد توجه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته، اما در نهایت علی‌رغم پیچیده‌تر شدن محاسبات پایداری، مزایای چندانی از آن حاصل نشده است. در خاک‌های درشت‌تر متشکل از قلوه‌سنگ، لاشه‌سنگ و قطعات سنگی خیلی بزرگ، سطح لغزش کم و بیش مسطح است. از این رو در مقاطعی از خاکریز که متشکل از این‌گونه مصالح است، سطح لغزش پتانسیل با دو یا سه خط مستقیم مشخص می‌شود. در این حالت، روش کنترل پایداری، "روش قطعه‌ای ۱" یا "روش لغزش بلوکی ۲" نامیده می‌شود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این روش که اولین بار توسط فلنیوس در سال ۱۹۲۶ در کشور سوئد مطرح شد، سطح لغزش به صورت یک قوس دایره فرض شده و توده خاک در بالای سطح لغزش با رسم یک سری خطوط قائم موازی به قطعاتی تقسیم و سپس نیروهای محرک و مقاوم به لغزش برای هر قطعه محاسبه می‌شود و در نهایت تعادل نیروها یا لنگرها حول نقطه دوران (مرکز دایره لغزش) بررسی و بر اساس آن ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. این روش که به روش دایره سوئدی یا روش فلنیوس مشهور است، بعدها توسط سایر طراحان مورد اصلاح قرار گرفته و به نام‌های دیگری (نام‌های مشروح در بند ۱۲-۵) عرضه شده است.

در شکل ۱۲-۲ الف، یک سطح لغزش دایروی که به تعدادی قطعات قائم تقسیم شده، نمایش داده شده است. در محاسبات دستی تعداد این قطعات معمولاً متناسب با ابعاد مقطع عرضی سد بین ۶ تا ۱۲ و به طور متوسط ۸ یا ۹ است. عرض قطعات نیز در شرایط متعارف معمولاً مساوی انتخاب می شود، اما این موضوع الزامی نیست و در مواردی که دایره لغزش از مصالح با خصوصیات مختلف عبور می کند، تقسیم قطعات به گونه ای صورت می گیرد که هر قطعه حتی الامکان متشکل از یک نوع مصالح باشد و در این صورت عرض قطعات متغیر خواهد بود.



(ب)



(الف)

اجزای نمایش داده شده در شکل ۱۲-۲ به شرح زیرند:

E_n, E_{n+1} = نیروی افقی در دو سطح قائم قطعه (سطوح n و $n+1$)

X_n, X_{n+1} = نیروهای برشی (قائم) در سطوح n و $n+1$

W = کل وزن قطعه

p_n = کل نیروی عمود بر سطح قاعده قطعه (شامل فشار منفذی u)

S = نیروی برشی در سطح قاعده قطعه

p = عکس العمل کل نیروهای قائم در سطح قاعده قطعه

b = عرض قطعه

h = ارتفاع قطعه

l = طول وتر قوس در قاعده قطعه

ϕ = زاویه اصطکاک درونی مصالح

تنش عمودی مؤثر بر قاعده هر قطعه برابر است با :

$$\bar{\sigma} = \sigma - u = \frac{P_n}{l} - u \quad (2-12)$$

که در آن، u فشار منفذی در قاعده قطعه است. چنانچه ضریب اطمینان در شرایط تعادل برابر F فرض شود، تنش برشی مجاز برابر خواهد بود با :

$$\tau = \frac{1}{F} (c' + \bar{\sigma} \tan \phi') \quad (3-12)$$

چنانچه فاصله افقی مرکز ثقل قطعه نسبت به مرکز دوران (مرکز دایره لغزش) برابر x و شعاع دایره لغزش برابر R باشد، برای برقراری تعادل باید مجموع لنگر نیروهای محرک (ناشی از وزن) حول مرکز دوران با مجموع لنگر نیروهای مقاوم، ناشی از مقاومت برشی در قاعده قطعات، مساوی باشند. در این صورت :

$$\sum W.x = \sum \tau.l.R \quad (4-12)$$

چنانچه مقدار τ از رابطه ۳-۱۲ در رابطه ۴-۱۲ جایگزین شود:

$$\sum W.x = \frac{1}{F} \sum (c' + \bar{\sigma} \tan \phi').l.R \quad (5-12)$$

با جایگزینی مقدار $\bar{\sigma}$ از رابطه ۲-۱۲ در رابطه ۵-۱۲، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$F = \frac{R}{\sum W.x} \cdot \sum [c'.l + (p_n - u.l) \tan \phi'] \quad (6-12)$$

اکنون برای برآورد F لازم است مقدار نیروی عمود بر قاعده (p_n) تعیین شود. در روش فلیوس، کلیه نیروها در جهت عمودی یا شعاعی تجزیه می‌شوند که در این صورت چنانچه زاویه بین شعاع دوران قطعه و جهت قائم برابر α فرض شود، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p_n = (W + X_n - X_{n+1}) \cos \alpha - (E_n - E_{n+1}) \sin \alpha \quad (7-12)$$

چنانچه مقدار p_n از رابطه اخیر در معادله ۶-۱۲ قرار داده شود:

$$F = \frac{R}{\sum W.x} \sum \{c'.l + \tan \phi' (W \cos \alpha - u.l) + \tan \phi' [(X_n - X_{n+1}) \cos \alpha - (E_n - E_{n+1}) \sin \alpha]\} \quad (8-12)$$

همان طور که اشاره شد، در روش فلیئوس، مجموع نیروهای خارجی وارد بر قطعات معادل صفر در نظر گرفته می شوند، در این صورت:

$$\sum (X_n - X_{n+1}) = 0$$

$$\sum (E_n - E_{n+1}) = 0$$

بنابراین رابطه ۸-۱۲ با قرار دادن $x = R \sin \alpha$ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum [c' \cdot l + (W \cos \alpha - u \cdot l) \tan \phi'] \quad (9-12)$$

عبارت $W \sin \alpha$ مؤلفه مماسی وزن قطعه است که می توان آن را با T نشان داد.

به طور مشابه، می توان مؤلفه عمودی وزن $(W \cos \alpha)$ را نیز با N نمایش داد. همچنین مقدار کل نیروی حاصل از فشار منفذی در قاعده قطعه برابر است با $U = u \cdot l$. با استفاده از این علائم، رابطه ۹-۱۲ به صورت زیر درمی آید:

$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (N - U) \tan \phi']}{\sum T} \quad (10-12)$$

رابطه فوق ساده ترین راه حل کنترل پایداری شیب به روش قطعه ای است، اما باید توجه داشت که این رابطه بویژه در شرایطی که مقدار فشار منفذی U بزرگ و دایره لغزش نیز عمیق با زاویه مرکزی بزرگ باشد، با خطای زیادی همراه است.

در روش ساده شده بیشاپ، برخلاف روش فلنیوس، که در آن نیروها در جهت عمود بر سطح لغزش تجزیه می شوند، برای تعیین p_n نیروها در جهت قائم تجزیه می گردند و تعادل نیروها در این جهت مورد بررسی قرار می گیرد، که در این صورت نیروهای افقی در دو طرف قطعه (E_n و E_{n+1}) حذف می شوند. بدین ترتیب رابطه تعادل به صورت زیر درخواهد آمد:

$$W + X_n - X_{n+1} = p_n \cos \alpha + \frac{c'}{\sin \alpha} + \frac{(p_n - u \cdot l) \tan \phi' \cdot \sin \alpha}{F} \quad (11-12)$$

یا:

$$p_n \cos \alpha \left\{ 1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F} \right\} = W + X_n - X_{n+1} - \frac{c'}{\sin \alpha} + \frac{u \cdot l \cdot \sin \alpha \cdot \tan \phi'}{F} \quad (12-12)$$

چنانچه مقدار p_n از معادله ۱۲-۱۲ در رابطه ۱۲-۶ قرار داده شده و معادله برای محاسبه ضریب اطمینان F مرتب شود:

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \sum [c' b + \tan \phi' (W - u \cdot b + X_n - X_{n+1})] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}}$$

(۱۲-۱۳)

در روش ساده شده بیشاپ، معمولاً جمله حاوی $(X_n - X_{n+1})$ نادیده گرفته می شود. همچنین بعضی مواقع راحت تر آن است که فشار آب منفی u بر حسب وزن سربار طبق رابطه زیر بیان شود:

$$u = \bar{B} \gamma h = \bar{B} \frac{W}{b}$$

یا:

$$u b = \bar{B} \cdot W$$

با اعمال تغییرات فوق، رابطه ۱۲-۱۳ به صورت زیر درخواهد آمد:

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \sum [c' \cdot b + W(1 - \bar{B}) \tan \phi'] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}} \quad (12-14)$$

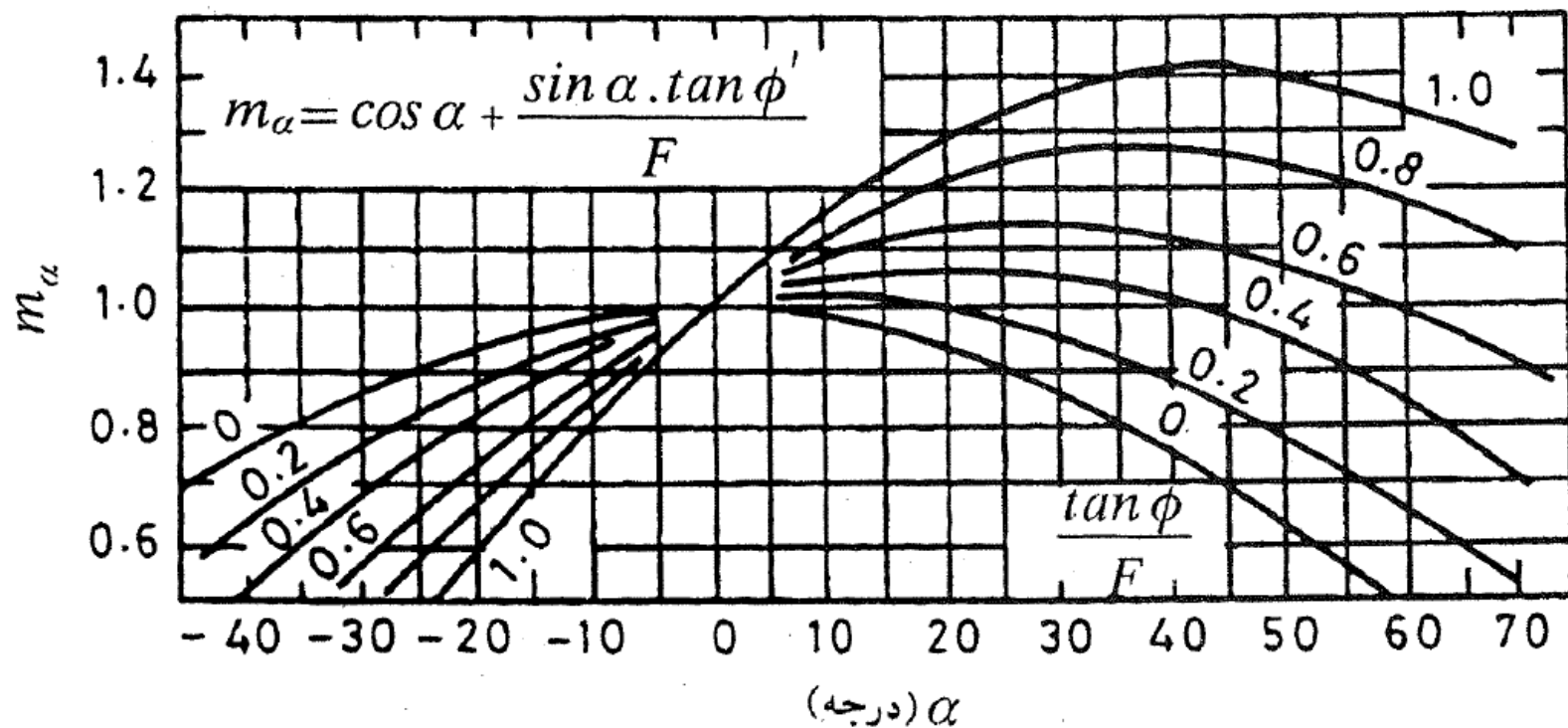
همان طور که مشاهده می شود، پارامتر F ، یعنی ضریب اطمینان، در دو طرف معادله وجود دارد و برای حل آن لازم است ابتدا عدد مفروضی برای F در یک طرف معادله فرض و F را مجدداً محاسبه کرد و چنانچه بین مقدار فرض شده و مقدار محاسبه شده تفاوت زیادی موجود باشد، در مرحله بعد محاسبه با عدد جدید تکرار و روش کار آنقدر ادامه می یابد تا اختلاف بین این دو مقدار به صفر نزدیک شود. برای سهولت محاسبات می توان معادله ۱۲-۱۴ را به صورت زیر ساده کرد:

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \sum \left[\frac{c' \cdot b + \tan \phi' (W - ub)}{m_\alpha} \right] \quad (12-15)$$

که در آن:

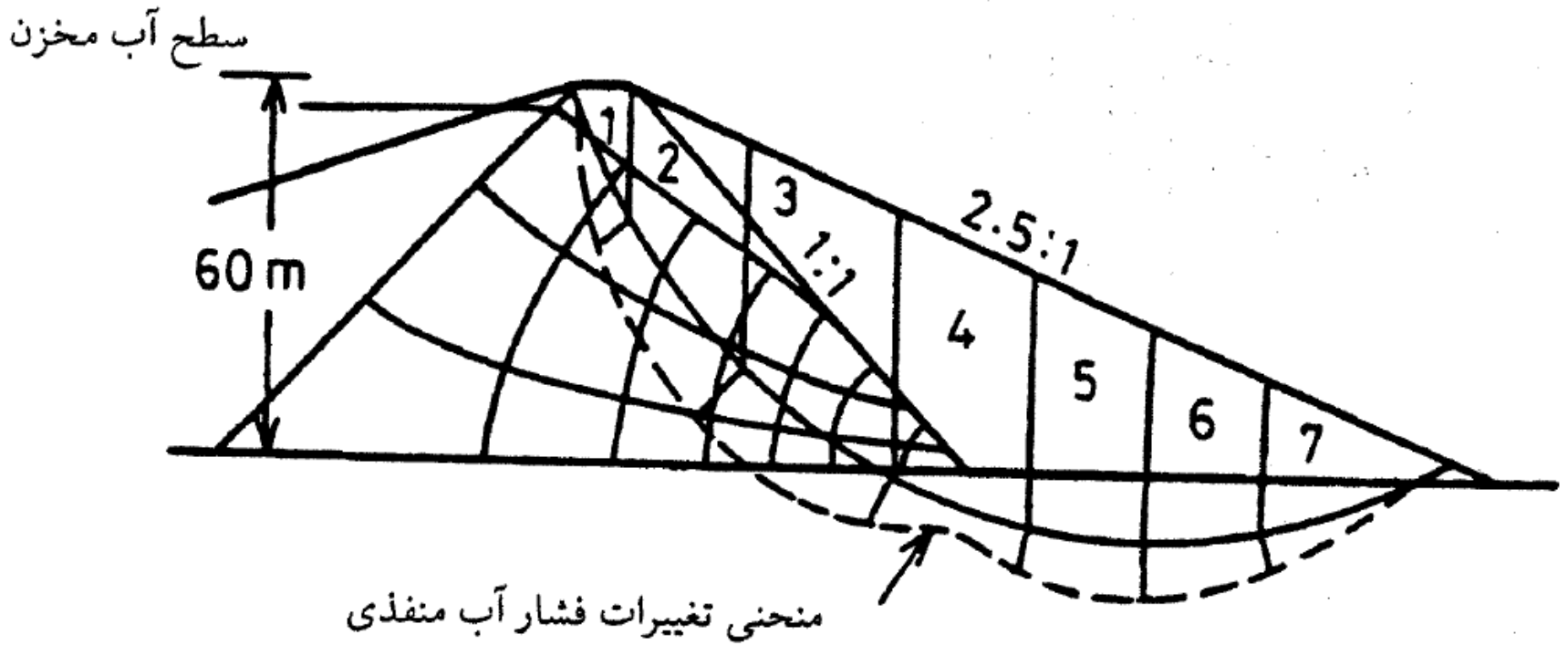
$$m_{\alpha} = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \phi'}{F} \quad (12-16)$$

مقدار m_{α} را می توان بر حسب زاویه α و نسبت $\frac{\tan \phi'}{F}$ از نمودار شکل ۱۲-۳ به دست آورد.



شکل ۱۲-۳- نمودار تعیین مقدار m_{α} برای روش بیشاپ ساده شده

مقطع عرضی یک سد خاکی به ارتفاع ۶۰ متر در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است. شیب پایین دست این سد بر اساس روش لغزش دایروی به ۷ قطعه تقسیم شده و با رسم شبکه جریان در آن، سطح فشار آب منفذی در روی سطح لغزش به صورت خط چین ترسیم گردیده است. مطلوب است محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیب با روش ساده شده بیشاپ.



شکل ۱۲-۴- مثال عددی ۱۲-۱

حل

با فرض ضریب اطمینان $F = 1/68$ و با استفاده از فرمول ۱۲-۱۵، محاسبات برای هریک از قطعات انجام و نتایج حاصله در جدول ۱۲-۲ خلاصه شده است. مشخصات اندازه گیری زاویه α نیز در جدول درج و بر اساس ارقام حاصله پارامتر m_α از رابطه ۱۲-۱۶ برای هریک از قطعات تعیین و سرانجام ضریب اطمینان برای کل توده در حال لغزش با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} \sum \left\{ \frac{c' b + \tan \phi' (W - u \cdot b)}{m_\alpha} \right\}$$

بر اساس جدول مذکور، (تن) $\sum W \cdot \sin \alpha = 2551$ ، بنابراین ضریب اطمینان کلی برابر $F = \frac{4285}{2551} = 1/68$ است.

جدول ۱۲-۲- محاسبات مربوط به مثال عددی پایداری شیب با روش ساده‌شده پیشاپ

(مثال عددی ۱۲-۱)

شماره قطعه	وزن مصالح، تن			وزن کل W (تن)	α (درجه)	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$W \cdot \sin \alpha$	b (متر)	$u \cdot b$ $= u l \cos \alpha$ (تن)	$W - ub$ (تن)	$(W - ub) \times$ $\tan \phi'$ (تن)	$c' \cdot b$ (تن)	m_a $F = 1/\phi_a$	$\frac{c' \cdot b + \tan \phi' (W - ub)}{m_a}$
	پوسته و می		(مرطوب)												
	س	(اشباع)													
۱	۱۸۴	۷۰	-	۲۵۴	۶۱/۵	۰/۸۸	۰/۴۸	۲۲۳	۹	۲۶	۲۲۸	۸۳	۳۶	۰/۶۷۱	۱۷۷
۲	۲۰۰	۵۴۰	۲۲۹	۱۱۶۹	۴۸/۹	۰/۷۵	۰/۶۶	۸۸۱	۲۰	۱۶۰	۱۰۰۹	۳۶۷	۸۰	۰/۸۲۳	۵۴۳
۳	۵۶	۸۶۰	۱۰۲۸	۱۹۴۴	۳۳/۵	۰/۵۵	۰/۸۳	۱۰۷۳	۲۶	۳۱۹	۱۶۲۵	۵۹۲	۱۰۴	۰/۹۴۹	۷۳۳
۴	۱۲۴	۱۵۸۲	۲۰۴	۱۹۱۰	۱۷/۷	۰/۳۰	۰/۹۵	۵۸۱	۲۳	۱۵۲	۱۷۵۸	۱۰۱۴	-	۱/۰۵۳	۹۶۳
۵	-	۱۱۲۵	۴۰۷	۱۵۳۲	۳/۶	۰/۰۶۲	۰/۹۹	۹۶	۲۰	۱۹۸	۱۳۳۴	۷۷۰	-	۱/۰۱۱	۷۶۲
۶	-	۷۹۰	۴۰۷	۱۱۹۷	-۱۲/۳	۰/۰۴۰	۰/۹۹	-۴۸	۲۰	۱۹۸	۹۹۹	۵۷۶	-	۰/۹۷۶	۵۹۰
۷	-	۶۳۲	۲۰۴	۸۳۶	-۱۷/۸	۰/۳۱	۰/۹۵	-۲۵۵	۳۱	۸۱	۷۵۵	۲۳۶	-	۰/۸۴۴	۵۱۷
$\sum W \cdot \sin \alpha = ۲۵۵۱$															$\sum = ۴۲۸۵$

همان طور که قبلاً اشاره شد، در این روش سطح لغزش به صورت چند قطعه خط مستقیم (خط شکسته) فرض شده و تعادل نیروهای وارد بر هر یک از بلوک‌های واقع بر روی سطح لغزش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور سهولت انجام محاسبات، معمولاً تعداد بلوک‌های بالای سطح لغزش دو یا سه فرض می‌شود. روش دوبلوکی یا دو قطعه‌ای برای شرایطی مناسب است که در آن تحلیل پایداری شیب بالادست یک سد سنگریز با هسته شیبدار به سمت بالادست مورد نظر باشد [۱۸]. در این روش با توجه به شکل ۱۲-۵، فرضیات زیر به عمل می‌آید:

- سطح لغزش بحرانی (bc) از پنجه سد می‌گذرد.

- در سطوح $(a-b)$ و $(b-c)$ اصطکاک و چسبندگی به طور مجزا بسیج شده‌اند.

بنابراین در سطح $b-c$ روابط زیر برقرار است:

$$\tan \theta_1 = \frac{\tan \phi'_1}{F} \quad (17-12)$$

$$S_1 = \frac{c'_1 \cdot l_1}{F} \quad (18-12)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\tan \phi'_2}{F} \quad (19-12)$$

$$S_2 = \frac{c'_2 \cdot l_2}{F} \quad (20-12)$$

- مقاومت بسیج شده بین دو قطعه ممکن است به میزان مقاومت برشی بسیج شده در قاعده همان قطعه (بلوک) نرسد. بنابراین زاویه اصطکاک δ بین صفر و ϕ قرار خواهد گرفت.

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \phi'}{F} \right] \quad (21-12)$$

در حالی که چسبندگی بین قطعات نیز بین صفر و $\frac{c'}{F}$ قرار خواهد داشت. بنابراین در یک روش منطقی، می توان میزان بسیج این دو پارامتر را بین دو حد نهایی فرض کرد و در تمام مراحل تحلیل، مقادیر نیروهای ناشی از چسبندگی و اصطکاک را برابر مقدار میانه بین دو حد نهایی در نظر گرفت. چنانچه مقدار δ معادل صفر فرض شود، ضریب اطمینان محاسبه شده به میزان ۲۵ درصد بالاتر و در جهت اطمینان بیشتر خواهد بود.

پارامترهای مورد استفاده در ترسیم چندضلعی نیروها در این روش به شرح زیرند :

$$W_1 \text{ و } W_2 = \text{وزن قطعات ۱ و ۲}$$

$$S_1 \text{ و } S_2 = \text{مقاومت برشی در زیر قطعات ۱ و ۲}$$

$$P_1 \text{ و } P_2 = \text{نیروی عکس العمل در زیر قطعات ۱ و ۲}$$

$$\theta_1 \text{ و } \theta_2 = \text{زاویه نیروهای عکس العمل } P_1 \text{ و } P_2 \text{ نسبت به خط عمود بر سطح}$$

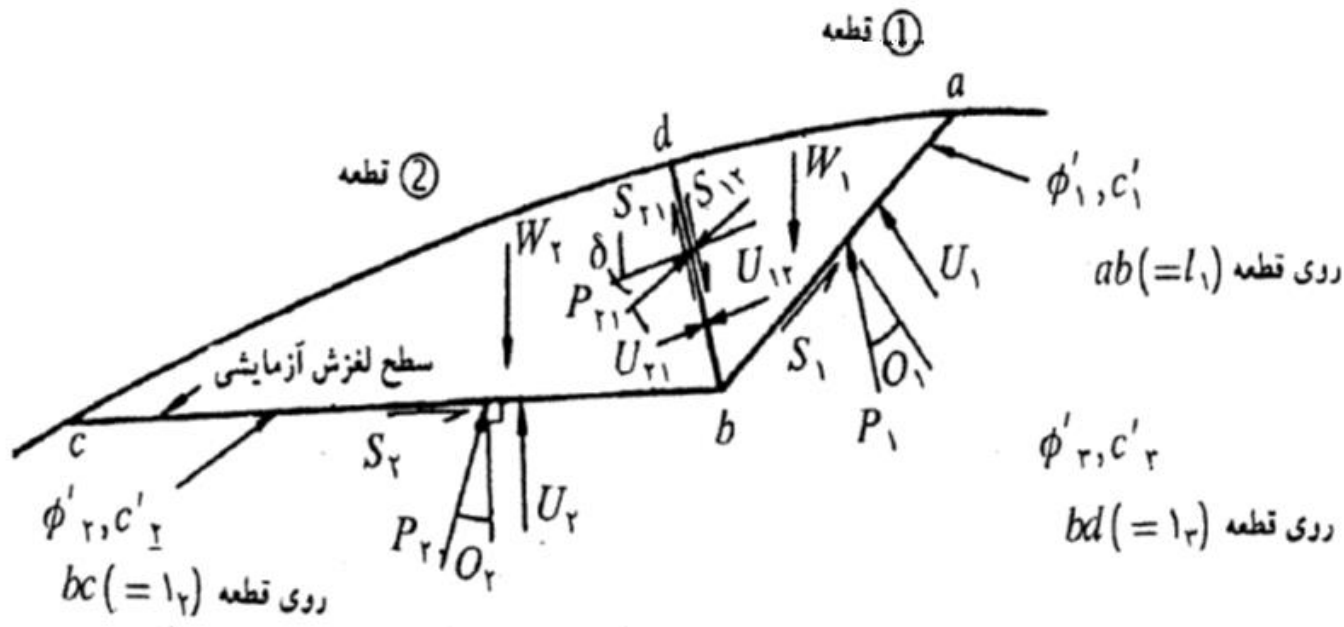
$$U_1 \text{ و } U_2 = \text{فشار آب منفذی در زیر قطعات ۱ و ۲}$$

$$\delta = \text{زاویه نیروهای } P_{12} \text{ و } P_{21} \text{ نسبت به خط عمود بر سطح } b d$$

$$l_3 = \text{طول سطح } b d$$

$$\phi'_3 = \text{زاویه اصطکاک بین مصالح دو قطعه}$$

$$c'_3 = \text{چسبندگی بین مصالح دو قطعه}$$



برای قطعه ۲

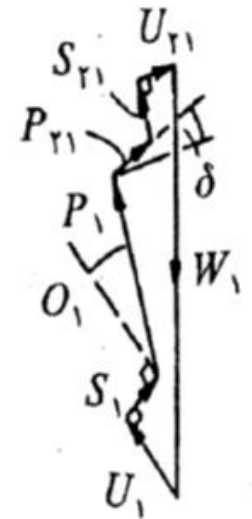
$$\tan \theta_1 = \tan \phi'_1 //$$

$$S_1 = c'_1 l_1 //$$

$$\tan \theta_2 = \tan \phi'_2 //$$

$$S_2 = c'_2 l_2 //$$

چند ضلعی نیروها



برای قطعه ۱

شکل ۱۲-۵- روش دو قطعه‌ای (بلوکی) به همراه چندضلعی نیروها

مراحل محاسبه ضریب اطمینان با این روش به شرح زیر است :

۱- برای ضرایب اطمینان F_1 و F_2 ، دو مقدار فرضی را که احتمالاً در محدوده مورد نظر قرار می گیرند، در نظر بگیرید.

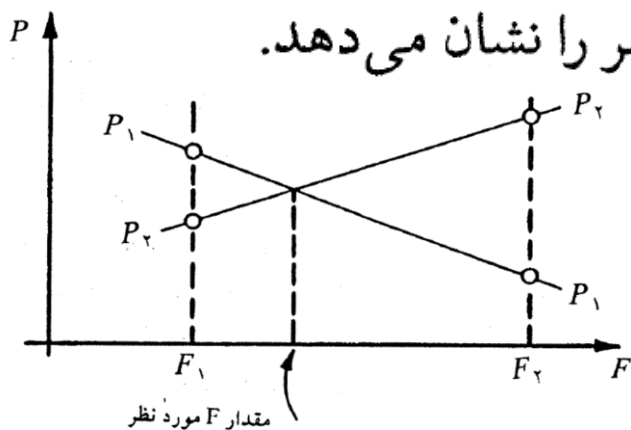
۲- برای هریک از قطعات مقادیر زاویه اصطکاک بسیج شده θ_1 و θ_2 و نیز نیروهای برشی S_1 و S_2 را (با توجه به معادلات ۱۲-۱۷ تا ۱۲-۲۰) و با استفاده از اولین ضریب اطمینان یعنی F_1 محاسبه کنید.

۳- چند ضلعی نیروهای مربوط به هریک از قطعات را مطابق شکل ۱۲-۵ ترسیم کنید. مقادیر نیروهای P_1 ، P_2 ، P_{12} و P_{21} نامعین، اما جهت آنها معین است، بنابراین با توجه به جهت این نیروها، می توان چند ضلعی را کامل کرد.

۴- با استفاده از چند ضلعی تکمیل شده نیروها، می توان مقادیر نیروهای P_{12} و P_{21} را تعیین کرد.

۵- حل صحیح مسئله وقتی حاصل می شود که $p_{۱۲} = p_{۲۱}$ باشد. چنانچه این دو مقدار با یکدیگر مساوی نباشند، باید با استفاده از یک ضریب اطمینان دیگر ($F_۲$) مجدداً مقادیر $p_{۲۱}$ و $p_{۱۲}$ را محاسبه کرد. در این صورت می توان مطابق شکل ۱۲-۶، تغییرات p بر حسب ضریب اطمینان را در دو حالت محاسبه ترسیم کرد. با اتصال تصاویر p مرتبط با هریک از دو ضریب اطمینان $F_۱$ و $F_۲$ به یکدیگر و با درون یا بی خطی، می توان مقدار F مورد نظر را با تصویر محل برخورد دو خط مستقیم حاصل بر روی محور F به دست آورد.

۶- در مراحل بعد می توان موقعیت خطوط $a-b$ و $b-c$ را تغییر داد و در هر مورد مقادیر ضریب اطمینان مربوطه را تعیین کرد. کمترین مقدار به دست آمده در این محاسبات ضریب اطمینان پایدار را شیب مورد نظر را نشان می دهد.



شکل ۱۲-۶- روش ترسیمی تعیین مقدار ضریب اطمینان (F)

۱۲-۶- نمودارهای پایداری سطوح لغزش دایروی

۱۲-۶-۱- نمودارهای تیلور^۱ [۱۹]

این نمودارها را که در شکل‌های ۱۲-۹ و ۱۲-۱۰ نشان داده شده‌اند، می‌توان در شرایط زهکشی کامل یا زهکشی نشده به کار برد. اما معمولاً کاربرد این نمودارها برای شرایط زهکشی نشده و بر اساس کاربرد روش تنش کل که در آن $\phi = 0$ است، توصیه می‌شود، زیرا در این حالت ضریب اطمینان مستقیماً از روی نمودار قابل قرائت است. در مورد مصالحی که پارامترهای مقاومتی مؤثر آنها، یعنی c' و ϕ' در دست است، باید از روش آزمون و خطا و تکرار استفاده کرد. بدین ترتیب که با فرض یک مقدار معین برای ضریب اطمینان، ابتدا زاویه اصطکاک مورد انتظار از رابطه زیر تعیین می‌شود.

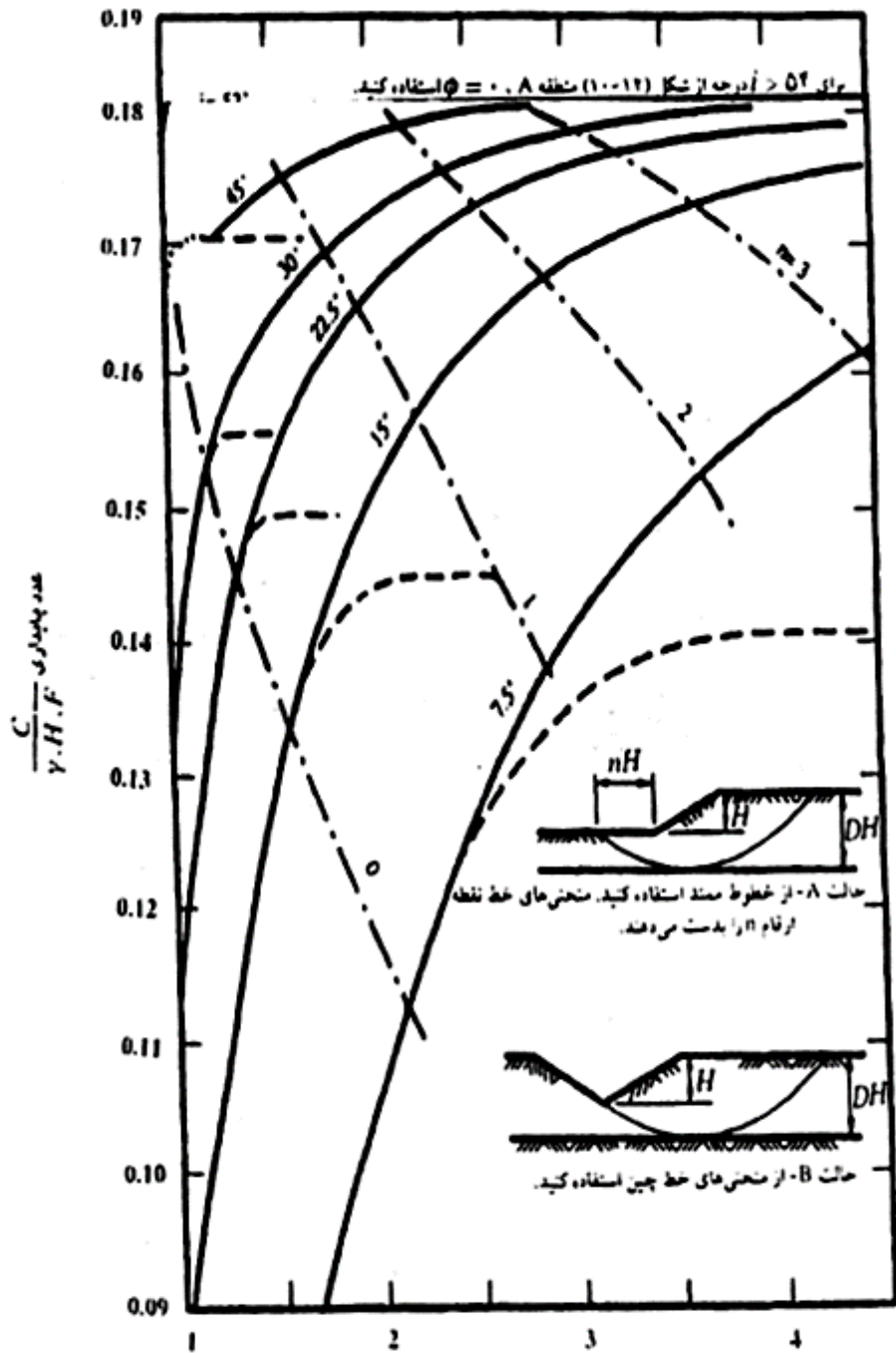
$$\tan \phi_d = \frac{\tan \phi'}{F}$$

(۱۲-۲۲)

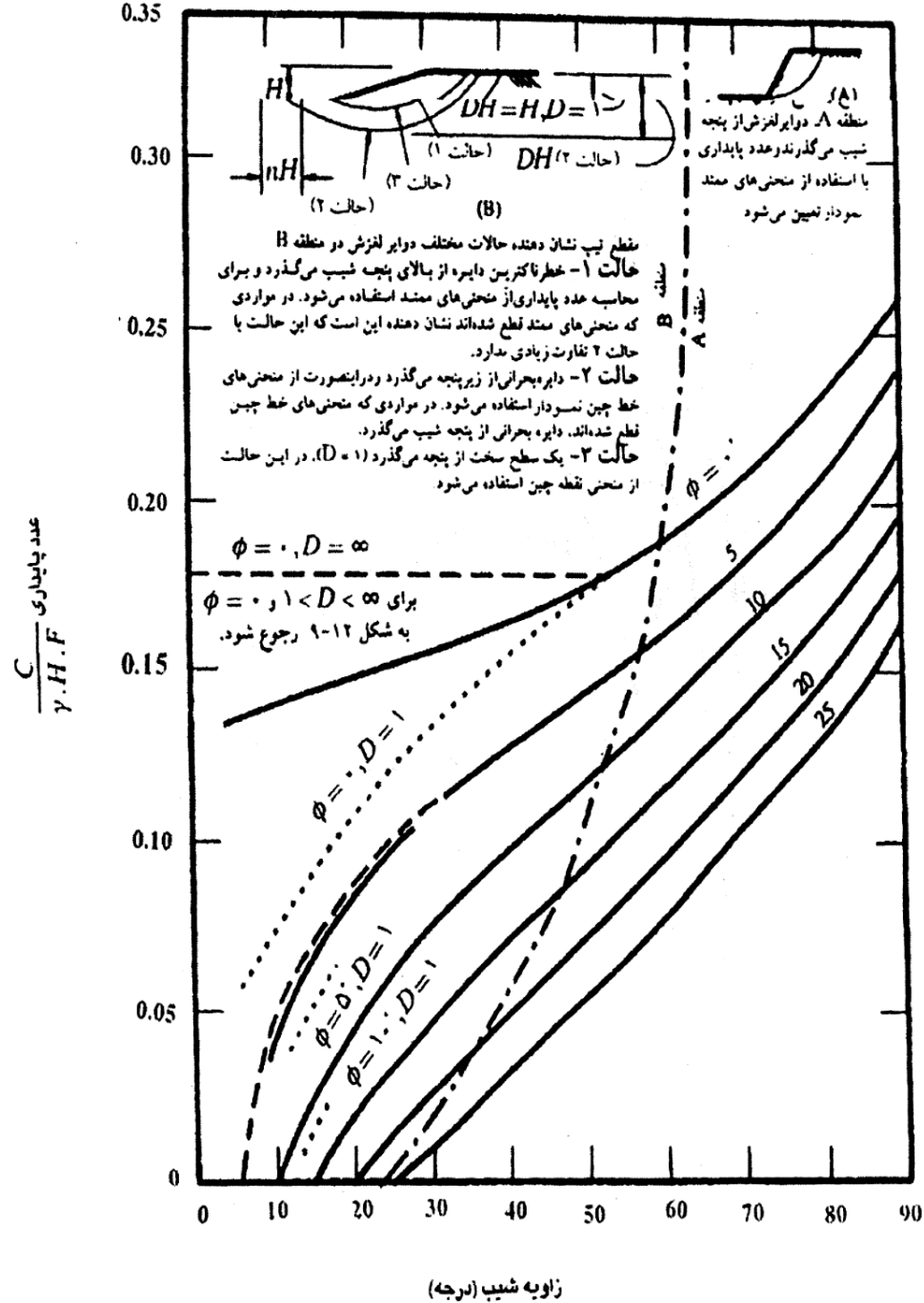
سپس با استفاده از رقم حاصله و به کمک نمودار، مقدار چسبندگی ایجاد شده c_d محاسبه می شود که در آن:

$$c_d = \frac{c'}{F} \quad (۱۲-۲۳)$$

از این رو از آنجا مقدار جدیدی برای F بر اساس نسبت $\frac{c'}{F}$ به دست می آید. چنانچه مقدار ضریب اطمینان با مقدار فرض شده اولیه یکسان نباشد، روند کار آنقدر تکرار می شود تا دو مقدار به یکدیگر برسند.



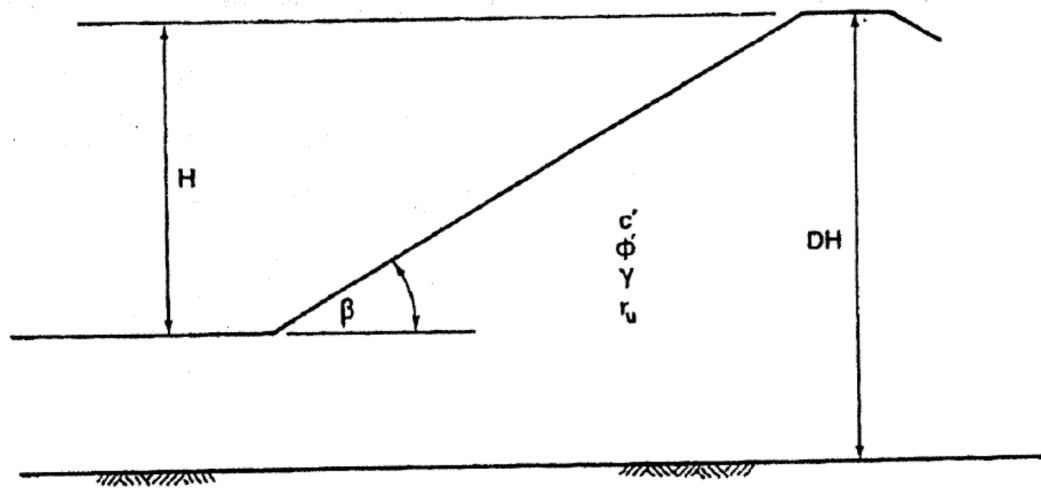
شکل ۱۲-۹- نمودار پایداری تیلور برای حالت $\phi = 0$ و $1 < D < \infty$ [۱۹] ضریب عمق (D)



شکل ۱۰-۱۲ - نمودار پایداری تیلور [۱۹]

۱۲-۶-۲- نمودارهای بیشاپ و مورگان اشترن [۲]

این نمودارها در تحلیل پایداری شیب‌ها بر اساس تنش مؤثر (ϕ' و c') به کار برده می‌شوند و توسط بیشاپ و مورگان اشترن با استفاده از برنامه رایانه‌ای تحلیل شیب به روش سطح لغزش دایروی تهیه شده‌اند. نمودارهای مذکور بر اساس مقادیر مختلف کمیت بدون بعد $\frac{c'}{\gamma \cdot h}$ و ضریب عمق ترسیم شده‌اند. شکل ۱۱-۱۲ مفهوم ضریب عمق در این نمودارها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، H ارتفاع سد و D نسبت عمق لایه سخت در زیر سد تا سطح تاج به ارتفاع سد (H) است. ضریب اطمینان F بر حسب دو ضریب پایداری m و n و نیز نسبت فشار آب منفذی (r_u) بیان می‌شود.



شکل ۱۱-۱۲- مشخصات پارامترهای به کار رفته در نمودارهای بیشاپ و مورگان اشترن

$$F = m - n \cdot r_u$$

(۱۲-۲۴)

که در آن :

$$r_u = \frac{u}{\gamma \cdot h}$$

(۱۲-۲۵)

در روابط فوق، u فشار آب منفذی، γ وزن واحد حجم مصالح و h عمق نقطه نسبت به سطح زمین است. نمودارهای مورد بحث بر حسب مقادیر $\frac{c'}{\gamma \cdot H}$ و D در شکل های ۱۲-۱۲ الی ۱۲-۱۴ ارائه شده اند. مقادیر m و n مورد نیاز در محاسبه ضریب اطمینان به ازای هر مقدار زاویه شیب سطح شیبدار مستقیماً از روی نمودارها استخراج می شود. چنانچه مقادیر $\frac{c}{\gamma \cdot H}$ مستقیماً در نمودارها نباشند، می توان از روش درونیابی استفاده کرد. در استفاده از این نمودارها راحت تر آن است که ضریب عمق بحرانی را با استفاده از خطوط هم نسبت فشار منفذی r_{ue} ، که در شکل با خط چین نشان داده شده اند، تعیین کرد. مقدار r_{ue} با رابطه زیر بیان می شود:

$$r_{ue} = \frac{m_2 - m_1}{n_2 - n_1}$$

(۱۲-۲۶)

که در آن m_2 و n_2 مقادیر مربوط به ضریب عمق بیشتر، یعنی D_2 ، m_1 و n_1 مقادیر مربوط به ضریب عمق کمتر، یعنی D_1 می باشند.

در حالتی که مقدار نسبت فشار منفذی طراحی برای یک مقطع عرضی و پارامترهای مقاومتی معین، بزرگتر از r_{ue} باشد، در این صورت، ضریب اطمینان به دست آمده با ضریب عمق بیشتر، D_2 ، کمتر از ضریب اطمینان حاصل به ازای ضریب عمق کمتر، D_1 ، خواهد بود. این امر برای تشخیص اینکه آیا لایه سخت وجود دارد یا اینکه آیا دایره بحرانی تری موجود است که در تماس با لایه سخت نیست، بسیار مفید است.

برای تعیین حداقل ضریب اطمینان برای مقاطعی که به طور مستقیم روی لایه سخت قرار ندارند، ابتدا نمودار مربوط به $D = 1$ را به ازای نسبت $\frac{c'}{\gamma \cdot H}$ مفروض به کار ببرید. مقادیر β و ϕ' نقطه‌ای را در روی منحنی‌های n در مقابل β نشان می دهند که متناظر با مقدار معینی r_{ue} (با استفاده از منحنی‌های خط چین) می باشند. چنانچه این مقدار کمتر از مقدار r_u طراحی باشد، ضریب عمق بعدی، یعنی $D = 1/25$ را به کار ببرید که در این صورت، مقدار بحرانی تری برای ضریب اطمینان به دست خواهد آمد. چنانچه از نمودار مربوط به $D = 1/25$ ، r_{ue} حاصله هنوز کمتر از مقدار r_u طراحی باشد، از نمودار بعدی مربوط به $D = 1/5$ با همان مقدار $\frac{c'}{\gamma \cdot H}$ استفاده کنید.

یک سطح شیبدار با زاویه شیب ۱:۴ موجود است. چنانچه عمق این شیب ۴۲ متر باشد و یک لایه سخت در عمق ۱۸ متری زیر پاشنه شیب قرار داشته باشد، حداقل ضریب اطمینان پایداری شیب را با توجه به مشخصات خاک به شرح زیر تعیین کنید:

$$\phi' = 30^\circ \text{ - زاویه اصطکاک مؤثر}$$

$$c' = 0.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ - چسبندگی مؤثر}$$

$$\gamma = 1.76 \text{ g/cm}^3 \text{ - وزن واحد حجم خاک}$$

$$r_u = 0.5 \text{ - نسبت فشار آب منفذی}$$

حل

با استفاده از اطلاعات داده شده، ابتدا نسبت $\frac{c'}{\gamma \cdot H}$ محاسبه می شود:

$$\frac{c'}{\gamma \cdot H} = \frac{0.4 \times 1000}{1.76 \times 4200} = 0.05$$

با استفاده از شکل ۱۲-۱۲ به ازای $D=1$ و $\frac{c'}{\gamma \cdot H} = 0.05$ و $\phi' = 30^\circ$ و $\beta = 1:4$ ، مشاهده می شود که $r_{ue} < 0.5$ است. بنابراین $D = 1/25$ ضریب عمق بحرانی تر است، در این صورت با استفاده از نمودار مربوط به این ضریب عمق، مشاهده می شود که این بار $r_{ue} > 0.5$ است. در این حالت، مقدار D برابر $\frac{42+18}{42} = 1/43$ می باشد و با توجه به محدوده ارائه شده نمودارها، $D = 1/25$ ضریب عمق بحرانی است. با استفاده از نمودار مربوطه:

$$n = 2/8 \text{ و } m = 3/2$$

با کاربرد رابطه ۱۲-۲۴ و به ازای $r_u = 0.5$ ، حداقل ضریب اطمینان برابر است با:

$$F = m - n \cdot r_u = 3/2 - 2/8 \times 0.5 = 1/8$$

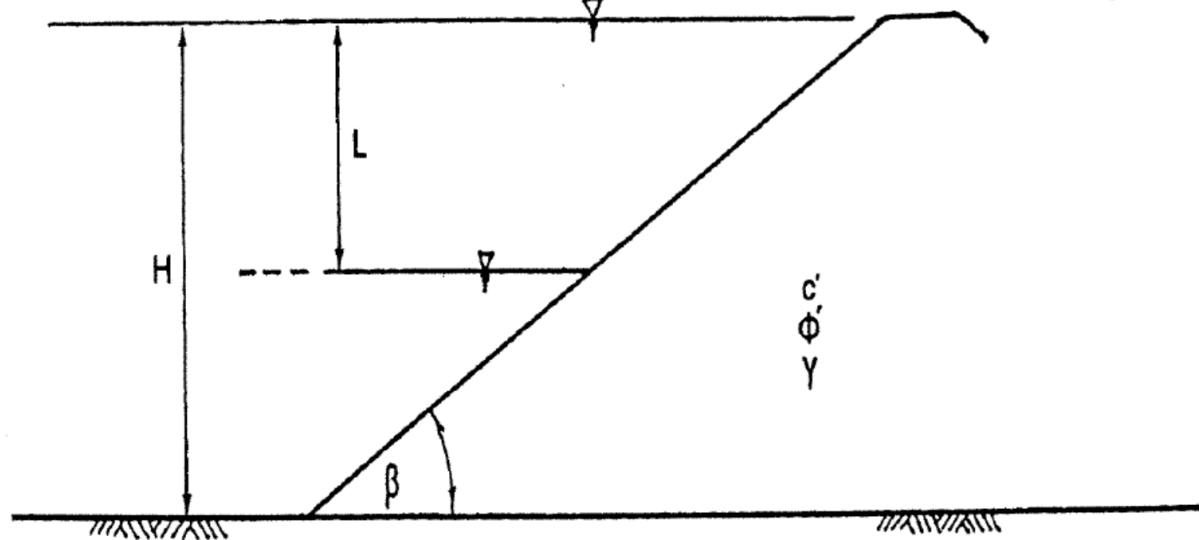
۱۲-۶-۳- نمودارهای افت سطح آب [۱۰]

مورگان اشترن یک سری نمودار محاسباتی دیگر برای بررسی پایداری و تعیین ضریب اطمینان شیب‌هایی که در معرض افت ناگهانی سطح آب قرار دارند، تهیه کرده است. با پایین رفتن سطح آب در مخزن، با فرض عدم پخش فشار منفذی در حین این فرایند، ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. مورگان اشترن سطح شیب‌دار را از نوع شیب ساده متشکل از مصالح همگن، مستقر روی یک لایه صلب غیر قابل نفوذ در پاشنه شیب فرض کرد. خاک تشکیل‌دهنده شیب دارای پارامترهای تنش مؤثر، یعنی c' و ϕ' بود که مقدار هر دو در عمق ثابت است. شیب، قبل از افت سطح آب، به طور کامل غرقاب بوده و حالت استغراق کامل برقرار است.

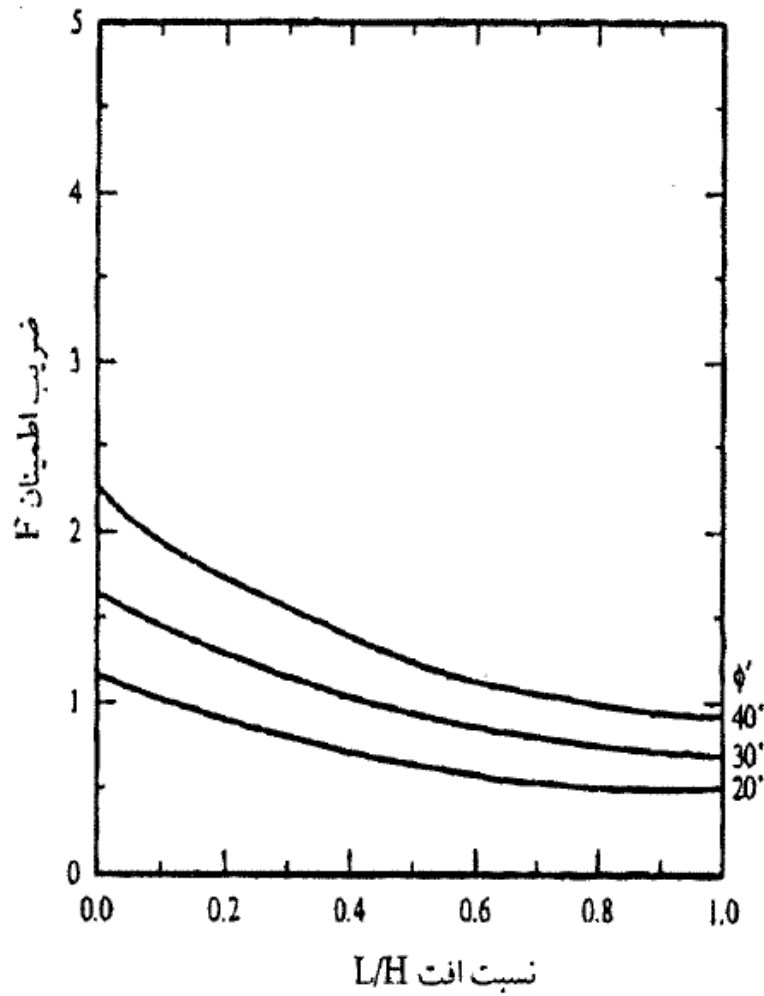
پارامتر فشار منفذی اسکمپتون، یعنی $\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1}$ ، در حین افت سطح آب برابر یک فرض شده و نیز فرض می‌شود که وزن واحد حجم خاک در این فرایند ثابت و معادل دو برابر وزن واحد حجم آب باشد. به علاوه فرض می‌شود که فشار منفذی برای هر نقطه را می‌توان از حاصل ضرب ارتفاع خاک در بالای نقطه در وزن واحد حجم آب به دست آورد.

نسبت افت برابر $\frac{L}{H}$ می باشد که در آن L مقدار افت سطح آب و H ارتفاع کل شیب است. کلیه دواير لغزش پتانسیل باید مماس بر قاعده مقطع باشند. این امر بدان معنی است که مقدار H در ضریب پایدار $\frac{c'}{\gamma \cdot H}$ و در نسبت افت $\frac{L}{H}$ باید متناسب با سطوح میانی مماس بر دایره لغزش تعریف شوند.

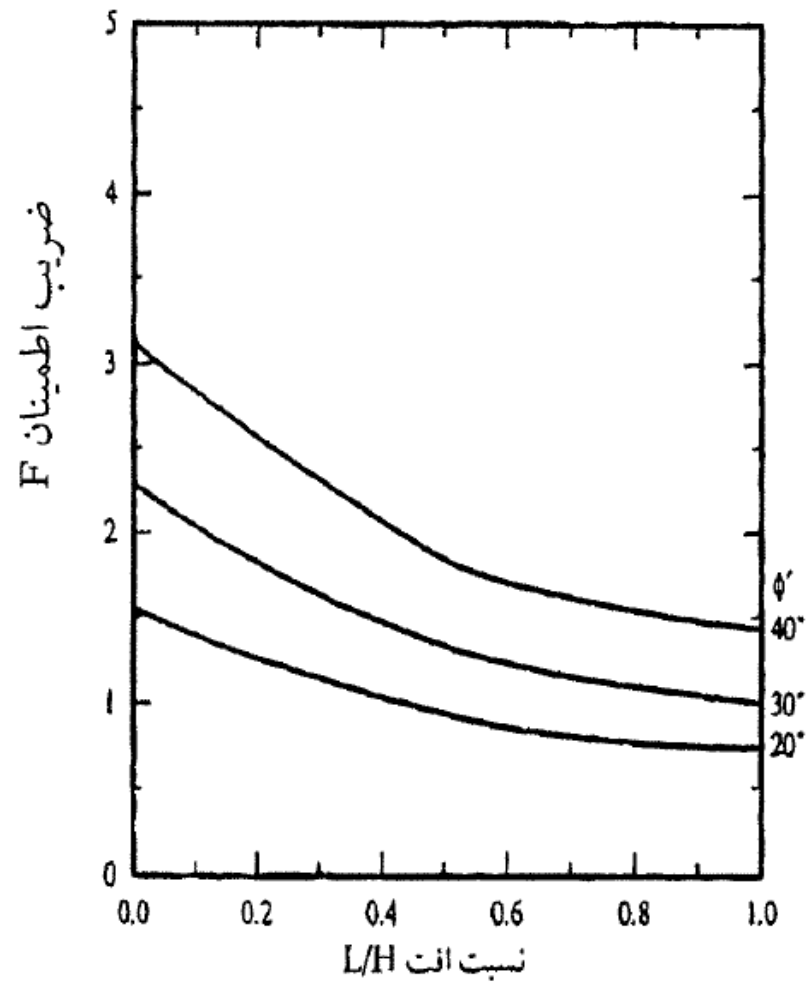
نمودارهای مورگان اشترن برای مقادیر ضریب پایداری از $0/125$ تا $0/050$ و برای شیب‌های $1:2$ الی $1:5$ و حداکثر زاویه اصطکاک $\phi' = 40^\circ$ تهیه شده‌اند. شکل ۱۲-۱۵، پارامترهای به کار برده شده در این نمودارها را نشان می‌دهد. این نمودارها در شکل ۱۲-۱۶ الی ۱۲-۱۸ ارائه شده‌اند.



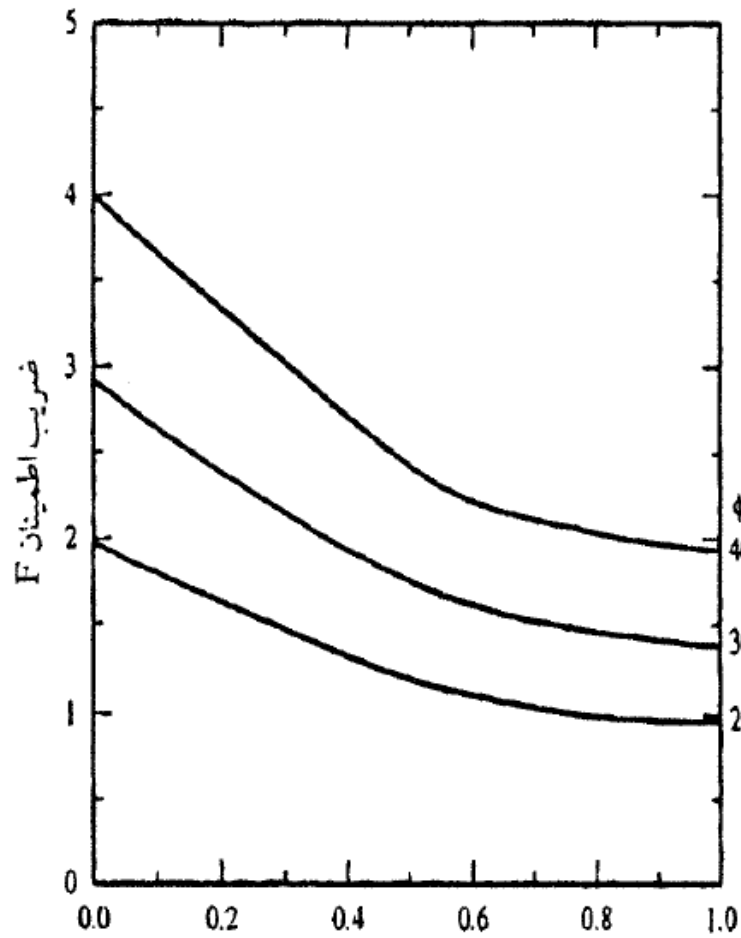
شکل ۱۲-۱۵ - پارامترهای به کار رفته در نمودارهای مورگان اشترن



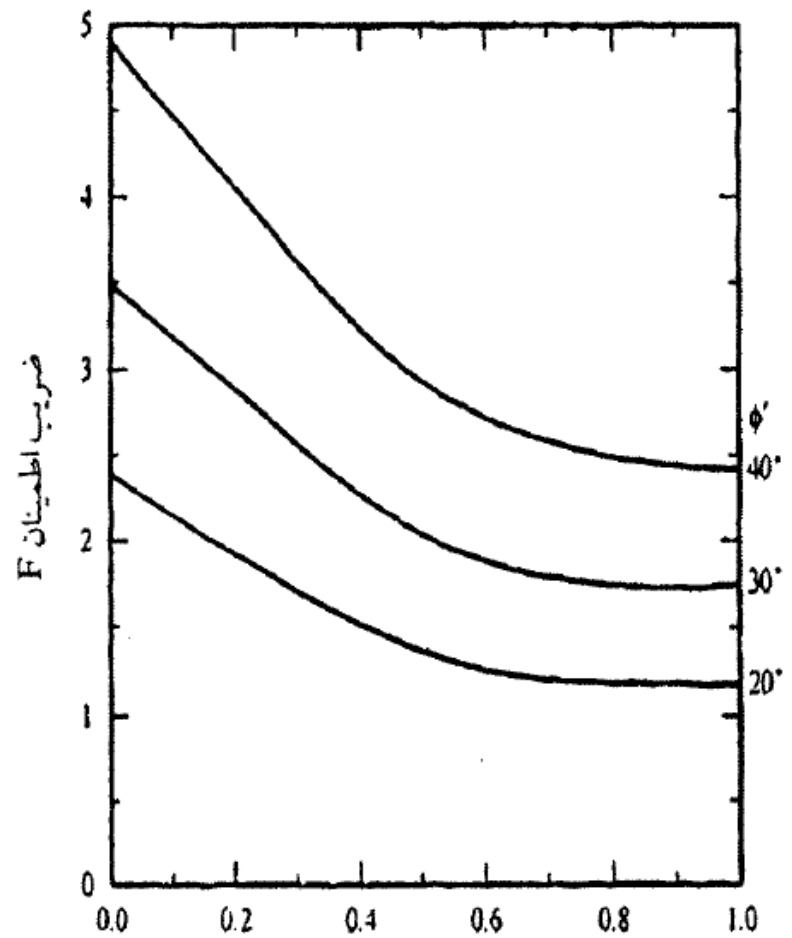
(a) $\beta = 2:1$



(b) $\beta = 3:1$



نسبت افت L/H
(c) $\beta = 4:1$

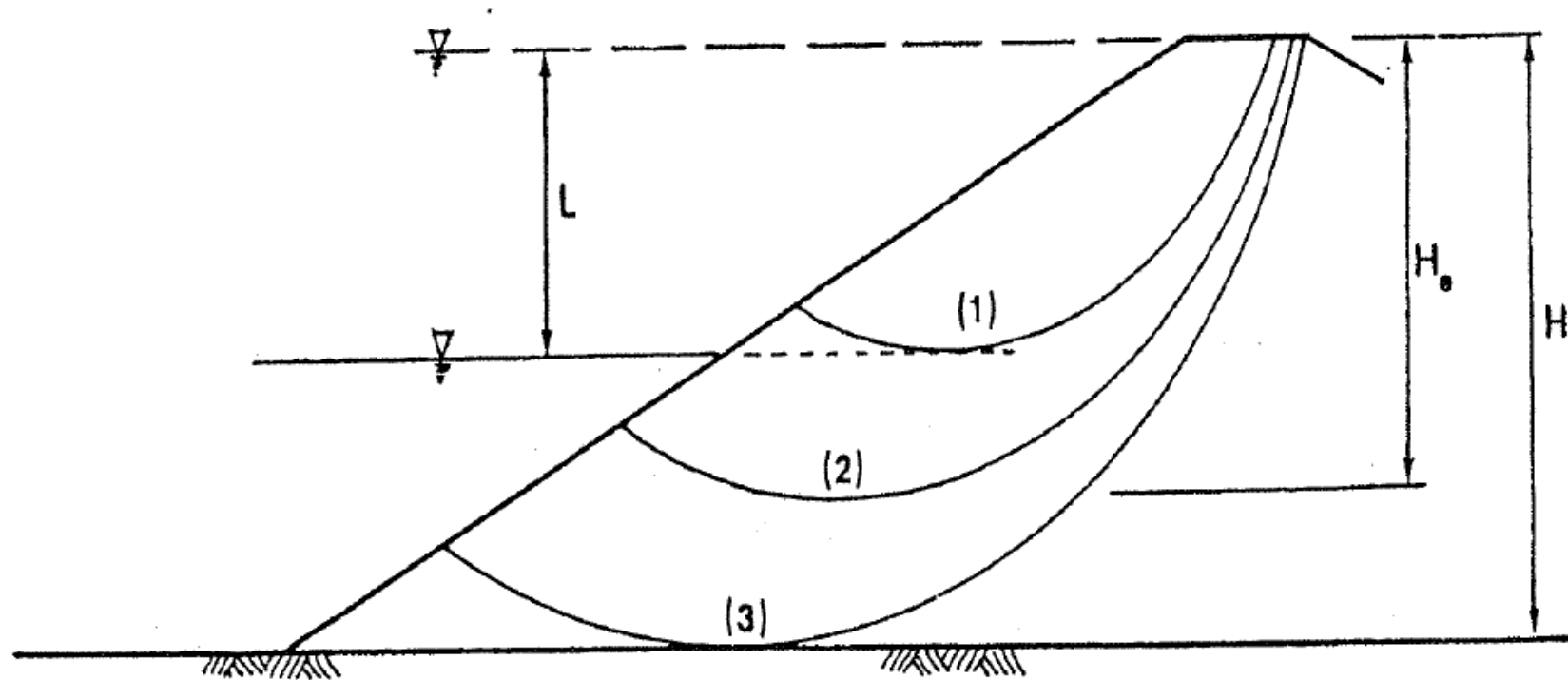


نسبت افت L/H
(d) $\beta = 5:1$

شکل ۱۲-۱۶ - نمودار افت سطح آب

$$\frac{c'}{\gamma H} = 0.0125 \quad \text{ضریب پایداری}$$

برای حالت افت کامل سطح آب، ضریب اطمینان به طور مستقیم از نمودار به دست می آید. اما برای حالت های افت ناقص سطح آب، سطوح بحرانی ممکن است مماس بر سطح قاعده سد نبوده و در ارتفاع بالاتری قرار گیرند. در این صورت، ضرایب اطمینان پایداری این سطوح باید با فرض یک ارتفاع معادل H_e که مطابق شکل ۱۲-۱۹ تعریف می شود، تعیین گردد.



شکل ۱۲-۱۹- افت ناقص سطح آب

برای مثال، برای یک نسبت افت معادل $\frac{L}{H} = \frac{1}{2}$ ، مطابق شکل ۱۲-۱۹، برای دایره لغزش (۱)، $He = \frac{H}{2}$ ، برای دایره لغزش (۲)، $He = \frac{3H}{4}$ و برای دایره لغزش (۳)، $He = H$ است.

با تعیین مقادیر $\frac{c'}{\gamma \cdot He}$ و $\frac{L}{He}$ ، کمترین مقدار ضریب اطمینان محاسبه می شود. برای آن دسته از مقادیر $\frac{c'}{\gamma \cdot He}$ که به طور مستقیم روی نمودارها یافت نمی شوند، می توان از روش درونیابی استفاده کرد.

یک سد خاکی به ارتفاع ۳۰ متر مفروض است. این سد از مصالح یکنواخت با چسبندگی مؤثر $c' = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ و زاویه اصطکاک مؤثر $\phi' = 30^\circ$ تشکیل شده است. وزن واحد حجم خاک دو برابر وزن واحد حجم آب و برابر ۲ گرم بر سانتی متر مکعب است. زاویه شیب بدنه سد $\beta = 1:3$ است. حداقل ضریب اطمینان پایداری در شرایط افت کامل سطح و افت تا نیم ارتفاع سد را به کمک نمودارهای مورگان اشترن تعیین کنید.

حل

ابتدا ضریب پایداری محاسبه می شود:

$$\frac{c'}{\gamma \cdot H} = \frac{0.15 \times 1000}{2 \times 3000} = 0.025$$

با استفاده از رقم مذکور و به ازای $\beta = ۱:۳$ و $\phi' = ۳۰^\circ$ و برای حالت افت کامل سطح آب $\frac{L}{H} = ۱$ ضریب اطمینان برابر $F = ۱/۲$ به دست می آید. با بررسی نمودارها مشاهده می شود که دایره لغزش بحرانی مماس بر قاعده سد است. چنانچه هر سطح تماس دیگری فرض شود، H باید کاهش یابد. در این صورت، با کاهش H ، ضریب پایداری افزایش یافته و بدین ترتیب در کلیه حالات ضریب اطمینان بیشتری به دست خواهد آمد.

در حالت دوم، یعنی افت سطح آب تا نیم ارتفاع سد، سطح لغزش مماس بر قاعده فرض شده و ارتفاع مؤثر He معادل با ارتفاع واقعی سد است که در این صورت، ضریب پایداری برابر $۰/۰۲۵$ ثابت باقی می ماند. با این رقم، ضریب پایداری و نسبت $\frac{L}{He} = ۰/۵$ ، به شرط ثابت بودن سایر شرایط، ضریب اطمینان از روی نمودار مربوطه برابر $F = ۱/۵۲$ به دست خواهد آمد.

چنانچه دایره لغزش به سطح عبوری بر نیم ارتفاع سد مماس باشد، ارتفاع مؤثر برابر نصف ارتفاع واقعی سد است، بنابراین $He = \frac{H}{۲} = ۱۵m$. در این صورت، $\frac{c'}{\gamma \cdot He} = ۰/۰۵$ و $\frac{L}{He} = ۱/۰$. با این شرایط حداقل ضریب اطمینان از روی نمودار مربوطه برابر $F = ۱/۴۸$ به دست خواهد آمد.

این نمودارها بر اساس کار قبلی فلنیوس و بیشاپ تهیه شده است. در این روش نیز سطح لغزش به صورت دایروی فرض می شود که با رسم خطوط قائم به نوارهایی تقسیم و تحلیل بر اساس تنش مؤثر و تعادل نیروها و لنگرها انجام شده و نیروهای کناری قطعات موازی فرض شده اند.

بر اساس روش اسپنسر زاویه اصطکاک بسیج شده، ϕ'_m برابر $\frac{\phi'}{F}$ است و فرض می شود که ضریب عمق، D ، کاملاً بزرگ است. همچنین توزیع فشار منفذی یکنواخت فرض شده و مفهوم نسبت فشار منفذی، r_u ، پیشنهادی بیشاپ و مورگان اشترن به کار گرفته شده است. بر اساس این روش که نمودارهای آن در شکل ۱۲-۲۲ نشان داده شده، ضریب پایداری به شرح زیر تعریف می شود:

$$N_s = \frac{c'}{F \cdot \gamma \cdot H} \quad (۱۲-۳۰)$$

که در آن :

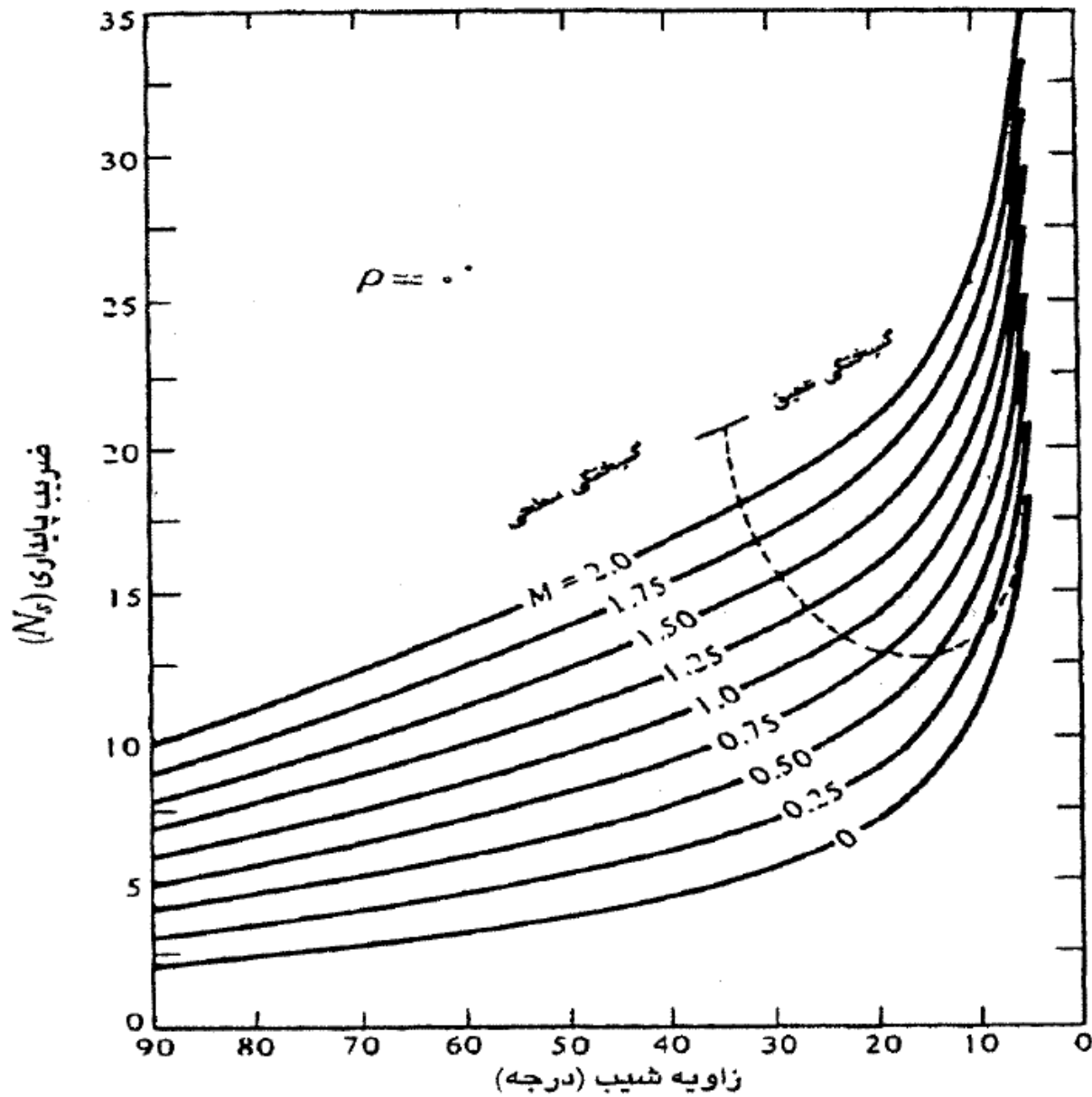
$c' =$ چسبندگی مؤثر

$F =$ ضریب اطمینان

$\gamma =$ وزن واحد حجم خاک

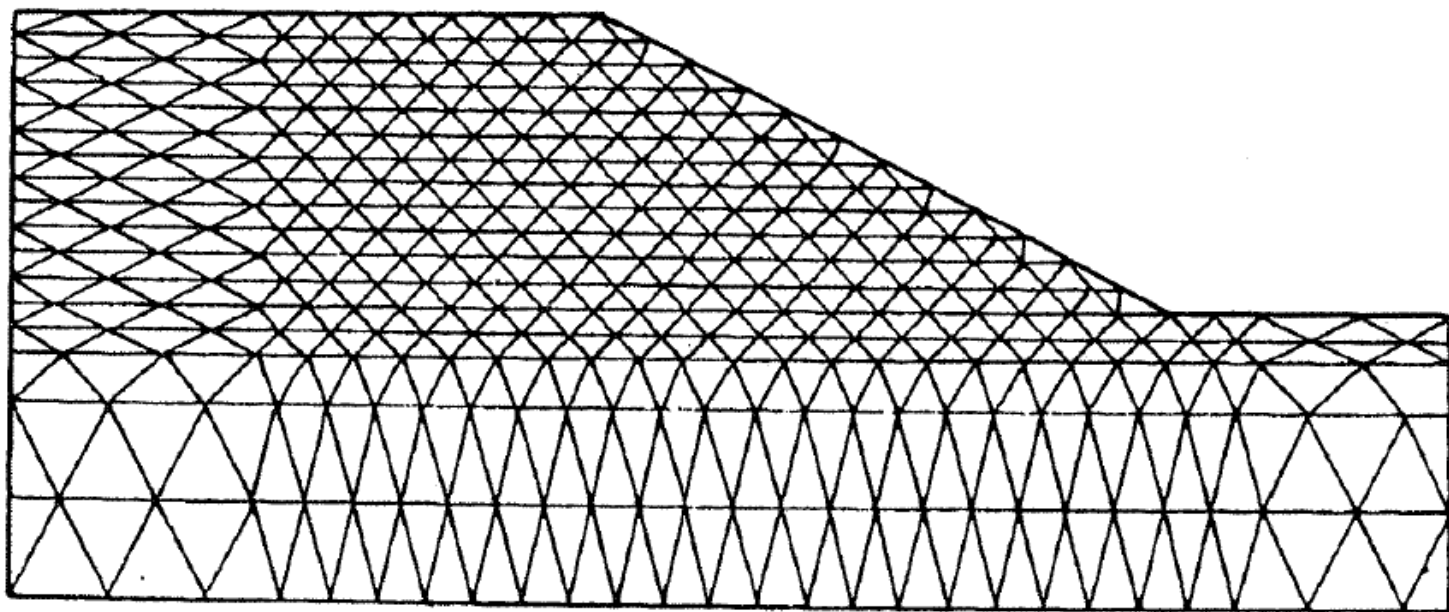
$H =$ متوسط ارتفاع هر قطعه

همان‌طور که شکل ۱۲-۲۲ نشان می‌دهد، تغییرات ضریب پایداری بر حسب زاویه اصطکاک بسیج شده بین ۱۰ تا ۴۰ درجه و زاویه شیب β تا ۳۴ درجه، بین صفر تا ۰/۱۲ است. در نمودارهای اسپنسر برای نسبت فشار منفذی، r_u ، سه رقم صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شده و در صورت نیاز برای ارقام دیگر به سهولت می‌توان از روش درونیابی خطی استفاده کرد.



شکل ۱۲-۲۰- رابطه شیب، ضریب پایداری (N_s) و نسبت سطح آب (M) [۶]

ضعف اصلی روش‌های تعادل حدی، ملحوظ نشدن مشخصات تنش - کرنش مصالح بدنه و پی سد در تحلیل پایداری است. با استفاده از روش اجزای محدود که در آن کلیه مشخصات تنش - کرنش مصالح ملحوظ می‌گردد، این ضعف برطرف می‌شود. اما در این روش نیز تنها تنش و تغییر شکل در نقاط مختلف سازه تعیین شده و سطح لغزش پتانسیل تعریف نمی‌شود و با مش‌بندی مقطع عرضی بدنه و پی سد و فرض مرزهای صلب در فواصل قابل ملاحظه از شیب، به گونه‌ای که مرزها اثری بر تنش‌های داخل محدوده نگذارند، مقادیر تنش - کرنش در نقاط گره محاسبه می‌شود.

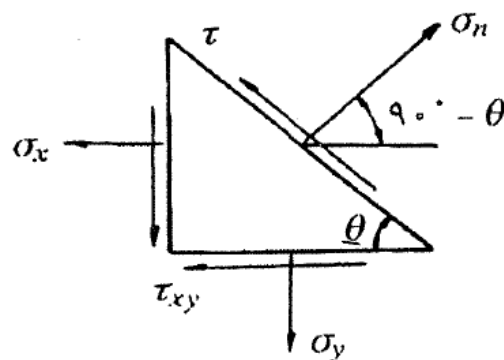
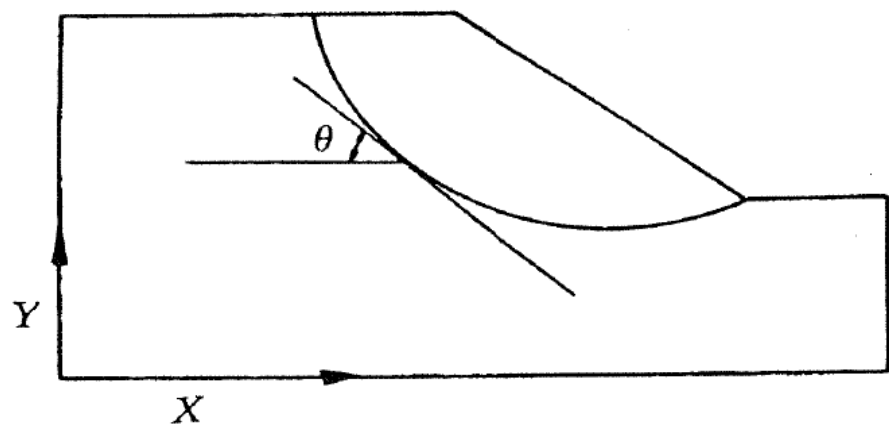


شکل ۱۲-۲۳- مش بندی مقطع سد در روش اجزای محدود

چنانچه یک سطح لغزش فرضی در دامنه شیب در نظر گرفته شود، مقدار تنش‌ها در نقطه‌ای مانند A روی سطح لغزش که تحت شیب θ قرار دارد، یعنی σ_x ، σ_y و τ_{xy} به کمک روش اجزای محدود قابل محاسبه است. در این صورت، مطابق شکل ۱۲-۲۴، مقادیر تنش‌های نرمال و برشی روی سطح گسیختگی را می‌توان با استفاده از روابط زیر تعیین کرد:

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (31-12)$$

$$\tau = -\tau_{xy} \cdot \cos 2\theta - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta \quad (32-12)$$



شکل ۱۲-۲۴- مؤلفه‌های تنش در هر نقطه روی سطح لغزش

از آنجا که کلیه تنش‌ها در امتداد سطح لغزش با کمک روش اجزای محدود قابل تعیین می‌باشند، از این رو تنش‌های نرمال برشی در هر نقطه در امتداد سطح گسیختگی را نیز می‌توان به کمک معادلات ۱۲-۳۱ و ۱۲-۳۲ به دست آورد. پس از محاسبه تنش‌های نرمال، مقاومت برشی، S ، در تمام نقاط را می‌توان بر اساس معادله مهر-کولمب به شرح زیر تعیین کرد:

$$S = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (12-33)$$

با جمع کردن مقادیر تنش‌های نرمال و مقاومت برشی در کلیه نقاط، مقدار مقاومت برشی و نیروی برشی کل محاسبه شده و ضریب اطمینان پایداری از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$F = \frac{\sum (c + \sigma_n \tan \phi) \Delta l}{\sum \tau \cdot \Delta l} \quad (12-33)$$

که در آن Δl طول هر جزء است. امروزه با وجود برنامه‌های رایانه‌ای بسیار قوی و با سرعت بالا، انجام این محاسبات علی‌رغم حجم بسیار زیاد آن به‌سهولت و در زمان کوتاه امکان‌پذیر است. در این برنامه‌ها، سطح گسیختگی به تعدادی قطعه با طول‌های مساوی تقسیم می‌شود که هر قطعه دارای دو نقطه انتهایی است. تنش‌های افقی، قائم و برشی در وسط هر قطعه با روش درونیابی تنش‌های اجزای مجاور تعیین می‌شود. پس از آن، تنش‌های نرمال و برشی هر قطعه با استفاده از تنش‌های وسط هر قطعه و زاویه θ آن قطعه محاسبه می‌شود.