توازن المنحدرات

4.1 مقدمة

يتم درسة توازن المنحدرات عند تشييد مختلف المنشآت في الهندسة المدنية كالطرق والشدود والأبنية المشيدة بالقرب من المنحدرات ... الخ. تهدف دراسة دراسة توازن المنحدران ضمان سلامة هذه المنشآت تحت تأثير الوزن الذاتي لتربة المنحدرات والحمولات الإضافية للمنشأ.

4. 2 تصنيف حركة الأرض

يمكن تصنيفات حركة الأرض إلى :

أ - حركة طويلة الأمد : يحدث الانهيار نتيجة تراكم الحركة خلال فترة طويلة من الزمن كحالة زحف التربة على طول المنحدر بسبب طبوغرافية الموقع وحالة الانهيار التدريجي لبنية التربة نتيجة لترطيب تربة المنحدر ... الخ

ب - حركة قصيرة الأمد : يحدث الانهيار نتيجة لتغير مفاجئ وكبير إما في الحمولات المطبقة على المنحدر أو لخواص تربة المنحدر، كحالة حدوث حفر أو انهيار في تربة قدم المنحدر أو حالة تطبيق حمولات إضافية كبيرة أعلى المنحدر أو حالة تجوية تربة قدم المنحدر نتيجة للسيول الناتجة عن الأمطار .. الخ.

4. 3 الانزلاقات الأرضية

تعتبر الانزلاقات الأرضية من الظواهر الطبيعية الهامة وذلك بسبب الأضرار الكبيرة المادية والبشرية التي تتسبب بها. يمكن تعريف الانزلاق الأرضي بالحركة نحو أسفل كتلة ترابية على طول سطح انهيار ينتشر في منحدر بفعل الجاذبية الأرضية.

4. 3. 1 أنواع الانزلاقات الأرضية

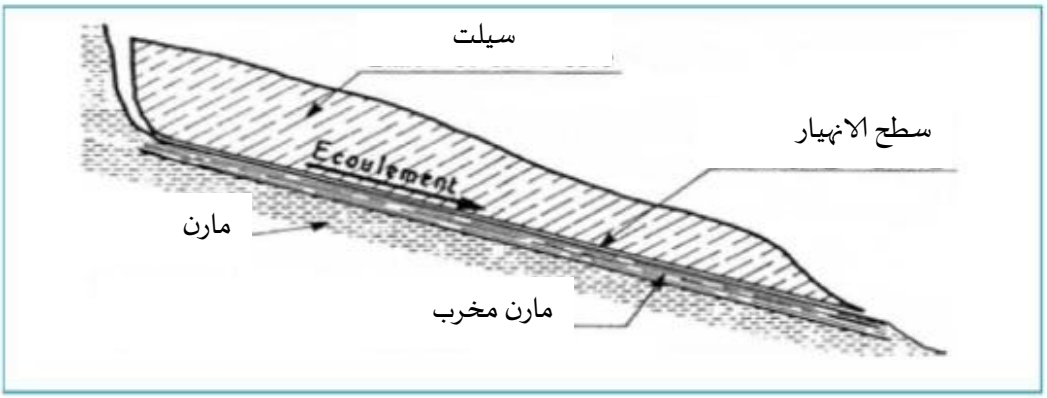
يمكن تصنيف الانزلاقات الأرضية حسب شكل سطح الانهيار إلى :

أ - انزلاقات مستوية : تحدث الانزلاقات المستوية عندما يتمكن أحد الأسطح من توجيه الانزلاق وفق أحد الأسطح كحالة طبقة غضارية دهنية ضعيفة المقاومة مستندة على طبقة صخرية مائلة وسطحها مستوي(الشكل 1-4).

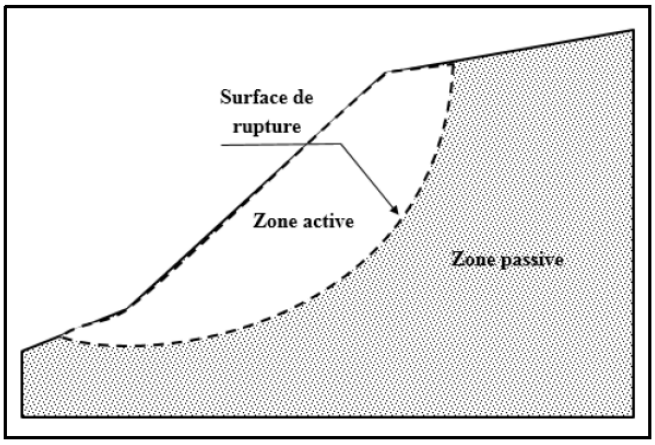
ب - انزلاقات دائرية : أثناء الانزلاقات الدائرية تتحرك كتلة التربة المنزلقة نحو الوجه الأمامي للمنحدر على طول سطح انهيار دائري، وتحدث عادة الانزلاقات الدائرية في الترب المتماسكة المتجانسة وضعيفة المقاومة، وعادة يكون حجم هذه الانزلاقات محدود (الشكل 2-4)، ويمكن أن تحدث الانزلاقات الدائرية وفق عدة أشكال (الشكل 3-4):

- انزلاق دائري لقمة المنحدر : يحدث هذا النوع من الانزلاق عندما تكون تربة المنحدر متماسكة وغير متجانسة وبحيث تستند طبقة ضعيفة أعلى المنحدر على طبقة عالية المقاومة تستمر تحت أسفل قدم المنحدر، أو عندما يكون سطح المنحدر مكون من ميلين بحيث يكون كبيراً في أعلى المنحدر وصغيراً في جزئه السفلي.
- انزلاق دائري لقدم المنحدر وهي الحالة الأكثر شيوعاً
- انزلاق عميق تحت قدم المنحدر: يمكن أن يحدث هذا الانزلاق عندما تكون التربة تحت قدم المنحدر ضعيفة المقاومة.

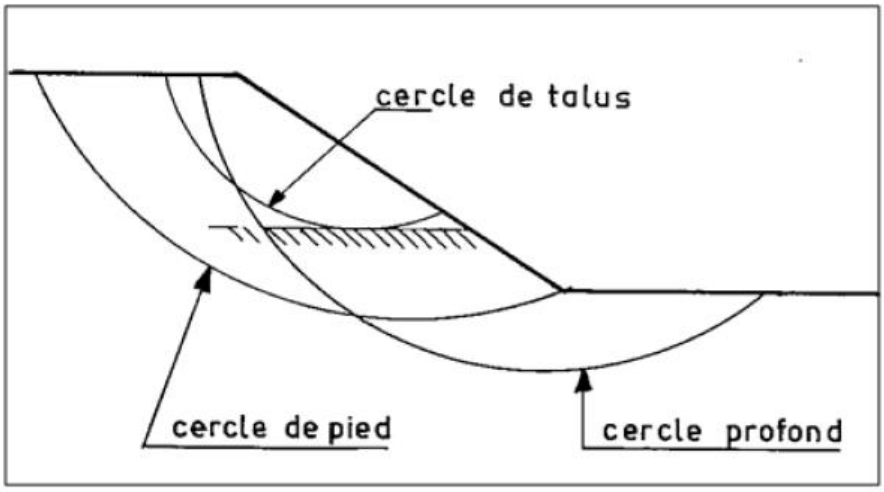
ت - انزلاقات مختلطة : وهي شبيهة بالانزلاقات السابقة ولكن سطح الانهيار غير منتظم (الشكل 4-4)



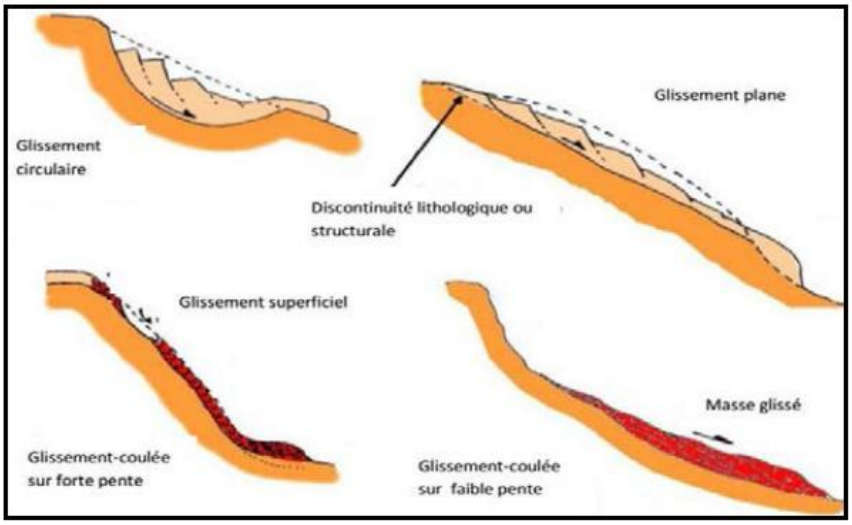
الشكل 4-1: مستوي الانزلاق المستوي



الشكل 4-2 : مستوي الانزلاق الدائري



الشكل 4-3 : أشكال الانهيارات الدائرية



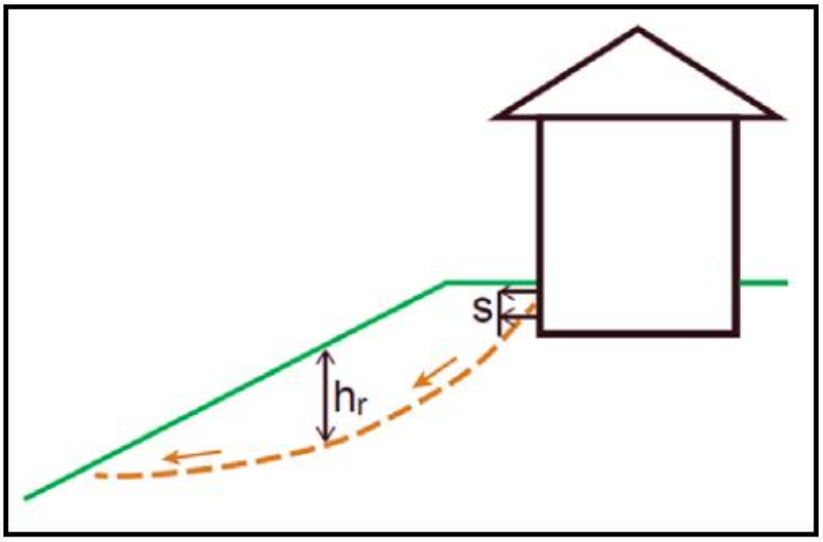
الشكل 4-4 : الانزلاقات المختلطة

ويمكن تصنيف الانزلاقات بحسب عمق مستوي الانزلاق إلى :

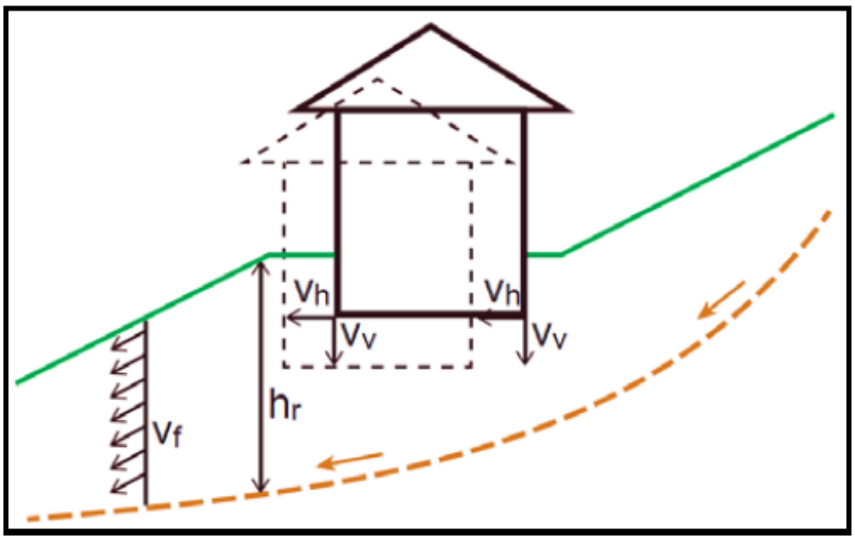
أ - انزلاقات سطحية : تتصف هذه الانزلاقات بسطح انهيار قريب من سطح الأرض ولا يتجاوز عمقه 2m ، ففي الترب الغضارية تحدث هذه الانزلاقات عادة نتيجة لاشباع التربة السطحية نتيجة للأمطار (الشكل 4-5).

ب - انزلاقات عميقة : تحدث عادة عند تلاقي عدة سطوح انهيار لترب ضعيفة متوضعة على أعماق كبيرة ، ويلعب وجود الحمولات الخارجية بالقرب أو ضمن كتلة التربة المتحركة دوراً كبيراً في تحديد شكل وحجم الكتلة الترابية المنزلقة (الشكل 4-6).

يبين الجدول 4-1 تصنيف الانزلاقات الأرضية حسب عمق مستوي الانزلاق، كما يبين الجدول 4-2 تصنيف الانزلاقات حسب سرعة انزلاق مستوي الانهيار



الشكل 4-5 : الانزلاقات السطحية



الشكل 6-4 : الانزلاقات العميقة

الانزلاق	عمق سطح الانزلاق
سطحي	0-2m
متوسط العمق	2-10m
عميق	10-30m
عميق جداً	>30m

الجدول 1-4 : تصنيف الانزلاقات الأرضية حسب عمق مستوي الانزلاق

الانزلاق	عمق سطح الانزلاق
بطيء جداً	0-2m/year
بطيء	2-10m/year
سريع	>10m/year

الجدول 2-4 : تصنيف الانزلاقات الأرضية حسب سرعة انزلاق مستوي الانهيار

4. 3. 2 أسباب الانزلاقات الأرضية

العديد من العوامل تسبب الانهيارات الأرضية، من أهم هذه العوامل :

أ - طبوغرافية الموقع : يمثل ميل سطح أرض الموقع العامل الأساسي لحدوث الانهيارات الأرضية

ب - تأثير المياه : في معظم الحالات تلعب المياه دوراً أساسياً في حدوث الانهيارات الأرضية

ت - العوامل الخارجية كالحمولات الخارجية والاهتزازات وغيرها من العوامل التي يمكن أن تجعل الاجهادات القاصة على طول أحد مستويات الانزلاق المحتملة أكبر من تحمل التربة على القص.

4.4 عامل الأمان للمنحدر

اعتماداً على المعطيات الجيوتكنيكية للمنحدر يمكن دراسة توازن المنحدر باستخدام طرق الحساب المعروفة. يتلخص الحساب بتحديد عامل الأمان (FS) الموافق لمستوي انهيار محتمل ومحدد مسبقاً (في حال استخدام طرق الحساب المستندة على مبدأ التوازن الحدي). يمكن حساب عامل الأمان الموافق للاجهادات القاصة أو للقوى أو لعزوم الدوران.
يتم تكرار حساب عامل الأمان لعدد كبير من مستويات الانهيار المحتملة وتكون قيمة عامل الأصغرية التي يتم الحصول عليها هي قيمة عامل الأمان للمنحدر المدروس.
تتعلق قيمة عامل الأمان الأصغرية المسموحة بطبيعة المنشأ وباستخداماته بالأضرار البشرية والمادية التي يمكن أن يسببها انهيار المنحدر (الجدول 3-4).

حالة المنشأ	Fs
خطر	< 1
أمان غير كافي	1-1.25
أمان كافي للمنشآت قليلة الأهمية	1.25-1.5
أمان للمنشآت الهامة	>1.5

الجدول 3-4 : قيمة عامل الأمان الأصغرية المسموحة تبعاً لأهمية المنشأ

5.4 دراسة توازن المنحدر

1.5.4 أنواع حسابات توازن المنحدر

يمكن إجراء نوعين من الحسابات على المنحدرات

أ - **حسابات قبل انهيار المنحدر:** في هذا الحساب يكون سطح الانهيار مجهول، لذلك يتلخص الحساب باختبار أكبر عدد من السطوح المرشحة للانهيار والبحث عن السطوح الذي يكون عنده عامل الأمان أصغرياً، فيكون هو سطح الانهيار المحتمل ويكون عامل الأمان لهذا السطح هو عامل أمان المنحدر.

ب - **حسابات بعد انهيار المنحدر:** يتلخص الحساب بدراسة عامل الأمان لهذا المستوي قبل وبعد الإصلاح والتدعيم وذلك من أجل التأكد من فعالية الحل المقترح ومن عدم تكرار الانهيار بعد تنفيذ الحل المقترح.

2.5.4 طرق دراسة توازن المنحدر

يمكن دراسة توازن المنحدر إما عددياً باستخدام طريقة العناصر المنتهية أو طريقة الفروقات المحدودة حيث يتم نمذجة كامل المنحدر حيث يتم في نهاية الحل تحديد منطقة الانهيار المحتملة والموافقة لأصغر عامل أمان، أو يمكن استخدام إحدى طرق التوازن الحدي المعروفة حيث يتم في هذه الحالة فرض سطح انهيار وحساب عامل الأمان لهذا السطح، ثم يتم تكرار هذه العملية لعدد كبير من المرات يتم خلالها فرض سطوح انهيار محتملة وحساب عامل الأمان لكل سطح ثم اختيار السطح الذي يوافق عامل الأمان الأصغري ليكون هو سطح الانهيار المحتمل.
سنكتفي في هذا الفصل بعرض عدد من طرق التوازن الحدي فقط دون التطرق للطرق العددية.

3.5.4 دراسة استقرار المنحدرات بفرض سطوح الانهيار المستوية

حالة منحدر محدود الأبعاد

يبين الشكل 7-4 منحدراً ارتفاعه H. بفرض أن سطح الانهيار مستوي وممثل على الشكل بالمستوي الذي ارتفاعه H1 ويميل بزاوية α عن الأفق.

بأخذ معادلة توازن للقوى على مستوي الانهيار نحصل على :

$$W.\sin\alpha - T = 0 \qquad (4-1)$$

حيث,

W وزن كتلة التربة المنزلقة فوق مستوي الانهيار

T قوة القص الممانعة للانزلاق والمتشكلة على طول مستوي الانهيار :

$$T = \frac{1}{F_s}\left(C'.L + W.\cos\alpha.\tan\phi'\right)$$

ϕ' زاوية الاحتكاك الداخلي لتربة المنحدر

L طول مستوي الانزلاق AB (L=AB)

بالتعويض في المعادلة 1-4 نحصل على :

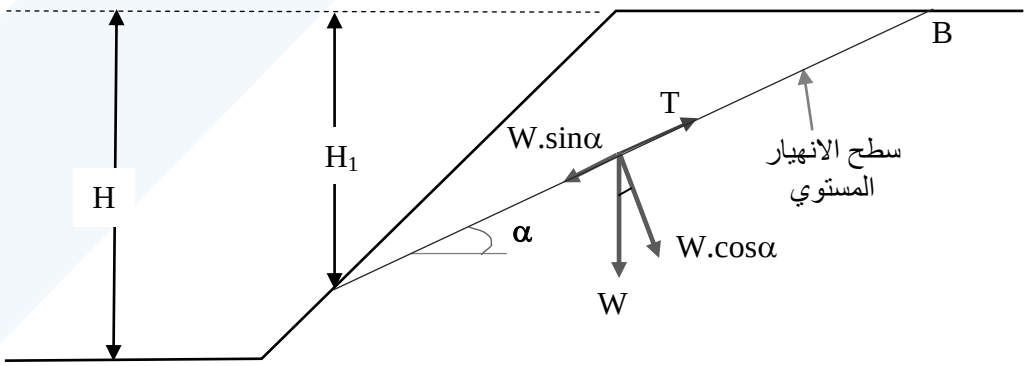
$$F_s = \frac{C'..L + W.\cos\alpha.\tan\phi'}{W.\sin\alpha} \qquad (4-2)$$

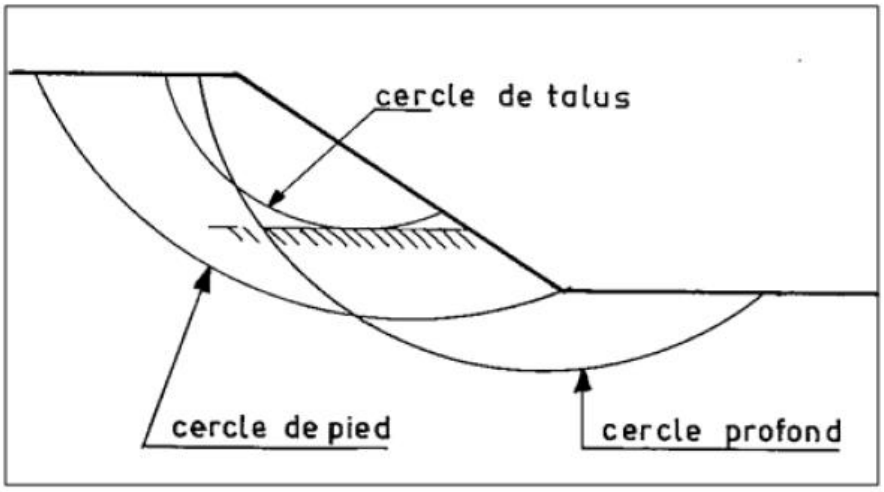
حيث،

β ميل سطح المنحدر

α ميل مستوي الانزلاق عن الأفق

ϕ' زاوية الاحتكاك الداخلي لتربة المنحدر





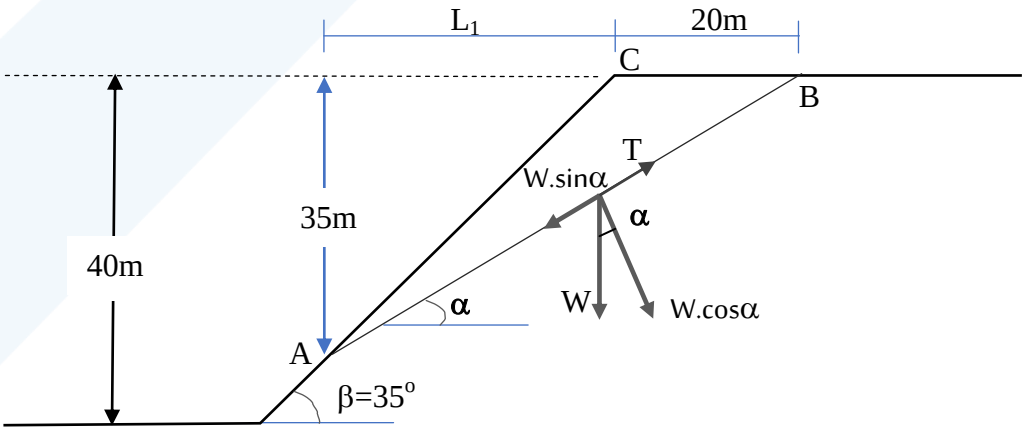
الشكل 4-4 : أنواع الانهيارات الدائرية

الشكل 4-7: حالة سطح الانهيار المستوي لمنحدر محدود الأبعاد

مثال

منحدر ارتفاعه 40m وميله $\beta=35^{o}$، تربته متجانسة مواصفاتها كالتالي : تربة سيلتية $\gamma=19kN/m^{3}$ $C'=40kPa$ و $\phi'=15^{o}$

إذا فرضنا أن سطح الانهيار المفترض مستوي ويقع على بعد 20 متر أفقي من ذروة المنحدر و5 متر شاقولي من الزاوية السفلية للمنحدر (انظر الشكل المرفق). احسب عامل الأمان للمنحدر عند هذا المستوي.



الحل

$$L_1 = 35 * \tan 55 = 50m$$

$$AB = \sqrt{70^2 + 35^2} = 78.3m$$

$$\alpha = \arctan \frac{35}{70} = 26.6^o$$

$$A = (70 - 50) * 35/2 = 350m^2$$

$$V = 350 * 1 = 350m^3$$

$$W = 19 * 350 = 6650kN$$

$$F_S = \frac{C'..L + W.\cos\alpha.\tan\phi'}{W.\sin\alpha} = \frac{40 * 78.3 + 6650 * \cos 26.6 * \tan 15}{6650 * \cos 26.6} = 0.795$$

حالة منحدر لا متناهي الأبعاد

يخضع الشكل المظلل المبين في الشكل 8-4 للقوى التالية :

- ردود الأفعال الجانبية PA و PM وهي متساوية بحسب مبدأ الفعل ورد الفعل
- وزن التربة W ، مركباته WN و WT
- رد الفعل R المؤثر على المستوي AM

يعرف عامل الأمان Fs بالعلاقة : $(4-3)$ $F_s = \frac{T}{W_T}$

حيث،

T القوى الممانعة للانزلاق المتولدة على السطح AM ، وتعطى بالعلاقة :

$T = C'.L + R_N.\tan\phi'$ $(4-4)$ (C′ و ϕ' التماسك و زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة)

W_T القوى المسببة للانزلاق $W_T = W.\sin\beta$

بالتعويض في العلاقة 3-4 نحصل على :

$$F_S = \frac{C'.L + W.\cos\beta.\tan\phi'}{W.\sin\beta}$$

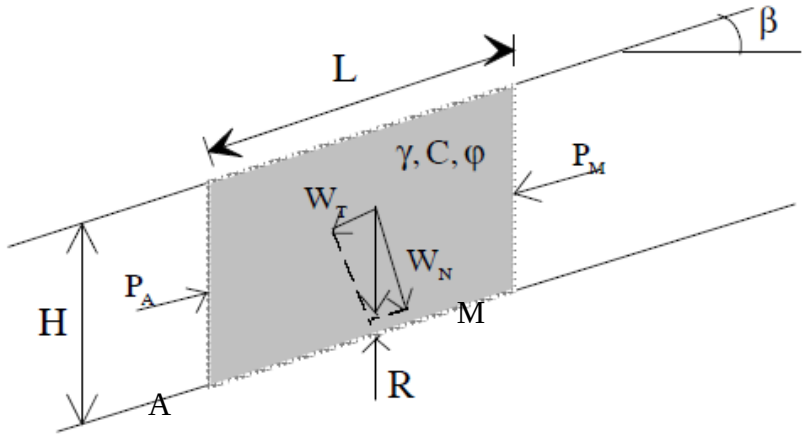
لكن $W = \gamma.H.L.\cos\beta$. بالتعويض نحصل على :

$$F_s = \frac{C'.L + \gamma.H.L.\cos^2\beta.\tan\phi'}{\gamma.H.L.\cos\beta.\sin\beta} \qquad (4-5)$$

في حالة الترب المفككة (C=0) يصبح عامل الأمان :

$$F_s = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \qquad (4-6)$$

هذا يعني أن المنحدرات التي تربتها مفككة تنهار إذا زادت زاوية ميل المنحدر عن زاوية الاحتكاك الداخلي لتربة المنحدر.



الشكل 8-4: حالة سطح الانهيار المستوي لمنحدر لا متناهي الطول

4.5.4 دراسة استقرار المنحدرات بفرض سطوح الانهيار دائرية

يمكن دراسة استقرار المنحدرات ذات مستوي الانهيار الدائري إما بطريقة مبسطة عن طريق حساب عامل الأمان لعزوم القوى الزالقة والممانعة للانزلاق لكامل الكتلة المنزلقة حول مركز دائرة مستوي الانزلاق، أو يمكن استخدام طريقة أكثر أكثر شمولية وتدعى بطريقة الشرائح حيث يتم تقسيم كتلة التربة المنزلقة إلى شرائح شاقولية وتطبيق جميع القوى على هذه الشرائح واستخدام معادلات التوازن للقوى والعزوم لجميع الشرائح.

1.4.5.4 الطريقة المبسطة (طريقة العزوم لكامل كتلة التربة المنزلقة)

لندرس الانزلاق وفق سطح دائري لمنحدر (الشكل 9-4) مكون من تربة مترابطة مثالياً (ϕ=0) لنفرض O مركز الدائرة و R نصف قطرها ($R=H/\sin\beta$). لنحسب عامل الأمان للعزم حيث يعرف عامل الأمان بنسبة عزوم القوى الممانعة للانزلاق إلى عزوم القوى المسببة للانزلاق :

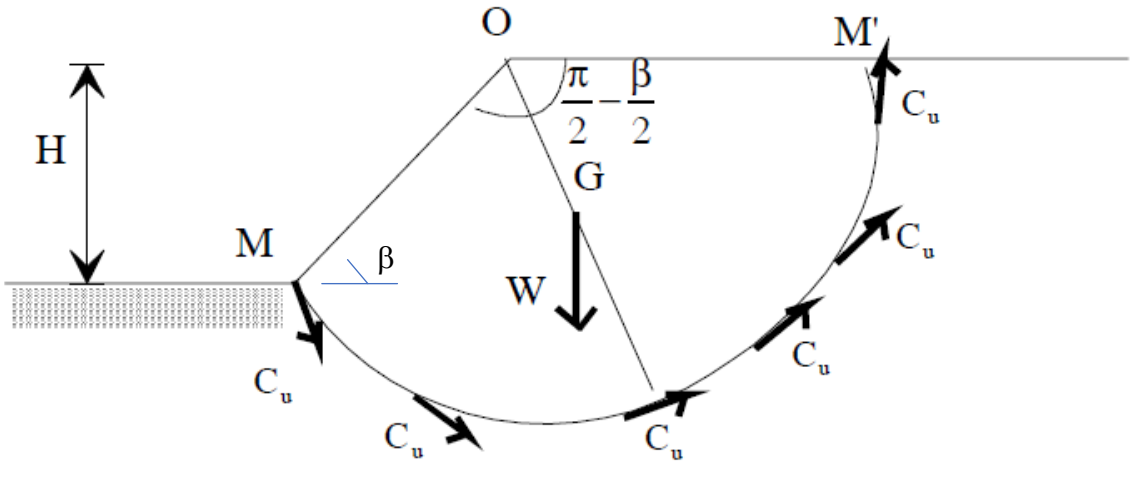
$$F_s = \frac{M_o(\mathrm{Res})}{M_o(Glis)} \qquad (4-7)$$

$$M_o(\mathrm{Res}) = 2R^2 \,.\, C_U \,.\, (\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}) \qquad (4-8)$$

$$M_o(Glis) = W \,.\, OG \,.\, \cos(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}) \qquad (4-9)$$

OG بعد مركز ثقل كتلة التربة المنزلقة عن مركز الدائرة

Cu التماسك غير المصرف للتربة



الشكل 4-9 : سطح الانهيار الدائري لتربة مترابطة مثالياً (ϕ=0)

4.5.4. 2 طريقة الشرائح

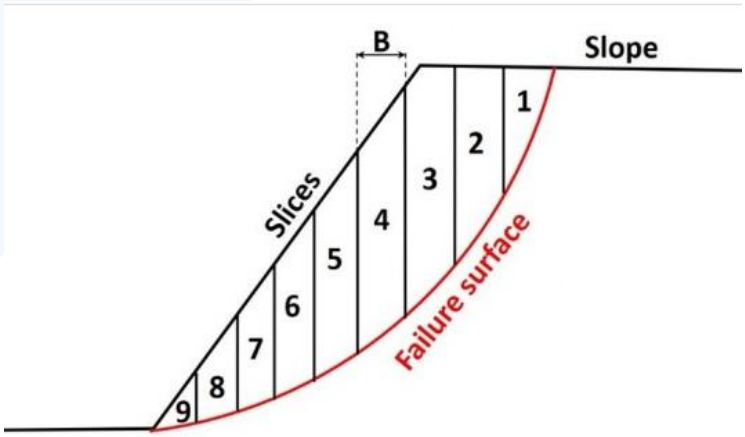
تعتمد طريقة الشرائح على تقسيم كتلة التربة المنزلقة إلى شرائح شاقولية متساوية العرض (الشكل 4-10) وتطبيق جميع القوى على هذه الشرائح. من أجل تحديد مقاومة القص للتربة عند مستوي الانهياريتم عادة استخدام قانون مور-كولومب الذي يكتب على الشكل التالي :

$$\tau = C' + \sigma' . \tan \phi' \qquad (4-10)$$

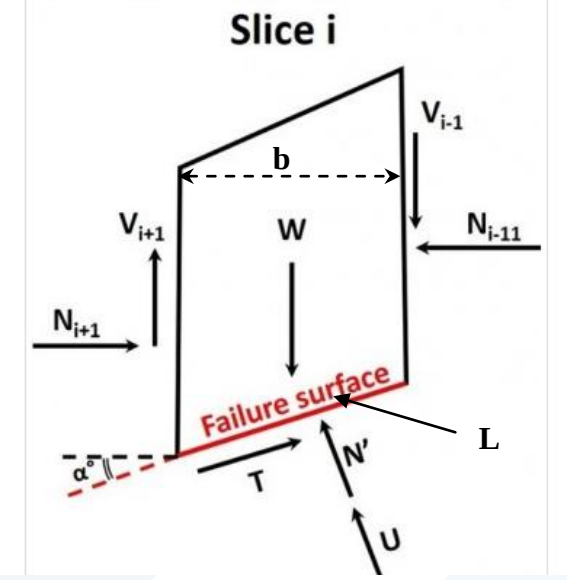
حيث $\sigma' = \sigma - u$ (u تمثل ضغط الماء المسامي)

من السهل كتابة المعادلات التي تربط بين جميع متغيرات المسألة، وإذا كان عدد المجاهيل أكبر من عدد المعادلات فلا بد من فرض شروط إضافية بسيطة بحيث يتم مساواة عدد المجاهيل بعدد المعادلات.

يبين الشكل4-11 القوى المؤثرة على شريحة شاقولية لمنحدر سطح انهياره دائري.



الشكل 4-10 : طريقة الشرائح



الشكل 11-4 : القوى المؤثرة على الشريحة i

h ارتفاع الشريحة

b عرض الشريحة b=L.cosα

w الوزن الكلي للشريحة

N′ القوة الناظمية الفعالة المؤثرة على قاعدة الشريحة

u ضغط الماء المسامي

$\overline{N}$ القوة الناظمية الكلية المؤثرة على قاعدة الشريحة $(\overline{N} = N' + u)$

T القوة المماسية المؤثرة على قاعدة الشريحة

Ni-1 وNi القوى الأفقية بين الشرائح

Vi-1 و Vi القوى الشاقولية بين الشرائح

α الزاوية التي تصنعها قاعدة الشريحة مع الأفق

R نصف قطر دائرة الانهيار التي مركزها o

L طول مستوي الانزلاق للشريحة

x ذراع وزن كتلة التربة المنزلقة

عامل الأمان

لنفرض القوى كالتالي :

$$\overline{N} = \sigma . L \qquad T = \tau_m . L$$

حيث يمثل اجهاد القص المقاوم على قاعدة المعبأ على قاعدة الدائرة والذي يعطى بالعلاقة $\tau_m = \dfrac{\tau}{F_s}$

في حال غياب المياه، يكون لدينا :

$$T = \tau_m . L = \frac{L}{F_s}(C' + \sigma' . \tan\phi') = \frac{C' . L + \sigma' . L . \tan\phi'}{F_s} \qquad (4-11)$$

من أجل شريحة واحدة وباسقاط جميع القوى على الشاقول نحصل على :

$$\bar{N} . \cos\alpha + T . \sin\alpha = W - (V_i - V_{i-1})$$

إذا عوضنا عن T بقيمتها المعطاة بالعلاقة (4-11) نحصل على :

$$\bar{N} = \frac{W - (V_i - V_{i-1}) - \frac{1}{F_s}(C' . L + \bar{N} . \tan\phi')}{m_a}$$

$$m_a = \cos\alpha(1 + \tan\alpha . \frac{\tan\phi'}{F_s}$$

باسقاط جميع القوى على الأفق نحصل على :

$$T . \cos\alpha + \bar{N} . \sin\alpha = N_i - N_{i-1}$$

إذا عوضنا عن T بقيمتها المعطاة بالعلاقة (4-11) نحصل على :

$$\frac{1}{F_s}(C' . L + \bar{N} . \tan\phi') + \bar{N} . \sin\alpha = N_i - N_{i-1} \qquad (4-12)$$

يمكن تعريف عامل الأمان إما اعتماداً على التوازن العام لعزوم جميع القوى ويرمز له بـ F_m، أو اعتماداً على التوازن العام للقوى الأفقية ويرمز له بـ F_f

التوازن العام للعزوم

$$\sum W . x = \sum T . R$$

بتعويض x بـ x=R.sinα نحصل على :

$$F_m = \frac{\sum C' . L + \bar{N} . \tan\phi'}{\sum W . \sin\alpha} \qquad (4-13)$$

في حال $u \neq 0$، يصبح لدينا :

$$F_m = \frac{\sum C' . L + (\bar{N} - u . L) . \tan\phi'}{\sum W . \sin\alpha} \qquad (4-14)$$

التوازن العام للقوى

في حال غياب الحمولات الخاجية، يكون لدينا :

$$\sum (V_i - V_{i-1}) = 0$$

$$\sum (N_i - N_{i-1}) = 0$$

تصبح معادلة التوازن 12-4 كالتالي :

$$F_f = \frac{\sum (C' . L + \bar{N} . \tan\phi') . \cos\alpha}{\sum \bar{N} . \sin\alpha} \qquad (4-15)$$

في حال $u \neq 0$، يصبح لدينا :

$$F_f = \frac{\sum (C' . L + (\bar{N} - u . L) . \tan\phi') . \cos\alpha}{\sum (\bar{N} - u . L) . \sin\alpha} \qquad (4-16)$$

4.5.4.2.1 طريقة فيلينوس

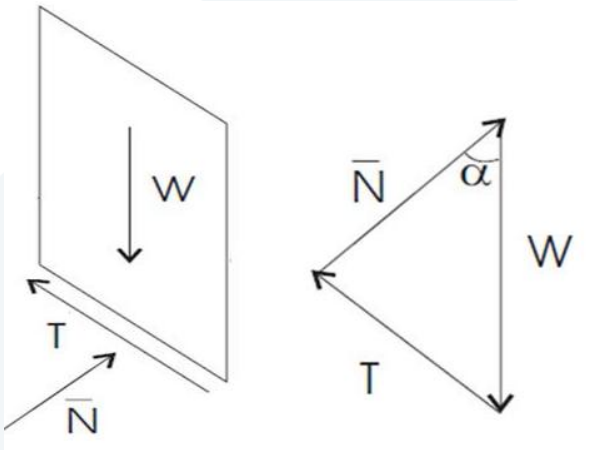
تم اقتراح طريقة فيلينوس عام 1927. إن سهولة الطريقة تسمح بالحساب اليدوي لعامل الأمان للمنحدر.

فرضيات طريقة فيلينوس

أ - سطح الانزلاق دائري

ب - القوى بين الشرائح (الأفقية والشاقولية) مهملة (Vi=Vi-1=0, Ni=Ni-1=0) (الشكل 12-4)، وبالنتيجة يكون

$$\overline{N} = W.\cos\alpha$$



الشكل 12-4 : القوى المؤثرة على شريحة وفق طريقة فيلينوس

بتبديل $\overline{N} = W.\cos\alpha$ في المعادلة 14-4 ، نحصل على :

$$F_s = \frac{\sum C'.L + (W.\cos\alpha - u.L).\tan\phi'}{\sum W.\sin\alpha} \qquad (4-17)$$

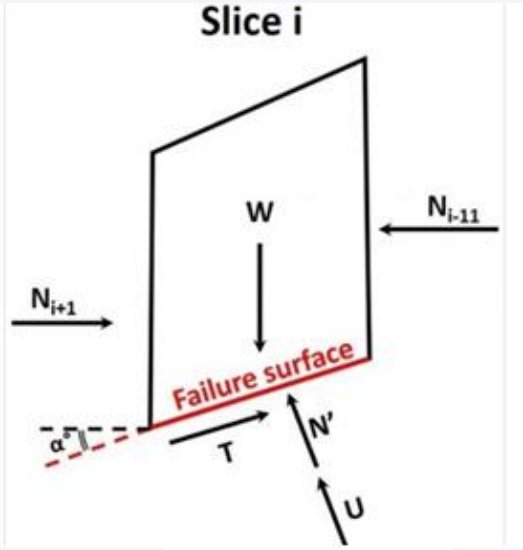
4.5.4.2.2 طريقة بيشوب المبسطة

تم تطوير هذه الطريقة عام 1955. إن تحديد عامل الأمان بهذه الطريقة يحتاج لاستخدام الحاسوب وذلك لأن الحساب يتم بطريقة التقريب المتتالي.

فرضيات طريقة بيشوب المبسطة

أ - سطح الانزلاق دائري

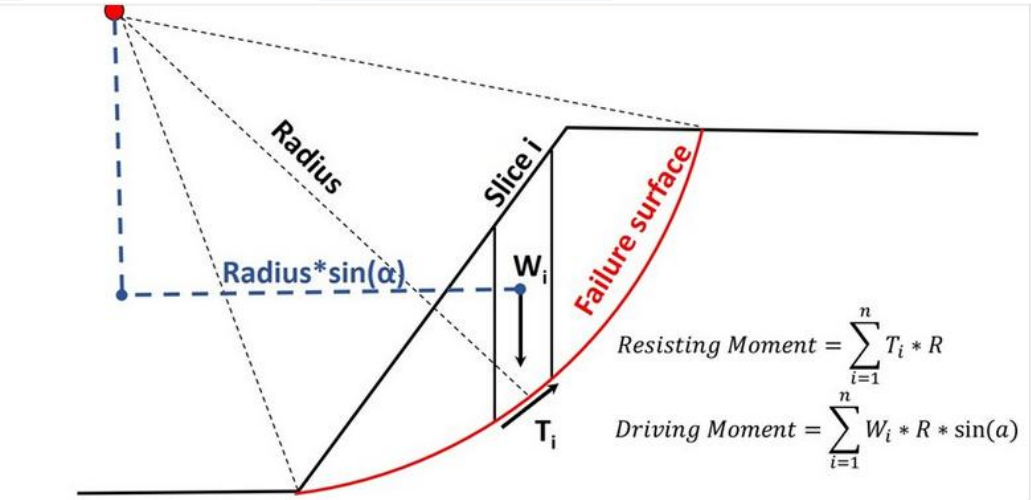
ب - القوى الشاقولية بين الشرائح مهملة (Vi=Vi-1=0) (الشكل 13-4)



الشكل 13-4 : القوى المؤثرة على شريحة وفق طريقة بيشوب المبسطة

يتم في هذه الطريقة حساب عامل الأمان عن طريق تحقيق ثلاثة معادلات توازن :

- توازن للعزوم لكامل سطح الانهيار بالنسبة لمركز الدائرة o
- توازن القوى الأفقية على كامل سطح الانهيار
- توازن القوى الشاقولية لكل شريحة



الشكل 14-4 : عزوم القوى اللمانعة للانزلاق والقوى الزالقة بطريقة بيشوب المبسطة

من الشكل 14-4 ، يمكن حساب عامل الأمان للمنحدر بالعلاقة :

$$F_s = \frac{\sum T_i \,.\, R}{\sum W \,.\, R . \sin\alpha} = \frac{\sum T_i}{\sum W \,.\, \sin\alpha} \qquad (4-18)$$

تعطى قوى القص على قاعدة كل شريحة Ti بالعلاقة :

$$T_i = C' \,.\, L_i + N_i' \,.\, \tan\phi' = C' \,.\, L_i + (\overline{N}_i - u_i \,.\, L_i) \,.\, \tan\phi' \qquad (4-19)$$

L طول قوس قاعدة الشريحة والذي يتم تقريبه إلى مستقيم

بتعويض Ti قيمة في علاقة Fs نحصل على :

$$F_s = \frac{\sum C'.L_i + (\overline{N}_i - u.L).\tan\phi'}{\sum W.\sin\alpha} \qquad (4-20)$$

تعطى قوى القص على قاعدة كل شريحة بالعلاقة :

$$T = \frac{C.L + N'.\tan\phi}{F_s} = \frac{C.L + (\overline{N} - u.L).\tan\phi'}{F_s}$$

L طول قوس قاعدة الشريحة والذي يتم تقريبه إلى مستقيم

من أجل الحصول على قيمة $\overline{N}$ نأخذ معادلة توازن للقوى الشاقولية المؤثرة على الشريحة:

$$\sum F_V = 0 \Leftrightarrow W - T.\sin\alpha - \overline{N}.\cos\alpha = 0$$

$$\Rightarrow W - \frac{1}{F_s}\left[C'.L_i + (\overline{N} - u.L).\tan\phi'\right]\sin\alpha - \overline{N}.\cos\alpha = 0$$

$$\Rightarrow \overline{N}.(\cos\alpha + \frac{1}{F_s}\tan\phi'.\sin\alpha) = W - \frac{1}{F_s}(C'.L - u.L.\tan\phi').\sin\alpha = 0$$

$$\Rightarrow \overline{N} = \frac{W - \frac{1}{F_s}(C'.L - u.L.\tan\phi').\sin\alpha}{(\cos\alpha + \frac{1}{F_s}\tan\phi'.\sin\alpha)} \qquad (4-21)$$

بتعويض $\overline{N}$ بقيمتها في علاقة Fs، نحصل على :

$$F_s = \frac{\dfrac{\sum C'.L_i\cos\alpha_i + (W_i - u_{i.}.L_{i.}.\cos\alpha_i)\tan\phi'}{\sum(\cos\alpha_i + \frac{1}{F_s}\tan\phi'.\sin\alpha_i)}}{\sum W_i.\sin\alpha_i} \qquad (4-22)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة أن عامل الأمان Fs موجود في الطرفين ولذلك يتم الحل بطريقة التقريب المتتالي.

4.5.4.2.3 طريقة جانبو المبسطة

تم تطوير هذه الطريقة عام 1956. يتم في هذه الطريقة حساب عامل الأمان بتحقيق التوازن العام للقوى الأفقية وللقوى الشاقولية وإهمال التوازن العام للعزم.

فرضيات طريقة جانبو المبسطة

أ - سطح الانزلاق لا على التعيين

ب - القوى المؤثرة على الشريحة مماثلة للقوى في طريقة بيشوب المعدلة

يعطى عامل الأمان بالعلاقة التالية :

$$F_s = \frac{\sum\left[C'.L_i + (\overline{N}_i - u_{i.}.L_{i.})\tan\phi'\right]\cos\alpha_i}{\sum \overline{N}_i.\sin\alpha_i} \qquad (4-23)$$