

Analytical and Numerical Study of the Rock Slope Stability and Designing the Wire Mesh Systems for Rockfall Protection along the Slope

Oula Joulak *

Muhannad Mhanna**

(Received 22 / 7 / 2025. Accepted 9 / 10 / 2025)

□ ABSTRACT □

This study investigates rock slope stability and the effectiveness of reinforcement using wire mesh and rock bolts through a combined theoretical and numerical approach. In the first phase, Slide 2D software was used to assess slope stability with weathered layers based on the Limit Equilibrium Method (LEM). The model was calibrated using data from a peer-reviewed study, incorporating rock properties according to the Hoek-Brown and Coulomb-Mohr criteria.

The second phase involved detailed modeling with Macro software to evaluate the effects of rock properties, weathering, and climate on slope behavior and their interaction with reinforcement systems. Five rock types were analyzed under varying climatic conditions and long-term effects over 100 years.

Results showed that weathering thickness varied significantly with rock type. In serpentine, it increased more than dolomite. Serpentine also required 5-meter-long rock bolts—double the length needed for dolomite—demonstrating the influence of weathering resistance on reinforcement design.

Keywords: rock slope stability, wire mesh reinforcement, rock bolts, sliding surfaces, numerical modeling



Copyright :Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Master's Student – Department of Geotechnical Engineering – Faculty of Civil Engineering – Latakia University (Formerly Tishreen) - Latakia – Syria.

** Associate Professor, Department of Geotechnical Engineering – Faculty of Civil Engineering – Latakia University (Formerly Tishreen) – Latakia, Syria – Email: mohanadmohana@tishreen.edu.sy

دراسة استقرار منحدر صخري تحليلياً وعددياً وتصميم أنظمة الشبكات المعدنية لحماية الصخور على طول المنحدر

علا جولاق*

د. مهند منها*

(تاریخ الإیادع 22 / 7 / 2025. قبیل للنشر في 9 / 10 / 2025)

□ ملخص □

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل استقرار المنحدرات الصخرية وتقديم فعالية لدعيمها باستخدام الشبكات المعدنية ومسامير التثبيت، عبر منهجية تجمع بين التحليل النظري والنمذجة العددية. شملت المرحلة الأولى استخدام برنامج Slide 2D لتحليل التثبات العام لمنحدرات ذات طبقات متوجبة، وفق منهجية التوازن الحدي (LEM)، مع معايير التمودج استناداً إلى بيانات من دراسة مرجعية محكمة وإدخال الخصائص الميكانيكية للصخور حسب قانوني Hoek-Brown و Coulomb-Mohr.

في المرحلة الثانية، استُخدم برنامج Macro لنمذجة تفصيلية لتقدير تأثير خصائص الصخور والتوجوية والمناخ على استقرار المنحدر، ودراسة تفاعلها مع أنظمة الدعيم. تناولت الدراسة خمسة أنواع رئيسية من الصخور، وأخذ في الحسبان تأثير الزمن حتى 100 سنة، وظروف مناخية متفاوتة الشدة.

أظهرت النتائج تبايناً في سماكة طبقة التوجوية حسب نوع الصخر، إذ تضاعفت في صخر السريلنتين مقارنة بصخر الدولوميت. كما تبين أن صخر السريلنتين يتطلب مسامير تثبيت بطول 5 أمتار، أي ضعف الطول اللازم للدولوميت، ما يعكس تأثير مقاومة الصخر للتوجوية على دعيم المنحدرات.

الكلمات المفتاحية: استقرار المنحدرات الصخرية، الدعيم بالشبكات المعدنية، مسامير تثبيت الصخور، سطوح الانزلاق، النمذجة العددية.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سوريا، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA 04 الترخيص

* طالب ماجستير - قسم الهندسة المدنية - اختصاص جيوفنزيك - جامعة اللاذقية(تشرين سابقاً) - اللاذقية - سوريا
** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الجيوفنزيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سوريا - البريد الإلكتروني: mohanadmohana@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يُعتبر استقرار المنحدرات الصخرية من التحديات الهندسية الهامة، خاصة في المناطق الجبلية والمشاريع الإنسانية الكبرى مثل الطرق والسدود والمرافق. يتأثر استقرار المنحدرات بعدة عوامل تشمل طبيعة الصخر، التجوية، التكوين الجيولوجي، والمناخ، بالإضافة إلى تأثيرات خارجية مثل المياه الجوفية والأحمالزلزالية والأنشطة البشرية التي تتضمن بدورها أعمال شق الطرق والأفاق وزيادة الأحمال السطحية أعلى المنحدر، مما يشكل تهديداً كبيراً على السلامة العامة والمنشآت المجاورة. لذلك أصبح من الضروري تطوير أنظمة حماية فعالة لتنشيط هذه المنحدرات ومنع حدوث الانهيارات. هناك العديد من طرائق تدعيم المنحدرات التي تتضمن بحسب الخصائص الجيولوجية (نوع الصخور، درجة التصدع)، زاوية المنحدر وارتفاعه، العوامل المناخية (أمطار، فروقات حرارية)، التكلفة والتأثير البيئي. ومن أبرز الطرائق المعتمدة عملياً لتنشيط المنحدرات الصخرية، كما ورد في المرجع [5]: (التدعم بالمسامير الصخرية، الشبكات المعدنية، البيتون المقدوف، الجدران الاستنادية، التعديل الهندسي للمنحدر، تصريف المياه، التدعيم النباتي).

الدراسات المرجعية:

تناولت الدراسات السابقة عدة جوانب متعلقة بتحليل استقرار المنحدرات الصخرية، بدءاً من تأثير التجوية وصولاً إلى نماذج التحليل العددي وأساليب التدعيم. في دراسة حديثة، قام الباحثين في الدراسة [11] بتحليل تأثير درجة التتشبع بالماء والتجوية على مقاومة الضغط للصخور الغضارية (Claystone) باستخدام اختبارات الضغط أحادي المحور. أظهرت النتائج انخفاضاً ملحوظاً في مقاومة الضغط للصخور بنسبة 27.3%， 22.2%， 46.1%， و 46.7% بعد النقع في الماء لمدة 1، 2، 4، و 8 دقائق على التوالي. كما أظهرت الدراسة أن هذا النوع من الصخور يصنف ضمن الحالة الصخرية السيئة (Class IV) بمعامل أمان منخفض ($SF = 1.14$)، مما يسلط الضوء على أهمية أحد التتشبع والتجوية بعين الاعتبار عند تحليل استقرار المنحدرات لهذه الأنواع من الصخور.

في دراسة أخرى، تناول الباحث في الدراسة [25] تأثير التجوية على استقرار المنحدرات المقطوعة في الصخور الطيرية، وخاصة المارل، ضمن تكوينات الفليش (Flysch) في منطقة دالمانيا، كرواتيا. أظهرت الملاحظات الحقلية خلال فترة 9 سنوات أن تأثير التجوية السطحية يمتد لعدة سنتيمترات إلى عشرات السنتيمترات، مما يتسبب في ازلاقات محلية أو سقوط كتل صخرية. بينما ينتقل تأثير التجوية الأعمق عبر المفاصل والشقوق، مسبباً تدهوراً تدريجياً في بنية المنحدر. وقد قدر معدل التجوية السطحية في بعض المنحدرات بحوالي 1-2 سم سنوياً، في حين أظهرت حالات أخرى معدلات أعلى وصلت إلى 10 سم سنوياً، خصوصاً في الطبقات ذات المحتوى الغضاري العالى. وهذا يشير إلى أهمية تقييم التجوية كعامل رئيسي في تحليل استقرار المنحدرات الصخرية الضعيفة على المدى الطويل.

أما فيما يتعلق باختيار قوانين السلوك المناسبة، قام الباحث في الدراسة [3] بمقارنة بين معيار Hoek-Brown غير الخطى والمعاملات المكافئة لمعيار Mohr-Coulomb في حساب عوامل الأمان للمنحدرات باستخدام طرائق التحليل الحدي والتوازن الحدي، حيث تم تطبيق طريقة العناصر المنتهية (FEM) في تحليلاتهم. أظهرت نتائجهم أن الفروقات بين الحسابات باستخدام المعيارين تكون ضئيلة عند زوايا ميل $\geq 45^\circ$ ومع عوامل أمان تقترب من 1، مما يشير إلى إمكانية استخدام معيار Mohr-Coulomb كديل تقريري في حالات الاستقرار الحرج. ومع ذلك، عند زوايا الميل الأكبر أو في ظروف أكثر تعقيداً، قد تظهر فروقات أكبر بين المعيارين، مما يؤكد أهمية اختيار المعيار المناسب بناءً على خصائص المنحدر والظروف المحيطة.

ونرى من جهة أخرى في مجال تدعيم المنحدرات، أنه قد تتوعد الأساليب والنمذج العددية المستخدمة. بين الباحث [30] من خلال نموذج في برنامج 2D PLAXIS أن زاوية ميل المسمار وطوله يؤثران بشكل كبير على فعالية التثبيت، خاصة في الصخور المتقطعة. وفي دراسة أخرى، أجرى الباحث [13] تحليلًا عدديًا وتحليليًّا لاستقرار المنحدرات الصخرية المتأثرة بعوامل التجوية والنشاطات الهندسية في منطقة قرفيص، حيث تم استخدام طريقة العناصر المتمتة (FEM) لتحليل استجابة المنحدر. أظهرت النتائج أن استخدام مسامير التربة يزيد بشكل ملحوظ من استقرار المنحدر، حيث يزداد عامل الأمان مع زيادة طول المسمار ليصل إلى $0.6H^*$. كما تبين أن زاوية ميل المسامير المثلثية هي حوالي 20° عن الأفق، مما يعزز فعالية التدعيم. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج أن التباعد الأفقي بين المسامير يؤثر أيضًا على فعالية التدعيم، حيث لوحظ انخفاض في عامل الأمان عند زيادة التباعد الأفقي بين المسامير.

أهمية البحث وأهدافه:

تُعد دراسة استقرار المنحدرات الصخرية من القضايا الحيوية في الهندسة الجيولوجية، لما لها من أثر مباشر في الوقاية من الكوارث الطبيعية وتقليل الخسائر البشرية والمادية. فقد وثق الباحث [8] حادثة سقوط صخري مميتة في وادي يوسماي (Yosemite Valley) في الولايات المتحدة، أسفرت عن وفاة شخص وتدمير مراقب سياحية حيوية، مما سلط الضوء على الخطير المباشر للانهيارات الصخرية حتى في المناطق السياحية المجهزة. كما بينت دراسة حديثة أجراها [12] أن الخسائر المادية المرتبطة بسقوط الصخور قد تكون باهظة للغاية. وتشير الدراسة أيضًا إلى أن التكاليف قد ترتفع أكثر في المناطق الجبلية أو النائية نتيجة ارتفاع تكاليف النقل والإجراءات الهندسية لحماية البنية التحتية والمنشآت من الأضرار الناتجة عن الانهيارات الصخرية.

تعود أهمية البحث للإشارة إلى ضرورة الانتباه لاستقرار المنحدرات الصخرية لأنه عكس المفهوم فهي قابلة للتتجوية ولو بنسبة أقل من المنحدرات التربوية، إلا أن انهياراتها وبالتالي فقدان الاستقرار مع الزمن. ترتكز دراستنا على استكشاف طرق للتدعيم يمكن النظر في قابليتها للتنفيذ عمليًّا وفق الخبرات البشرية والأدوات المحلية المتوفرة، بما يعزز السلامة ويفصل من مخاطر الانهيارات، كما ورد في [28].

تهدف دراستنا إلى محاولة تقديم طرح جديد لمنهج تحليل استقرار المنحدرات الصخرية وتقدير فعالية تدعيمها باستخدام الشبكات المعدنية ومسامير التثبيت، وذلك من خلال الأهداف التالية:

- تحسين تمثيل الطبقة المتتجوية: اقتراح نموذج عددي مبسط ودقيق يُراعي تأثير الزمن والظروف المناخية المختلفة على خصائص الطبقة المتتجوية، ما يُعزز دقة تقييم الاستقرار.
- إجراء تحليل بارامטרי لتأثير خصائص التدعيم: دراسة تأثير المتغيرات الآتية:
- الأبعاد الهندسية للمنحدر: زاوية ميل المنحدر الصخري (β) وعمق الطبقة المتتجوية (S)
- نوع الصخر وخصائص الطبقة الصخرية المتتجوية: قوة الضغط أحادي المحور للفوائل (JCS)، عامل خشونة الفوائل (JRC)

• خصائص مسامير التثبيت: القطر (ϕ)، الطول (L)، التباعدات الأفقية والعمودية (ly , lx).

• تطبيق معايير تحليل متعددة: مقارنة نتائج ثلاثة نماذج مقاومة مختلفة (Mohr–Coulomb، Hoek–Brown، Barton–Bandis) لتقديم رؤية متكاملة حول موثوقية كل منها في تمثيل حالات الانهيار المختلفة.

- تقديم توصيات تصميمية: الوصول إلى مقترنات عملية لتصميم أنظمة تدعيم فعالة وآمنة اقتصادياً، بناءً على نتائج الدراسة العددية والتحليل الباراميترى.

طرائق البحث ومواده:

تم اعتماد منهجية تحليلية عددية في هذا البحث، تعتمد على استخدام برامج هندسية متخصصة لتقدير استقرار المنحدرات الصخرية قبل التدعيم وبعده. وقد تم تقسيم البحث إلى ثلاثة مراحل رئيسية، كما يلي:

المرحلة الأولى: التحليل قبل التدعيم

تم اقتراح نموذج عددي باستخدام برنامج Slide 2D لمحاكاة استقرار المنحدر قيد الدراسة استناداً إلى الأبعاد والطبقات الجيولوجية المستخلصة من دراسة مرجعية شاملة أجزتها [29] نظراً لعدم توفر بيانات حقلية ومخبرية كاملة للموقع، تم اعتماد هذه الدراسة المرجعية لمعايرة النموذج العددي، حيث توفر معلومات دقيقة للخصائص الفيزيائية والميكانيكية للطبقات الجيولوجية المختلفة.

تم إدخال الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لكل من طبقات الصخر السليم والصخر المتوجى في النموذج العددي بما يتوافق مع سلوك كل نوع من الصخور. بالنسبة للصخر السليم، تم استخدام معيار السلوك غير الخطى Hoek-Brown مع الدراسة [6]، بما في ذلك مقاومة الضغط أحادي المحور (σ_c)، معامل المادة (m)، ومؤشر قوة الكتلة الصخرية (GSI). أما بالنسبة للصخر المتوجى، فقد تم استخدام معيار Mohr-Coulomb بعد تحويل الخصائص الجيوتكنيكية المستندة من نظام Barton-Bandis إلى مكافئاتها في هذا المعيار، مما أتاح تحديد كل من زاوية الاحتكاك الداخلي (ϕ) والتماسك (c) بدقة.

تم تطبيق شروط حدية ملائمة على حدود النموذج لضمان تمثيل دقيق وواعي للحالة الطبيعية للمنحدر، معأخذ تأثير المياه الجوفية بعين الاعتبار في بعض الحالات. كما تم اعتماد منهجية التوازن الحدي (Limit Equilibrium Method - LEM) في التحليل العددي لتقدير استقرار المنحدر من خلال حساب عوامل الأمان لعدة أسطح انزلاق محتملة. كما تم تحديد أسطح الانزلاق الأكثر خطورة بناءً على قيم عوامل الأمان المحسوبة، مما يساعد في تحديد النقاط التي قد تتطلب تدابير احترازية أو تدعيم إضافي لضمان استقرار المنحدر.

المرحلة الثانية: التحليل بعد التدعيم

تم في هذه المرحلة تقييم فعالية نظام التدعيم المكون من مسامير التثبيت والشبكات المعدنية، وذلك عبر تمثيل دقيق للمنحدر باستخدام برنامج MACRO، حيث تم تصدير الخصائص الفيزيائية والهندسية للمنحدر (كالسمكة، زاوية الميل، نوع الصخر ودرجة التجوية) من النموذج الأول في برنامج Slide 2D إلى برنامج MACRO لمحاكاة تأثير عناصر التدعيم على تحسين الاستقرار. شملت النمذجة التفاعل بين طبقة التجوية والصخر السليم ضمن بيئات مختلفة.

المرحلة الثالثة: الدراسة الباراميترية

أُجريت دراسة باراميترية موسعة باستخدام برنامج MACRO بهدف تحليل تأثير عدد من المتغيرات على استقرار المنحدر بعد التدعيم. شملت هذه المتغيرات:

- تغير سماكة الطبقة التجوية المتوقعة وفقاً لنوع الصخر ودرجة قساوة الظروف البيئية المحيطة
- تأثير نوع الصخر وزاوية الميل على عامل أمان الشبكة المعدنية ومسامير التثبيت

- تأثير نوع الصخر على طول مسامير التثبيت الالزنة لتحقيق الاستقرار على الانسحاب
- **وصف الحالة المدروسة (Case study):**
- **الموقع المدروس:**

يقع المنحدر MS-2.3 كما وضح الباحث في الدراسة [29] على مسافة تقارب 16 كم إلى الجنوب الشرقي من مركز مدينة زونغولداك في شمال غرب تركيا. يبلغ ارتفاعه حوالي 20m بزاوية ميل تصل إلى 52° . يتكون المنحدر من تعاقب طبقي من الصخور المارلية والغضارية كما هو موضح في الشكل (1). تشير الملاحظات الميدانية إلى أن المنحدر الصخري مستقر بشكل عام، غير أن الطبقة السطحية المتأثرة بعوامل التجوية أظهرت بعض علامات التدهور والانهيار الجزئي، مما تسبب بتساقط كتل صخرية صغيرة جدًا في قناء التصريف الواقع أمام المنحدر. وقد تم إنشاء المنحدر باستخدام تقنيات الحفر بالآلات، وعليه يمكن اعتماد قيمة عامل الاضطراب $D = 0.7$ ، كما ذكر في [6].



الشكل (1): صورة عامة للموقع توضح موقع المنحدر الصخري من الدراسة [29]

التصنيف الهندسي لطبقات موقع منحدر :

يعتمد علم توصيف الصخور من الناحية الجيوتكنيكية على مجموعة من البارمترات، أهمها: مقاومة الضغط أحادي المحور **UCS** (strength compressive uniaxial) على العينة الصخرية الطبيعية، ومؤشر القوة الجيولوجية **GSI** (geological strength index) ومعامل الاضطراب **D** (disturbance factor) الذي يعكس تأثير تقنيات الحفر والتنفيذ. بالاستناد إلى الاختبارات الحقلية والمخبرية والجيوفيزائية التي أجريت في الدراسة المرجعية [29] جرى تحديد الخصائص الميكانيكية للطبقات المكونة للمنحدر كما هو موضح في الجدول 1/.

الجدول 1: قيم UCS للعينات الصخرية من المنحدر المدروس والمحسوبة بالاعتماد على تجارب التحميل النقطي من الدراسة [29] وفقاً لإجراء ISRM (1985).

Slope	Rock Type	Test	Fresh		Weathered	
			Dry	Saturated	Dry	Saturated
MS-2.1	Marl	(Mpa)UCS	54.46	29.58	35.94	17.87
		(Unit Weight (kN/m ³	24.28	25.11	24.21	24.87
MS-6	Mudstone	(Mpa)UCS	18.33	6.86	8.29	2.94
		(Unit Weight (kN/m ³	23.14	24.36	22.48	23.95

وقد أظهرت نتائج الاختبارات من الدراسة [29] أن القيمة الوسطية لـ UCS للصخور غير المتأثرة بالتجوية تقارب 23 Mpa، وهي القيمة التي استُخدمت لاحقاً في التحليل العددي لاستقرار المنحدر. كما تبين أن الوزن الحجمي للصخور السليمة بلغ نحو 24.89 kN/m^3 ، في حين انخفض قليلاً في الصخور المتوجية ليسجل حوالي 24.59 kN/m^3 . أما سماكة الطبقة المتأثرة بعوامل التجوية على واجهة المنحدر فقد قدرت بحوالي ($S=40 \text{ cm}$). كذلك جرى اعتماد قيم التماسك (c) وزاوية الاحتكاك الداخلي لكتلة الصخرية (ϕ) بالاستناد إلى نتائج التحاليل السابقة وارتفاع المنحدر، كما هو مبين في الجدول /2/.

الجدول 2: الخصائص المعتمدة في النمذجة العددية باستخدام معياري Mohr-Coulomb و Hoek-Brown بحسب درجة تجوية الصخور

Material Name	Color	Strength type	Unit Weight ((kN/m ³)	Cohesion ((kPa)	(°)Ø	UCS (kPa)	GSI	m	s	a
R Fresh		Generalised Hoek-Brown	24.89			22760	25	0.11361 2	$e^{-5} 1.902$	0.53 1
Weathered		Mohr-Coulomb	24.59	0	17					

تمثيل الثوابت s و a خصائص كتلة الصخر وفقاً للدراسة التي أجرتها الباحث [6]، ويتم تحديدهما وفق العلاقات التالية:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$$

$$b_s = 9 - 3D$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

كما تُعتبر m_b القيمة المخفضة للثابت المادي m_i وفقاً للدراسة [6] وتحسب وفق المعادلة:

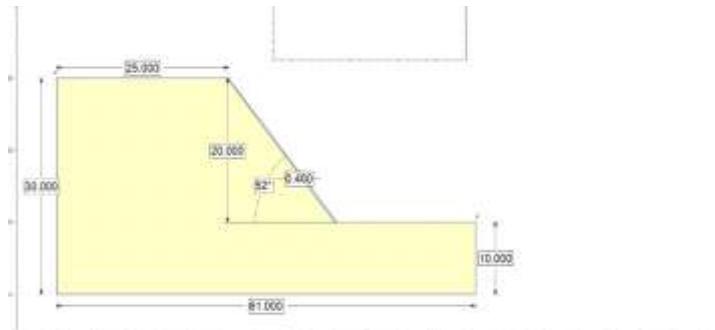
$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right)$$

$$b_m = 28 - 14D$$

دراسة استقرار المنحدر بوضعه الراهن:

بناء على النتائج الحقلية والتجارب المخبرية الموضحة بالجدول 1 تم اعتماد وجود طبقتين متمايزتين عند دراسة استقرار المنحدر الصخري كما هو موضح بالشكل (2):

- الطبقات الصخرية الخارجية على واجهة المنحدر الصخري، والمعرضة لعوامل التجوية، ويسماكة 40cm باتجاه الداخلي، تم تمثيلها كطبقة تربة بمواصفات مكافئة.
- الطبقات الداخلية غير المجواة، والتي تمثل الجزء الأساسي في حساب استقرار المنحدر.



الشكل (2): النموذج العددي المبين عليه الطبقات الصخرية المعتمدة في التحليل العددي

بما أن سلوك الصخور يختلف عن سلوك التربة ولا يمكن تمثيله بشكل دقيق باستخدام معيار Mohr-Coulomb وحده، فقد تم اعتماد المعيار غير الخطى Hoek-Brown لوصف مقاومة الصخور السليمة، إذ يعتمد هذا المعيار على قيم مقاومة الضغط أحادى المحور (UCS) ومؤشر قوة الكتلة الصخرية (GSI) ومعامل الخشونة الداخلى (mi) أما الطبقة السطحية شديدة التجوية فقد جرى توصيفها اعتماداً على نموذج Barton [19] الذي يسمح بحساب قيم مكافئة للتماسك وزاوية الاحتكاك الداخلى يمكن إدخالها في برامج التحليل التي تعتمد على صياغة Mohr-Coulomb مثل برنامج Slide. لغرض ذلك، استُخدمت معادلات بارتون لتقدير زاوية الاحتكاك المتبقية (\emptyset_r) ومعامل خشونة الفواصل (JRC)، مع تعديل قيم مقاومة الفواصل (JCS) بعد إجراء التصحيحات الالزامية لنتائج القياسات الميدانية باستخدام مطرقة سميدت وأجهزة قياس الخشونة البيوية، ومقارنتها بالمعايير القياسية التي وضعها [19].

من المهم الإشارة إلى أن بارتون يفترض أن الفواصل المستوية والخالية من مواد مالئة يمكن اعتبارها عديمة التماسك. تعتمد الدراسة [29] على مجموعة من العلاقات التجريبية من الدراسة [19] لحساب معاملات القص لكتلة الصخرية (مثل زاوية الاحتكاك الداخلى والتماسك) على طول سطوح الانزلاق. هذه العلاقات تأخذ بعين الاعتبار كل من مقاومة الضغط أحادى المحور للصخور (UCS) إضافة إلى توصيفها الليتولوجي ودرجة جودتها.

$$\text{المعادلة (1)} \quad \tau = \sigma_n \tan \left(\text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \emptyset_r \right)$$

حيث τ : إجهاد القص على المفصل، σ_n : الضغط أحادى المحور الفعال، JRC: معامل خشونة المفصل، JCS: قوة الضغط غير المحصورة للفواصل، \emptyset_r : زاوية الاحتكاك المتبقية ويمكن استنتاجها من العلاقة الرياضية وفقاً للدراسة [20-16]:

$$\text{المعادلة (2)} \quad \emptyset_r = (\emptyset_b - 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right)$$

حيث تمثل \emptyset_b زاوية الاحتكاك الأساسية لسطح الانهيار، r هي قيمة الارتداد لمطرقة سميدت التي تم قياسها على سطح الفواصل المترعرضة للتوجية، في حين أن R هي القيمة المقاسة على سطح الصخور السليمة.

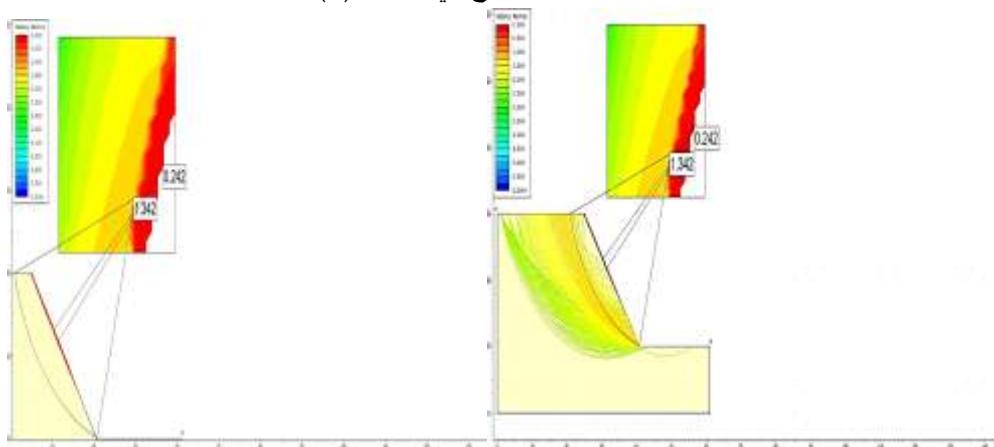
وبالنسبة لمعامل خشونة الفواصل (JRC)، تم إجراء تصحيح وفقاً لقياس العلاقة التي وضعها [17] الموضحة أدناه:

$$\text{المعادلة (3)} \quad \text{JRC}_n = \text{JRC}_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 \text{JRC}_0}$$

حيث يشير L_0 إلى طول جهاز مقياس خشونة السطح البالغ 100 ملم، بينما يرمز L_n إلى أحجام الكتل في الموقع. وبالمثل، تم تطبيق تصحيح للمقياس بالنسبة لمقاومة جدران الفواصل للانضغاط (JCS)، وذلك وفقاً للعلاقة التي وضعها [17] والمبيّنة أدناه.

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0} \quad (4)$$

تم إجراء التحليل العددي لاستقرار المنحدر الصخري باستخدام برنامج 2D Slide ، والذي يُعد من البرمجيات المتطورة والمستخدمة في مجال تحليل ثبات المنحدرات باستخدام منهجية التوازن الحدي.(Limit Equilibrium) تم تنفيذ تحليل نصيلي شمل عدداً من سطوح الانزلاق المحتملة الانهيار بهدف تحديد السطوح الحرجة الأكثر عرضة للانهيار. أظهرت النتائج تبايناً ملحوظاً في توزيع قيم عامل الأمان (Factor of Safety) على طول مقطع المنحدر، مما مكّن من تمييز المناطق غير المستقرة بدقة كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3): سطوح الانزلاق الكلية المدروسة مع توضيح سطوح الانزلاق الحرجة (FS > 1) باللون الأحمر

أظهر التحليل العددي باستخدام برنامج Slide 2D أن الطبقة السطحية المتوجبة تُظهر سلوكاً غير مستقر، حيث كانت جميع سطوح الانزلاق المحتملة ضمن هذه الطبقة تسجل قيمة عامل الأمان أقل من ($FS < 1$)، إذ أعطى أكثر سطح قابل للانزلاق خطورة عامل أمان ($FS = 0.242$)، ما يشير إلى قابلية عالية لحدوث انهيارات موضعية وانفصال كتل صخرية عن جسم المنحدر، وهذا ما يتوافق مع المشاهدات الحقلية. كما بين التحليل وجود سطح انزلاق حرج يمتد عبر كل من الطبقة السطحية المتوجبة والطبقات الصخرية الأعمق، مع تسجيل قيمة منخفضة لعامل الأمان ($FS = 1.342$) حتى ضمن المناطق التي تُعد جيولوجياً أكثر تماساً. هذه النتائج قريبة من قيمة عامل الأمان التي سُجلت في الدراسة المرجعية ($FS = 1.334$) مع وجود فرق مقبول، مما يدل على أن المنحدر بأكمله يعاني من حالة استقرار حرجة نسبياً، وهو ما يتوافق مع المشاهدات الحقلية والاختبارات المخبرية للدراسة [29]. بناءً على ذلك، يتطلب الوضع الحالي تدخلاً هندسياً شاملًا يتجاوز الحلول السطحية لتوفير استقرار مستدام للمنحدر.

الدراسة التدعيمية:

تحليل استقرار المنحدر المدعوم باستخدام برنامج Macro:

استناداً إلى النتائج المستخلصة من الحالة الدراسية المطبقة في برنامج Slide، والتي بينت تدني عامل الأمان حتى في الطبقات الصخرية غير المتوجبة، تم الانتقال إلى مرحلة التحليل التدعيم باستخدام برنامج MACRO، وذلك بهدف التقييم التفصيلي لأثر التدعيم بمسامير التثبيت على استقرار المنحدر.

تم تصدير الخصائص الجيوبوتكنيكية والجيومترية، بما في ذلك سماكة الطبقة القابلة للانزلاق والتي قدرت بحوالي 50 cm إلى برنامج MACRO، حيث أن السطح المنزلي لم يكن محصوراً تماماً داخل الطبقة المتوجبة، بل كان محاذياً لميلها

ويتمد جزئياً ضمن الصخر السليم. يوضح الباحثين في الدراسة [22] قدرة البرنامج العالية على نمذجة السلوك الحقيقي للمنحدرات المدعمة، وخاصة في الحالات التي تشمل استخدام عناصر تسليح مثل المسامير والشبكات المعدنية. كما يتيح MACRO تمثيلاً دقيقاً لتأثير مقاومة الشد في مسامير التثبيت، وزوايا إدخالها، وتوزع الإجهادات على طول هذه العناصر. وتتمكن قوة البرنامج أيضاً في قدرته على تقدير التغير في عامل الأمان بدقة بعد إدخال التدعيم، مما يساعد في مقارنة فعالة بين حالي المنحدر قبل وبعد التدعيم، وتحديد مدى كفاءة نظام التدعيم المعتمد. يتيح البرنامج أيضاً إعداد مخططات تحليلية وبيانية توضح مساهمة كل عنصر تثبيت في رفع عامل الأمان العام.

تصميم مسامير التثبيت:

يعتمد منهج الحساب على فرضية وجود كتلة صخرية سطحية متوجية تغطي المنحدر، حيث يتم تبسيط تمثيل هذه الكتلة إلى وسط متصل. ينتج عن هذا الوسط المتصل حالات عدم استقرار متكررة بعمق محدود، إضافةً إلى ظاهرة سقوط الكتل الصخرية. تتميز هذه الطبقة بسمكها "S" وزاوية ميل "β" توازي ميل المنحدر.

يتم تصميم مسامير التثبيت بناءً على قيمة كل من القوة المحورية الفعلية المطبقة على رأس المسamar T_{DD} من جهة y_D والمقاومة التصميمية لمسamar التثبيت y_D ، والمقاومة الطبيعية التي تساعد على تثبيت المسamar من جهة أخرى y_S . يعتمد التصميم على تحديد الأقطار المناسبة لمسامير وزوايا التثبيت بناءً على خصائص التربة والطبقات الصخرية الموجودة. تُحسب المقاومة التصميمية لمسامير التثبيت وفقاً لأبحاث علمية سابقة كالتالي أجرتها الباحث [4] ، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير عمل المسامير ضمن مجموعات، كما في الدراسة [14].

تصميم الشبكة المعدنية:

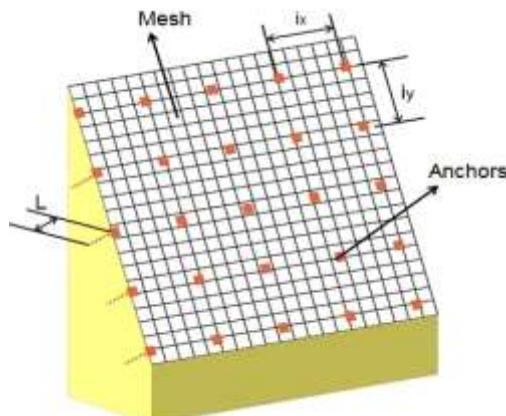
تم تصميم الشبكة المعدنية لتوفير دعم إضافي للطبقة السطحية للمنحدر، وخاصة في المناطق التي تكون عرضة لتفكك الصخور أو التجوية. يتم اختيار المواد المناسبة للشبكة المعدنية بحيث تكون مقاومة للعوامل الجوية وتحمل الأحمال الميكانيكية الناتجة عن القوى المؤثرة على المنحدر. يتم تصميم الشبكة بحيث تُوزع الأحمال بشكل متوازن على سطح المنحدر، وذلك بناءً على قيمة كل من قوة الدفع الفعلية المطبقة على الشبكة المعدنية M من جهة y_D والمقاومة التصميمية للشبكة المعدنية M_{mesh} وفقاً للمواصفات التي تتبع (ISO 17746:2016). مما يقلل من تركز الضغوط في نقاط معينة ويسهم في استقرار المنحدر بشكل عام. كما تم تحديد ترتيب الشبكة المعدنية في التصميم بناءً على نوع وحجم الصخور والطبقات التي يجب دعمها، مع الأخذ بعين الاعتبار متطلبات الأمان الهندسي.

تصميم العلاقات التحليلية المستخدمة في التحقق من أنماط الانهيار الرئيسية:

تم بداية استخدام العلاقات التحليلية من عدة دراسات بحثية كما في [10-14-26] للتحقق من أمان التصميم لمسامير الشبكة المعدنية لمقاومة أنماط الانهيار المختلفة الموضحة بالشكل (4) مع اعتماد الرموز والاصطلاحات الموضحة بالشكل (5).



الشكل (4): أنماط انهيار الأساسية لمسامير التثبيت والشبكة المعدنية كما ذكر في [22]



الشكل (5): توضيح الرموز الأساسية المستخدمة في دراسة ثبيت المنحدر الصخري وفقاً لدراسة الباحثين [22]

الجدول 3: العلاقات الرياضية المستخدمة في حساب قيم عوامل الأمان المختلفة لاستقرار المنحدر كما ذكر في [22] وتتضمن بشكل رئيسي: عامل أمان المنحدر بعد التعديم بمسامير التثبيت Anchor FoS_R (المعادلة 5)، الطول الأصغر اللازم لمسamar التثبيت لعدم الانهيار بالانسحاب L_a (المعادلة 6)، عامل أمان الشبكة Mesh FoS_R (المعادلة 7) مع تسميات الرموز المختلفة والاصطلاحات المعتمدة في القوانين الرياضية المختلفة بحسب (MACCAFERRI).

العلاقة المستخدمة	البارمترات الازمة
	(عامل أمان المنحدر بعد التعديم بمسامير التثبيت Anchor FoS_R)
	(الطول الأصغر اللازم لمسamar التثبيت) L_a
	(عامل أمان الشبكة Mesh FoS_R)

F_yd : المقاومة التصميمية لمسamar التثبيت. μM : مقاومة التقب للشبكة المعدنية في ظروف التطبيق الميداني على المنحدر. $M0$: مقاومة التقب للشبكة المعدنية كما حدثت في التجارب المخبرية. M : معامل يعبر عن الارتباط بين نتائج الاختبارات المخبرية والظروف الحقلية. $\alpha - \beta$: المقاومة التصميمية للشبكة المعدنية. α : زاوية ميل سطح المنحدر. β : زاوية ميل مجموعة الفوائل الأكثر خطورة. $Fd = BDd - BRd$: القوة التصميمية الناتجة عن حركة الكتلة الصخرية بين مسامير التثبيت. BDd : القوة التصميمية الزالقة. BRd : القوة التصميمية المثبتة.	$F_yd = M0 M_{mesh} = M0 \cdot$ $\cdot (MPa)$ $R_{stab,d} = R_{stab,d} - \tau Dd = \tau Dd$: القوة المثبتة المطلوبة لتحقيق شرط الاتزان. τ : القيمة التصميمية لقوة المثبتة (MPa). τDd : القيمة التصميمية لقوة الزالقة (MPa). L_s : طول الجزء الواقع ضمن الكتلة الصخرية السليمة (م). L_i : طول الجزء الواقع ضمن الكتلة الصخرية المتجوية (م). L_p : طول الجزء من الكتلة الصخرية السليمة
--	---

المتأثر بتشوهات غير مرنة أو مظاهر لدونة.	
--	--

الدراسة البارامترية:

تغير سماكة الطبقة المتوجبة المتوقعة وفقاً لنوع الصخر ودرجة قساوة الظروف البيئية المحيطة:

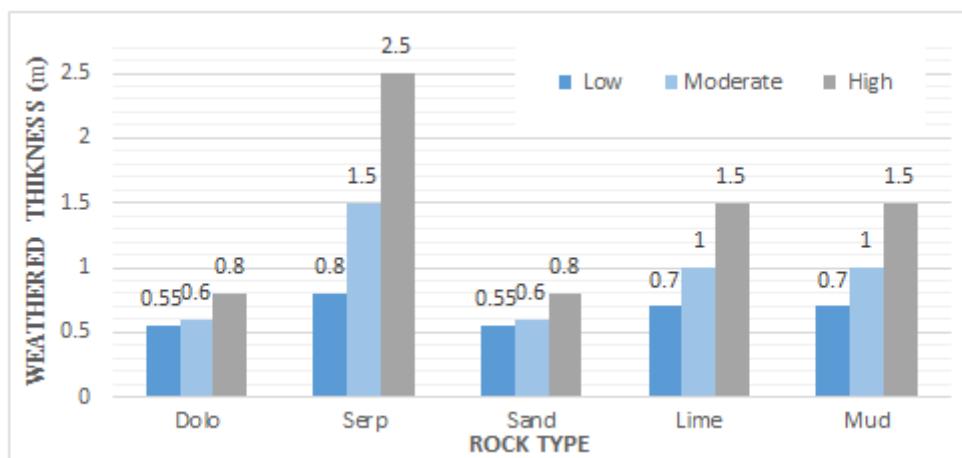
يعرض الشكل (6) نتائج تحليل بارامترى يهدف إلى تقييم أثر نوع الصخر على سماكة الطبقة المتوجبة المتشكلة خلال فترة زمنية مقدارها 100 عام، وذلك ضمن ثلاث بीئات مناخية تمثل درجات متفاوتة من قساوة الظروف البيئية المحيطة: منخفضة، معتدلة، وعالية. حيث تم حساب سماكة الطبقة المتوجبة وفقاً لـ [1-2-7-2-1-15-9-21-24-30] كما

هو موضح بالجدول 4/

الجدول [4]: معدل التجوية السنوية ضمن ثلاث بीئات مناخية لخمسة أنواع من الصخور (cm/year)

Summary Table: Average Weathering Thickness (cm/year)			
Arid/semi-arid	Temperate	Tropical/humid	Rock slope type
0.05–0.2	0.2–0.5	0.5–1.0	Limestone
0.01–0.05	0.05–0.1	0.1–0.3	Dolomite
0.01–0.05	0.05–0.1	0.1–0.3	Sandstone
0.1–0.3	0.3–1.0	1.0–2.0	Serpentinite
0.05–0.2	0.2–0.5	0.5–1.0	Mudstone

شملت الدراسة عدة أنواع من الصخور الرسوبيّة والمحولّة: (الدولوميت، السرپنتين، الصخر الرملي، الصخر الكلسي، الصخر العضاري).

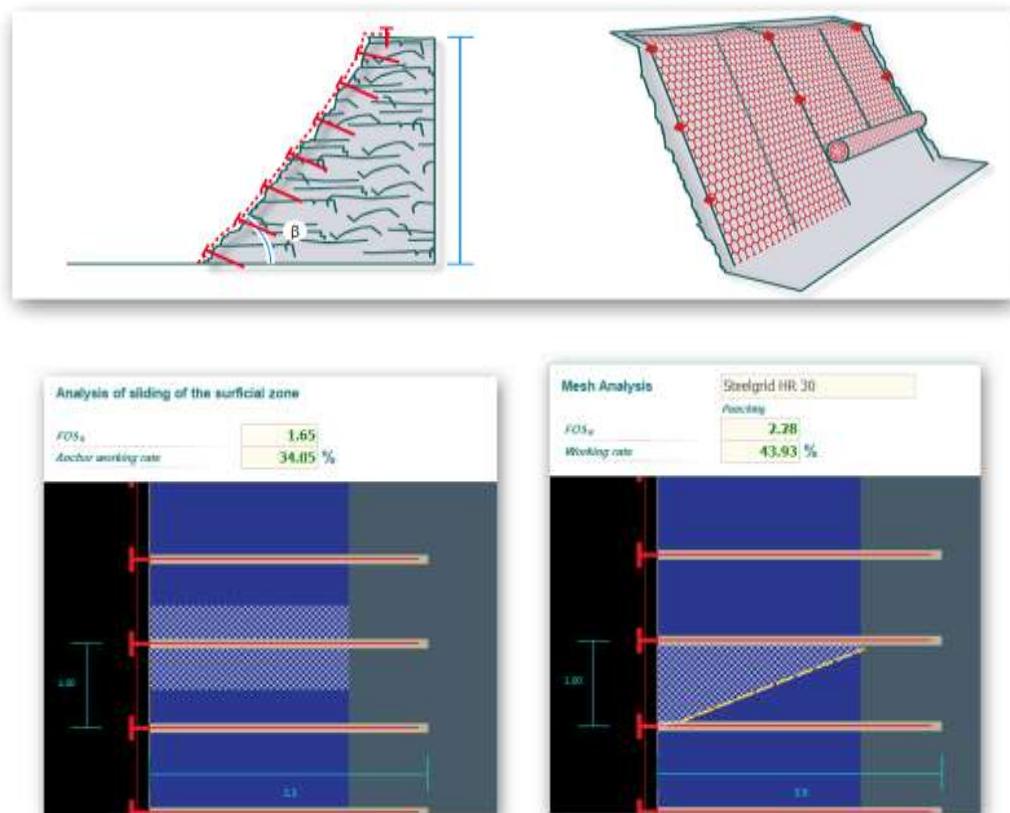


الشكل (6): تأثير نوع الصخر على سماكة الطبقة المتوجبة المتوقعة خلال 100 عام

أظهرت النتائج أن صخر السرپنتين سجّل أعلى سماكة متوجبة في المناطق ذات الظروف ذات البيئية شديدة القساوة (2.5)، وهو ما يشير إلى انخفاض مقاومته النسبية لعوامل التجوية في الظروف الحارة والرطبة. بالمقابل، أبدى كلاً من الدولوميت والصخر الرملي سلوكاً أكثر استقراراً، مع تسجيلهما أعلى القيم تحت جميع الظروف المناخية المدروسة، الأمر الذي يُعزى إلى خصائصهما البنوية والكيميائية الأكثر تماساً.

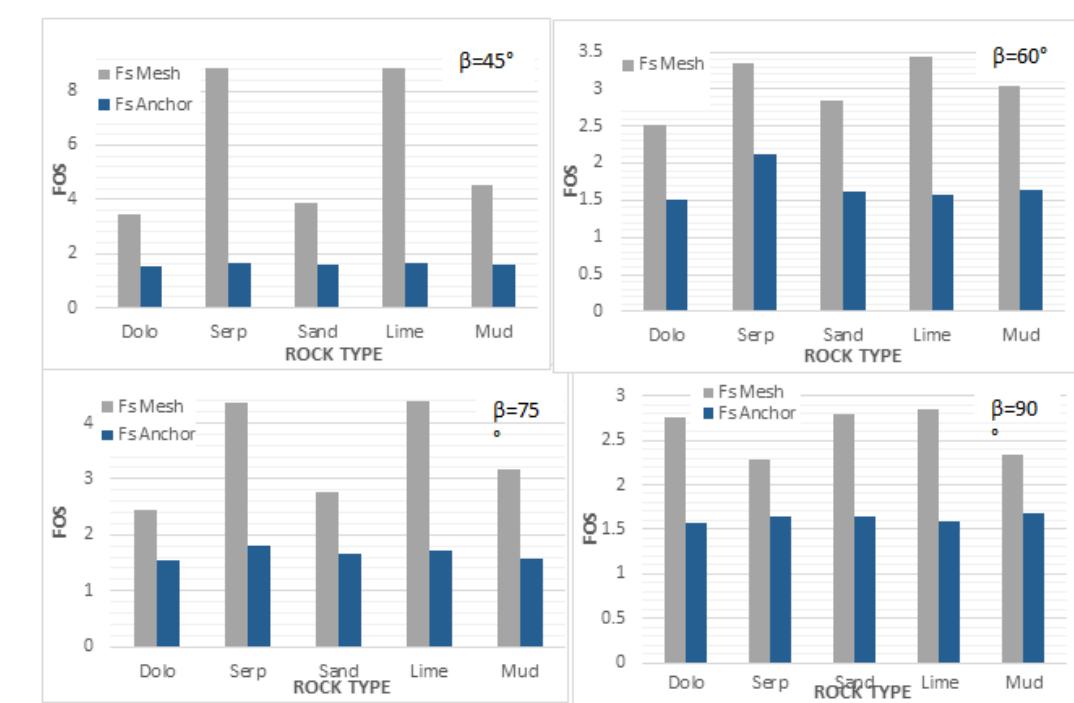
تأثير نوع الصخر وزاوية الميل على عامل أمان الشبكة المعدنية ومسامير التثبيت:

تم في هذا التحليل مقارنة أداء نظام مسامير التثبيت (Fs Anchor) لخمسة أنواع من الصخور تحت تأثير ظروف بيئية شديدة القساوة، وذلك عند 4 زوايا مختلفة لميل المنحدر: 45° و 60° و 75° و 90° . تم الحفاظ على نفس خصائص الصخر والبيئة في الحالتين وثبتت خصائص الشبكة المعدنية المعتمدة ($M_{mesh} = 155$ MPa)، مع تعديل خصائص المسامير (قطر وتباعد ومقاومة تصميمية) بما يحقق الحد الأدنى المقبول من عامل الأمان (Anchor Fs) في كل حالة. يبين الشكل (7) قيم عامل الأمان المستخرجة من مايكرو والموافقة لحالة منحدر بميل 90° من صخر السربينتين تحت تأثير ظروف بيئية شديدة القساوة.



يُبيّن الشكل (7) قيم عامل الأمان المستخرجة من مايكرو والموافقة لحالة منحدر بميل 90° من صخر السربينتين تحت تأثير ظروف بيئية شديدة القساوة.

أظهرت النتائج كما هو موضح في الشكل (8) أن متطلبات التصميم تختلف بشكل ملحوظ بحسب نوع الصخر وزاوية الميل.

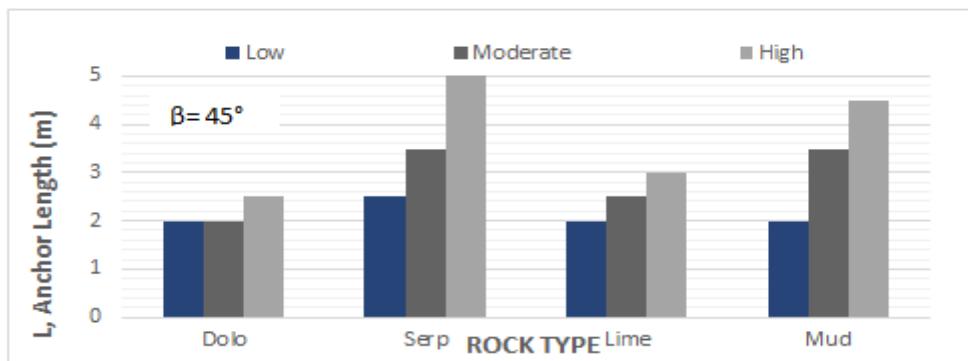


الشكل (8): تأثير نوع الصخر على عامل أمان الشبكة المعدنية وعامل أمان مسامير التثبيت (من أجل ظروف بيئية شديدة القساوة)

أظهرت النتائج أن زيادة زاوية الميل من 45° إلى 90° عبر الزوايا الوسيطة 60° و 75° أدت إلى انخفاض تدريجي وملحوظ في قيمة عامل أمان الشبكة لجميع أنواع الصخور، ما تطلب تقليل التباعد بين المسامير وزيادة أقطارها تدريجياً لضمان الثبات. ويعزى ذلك إلى أن الميل الأكبر يزيد من مركبة الوزن الموازية للمنحدر، وبالتالي يزيد القوى الزلقة والمؤثرة سلباً على نظام التثبيت. كان هذا التأثير أكثر وضوحاً في الصخور الهشة أو ذات الطبقات المتوجبة السمية مثل السربنتين والصخر الكلسي، حيث سُجلت أكبر الفروقات في المتطلبات التصميمية بين الزوايا الأربع. على سبيل المثال، بالنسبة لصخر الدولوميت تحت تأثير ظروف بيئية شديدة القساوة، والذي يتميز بخصائص ميكانيكية جيدة ومقاومة عالية للتوجية، تم تقليل التباعد بين المسامير تدريجياً من 3 m عند ميل 45° إلى 2.5 m عند 60° ، ثم 2 m عند 75° ، ليصل إلى 1.5 m عند ميل 90° ، مع خفض قطر المسamar من 30mm إلى 26mm دون الحاجة لتعديل مقاومته التصميمية. أما في حالة صخر السربنتين، وهو من الصخور الهشة وعالية القابلية للتوجية، فقد تطلب الظروف البيئية الأكثر قساوة استخدام مسامير بقطر 32 mm ومقاومة تصميمية 550 MPa حتى عند زاوية ميل 45° ، مع تقليل التباعد تدريجياً من 1.5 m إلى 1.2 m إلى 60°، ثم 1 m عند ميل 75° و 90° لضمان تحقيق الحد الأدنى المقبول من عامل الأمان.

تشير هذه النتائج إلى أن تأثير زاوية الميل يظهر بوضوح أكبر في الصخور الضعيفة أو ذات الطبقات المتوجبة السمية، حيث ازدادت متطلبات التدعيم بشكل ملحوظ مع كل زيادة في زاوية الميل. في المقابل، أظهرت الصخور الأكثر تماسكاً مثل الدولوميت أداءً أكثر استقراراً حتى عند الميل الأعلى، مما قلل من الحاجة إلى تعزيز كبير في عناصر التثبيت.

تأثير نوع الصخر على طول مسامير التثبيت اللازم لتحقيق الاستقرار على الانسحاب: تم في هذا الجزء من الدراسة تفاصيل تحليل بارامترى يهدف إلى تقييم تأثير نوع الصخر على الطول اللازم لمسامير التثبيت لضمان الاستقرار على الانسحاب، وذلك ضمن ثلاث حالات لشدة الظروف البيئية: منخفضة، متوسطة، وعالية. تم تثبيت خصائص الشبكة المعدنية المعتمدة (MPa 155=M_{mesh}). الشكل (9) يبين أطوال مسامير التثبيت المستخرجة من ماקרו واللازم لتحقيق عامل الأمان على الانسحاب.



الشكل (9): تأثير نوع الصخر على طول مسامير التثبيت اللازم لتحقيق الاستقرار على الانسحاب

أظهرت النتائج أن الطول اللازم لمسامير التثبيت يزداد مع زيادة فسادة الظروف البيئية المحيطة، نتيجةً لانخفاض معامل التلاصق ومقاومة القص على طول السطح البيني بين المسamar والصخر بفعل عمليات التجوية المتقدمة. وقد كانت الزيادة في الطول أكثر وضوحاً في الصخور الضعيفة، مثل السريلينتين والصخر الغضاري، التي تتطلب أطوالاً تصل حتى 5 m تقريباً في الظروف البيئية شديدة القساوة لتحقيق عامل الأمان المطلوب، مقارنةً مع صخور أكثر تماسكاً مثل الدولوميت، والتي حققت الاستقرار بطول أقل بلغ حوالي 2.5 m ضمن نفس الظروف.

كما بيّنت الدراسة أن طول المسamar اللازم يتأثر بشدة بخصائص الصخر عند وجود تجوية متقدمة، حيث أن المسافة الفعالة لنقل قوى الانسحاب تصبح محدودة، مما يتطلب تمديد الطول إلى طبقات أعمق وأكثر تماسكاً لضمان الفعالية. يُظهر هذا التحليل أهمية اعتماد تصميم مخصص لطول المسamar يأخذ بعين الاعتبار الخصائص الجيولوجية والمناخية للموقع بدلاً من استخدام أطوال نمطية قد لا تكون فعالة في ظروف معينة.

النتائج والمناقشة:

قدم هذا البحث دراسة تفصيلية مستندة على تحريرات حقلية ومخبرية وصولاً إلى إجراء دراسة تحليلية وعددية لفعالية استخدام تقنية مسامير التثبيت في تدعيم المنحدر الصخري. حيث أظهرت الدراسة العددية فعالية الشبكات المعدنية ومسامير التثبيت في زيادة استقرار المنحدر الصخري بالإضافة للنقطات الأساسية الآتية:

- أظهرت الدراسة أن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للصخور تؤثر تأثيراً جوهرياً على معدل التجوية، وبالتالي على سماكة الطبقة المتوجية عبر الزمن. تُظهر صخور السريلينتين، ذات المقاومة المنخفضة لعوامل التجوية، معدلات

تجوية مرتقبة مقارنةً بصخور الدولوميت تحت ظروف مناخية مماثلة، ما ينعكس على زيادة ملموسة في حجم الكتلة السطحية الضعيفة التي تتفاعل مع نظام التثبيت. الأمر الذي يُبرز الأثر الكبير لنوعية الصخر في تطور الطبقة المتوجية واشتراطات التصميم الهندسي لأنظمة التثبيت.

- ينعكس اختلاف نوع الصخور المشكّلة لكتلة المنحدر على فعالية التثبيت، حيث تتطلب الصخور الأقل تماسكاً أو الأعلى في التجوية تصميمًا أكثر تحفظاً لمسامير التثبيت (من حيث القطر أو التباعد)، وذلك لتعويض الانخفاض في قدرة الصخور على التماسك حول المسamar وتحقيق نقل فعال للحملة. على سبيل المثال، في دراستنا، استلزمت الصخور المتوجية مثل السربينتين تقليل تباعد المسامير حتى 1m وزيادة قطر المسamar إلى 32mm، أما بصخور الدولوميت فعلى الرغم من تقليل التباعد حتى 1.5m فكان قطر 26mm كافياً لضمان استقرار المنحدر تحت نفس ظروف التحميل.
- تبين أن ارتفاع درجة قساوة الظروف البيئية يؤدي إلى تدهور تدريجي في الخصائص الميكانيكية للصخر (مثل مقاومة القص ومعامل التلاصق)، مما يُضعف فعالية التثبيت على المدى الطويل، ويستلزم تعديل تصميم المسامير لتحقيق نفس مستوى الأمان. يتضح ذلك من خلال الحاجة إلى زيادة عدد المسامير أو استخدام أقطار أكبر في البيئات الرطبة أو ذات التجوية الشديدة.
- تؤدي زيادة ميل المنحدر وسمكّة الطبقة المتوجية إلى رفع مركبة وزن الكتلة الموازية لميل المنحدر، مما يضاعف القوى المؤثرة على كل من الشبكة والمسامير (وهذا أمراً سلبياً)، خاصة عند الزوايا القريبة من العمودية، مما يؤدي إلى انخفاض في عامل الأمان. في دراستنا، أظهرت النتائج أن زيادة زاوية الميل من 45° إلى 90° بالنسبة لصخر الدولوميت أدت إلى انخفاض عامل أمان المسامير بنسبة تصل إلى 30% ، الأمر الذي استلزم تقليل تباعد المسامير من 3m إلى 1.5m وبالتالي مضاعفة عدد المسامير لتحقيق استقرار المنحدر.
- يعتمد الطول الفعال لمسامير التثبيت بشكل رئيسي على مقاومة التلاصق بين المسamar والصخر، والتي تتأثر بدورها بخصائص الصخر ودرجة التجوية. ومع تزايد قساوة الظروف البيئية، تتحفظ هذه المقاومة، ما يفرض الحاجة إلى أطوال تثبيت أكبر للوصول إلى طبقات أعمق وأكثر تماسكاً تضمن انتقال الحمل بفعالية وتحقق عامل الأمان المطلوب.

الاستنتاجات والتوصيات:

- توسيع التحليل ليشمل السلوك الزلالي للمنحدر، وخاصة في المناطق النشطة زلزاليةً، لما له من تأثير مضاعف على استقرار الكتل الصخرية وعلى أداء أنظمة التدعيم.
- مقارنة اقتصادية بين أنظمة الشبكات المعدنية مع التدعيم الصلب باستخدام البيتون المقدّف، حيث يُنصح بإجراء دراسات جدوى فنية-اقتصادية لتحديد الحلول المثلثيّة التي توازن بين الكلفة والأداء.
- تطوير نماذج تنبؤية باستخدام الذكاء الصناعي، يمكن أن تُستخدم في تقييم سريع لحالة المنحدر بناءً على قاعدة بيانات جيولوجية ومناخية، مما يسهل اتخاذ قرارات التدخل الوقائي في المراحل المبكرة.

References:

- A. M. Blair 'G. E. Brown, "The weathering of serpentinites: Field observations and laboratory experiments ",*Clay Minerals* ,vol. 26, no. 4, pp. 567–585, 1991.
- A. S. Goudie, H. A. Viles, *The Dictionary of Physical Geography*, Wiley, 2008.
- C. Li, X. Zhao, X. Xu, and X. Qu, "Study on the differences between Hoek–Brown parameters and equivalent Mohr–Coulomb parameters in the calculation slope safety factor," *Scientific Reports*, Vol. 14, Article 15128, (2024).
- D.C. Wyllie, and C.W. Mah, *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th Edition, CRC Press, London/New York, (2004).
- D.C. Wyllie, *Rock Slope Engineering: Civil Applications*, 5th Edition, CRC Press, New York, (2017).
- E. Hoek, P. K. Kaiser, and W. F. Bawden, Support of underground excavations in hard rock (2nd ed.), A.A. Balkema, (2002).
- Ford, D., and Williams, P., *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Wiley, (2007).
- G.F. Wieczorek, "Unusual July 10, 1996, Rock Fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California," *U.S. Geological Survey, Open-File Report 98-467*, (1996).
- J. I. Drever, *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*, Prentice Hall, 1997.
- M. Bustamante, and B. Doix, "Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés," *Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, No. 140, pp. 75–92, (1985).
- M. F. R. Hasan, M. Y. Frastika, P. A. M. Agung, A. Susilo, E. A. Suryo, Y. Zaika, A. M. Juwono, and S. Zulaikah, "Influence of rock weathering and saturation on compressive strength and slope stability: A uniaxial test analysis," *International Journal of Safety and Security Engineering*, Vol. 14(1), pp. 145–153, <https://doi.org/10.18280/ijsse.140114>, (2024).
- M. Jaboyedoff, J. Pedrazzini, A. Michoud, K. Derron, and P. Horton, "A comprehensive approach to quantitative risk assessment of rockfalls on buildings using 3D model of rockfall runout," *Geosciences*, Vol. 13(3), Article 92, (2023).
- M. Mhanna, An analytical and numerical study of the stability of rock slopes reinforced with soil nails: Case study of Qurfays slope, Tuj-eng, Vol. 45, No. 3, pp. 73–94, [in Arabic], <https://journal.latakia-univ.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/15275>, (2023).
- M. Panet, *Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (1995).
- Mustoe, G. E., "Weathering of sandstone: A review," *Earth-Science Reviews*, Vol. 61(1–2), pp. 1–24, (2003).
- N. Barton, "Review of a new shear-strength criterion for rock joints," *Engineering Geology*, Vol. 7(4), pp. 287–332, (1973).
- N. Barton, "Shear strength investigations for surface mining," In *Stability in Surface Mining (Proc. 3rd Intl. Conference)*, Vancouver, British Columbia, Society of Mining Engineers, pp. 171–196, (1982).
- N. Barton, "The shear strength of rock and rock joints," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 13(1), pp. 1–24, (1976). doi:10.1016/0148-9062(76)90003-6.
- N. Barton, and V. Choubey, "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock Mechanics*, Vol. 10(1–2), pp. 1–54, <https://doi.org/10.1007/BF01261801>, (1977).
- N. Barton, *Scale effects or sampling bias?* In *Proceedings of the International*

- Workshop on Scale Effects in Rock Masses*, pp. 1–16, Balkema, (1992).
- O. A. Chadwick, L. A. Derry, P. M. Vitousek, "Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development," *Nature*, vol. 397, no. 6716, pp. 491–497, 1999.
 - Officine Maccaferri S.p.A., "MACRO 1 - Reference Manual," Version 2.0, 2018.
 - O. P. Bricker, K. C. Rice, "Chemical weathering of silicate minerals," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 23, pp. 1–42, 1990.
 - P. Brimblecombe, and J. Wright, "The chemistry of polluted rain on sandstone," *Atmospheric Environment*, Vol. 20(1), pp. 59–66, 1986.
 - P. Miscevic, and G. Vlastelica, "Weathering of soft rocks in the Mediterranean climate," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6(3), pp. 240–250, (2011).
 - R. Bertolo, G. Giacchetti, and R. Majoral, "Full-scale testing of draped nets for rockfall protection," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46(10), pp. 1187–1199, <https://doi.org/10.1139/T09-126>, (2009).
 - Rocscience Inc., Slide2 User Guide, Rocscience, Toronto, Canada, (2022).
 - S.-Y. Ma, J.-Y. Zheng, Y.-C. Hu, et al., "Investigation of weathering effects on rock mass properties and slope stability in open-pit mines," *Applied Sciences*, Vol. 14(18), Article 8449, (2024). doi:10.3390/app1418449.
 - T. Ersöz, *Slope stability assessment of various road cuts with effects of weathering at North West Black Sea Region (Turkey)*, Middle East Technical University, (2017).
 - V.P. Singh, G.S. Babu, and S. Bhattacharya, "Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods," *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 34(2), pp. 557–570, (2016). doi:10.1007/s11041-015-9993-7.
 - W. B. White, , *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, (1988).