

"A Comparison of Several Methods in a Rock Slope Stability Analysis in "Syria"

مقارنة طرق متعددة في تحليل توازن منحدر صخري في سورية"

Zain Alabideen Kinan *

Member of technical staff - Department of Geotechnical Engineering - Faculty of Civil Engineering - Al-Baath University – Homs – Syria.

Soumis le : 23 /05/2016.

Révisé le : 12/03/2017

Accepté le : 30/05/2017

الملخص

يستخدم هذا البحث بعض الطرق التقليدية والعديدية في تحليل توازن المنحدرات الصخرية بالإضافة إلى الإسقاط الستيريوغرافي، وه ويتركز بشكل أساسي على التحليل الكينماتيكي باستخدام مبادئ الإسقاط الستيريوغرافي، من أجل تحديد آليات الانهيار المتوقعة في المنحدرات الصخرية. يوظف هذا البحث الطرق والمبادئ المذكورة في تحليل توازن بعض المنحدرات الصخرية في منجم من نوع الحفر المفتوحة في سورية، هو منجم خنيفيس للفوسفات. تكمن أهمية هذا البحث في إبرازه لدور التحليل الكينماتيكي في اختصار الجهود المبذولة للتحقق من أمان المنحدرات الصخرية وفي التخطيط الآمن لأعمال الحفر وإنشاء المنحدرات، منخل الاختيارات اتجاهات أمانة، كما تبرز أهمية هذا البحث في تقديم بعض الوسائل المفيدة من مخططات وعلاقات تسهل على المهندسين العمل في الموقع عند التعامل مع المنحدرات الصخرية وتسرع من عملية اتخاذ القرار فيما يتعلق بعلاقة عامل الأمان مع ارتفاعات المنحدرات وميولها وميول الانقطاعات الموجودة فيها، كتحديد عامل أمان منحدر قائم، أو تحديد الارتفاع المسموح به لمنحدر أو زاوية الميل المسموح بها لوجه المنحدر.

الكلمات المفتاحية: منحدر صخري – طرق تقليدية وعديدية – تحليل كينماتيكي.

Abstract

This research uses some traditional methods, numerical methods and stereographic projection in rock slope stability analysis. It mainly concentrates on kinematical analysis using the principles of stereographic projection, in order to determine the expected failure mechanisms of rock slopes. This research uses the mentioned methods and principles in the stability analysis of some rock slopes in an open pit mine in Syria, that is Khneifees phosphate mine.

The importance of this research is that it shows the role of kinematical analysis in minimizing efforts when verifying the safety of rock slopes in site, and when performing safe designs of excavating works and slope constructing by choosing safe directions. Also, the importance of this research is that it presents some useful charts and equations to facilitate the site work of engineers when dealing with rock slopes, and speed up making decisions about the relationship between the safe factor and slope height, slope dip or discontinuity dip, such as determining the safe factor of existent slope or determining the allowable height or dip of the slope.

Key Words: Rock Slope - Traditional and Numerical Methods - Kinematic Analysis.

*Corresponding author kinan.zain@hotmail.com

1 مقدمة

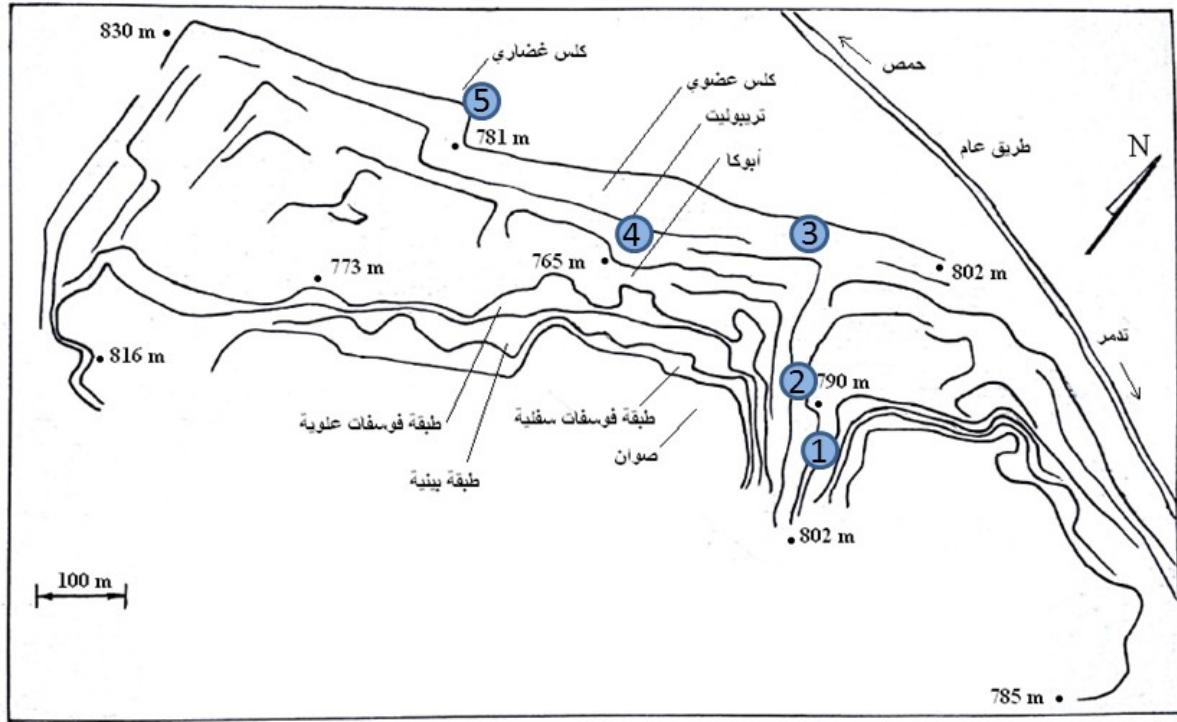
إن الموقع المختار للدراسة في هذا البحث هو مناجم خنيفيس للفوسفات، وهي تقع في وسط البادية السورية على السفح الجنوبي الغربي لجبل الأبت، وتبعد عن مدينة حمص 145 km نحو الشرق، وعن مدينة تدمر 60 km نحو الجنوب الغربي، وهي مصدر رئيس للفوسفات ويوفر دخلاً كبيراً للاقتصاد السوري، حيث يبلغ الإنتاج السنوي 800000 t، وتعتبر مناجم خنيفيس الأقدم في إنتاج الفوسفات في سورية حيث بُدئ باستثمارها منذ عام 1971 م وما زالت قيد الاستثمار حتى الآن، وهي تحوي كميات كبيرة من الفوسفات، قسم منها قريب من سطح الأرض على بعد 5 m تقريباً، والقسم الآخر يصل عمقه إلى أكثر من 70 m تحت سطح الأرض الطبيعية [1]، وإن استخراج هذه الكميات من الفوسفات يعد اقتصادياً ما لم يتجاوز عمقها حداً معيناً حيث تصبح كلفة حفر وترحيل الصخور التي تغطيها كبيرة؛ ومن جهة أخرى فإن عامل الأمان أثناء عمل آلات الحفر والعمال في المنجم ينبغي أن يراعى، حيث يعد هذا المنجم من نوع الحفر المفتوحة التي تحوي منحدرات صخرية يزداد ارتفاعها كلما تقدم العمل واستمر الحفر - حيث يحوي المنجم منحدرات صخرية تصل ارتفاعاتها إلى 50 m تقريباً -، كما أن ظروف العمل والناحية الاقتصادية في التنفيذ تقتضي أن تكون ميول هذه المنحدرات عن الأفق كبيرة؛ مما يقلل من عوامل أمان توازن هذه المنحدرات وخاصة بازدياد الارتفاعات مع تقدم العمل؛ ومن هنا كانت الحاجة الماسة إلى دراسة توازن المنحدرات الصخرية في هذه المناجم.

لقد تبين أن المقاطع الجيولوجية متشابهة في كل نقاط الموقع مع اختلاف سماكات الطبقات من نقطة إلى أخرى حسب ميول هذه الطبقات واتجاهاتها [2] و [3]، ويبين الشكل (1) العمود الطبقي للموقع المدروس.

وقد تم رسم مخطط طبوغرافي عام للموقع، الشكل (2)، حيث تمثل الخطوط الظاهرة في المخطط حدود المنحدرات، وتمثل الأرقام الموضوعية ضمن دوائر مواضع بعض المنحدرات المختارة للدراسة.

تربة حضارية زراعية بسماكة 0.5-0.8 m	
صخر كلسي حضاري بسماكة 9-42 m	
صخر كلسي عضوي بسماكة 9-13 m	
تريبوليت أبيض أو رمادي بسماكة 13-21 m	
أبوكا مع وجود عروق صوانية أحياناً بسماكة 6-7 m	
طبقة فوسفات علوية بسماكة 0.3-7 m	
طبقة بينية كلسية حضارية فوسفاتية مع تداخلات صوانية بسماكة 0.5-2 m	
طبقة فوسفات سفلية بسماكة 5-12.7 m	
صوان قاعدي غير محدد السماكة	

الشكل (1): عمود طبقي لمنطقة خنيفيس يبين تسلسل الطبقات الصخرية



الشكل (2): مخطط طبوغرافي يظهر حدود المنحدرات وأنواع الصخور المتكشفة على السطح وارتفاعات بعض النقاط في المنجم عن سطح البحر

2 المواد والطرق:

نبين في هذه الفقرة أنواع الصخور المدروسة التي تم تحديدها من الاستكشافات الحقلية، ومن المعلومات المتوفرة في المراجع [1] و [3] و [4]، وهي كما يأتي:

الصخر الكلسي الغضاري "Clayey Limestone": صخر رسوبي كلسي قاس، من الصخور الكربوناتها ذات المنشأ الكيميائي.

الصخر الكلسي العضوي "Organic Limestone": صخر رسوبي يتكون من أجزاء القواقع والبقايا العضوية المتجمعة بملاط كلسي.

صخر التريبوليت "Trepolite": صخر رسوبي سيليسي يتألف بمعظمه من السيليكا SiO_2 (حببات سيليسية كروية الشكل أبعادها 0.01 - 0.02 mm)، فلزاته هي الأوبال وأحياناً الكالسيدوان، كما يحوي أحياناً بعض فلزات الغضار والكوارتز والصفاح.

صخر الأوبوكا "Opoka": صخر رسوبي مساماته مجهرية مؤلف من سيليس غير مبلور (فلز الأوبال) مع شوائب غضارية وهياكل عضويات.

الصوان "Chert": صخر رسوبي سيليسي كيميائي (لا حطامي) قاس يتكون من فلزات الكالسيدوان والأوبال وهو غير مبلور، وقد يحوي بعض السيليكا المبلورة (الكوارتز).

الفوسفات "Phosphate": صخر رسوبي حطامي (متماسك أو مفكك) يحتوي على مركبات الفوسفور، ويتكون بشكل رئيس من فلز الأباتيت، صيغته الكيميائية: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{OH}, \text{F}, \text{Cl}]$ (فلور كلور فوسفات الكالسيوم).

وقد أجريت التجارب المخبرية اللازمة على عينات من هذه الصخور تم إحضارها إلى مخبر ميكانيك التربة والصخور في كلية الهندسة المدنية بجامعة البعث - حمص - سوريا عام 2014، حيث تم تحديد الأوزان الحجمية الرطبة والرطوبات الموافقة، كما أجريت تجارب القص باستخدام جهاز هوك لاختبار مقاومة العينات الصخرية على القص، المبين في الشكل (3)، والذي طوره البروفسور هوك في لندن، اعتماداً على الفكرة التي قدمها: [44] Hoek and Bray (1981). وكانت مواصفات الصخور المدروسة كما في الجدول (1).



الشكل (3): جهاز هوك لقص الصخور في مخبر جامعة البعث – حمص (2014)

الجدول (1): مواصفات الصخور المدروسة

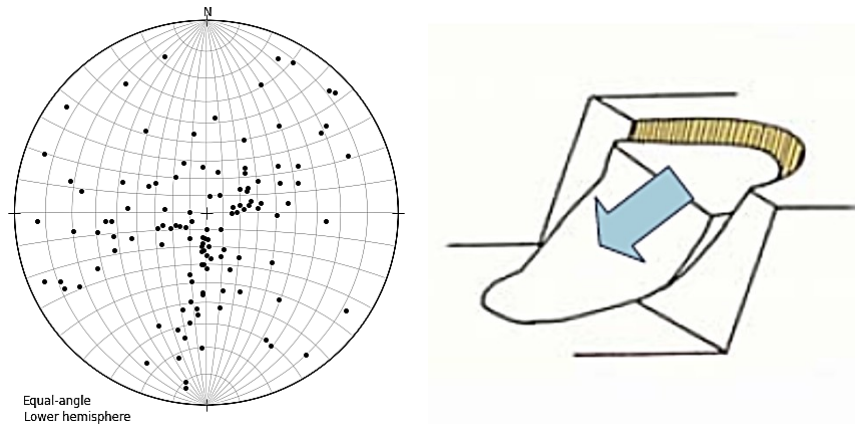
نوع الصخر	الوزن الحجمي الرطب γ [kN/m ³]	الرطوبة w %	زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ [°]	التماسك C [kPa]
الكلس الغضاري	21	2	39	230
الكلس العضوي	24	1	44	300
التريبوليت الأبيض	18	5	40	50
التريبوليت الرمادي	20	4	40	75
الأبوكا	20	4	27	47
الفوسفات	23	2	42	280
الصوان	26	1	42	230

3 الشروط الكينيماتيكية (الحركية) لانتهيار المنحدرات الصخرية:

- إن التمثيل الستيريوغرافي للشروط البنيوية اللازمة لحدوث انهيار في منحدر صخري يتم برسم مخطط ستيريو يتضمن:
- الدائرة العظمى التي تمثل مستوي وجه المنحدر.
 - دائرة الاحتكاك التي تمثل زاوية الاحتكاك للانقطاعات في الكتلة الصخرية.
 - الأقطاب الممثلة للانقطاعات وخطوط الكونتور التي توضح كثافات تركيز الأقطاب ضمن مخطط الستيريو.
 - الدوائر العظمى الممثلة للمستويات الرئيسية لمجموعات الانقطاع المكتشفة على وجه المنحدر (أي الدوائر العظمى الممثلة للمستويات التي توافق أقطابها مراكز مناطق تركيز الأقطاب على مخطط الستيريو).
- بعد هذا التمثيل يمكن أن يتم إجراء مناقشة للشروط الكينيماتيكية للانتهيار.
- توضح الأشكال من (4) إلى (7) التمثيل الستيريوغرافي لكل حالة من الحالات الأربع الرئيسية لأشكال الانتهيار.

3.1 حالة الانزلاق الدائري:

حتى تتوفر الإمكانية الحركية لحدوث الانزلاق الدوراني على سطح انهيار قص دائري يجب أن تكون الأقطاب الممثلة للانقطاعات مبعثرة، الشكل [5](4).



الشكل (4): التمثيل الستيريوغرافي لظاهرة الانزلاق الدائري

3.2 حالة الانزلاق المستوي:

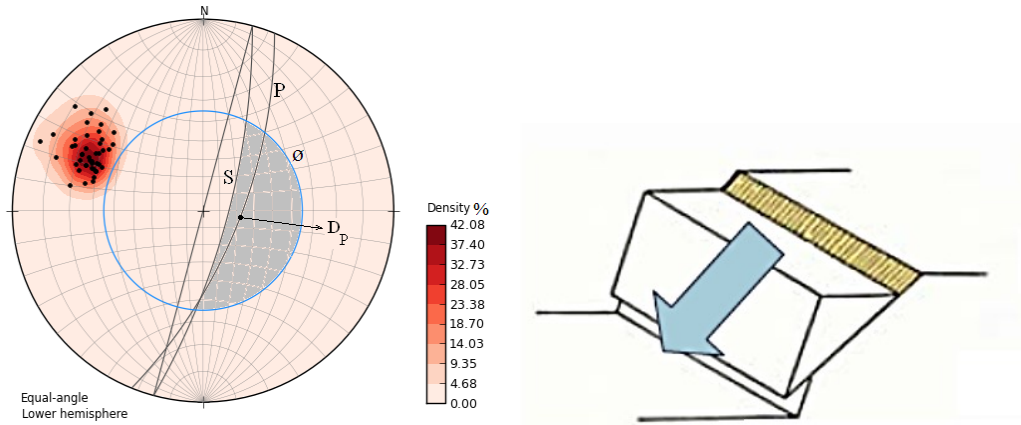
في حالة الانتهيار المستوي يجب أن تتحقق الشروط الأساسية الثلاثة الآتية حتى تتوفر الإمكانية الحركية للانتهيار [6]:

- 1 - يجب أن يكون اتجاه ميل مستوي الانزلاق مماثلاً لاتجاه ميل وجه المنحدر مع فارق لا يتجاوز $\pm 20^\circ$ تقريباً.
- 2 - يجب أن يتكشف سطح الانزلاق عند وجه المنحدر.
- 3 - يجب أن يكون ميل مستوي الانزلاق أكبر من زاوية الاحتكاك الداخلي لهذا المستوي.

تم إهمال وجود عوامل أخرى في هذا الإجراء البسيط، مثل تأثير الماء وضرورة وجود سطوح تحرر جانبية.

يوضح الشكل (5) الشروط الكينيماتيكية لحدوث الانزلاق المستوي. هناك تركيز واضح للأقطاب الممثلة للانقطاعات، تم اعتماد مركز هذا التركيز قطباً للمستوي الرئيس P لهذه المجموعة من الانقطاعات.

يجب أن تتوضع النقطة D_p الممثلة لشعاع ميل مستوي الانقطاع P ضمن المنطقة المظللة المحصورة بين الدائرة العظمى الممثلة لوجه المنحدر S ودائرة الاحتكاك $\emptyset$.



الشكل (5): التمثيل الستيريوغرافي لظاهرة الانزلاق المستوي

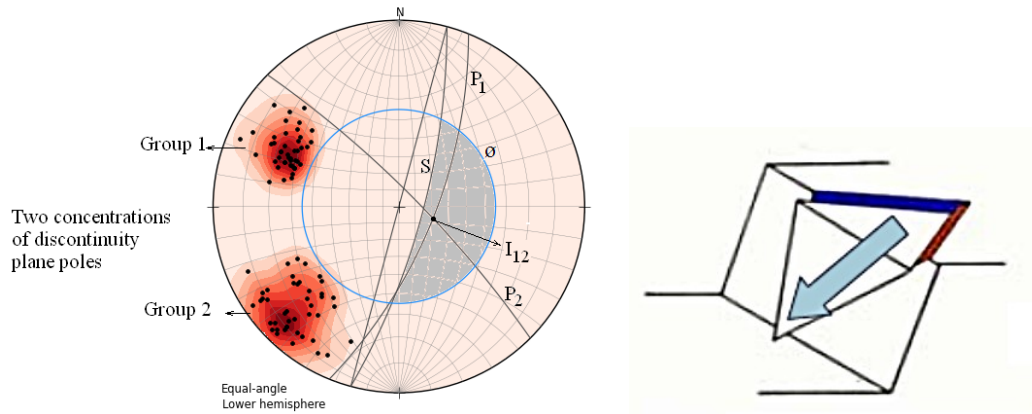
3.3 حالة الانزلاق الموشوري:

حتى تتوفر الإمكانية الحركية لحدوث الانزلاق الموشوري يجب أن يتحقق الشرطان الآتيان [7]:

- 1 - أن يتكشف خط التقاطع بين الموشورين ضمن وجه المنحدر.
- 2 - أن يكون ميل خط التقاطع أكبر من زاوية الاحتكاك الداخلي لسطحي الانقطاع.

على الرغم من أن هذا الإجراء البسيط لا يراعي اختلاف زوايا احتكاك لسطحي الانقطاع والتأثير المحتمل لوجود الماء إلا أنه يعتبر مقبولاً كتقدير أولي [8].

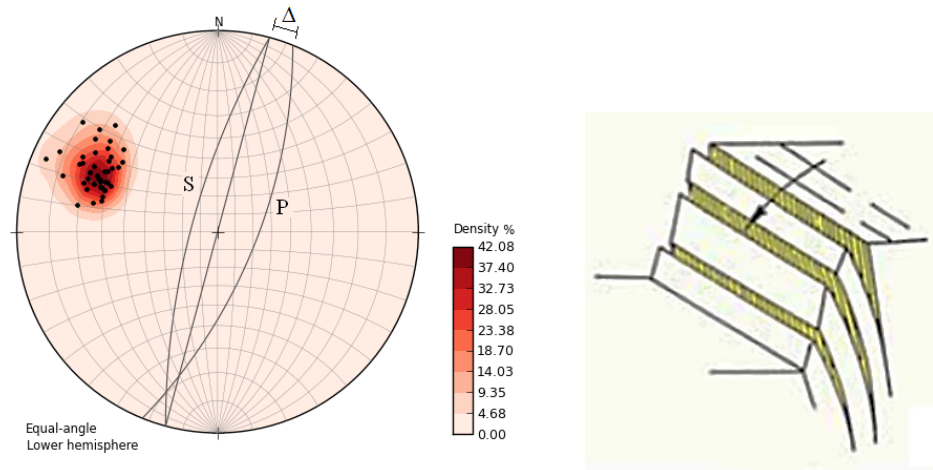
حتى يحدث الانزلاق الموشوري يجب أن تقع النقطة I_{12} الممثلة لخط التقاطع بين مستويي الانقطاع الممثلين للموشور ضمن المنطقة المظللة المحصورة بين الدائرة العظمى الممثلة لوجه المنحدر S ودائرة الاحتكاك ϕ ، الشكل (6).



الشكل (6): التمثيل الستيريوغرافي لظاهرة الانزلاق الموشوري

3.4 حالة الانقلاب:

يمكن أن يحدث الانقلاب عندما يكون اتجاه ميل وجه المنحدر بالاتجاه المعاكس تقريباً لاتجاه ميل المجموعة الرئيسية للانقطاعات في الكتلة الصخرية [7]، ولكن الانقلاب لن يحدث عندما يكون الفرق Δ بين اتجاه امتداد وجه المنحدر واتجاه امتداد المستوي الممثل لمجموعة الانقطاعات الرئيسية كبيراً نسبياً، (أكبر من $\pm 20^\circ$ تقريباً)، الشكل (7). وقد تم اختيار الرقم $\pm 20^\circ$ لكي يكون متوافقاً مع الرقم المعتمد في شرط الانزلاق المستوي، وهو أن يكون اتجاه ميل مستوي الانقطاع مماثلاً لاتجاه ميل وجه المنحدر مع فارق بسيط لا يتجاوز $\pm 20^\circ$ ، وكذلك في شرط الانزلاق الموشوري، وهو أن يكون اتجاه ميل خط التقاطع بين مستويي الانقطاع مماثلاً لاتجاه ميل وجه المنحدر مع فارق بسيط لا يتجاوز $\pm 20^\circ$.



الشكل (7): التمثيل الستيريوغرافي لظاهرة الانقلاب

4 الإجراء العام المقترح للتحليل الكينيماتيكي "General Procedure":

تم اقتراح إجراء عام للتحليل الكينيماتيكي لتوازن المنحدرات الصخرية، مؤلف من الخطوات الآتية:

- 1 - تنفيذ القياسات الحقلية لتحديد البيانات الجيولوجية المتعلقة بالانقطاعات في الكتلة الصخرية وبوجه المنحدر المدروس.
- 2 - تمثيل البيانات المذكورة على شبكة ستيريو لإنشاء مخطط ستيريو يوضح الدوائر العظمى الممثلة للانقطاعات.
- 3 - رسم مخطط ستيريو للأقطاب الممثلة للانقطاعات.
- 4 - تفحص مخطط الستيريو المبين لتوزيع الأقطاب، فإذا كانت هذه الأقطاب مبعثرة بشكل كبير ضمن مخطط الستيريو فإن هذا يدل على إمكانية حدوث الانزلاق الدائري، وهنا يتم الانتقال لإجراء تحليل توازن بالطرق التقليدية أو العددية لتحديد عامل أمان المنحدر. وإذا لم تكن الأقطاب مبعثرة بل تتجمع وتتركز في منطقة أو أكثر من مخطط الستيريو فيتم الانتقال للخطوة التالية.
- 5 - إعداد مخطط خطوط كونتور لكثافات تركيز الأقطاب المذكورة.
- 6 - تحديد المستوي الرئيس لكل مجموعة من مجموعات الانقطاعات من خلال رسم الدائرة العظمى الممثلة لهذا المستوي بحيث يكون قطبه واقعاً في مركز منطقة التركيز الرئيس لأقطاب هذه المجموعة.
- 7 - رسم دائرة الاحتكاك ϕ بنصف قطر يوافق الزاوية $0-90^\circ$ ، حيث ϕ هي زاوية الاحتكاك لسطوح الانقطاع في الكتلة الصخرية.
- 8 - تحديد الأشعة الممثلة لميول المستويات الرئيسة للانقطاعات، وتحديد خطوط التقاطع بين هذه المستويات.
- 9 - رسم الدائرة العظمى الممثلة لوجه المنحدر إذا كان معلوماً.
- 10 - تحديد المنطقة الخطرة التي تحقق شروط الانزلاق المستوي والموشوري والتي تكون محصورة بين وجه المنحدر ودائرة الاحتكاك، ومناقشة الشروط الكينيماتيكية اللازمة لحدوث كل من نوعي الانزلاق المستوي والموشوري والانقلاب، والحكم على المنحدر هل هو آمن أم لا، وذلك وفق ما يأتي:
- يكون الانزلاق المستوي ممكناً إذا وقع شعاع الميل لمستوي الانقطاع في المنطقة الخطرة المذكورة.
- يكون الانزلاق الموشوري ممكناً إذا وقع خط التقاطع بين مستويي الانقطاع المشكلين للموشور في المنطقة الخطرة المذكورة.
- يكون الانقلاب ممكناً إذا وقع شعاع الميل لمستوي الانقطاع الرئيس المشكل للأعمدة الصخرية المنقلبة، في الاتجاه المعاكس لاتجاه ميل وجه المنحدر أو بحيث يكون اتجاه امتداد هذه الطبقات - الأعمدة - الصخرية مماثلاً لاتجاه امتداد وجه المنحدر مع فارق بسيط ($\pm 20^\circ$).
- 11 - إذا لم يكن وجه المنحدر معلوماً ويطلب تحديد الميل واتجاه الميل الآمنين لهذا الوجه تتم مناقشة احتمالات حدوث كل من نوعي الانزلاق المستوي والموشوري كما يأتي:

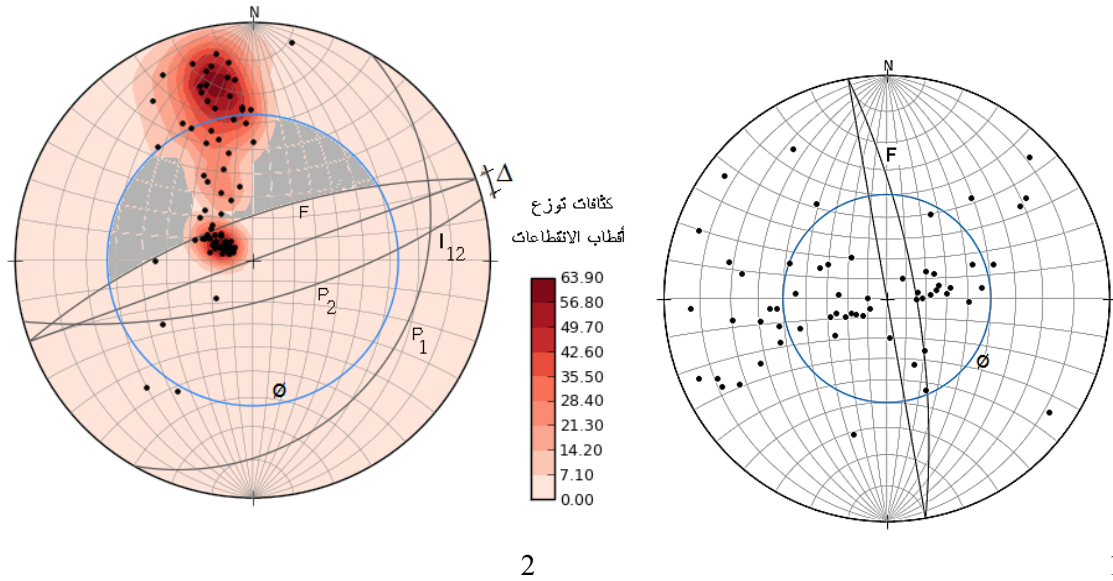
- يتم تحديد شعاع الميل لكل مستوي انقطاع رئيس؛ فإذا وقع داخل دائرة الاحتكاك فهناك احتمال لحدوث الانزلاق المستوي، فيتم رسم مخطط يمثل فيه مستوي الانقطاع الرئيس المذكور ومستويان يختلفان عنه باتجاه الميل بمقدار ($\pm 20^\circ$)، وينتج عن ذلك تحديد المنطقة الخطرة لتوضع شعاع ميل وجه المنحدر. وهكذا ترسم المناطق الخطرة لكل مستويات الانقطاع الرئيسة التي تبين أنها خطيرة.
- يتم تحديد خط التقاطع بين كل مستويي انقطاع رئيسين ممثلين لمجموعات الانقطاع الرئيسة؛ فإذا وقع داخل دائرة الاحتكاك فهناك احتمال لحدوث الانزلاق الموشوري، وعند ذلك يتم إجراء مناقشة شبيهة بالمناقشة السابقة في حالة الانزلاق المستوي، أي يتم رسم المنطقة الخطرة التي يكون فيها اتجاه الميل يختلف بمقدار ($\pm 20^\circ$) عن اتجاه ميل خط التقاطع. وهكذا ترسم المناطق الخطرة لكل خطوط التقاطع التي تبين أنها خطيرة.
- 12 - يستعمل المخطط الناتج عن الخطوة السابقة لاختيار ميل واتجاه ميل آمنين لوجه المنحدر من خلال اختيار النقطة الممثلة لشعاع ميل وجه المنحدر المختار خارج المناطق الخطرة التي توافق حالات الانزلاق المستوي والانزلاق الموشوري الممكنة كينماتيكياً والتي تم تحديدها في الخطوة السابقة.
- 13 - بعد اختيار ميل واتجاه ميل وجه المنحدر وفق الخطوة السابقة يتم رسم الدائرة العظمى لوجه المنحدر المختار، ويتم التحقق من أن هذا المنحدر آمن ضد الانقلاب من خلال مقارنة الدائرة العظمى المذكورة مع الدائرة العظمى للمستوي الممثل لكل مجموعة انقطاع رئيسة، والتأكد من عدم توفر الشروط الكينماتيكية اللازمة لحدوث الانقلاب؛ وإلا فيتم التغيير واختيار ميل واتجاه ميل جديدين لوجه المنحدر.

5 التحليل الكينماتيكي لبعض المنحدرات الصخرية "Kinematical Analysis of Some Rock Slopes":

تم توظيف مبادئ التحليل الكينماتيكي في دراسة توازن بعض المنحدرات، وقد تم استخدام برنامج OpenStereo 0.1.2 [9](2015) للإسقاط الستيريو غرافي لرسم مخططات الستيريو المطلوبة.

المنحدر الأول من صخر التريبوليت والثاني من صخر الأبوكا، ويشار إلى موضع المنحدرين الأول والثاني بالرقمين 1 و 2 في المخطط المبين في الشكل (2) الذي يوضح مواضع المنحدرات المدروسة في منجم خنيفيس.

إن تبعثر الأقطاب وتوزعها العشوائي في مخطط توزع الأقطاب الخاص بالمنحدر الأول، الشكل (1-8)، وعدم وجود تركيز واضح لها في موضع محدد على المخطط يشير إلى أن آلية الانهيار المحتملة لهذا المنحدر هي الانزلاق الدائري.



الشكل (8): مخططا الستيريو للمنحدرين الأول والثاني

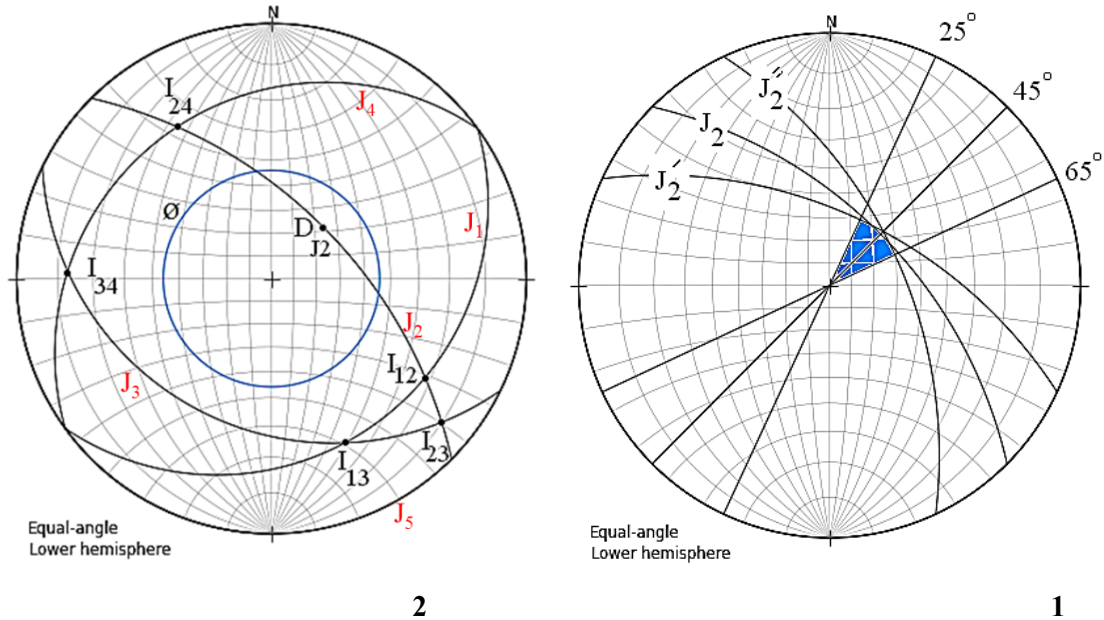
إن وقوع كل من الدائرتين العظميين P_1 و P_2 ، الشكل (2-8)، الممثلين لمجموعي الانقطاعات السائنتين في الكتلة الصخرية المشكلة للمنحدر الثاني جهة معاكسة لجهة وجه المنحدر F يشير إلى عدم إمكانية حدوث الانزلاق المستوي على هذين المستويين، وإن وقوع النقطة الممثلة لخط الانقطاع بينهما I_{12} خارج المنطقة المظلمة في المخطط يعني عدم إمكانية حصول انهيار موشوري. وإن وقوع الدائرة P_2 بجهة معاكسة لجهة ميل وجه المنحدر F مع كون اتجاه امتداد P_2 يختلف عن اتجاه امتداد F بقيمة صغيرة $\Delta=5^\circ$ يشير إلى إمكانية حصول انهيار بالانقلاب إذا دلت المؤشرات والملاحظات الحقلية على ذلك.

تم أيضاً إجراء دراسة لمنحدر ثالث من الكلس العضوي- وهو مشار إليه بالرقم 3 في مخطط المنجم المبين في الشكل (2) -على كامل امتداده في الموقع الذي يصل إلى 300 m تقريباً، وذلك لتحديد ميل واتجاه ميل آمنين لوجه المنحدر المدروس عند توسيع حفرة المنجم المفتوح، فتم رسم المستويات الرئيسة لمجموعات الانقطاعات الخمس - أي الدوائر العظمى التي تمثل المستويات التي تنطبق أقطابها على مراكز مناطق التركيز الرئيسة للأقطاب. إن كل خطوط التقاطع I_{12} و I_{13} و I_{24} و I_{23} و I_{34} بين المستويات الرئيسة للانقطاعات في المنحدر الثالث، الشكل (1-9)، لم تقع ضمن دائرة الاحتكاك، وهذا يعني أن الشروط الكينيماتيكية اللازمة لحصول الانزلاق

الموشوري غير محققة. وإن جميع أشعة الميل للمستويات الرئيسة الممثلة لمجموعات الانقطاعات لا تقع ضمن دائرة الاحتكاك باستثناء D_{J_2} ، وهذا يعني أن هناك إمكانية واحدة فقط لحدوث الانزلاق المستوي على المستوي $J_2(045^\circ/58^\circ)$.

إن أحد الشروط الكينيماتيكية لحدوث الانزلاق المستوي هو أن يكون اتجاه ميل مستوي الانزلاق مماثلاً لاتجاه ميل وجه المنحدر مع فارق بسيط لا يتجاوز $\pm 20^\circ$ تقريباً، ولذلك تم رسم مستويين $J_2'(025^\circ/58^\circ)$ و $J_2''(065^\circ/58^\circ)$ في الشكل (2-9) لحصر منطقة خطرة لتوضع شعاع ميل وجه المنحدر.

إذا تكشف مستوي الانزلاق J_2 ضمن وجه المنحدر فإن شعاع ميل وجه المنحدر سيقع في المنطقة الحرجة - أي المساحة المظلمة في الشكل (2-9) -. وهكذا نكون قد حصلنا على مخطط يفيد في الموقع عند عمليات التوسعة لحفرة المنجم، فبعد اختيار ميل واتجاه ميل وجه المنحدر المراد حفره يتم تمثيل شعاع ميل وجه المنحدر على مخطط الستيريو المبين في الشكل (2-9)، للتأكد من أن هذا الشعاع لا يقع ضمن المنطقة الحرجة، وهذا يعني أن المنحدر المراد إنشاؤه آمن.



الشكل (9): 1 - مخطط الستيريو للمنحدر الثالث

2 - مخطط يبين المنطقة الخطرة للانزلاق المحتمل على المستوي J_2

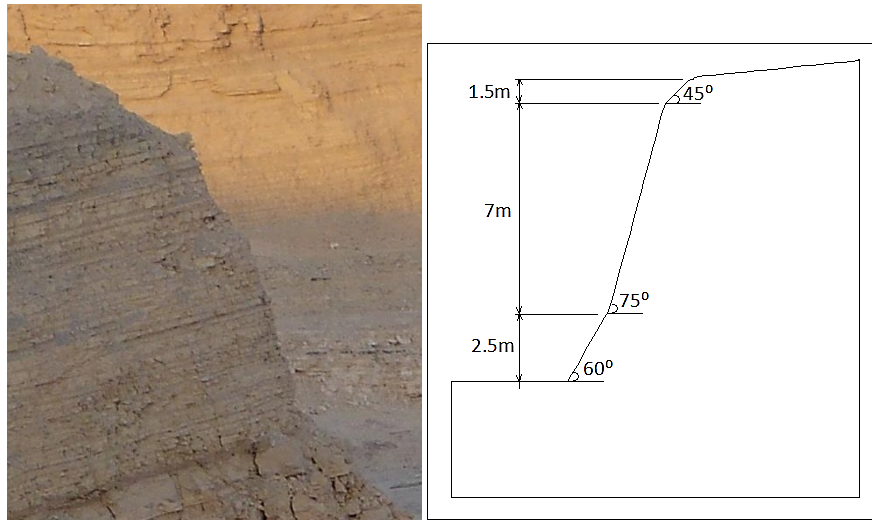
6 تحليل توازن منحدر من صخر التريبوليت بطرق تقليدية وعددية مختلفة:

يحدث انهيار المنحدرات الصخرية عادة على طول الانقطاعات البنوية الموجودة في الكتل الصخرية، ويقصد بهذه الانقطاعات مستويات الضعف مثل الصدوع والفوالق ومستويات التطبق وغيرها، ولكن في حالة الكتل الصخرية المتصدعة بشكل كبير والمعرضة للتجوية تكون سطوح الانهيار بالانزلاق منحنية غالباً كما في حالة المنحدرات الترابية [7]. ومن خلال المشاهدة الحقلية تبين أن صخر التريبوليت في مناجم خنيفيس متصدع بشكل كبير، وشكل الانهيار المتوقع فيه هو الانزلاق الدائري.

تمت دراسة المنحدر المشار إليه بالرقم 4 في الشكل (2)، وبما أن هذا المنحدر الصخري يحوي انقطاعات كثيرة وتباعاتها صغيرة بالمقارنة مع أبعاد هذا المنحدر، فقد كان هناك إمكانية لحدوث انزلاق دائري شبيه بالانزلاق الذي يحصل في التربة، ولهذا تم استخدام برنامج [10] GeoStudio 2007 و [11] الذي يدرس توازن المنحدرات بالطرق التقليدية وبطريقة عديدة هي طريقة العناصر المحدودة كما تجدر الإشارة إلى أن الانقطاعات في الكتل الصخرية المدروسة كانت مغلقة، وهذا يسمح باعتماد فرضية أساسية عند الحل بالطرق المذكورة وبالبرنامج المذكور وهي فرضية الوسط المستمر [12]. إن طريقة العناصر المحدودة FEM صالحة لدراسة الأوساط المستمرة، وقد تم التأكد من أن الانقطاعات في الكتل الصخرية المدروسة كانت مغلقة، أي كأنها كتل امسبينية الصخر عند الانقطاعات دون وجود مواد مألثة تؤدي إلى اختلاف خواص الوسط وجعل الكتلة الصخرية مؤلفة من أوساط غير مستمرة. لقد تمت نمذجة المنحدر وتحليل توازنه تحت تأثير قوة الثقالة (وزنه الذاتي)، دون وجود ماء لأن السطح الحر للماء عميق جداً ولا أثر له ضمن جسم المنحدر، باستخدام البرنامج الفرعي SLOPE/W من برامج GeoStudio، بالطرق المختلفة (طرق التحليل الحدي وطريقة العناصر المحدودة)، وقد تم تحديد الشكل الهندسي للمنحدر المدروس، الشكل (10)، وتوصيف سلوك الصخر باستخدام نموذج مور-كولومب، وإعطاء المادة (الصخر) الموصفات الآتية: - الوزن الحجمي: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

- زاوية الاحتكاك الداخلي: $\phi = 40^\circ$ والتماسك: $c = 50 \text{ kPa}$

الارتفاع الكلي للمنحدر: (11 m)، ويتألف من ثلاثة أجزاء: ارتفاع الجزء السفلي: (2.5 m) وزاوية ميله: (60°) ، وارتفاع الجزء الأوسط: (7 m) وزاوية ميله: (75°) ، وارتفاع الجزء العلوي: (1.5 m) وزاوية ميله: (45°) .



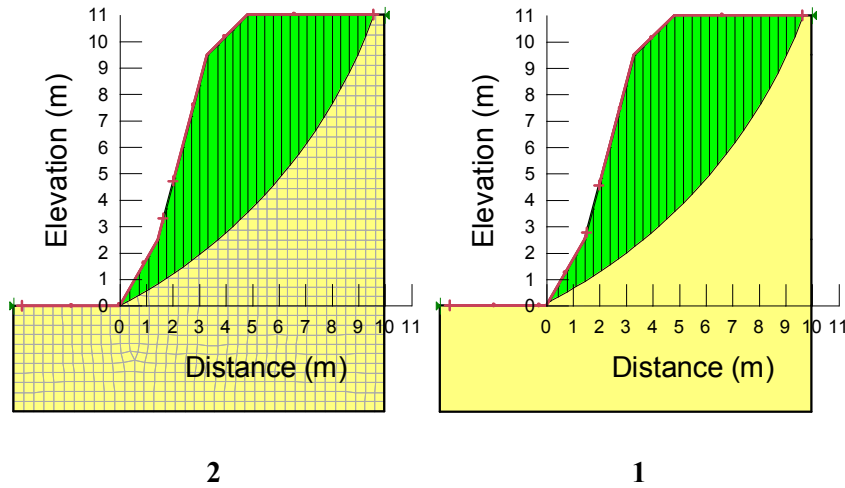
الشكل (10): الشكل الهندسي للمنحدر المدروس من صخر التريبوليت - المنحدر الرابع

يبين الجدول (2) قيم عوامل الأمان الناتجة عند الحل بطرق تقليدية مختلفة، ويظهر في الشكل (11-1) سطح الانزلاق الحرج الناتج. لتحليل الإجهادات بالاعتماد على طريقة العناصر المحدودة تم استخدام البرنامج الفرعي SIGMA/W من برنامج GeoStudio، حيث تحسب الإجهادات بتأثير الوزن الذاتي للصخر بتحديد نوع التحليل "Insitu" الذي يحدد الإجهادات الممثلة للإجهادات الفعلية في الموقع، وبعد تعريف الإجهادات يمكن أن تتم متابعة التحليل ضمن البرنامج الفرعي SLOPE/W. يبين الشكل (11-2) سطح الانزلاق الحرج الناتج عند الحل بهذه الطريقة، وقد تم الحصول على القيمة الآتية لعامل الأمان بطريقة العناصر المحدودة: $FS = 2.37$.

تدل قيم عوامل الأمان الناتجة للمنحدر على أنه آمن ويمكن العمل بجواره، ويمكن زيادة الارتفاع للوصول إلى أعماق أكبر عند استمرار استثمار المنجم، لأن قيمة عامل الأمان كانت أكبر من القيمة المسموح بها (1.5).

الجدول (2): قيم عوامل الأمان الناتجة للمنحدر الرابع بالطرق التقليدية

الطريقة	عامل الأمان
الشرائح العادية	2.23
بيشوب	2.21
جانبو	2.27
مورغينستيرن – برايس M-P	2.33
سبينسر	2.31
التوازن الحدي العامة GLE	2.23
فيلق المهندسين الأمريكي رقم 1	2.42
فيلق المهندسين الأمريكي رقم 2	2.44
لو – كارافياث	2.27
سارما	2.22



الشكل (11): سطح الانزلاق الحرج في المنحدر الرابع

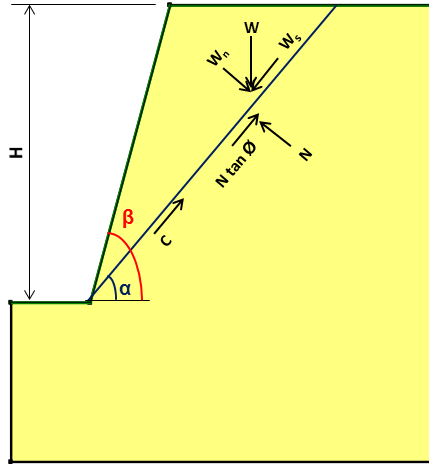
1- عند الحل بالطرق التقليدية

2 - عند الحل بطريقة العناصر المحدودة

7 تحليل توازن منحدر صخري من الكلس الغضاري

يتألف المنحدر المدروس من الكلس الغضاري ، الشكل (12)، ويشار إلى هذا المنحدر بالرقم 5 في مخطط المنجم المبين في الشكل (2)، حيث كان ارتفاع المنحدر 26 m، وزاوية ميله عن الأفق: 75° . تم توصيف سلوك الصخر باستخدام نموذج مور- كولومب ، وإعطاء الصخر المواصفات الآتية: الوزن الحجمي: $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ ، زاوية الاحتكاك الداخلي: $\phi = 39^\circ$ والتماسك: $c = 230 \text{ kPa}$ ، وبما أن المنحدر يقع في منطقة جافة فإن السطح الحر للماء أخفض بكثير من جسم المنحدر. وإن ارتفاع المنحدر على امتداده الطويل يختلف من منطقة إلى أخرى، وكذلك تختلف زاوية ميل وجوه المنحدرات الأخرى المشابهة، فعند اختلاف ارتفاع المنحدر في مناطق

أخرى من المنجم ووجود عدد محدود من الانقطاعات الرئيسية يمكن أن يحصل الانزلاق المستوي إذا تحققت الشروط الكينيماتيكية اللازمة. في الشكل (12) تم تمثيل الكتلة المنزلقة ومستوي الانزلاق المفترض في المنحدر المدروس.



الشكل (12): منحدر الكلس الغضاري المدروس - المنحدر الخامس -

بإدخال القوى المؤثرة على الكتلة المنزلقة، الشكل (12)، بحسب عامل الأمان في هذه الحالة بالعلاقة [7](1):

$$FS = \frac{R}{D} = \frac{C+N.\tan \phi}{D} = \frac{c.A+W_n.\tan \phi}{W_s} \quad (1)$$

حيث:

R: مجموع القوى المقاومة للانزلاق

D: مجموع القوى المحركة

C = c.A: قوة التماسك عند سطح الانزلاق

c: تماسك الكتلة الصخرية

A = b.H/sin α: مساحة سطح الانزلاق

b: عرض سطح الانزلاق

H: ارتفاع المنحدر (ارتفاع الكتلة المنزلقة)

α: زاوية ميل سطح الانزلاق عن الأفق

β: زاوية ميل وجه المنحدر

W = γ.V: وزن الكتلة المنزلقة

γ: الوزن الحجمي للكتلة الصخرية

$$V = \frac{b.H^2}{2} [\cot \alpha - \cot \beta] \text{ : حجم الكتلة المنزلقة}$$

W_n = W.cos α: المركبة الناعمية لوزن الكتلة المنزلقة

W_s = W.sin α: المركبة المماسية لوزن الكتلة المنزلقة

بالتعويض في العلاقة (1) نجد:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c.b.H}{\gamma \frac{b.H^2}{2} [\cot \alpha - \cot \beta] \sin^2 \alpha} \quad (2)$$

كما يمكن كتابة العلاقة بالصيغة (3) لحساب ارتفاع المنحدر بدلالة باقي القيم، ويمكن كتابة العلاقة بالصيغة (4) لحساب زاوية ميل وجه المنحدر بدلالة باقي القيم.

$$H = \frac{2c}{\left[FS - \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}\right] \gamma [\cot \alpha - \cot \beta] \sin^2 \alpha} \quad (3)$$

$$\cot \beta = \cot \alpha - \frac{2c}{\left[FS - \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}\right] \gamma H \sin^2 \alpha} \quad (4)$$

تطبيق العلاقات المذكورة عندما $c \neq 0$.

8 تطبيقات

8.1 التطبيق الأول

عند استكشاف منحدر الكلس الغضاري على امتداده الطويل كان ارتفاع المنحدر يختلف من منطقة إلى أخرى، وقد دل التحليل الكينماتيكي لتوازن المنحدر على احتمال حدوث الانزلاق المستوي بسبب وجود مجموعة انقطاعات رئيسية زاوية ميلها عن الأفق $\alpha = 50^\circ$ ، فما هي العلاقة التي تربط بين عامل أمان المنحدر في حالة الانزلاق المستوي وبين ارتفاعه؟
بالتعويض في العلاقة (2) نحصل على العلاقة (5) المطلوبة. علماً أن مواصفات الصخور المدروسة مبينة في الجدول (1).

$$H[m] \quad (5)$$

تستخدم العلاقة الناتجة مباشرة في الحقلين أجل كل جزء من المنحدر لمعرفة هل هو آمن أم لا اعتماداً على ارتفاعه فقط.

8.2 التطبيق الثاني

عند استكشاف منحدر الكلس الغضاري وفي منطقة محددة منه كان ارتفاع المنحدر الوسطي: $H = 30m$ وقد لوحظ احتمال حدوث الانزلاق المستوي بسبب وجود انقطاعات تختلف زاوية ميلها عن الأفق α من مكان إلى آخر، ما هي العلاقة التي تربط بين عامل أمان المنحدر في حالة الانزلاق المستوي وبين زاوية ميل مستوي الانقطاع α ؟
بالتعويض في العلاقة (2) نحصل على العلاقة (6) المطلوبة.

$$FS = \frac{0.81}{\tan \alpha} + \frac{460}{[21 \cot \alpha - 5.63] \sin^2 \alpha} \quad (6)$$

تستخدم العلاقة الناتجة مباشرة في الحقل من أجل كل جزء من المنحدر لمعرفة هل هو آمن أم لا اعتماداً على زاوية ميل مستوي الانقطاع فقط.

لقد كان الارتفاع شبه ثابت في المنطقة المدروسة في هذا التطبيق، وبما أن الهدف من استخراج هذه العلاقات هو سهولة استخدامها في الموقع مباشرة فقد تم استخدام القيمة الوسطية للارتفاع $H=30m$ عند استنتاج العلاقة (6)، أما في حالة اختلاف الارتفاع بشكل كبير فيمكن العودة لاستخدام العلاقة الأصلية (2).

8.3 التطبيق الثالث

توجد في المنجم منحدرات من الكلس الغضاري تختلف زاوية ميلها β من منطقة إلى أخرى، وارتفاعها الوسطي $H = 35m$ ، فإذا وجدت مجموعة انقطاع رئيسية في هذه المنحدرات زاوية ميلها $\alpha = 45^\circ$ ، فما هي العلاقة التي تربط بين عامل أمان المنحدر في حالة الانزلاق المستوي وبين زاوية ميل وجه المنحدر β ؟
بالتعويض في العلاقة (2) نحصل على العلاقة (7) المطلوبة.

$$FS = 0.81 + \frac{43.81}{1 - \cot \beta} \quad (7)$$

تستخدم العلاقة الناتجة مباشرة في الحقل من أجل كل منحدر من منحدرات الكلس الغضاري في المنطقة المدروسة لمعرفة هل هو آمن أم لا اعتماداً على زاوية ميل وجهه فقط.

لقد كان الارتفاع شبه ثابت في المنطقة المدروسة في هذا التطبيق أيضاً، ولذلك تم استخدام القيمة الوسطية للارتفاع $H=35\text{ m}$ عند استنتاج العلاقة (7)، أما في حالة اختلاف الارتفاع بشكل كبير فيمكن العودة لاستخدام العلاقة الأصلية (2).

8.4 التطبيق الرابع

يراد تعميق حفرة المنجم من خلال زيادة ارتفاع منحدر الكلس الغضاري الذي يميل وجهه عن الأفق بزاوية $\beta = 80^\circ$ ، وقد دل التحليل الكينماتيكي لتوازن المنحدر على احتمال حدوث الانزلاق المستوي بسبب وجود مجموعة انقطاع رئيسية زاوية ميلها $\alpha = 60^\circ$ ، فما هو الارتفاع الأعظمي المسموح به للمنحدر لتحقيق عامل أمان $FS = 1.5$ ؟

بتعويض المعطيات في العلاقة (3) نجد أن الارتفاع الأعظمي المسموح به هو: $H = 70.5\text{ m}$

8.5 التطبيق الخامس

يراد توسيع حفرة المنجم، ويحتاج الأمر لمعرفة زاوية الميل الآمنة β لوجه منحدر الكلس الغضاري بحيث يكون عامل الأمان: $FS = 2$ ، علماً أن الارتفاع الوسطي للمنحدر: $H = 40\text{ m}$ ، وقد دلت الدراسة الكينماتيكية على احتمال حدوث الانزلاق المستوي بسبب وجود مجموعة انقطاع رئيسية زاوية ميلها: $\alpha = 55^\circ$.

بالتعويض في العلاقة (4) نجد أن زاوية الميل الأعظمية المسموح بها هي: $\beta = 82^\circ$

8.6 التطبيق السادس

قبل إجراء زيارة حقلية للمنجم نحتاج لتجهيز مخطط يمثل العلاقة الخطية بين عامل الأمان FS وارتفاع المنحدر H في حالة منحدر يميل وجهه عن الأفق بزاوية $\beta = 75^\circ$ ، ويحوي انقطاعاً مستوياً يميل بزاوية $\alpha = 50^\circ$ ويمكن أن يسبب انزلاقاً مستوياً، وذلك من أجل أنواع مختلفة من الصخور في المنجم هي: الكلس الغضاري والكلس العضوي والتريبوليت الأبيض والتريبوليت الرمادي والأبوكا.

بللتعويض في العلاقة (2) نحصل على المخطط المبين في الشكل (13)، ويمكن من هذا المخطط أن يتم تحديد عامل أمان المنحدر في الحقل مباشرة اعتماداً على ارتفاع المنحدر فقط، أو أن يتم تحديد ارتفاع المنحدر المسموح به من أجل عامل أمان معين – وذلك حسب نوع الصخر –.

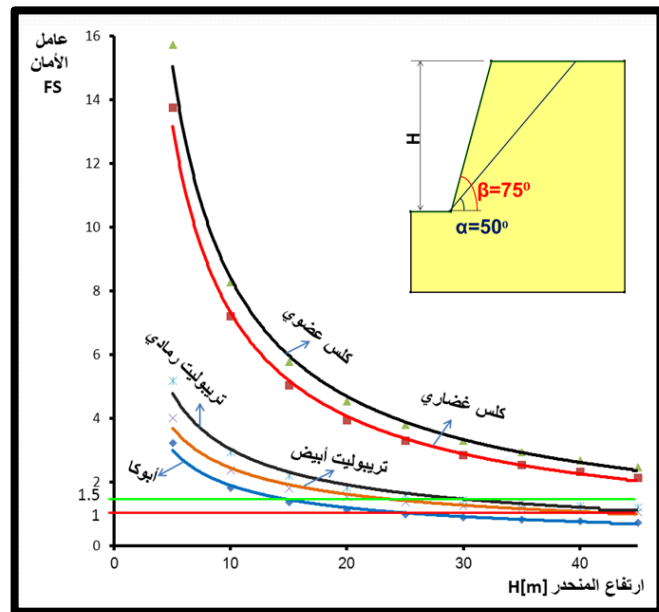
على سبيل المثال: في حالة منحدر من صخر التريبوليت الأبيض ارتفاعه $H=25\text{ m}$ يكون عامل الأمان المأخوذ من المخطط (13): $FS = 1.7$. وكذلك من المخطط (13) يمكن أن نلاحظ أنه من أجل منحدر من صخر الأبوكا يكون المنحدر آمناً ($FS > 1.5$) عندما يقل ارتفاع المنحدر عن 13 m .

8.7 التطبيق السابع

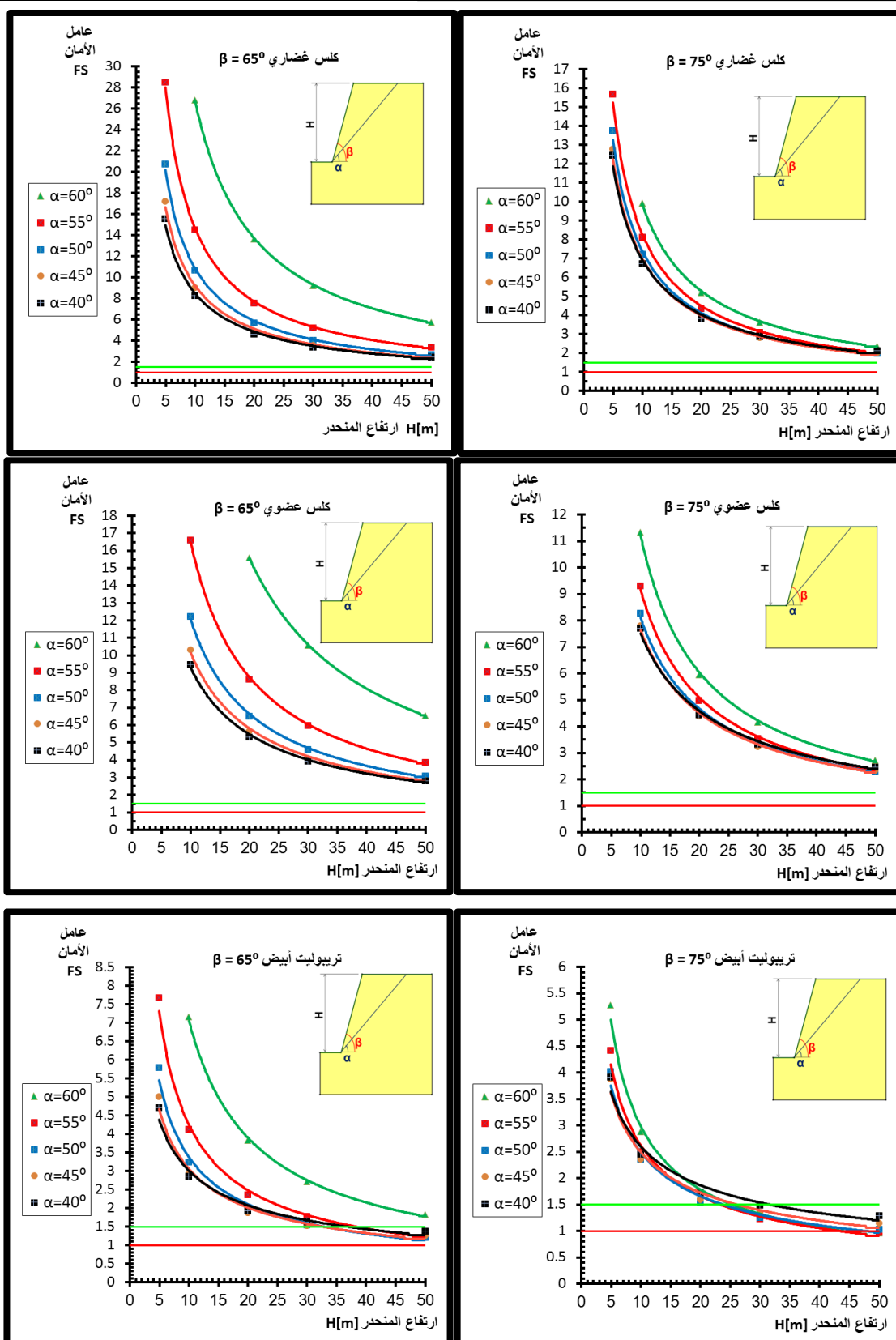
تقتضي ظروف العمل الفنية أن تكون زوايا ميل وجوه المنحدرات الصخرية المنفذة عن الأفق كبيرة، ومعظم المنحدرات منفذة بزوايا ميل $\beta = [65-75^\circ]$ ، بينما تختلف ارتفاعات المنحدرات وزوايا ميل مستويات الانقطاع من مكان لآخر، ويراد تجهيز مخططات تربط بين ارتفاع المنحدر H وعامل الأمان ضد الانزلاق المستوي FS وزاوية ميل مستوي الانقطاع α ، وذلك للكتل الصخرية من نوع الكلس الغضاري والكلس العضوي والتريبوليت الأبيض والأبوكا.

يبين الجدول (1) المواصفات المستخدمة للصخور المذكورة، وبللتعويض في العلاقة (2) تم الحصول على المخططات المبينة في الشكل (14).

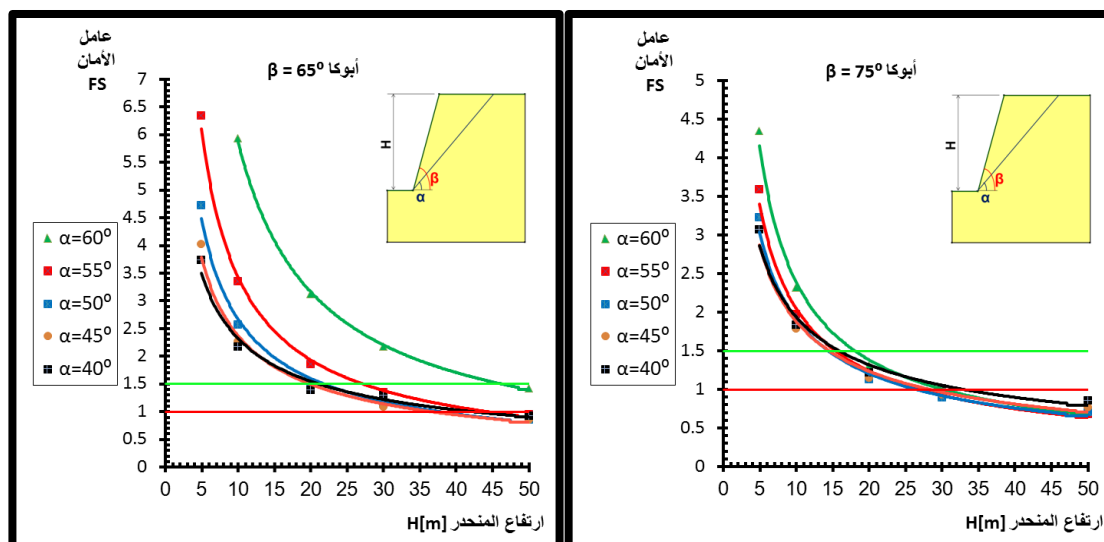
تستخدم المخططات المبينة في الشكل (14) مباشرة في الحقل بدلاً من العودة إلى العلاقات والتعويض فيها. على سبيل لمثال : في حالة منحدر منصخر الأبوكا يميل وجهه عن الأفق بزاوية $\beta = 75^\circ$ ، ويحوي انقطاعات مستوية تميل عن الأفق بزاوية $\alpha = 60^\circ$ ، فإنه يتوقع انهيار المنحدر عندما يبلغ ارتفاعه $H=29$ m (بالاستعانة بالخط الأفقي عند $FS = 1$). ويكون المنحدر آمناً عندما يقل ارتفاعه عن $H=17$ m (بالاستعانة بالخط الأفقي عند $FS = 1.5$).



الشكل (13) : العلاقة بين عامل الأمان وارتفاع المنحدر في التطبيق السادس



الشكل (14): مخططات تغير عامل الأمان بدلالة ارتفاع المنحدر من أجل قيم محددة للزاوية β



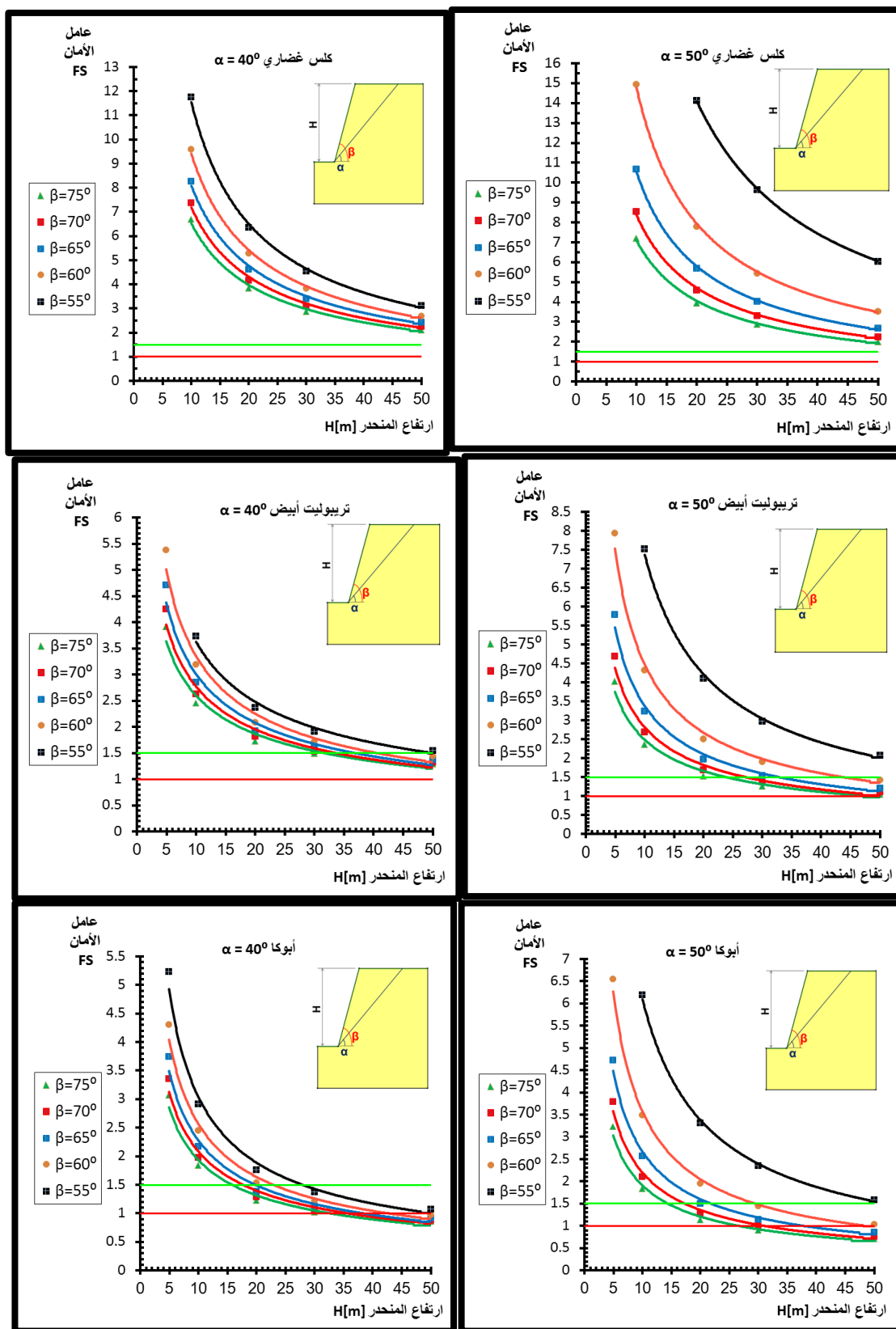
تابع الشكل (14)

8.8 التطبيق الثامن

يراد تجهيز مخططات تربط بين ارتفاع المنحدر H وعامل الأمان ضد الانزلاق المستوي FS وزاوية ميل وجه المنحدر β ، وذلك للكتل الصخرية من نوع الكلس الغضاري والتربيوليت الأبيض والأبوكا. يبين الجدول (1) المواصفات المستخدمة للصخور المذكورة، وبتعويض المعطيات في العلاقة (2) تم الحصول على المخططات المبينة في الشكل (15).

8.9 ملاحظة

تجدر الإشارة إلى أنه في حالة كون مستوي الانقطاع مرتفعاً بحيث لا يمر من قدم المنحدر فإن الارتفاع H في التطبيقات السابقة يمثل ارتفاع الكتلة المنزلقة، وتبقى الحالة الأخطر هي حالة مرور مستوي الانقطاع من قدم المنحدر، فعند وجود مجموعة انقطاعات في الكتلة الصخرية تميل بزاوية α يمكن أن يمر أحدها من القدم.



الشكل (15): مخططات تغير عامل الأمان بدلالة ارتفاع المنحدر من أجل قيم محددة للزاوية α

9 الملاحظات والاستنتاجات النهائية

- يقدم التحليل الكينماتيكي طريقة مفيدة جداً لتحديد الآليات المحتملة لانهييار الكتل الصخرية، والتحقق من الإمكانية الحركية لحدوث الانهييار ويوفر الكثير من الوقت والجهد، وذلك من خلال استبعاد المنحدرات الآمنة التي لا تتوفر فيها الشروط الكينماتيكية للانهييار من الدراسة، والتركيز على تحليل توازن المنحدرات التي تبين من خلال التحليل الكينماتيكي أنها خطيرة لوجود إمكانية حركية لحدوث الانهييار فيها.
- تم اقتراح إجراء عام للتحليل الكينماتيكي لتوازن المنحدرات الصخرية يحدد آلية الانهييار الممكنة ويشمل حالات الانهييار المختلفة، كما يميز هذا الإجراء بين حالتين مختلفتين: الأولى هي حالة كون وجه المنحدر محدداً أو موجوداً مسبقاً، والثانية هي الحالة التي يراد فيها اختيار ميل وجه المنحدر واتجاه ميله بشكل آمن، حيث يمكن تجنب الكثير من الانهييارات الصخرية عند الاختيار الصحيح لاتجاه الحفر اعتماداً على نتيجة الإجراء العام المقترح.
- بما أن عوامل الأمان للمنحدرات المدروسة بمختلف الطرق التقليدية والعديد أكبر من الحد المسموح به (وهو 1.5) فإنه يمكن استمرار الحفر وزيادة ارتفاعات هذه المنحدرات للوصول إلى أعماق أكبر للمنجم عند استمرار استثماره، مما يحقق فائدة اقتصادية أكبر من هذا المنجم من خلال الحصول على كميات أكبر من الفوسفات من الحفر المنفذة.
- لقد أعطت الطرق التقليدية - طرق التحليل الحدي - قيماً مختلفة لعامل الأمان، وبشكل عام تختلف دقة كل طريقة من طرق التحليل الحدي عن الأخرى بما يأتي:
 - معادلات التوازن الحدي التي تعتمد عليها (معادلة واحدة أو اثنتان أو ثلاث).
 - إدخال القوى الداخلية بين الشرائح في الحساب (عدم إدخال أية قوة أو إدخال القوى الناطمية فقط أو إدخال القوى الناطمية والقاصة معاً).
 - افتراض شكل تابع القوى الداخلية الذي يربط بين القوى الناطمية والقوى القاصة بين الشرائح.
- وبما أن تحليل التوازن باستخدام طريقة العناصر المحدودة هو أقرب للواقع لأنه يراعي العلاقة بين التشوهات والإجهادات؛ فإننا نعتبر أن نتيجة الحل بإحدى طرق التحليل الحدي دقيقة بمقدار ما تكون قيمة عامل الأمان قريبة من قيمة عامل الأمان في طريقة العناصر المحدودة، وبشكل عام إن الطرق التي تراعي توازن القوى والعزوم كطريقة مورغينستيرن - برايس وطريقة سبينسر هي المفضلة، ولكننا لا نستطيع القول إن طريقة ما هي الأدق دائماً، لأننا لا نعرف في أية طريقة يكون تابع القوى الداخلية أقرب إلى الواقع في تمثيل العلاقة بين القوى الناطمية والقاصة بين الشرائح.
- تم عرض بعض التطبيقات المفيدة عملياً بعد إجراء التحليل الكينماتيكي والتأكد من إمكانية حدوث الانهييار المستوي، حيث تم استنتاج بعض العلاقات والمخططات التي يمكن أن تسهل العمل في الموقع عند الحكم على المنحدرات الموجودة بأنها آمنة أو غير آمنة اعتماداً على ارتفاع المنحدر H فقط (عند ثبات القيم الأخرى)، أو اعتماداً على زاوية ميل وجه المنحدر β فقط، أو اعتماداً على زاوية الميل α لمجموعة الانقطاعات الموجودة في الكتلة الصخرية المدروسة، كما يمكن أن تستخدم العلاقات والمخططات المذكورة لإيجاد القيمة المسموح بها H أو β أو α عند اتخاذ القرار بإنشاء المنحدرات الجديدة.

10 المراجع

1. موقع الشركة العامة السورية للفوسفات والمناجم على الإنترنت (2015): www.gecopham.com
2. رسلان، ع.، داود، ر.، غنوم، ن.، حامد، ص.، "التقرير الفني لأعمال التنقيب التفصيلي عن توضع الفوسفات في المناطق المحيطة بمناجم خنيفس (المنجم الجنوبي)"، (1992)، المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية، 50 صفحة.
3. موقع المؤسسة العامة السورية للجيولوجيا على الإنترنت - دليل الخامات المعدنية (2015): www.geology-sy.org
4. د. العيسى، م.، "دراسة بتروغرافية للفوسفات السوري في المنطقة التدمرية"، (2003)، مجلة جامعة البعث، العلوم الهندسية، المجلد 25 - العدد 10، صفحة 151-178.
5. Giani, P. G. "Rock Slope Stability Analysis", (transl. from Italian), (1988). Balkema, Rotterdam, 345 pages.
6. Goodman, R. E. "Introduction to Rock Mechanics", (1989). University of California at Berkeley, 562 pages.

7. Hoek, E. and Bray, J. W. "Rock Slope Engineering", (1981). The Institute of Mining and Metallurgy, London, 548 pages.
8. Simons, N., Menzies, B. and Matthews, M. "Soil and Rock Slope Engineering", (2005). Thomas Telford Publishing, London, 432 pages.
9. Grohmann, C. H. and Campanha, G. A. "OpenStereo Program", software for structural geology analysis, (2009-2015) . Institute of Geosciences - University of Sao Paulo, Brazil, URL: <http://www.igc.usp.br/openstereo>.
10. GEO-SLOPE International Ltd " Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version", (2008). An Engineering Methodology, Calgray, Alberta, Canada, 355 pages. Web: [<http://www.geo-slope.com>]
11. GEO-SLOPE International Ltd "Stress – Deformation Modeling with SIGMA/W 2007", (2008). An Engineering Methodology, Calgray, Alberta, Canada, 323 pages. Web: [<http://www.geo-slope.com>]
12. Duncan J. M. " Limit Equilibrium and Finite – Element Analysis of Slopes", (1996). J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 122, No. 7, pp. 577-596.