

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

د. ريم بوبو¹

ملخص

يتسبب حفر الأنفاق بحدوث تشوهات ناتجة عن تخريب الحالة الإجهادية السائدة في الوسط قبل البدء بأعمال الحفر. عند حفر الأنفاق ضمن وسط ضعيف المقاومة وفي حال عدم تنفيذ تدعيم سريع وكاف لمحيط حفريات النفق يمكن أن تتطور هذه التشوهات لتتحول إلى انهيارات خطيرة تبدأ في محيط النفق وقد تمتد لأعماق كبيرة. يتضمن هذا البحث تحليل لأهم العوامل التي يمكن أن تكون ذات تأثير مباشر على عمق انتشار هذه الانهيارات وذلك في دراسة لحالات أنفاق منفذة بالطريقة النمساوية الحديثة ضمن وسط صخري ضعيف المقاومة. الغاية من البحث هي دراسة إمكانية التنبؤ بعمق الانهيارات المحتملة في محيط حفريات النفق بناءً على العوامل المقترحة بالإضافة لتحليل الأهمية النسبية لهذه العوامل. اعتمدت الدراسة على تحليل عدد هام من الحالات المرجعية تضمنت بيانات أكثر من 40 مقطع لأنفاق متوضعة تحت سماكات تغطية متنوعة وبخصائص صخور مختلفة من مقطع لآخر، الأمر الذي اقتضى تنفيذها وتدعيمها بطرق مختلفة. اتبع البحث منهجية قائمة على طريقة تحليل الانحدار Regression Analysis بالاعتماد على طرق الذكاء الصناعي. بينت الدراسة أن العامل الأساسي والمسيطر على عمق الانهيارات الصخرية هو خصائص الصخر المتمثلة بقيمة GSI. كما تبين أن طريقة حفر وتدعيم النفق أكثر أهمية من سماكة التغطية أعلى النفق في الحالة المدروسة لأنفاق عميقة خاضعة لظاهرة الضغط الجبلي. أكدت مقارنة القياسات الحقلية مع نتائج التحليل صلاحية المنهجية المقترحة للتنبؤ بأعماق الانهيارات ودراسة العديد من العوامل التي يصعب أخذها بعين الاعتبار بطرق التحليل التقليدية. **كلمات مفتاحية:** انهيار صخري، أنفاق، الطريقة النمساوية الحديثة، GSI، تحليل الانحدار، ذكاء صناعي.

1. أستاذ مساعد - قسم الجيوتكنيك - كلية الهندسة المدنية - جامعة حمص.

Analysis of parameters affecting rock collapse depth around tunnels excavations.

Abstract

Tunneling causes deformations resulting from stress conditions changes. In case of tunneling in a weak and low resistance zone, and when using insufficient or late support, these deformations can cause dangerous collapses that may extend to great depths around the tunnel. This research includes an analysis of the most important factors that can have a direct impact on the depth of these collapses in case of NATM tunnels constructed in a weak rock environment. The goal of this research is to study the possibility of predicting of the potential collapse's depth based on the suggested factors in addition to analyzing the relative importance of these factors. The study based on analyzing reference cases that included data from more than 40 tunnel sections located under various cover thicknesses and with different rock conditions. The research relied on Regression Analysis method based on artificial intelligence. The study showed that the most important factor is the rock characteristics, mainly GSI value. It also turned out that the excavation and support method is more important than the cover thickness above the tunnel. Comparing field measurements with the analysis results confirmed the validity of the proposed methodology to predict the collapse depth and to study many factors that are difficult to be considered by traditional methods.

Keywords: Rock collapse, rock tunnels, NATM, GSI, regression analysis, artificial intelligence.

مقدمة

إن حفر الأوساط الصخرية الضعيفة لتنفيذ الأنفاق ينطوي على خطورة انهيار الكتل الصخرية أعلى حفرة النفق، الأمر الذي قد يكون أكثر خطورة من تنفيذ الحفر في الأوساط الترابية. يعتقد الكثيرون أن الأوساط الصخرية تتمتع بمقاومة كافية قد تسمح بحفرها دون تدعيم أو بتدعيم خفيف، هذا الاعتبار الذي يمكن أن يتسبب بمخاطر كارثية في حال كانت الصخور مشققة بكثافة أو متطبقة ذات طبقات رقيقة ضعيفة. تشكل التشققات والفواصل بكل أشكالها نقاط ضعف في الأوساط الصخرية وبخاصة تلك التي تمتد على شكل سطوح تطبق تقسم الصخر إلى طبقات رقيقة يمكن أن تتكسر وتتهار بسهولة عند حفرها. تبدأ الانهيارات في محيط حفرة النفق ويمكن أن تمتد لأعماق قد تصل لبضعة أمتار ضمن الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق.

بالإضافة لتأثير خصائص فواصل الصخر، فإن انهيار الأوساط الصخرية المتطبقة يتعلق بالعديد من العوامل الأخرى كقيم الإجهادات الثانوية في محيط حفرة النفق، الخصائص الجيوتكنيكية للصخر، عمق وأبعاد الحفرة، كذلك طريقة الحفر والتدعيم المعتمدة.

فيما يتعلق بدراسة انهيار الصخور في محيط الأنفاق ومع تطور تقنيات تنفيذ الأنفاق ركزت بعض الدراسات على آليات وأسباب الانهيار [2], [1] اخذين بعين الاعتبار طريقة تنفيذ النفق بشكل أساسي [4], [3].

درس [5] *Martin et al.* العديد من الحالات لانهايار الصخور في محيط الأنفاق آخذاً بعين الاعتبار معيار الانهيار لـ *Hoek-Brown* [6] من أجل تحديد اتساع المنطقة المعرضة للانهايار أعلى النفق. حيث أكد على أهمية تأثير الإجهادات وخصائص الصخر في محيط حفرة النفق، بشكل خاص قيمة مقاومة الضغط المحوري للصخر السليم وخصائص فواصل الصخر كعوامل مساهمة في حدوث الانهيارات.

درس [7] *Li et al.* انهيار الصخور في محيط نفق *Shimenya* في الصين الذي امتد 4m أعلى النفق حيث بينت الدراسة أن أهم أسباب انهيار الصخور في محيط حفرة النفق المدروس هو توزع واتجاه الطبقات في الصخور المتطبقة، كما أن وجود جريان للمياه الجوفية أثر على استقرار محيط النفق بالإضافة لعدم كفاية التدعيم المستخدم.

وجد [8] Wang *et al.* أن أهم العوامل المؤدية إلى انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق هي: المياه الجوفية، تدعيم واجهة الحفر، خصائص الصخر وبشكل خاص المقاومة على الضغط بالإضافة لسماكة التغطية أعلى النفق.

درس [9] Qiao *et al.* انهيار الكتل الصخرية أعلى نفق Chen Jiashan في الصين حيث تبين أن العوامل المسببة للانهيار كانت: الطبيعة الجيولوجية للصخر المحيط بالنفق، تطور الإجهادات الثانوية في محيط حفريات النفق، تأثير المياه الجوفية، طريقة تنفيذ النفق (حفر بمقطع كامل)، عدم كفاية والتأخر بتنفيذ التدعيم لمحيط الحفريات.

اعتمدت أغلب الدراسات السابقة [11], [10] التي تناولت انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق على الطرق التحليلية التقليدية [12] أو على طرق النمذجة الرقمية [13] التي تتطلب استخدام العديد من الفرضيات لتبسيط الحالة المدروسة. حيث اعتمدت هذه الدراسات على فرضية الأوساط المستمرة وهو ما لا ينطبق على الأوساط الصخرية التي لا تخلو من الفواصل والتشققات بمختلف أنواعها.

نتيجةً للقيود الكثيرة ولتعقيد المسألة لم تحظ محاولات التنبؤ بانهيار الصخور في محيط الأنفاق باستخدام طرق التحليل التقليدية [16], [15], [14] بقدر كبير من النجاح.

إن إدراج كل العوامل التي يمكن أن تتسبب بانهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق بما فيها خصائص الصخور والفواصل والعوامل التكنولوجية المتعلقة بطريقة الحفر والتدعيم يتطلب اعتماد نموذج متطور يأخذ بعين الاعتبار تعقيد المسألة المطروحة للدراسة.

تشكل طرق الذكاء الصناعي بتنوعها الكبير خياراً مثالياً يمكن من دراسة قضايا يصعب أو يستحيل برمجتها عبر الوسائل الخوارزمية الكلاسيكية [25]. تعتمد معظم هذه الطرق في معالجتها للمسائل المدروسة على مبدأ تعلم الآلة Machine Learning الذي يشمل التقنيات التي تسمح بالتعلم والتنبؤ انطلاقاً من التدريب دون استخدام علاقات رياضية محددة بشكل مسبق [26].

وظفت طرق الذكاء الصناعي في العديد من الأبحاث المتعلقة بدراسة حفريات الأنفاق حيث وظفت Nguyen *et al.* [17] طريقة تحليل الانحدار الخطي المتعدد Multiple Linear Regression Analysis (MLRA) لدراسة حفر الأنفاق بالتفجير حيث وظفت هذه الطريقة

للتنبؤ بمساحة الجزء المحفور في واجهة الحفر في كل خطوة تفجير وأعطت نتائج مرضية مطابقة للقياسات الحقلية في الحالة المدروسة.

قام [18] Farhadian and Katibeh بدراسة التنبؤ بتسرب المياه إلى واجهة نفق دائري المقطع باستخدام طريقة تحليل الانحدار حيث وظفت الخصائص الجيولوجية والهيدرولوجية للوسط المحيط بالنفق للتنبؤ بنجاح بكمية المياه المتسربة لواجهة الحفر.

وظف [19] Jakubowski *et al.* خصائص الوسط الصخري بالإضافة لبعض عوامل تشغيل الآلة الدرية المدعمة بضغط التربة في موديل يعتمد على تحليل الانحدار متعدد البارامترات وذلك لتقييم أداء الحفر وسرعة تقدم الآلة الدرية بناءً على العلاقة الخطية أو اللاخطية بين العوامل المقترحة في الدراسة.

دمج [20] Singh *et al.* النمذجة الرقمية مع طريقة تحليل الانحدار من أجل التنبؤ بهبوطات سطح الأرض أعلى حفرة نفق بالاعتماد على عوامل متعلقة بخصائص التربة والنفق المنفذ. حيث تم اقتراح علاقة تربط بين الهبوط والعوامل المقترحة بناءً على طريقة تحليل الانحدار التي أعطت نتائج مقارنة جداً لتقييم الهبوطات المقاسة حقلياً.

درس [21] Shi *et al.* إمكانية توظيف طريقة شعاع الدعم الآلي Support Vector Machine وتحليل الانحدار اللاخطي باستخدام السلاسل الزمنية Time Series Regression للتنبؤ بالهبوط أعلى قمة نفق منفذ في وسط صخري ووجد أن هذه الطرق تقدم إمكانية تعلم عالية ويمكن توظيفها للتنبؤ بالتشوهات في قمة نفق منفذ في وسط صخري حيث يصعب دراسة العلاقة اللاخطية بين العوامل المختلفة بالطرق التقليدية.

وظف [22] Xue *et al.* إحدى تقنيات الذكاء الصناعي وهي التحليل الهرمي والمنطق الضبابي للتنبؤ بانهييار صخور في محيط نفق Zhengwan اعتماداً على ثمانية عوامل، ووجد أن ظروف المياه الجوفية وخصائص كتلة الصخور هي أكثرها تأثيراً مسبباً انهيار الصخور في الحالة المدروسة.

إن غالبية الأبحاث التي تناولت موضوع دراسة الأنفاق باستخدام طرق تحليل الانحدار ركزت على صلاحية تطبيق هذه الطرق وإمكانية توظيفها في مجال دراسة الأنفاق. بالرغم من الامكانيات

الكبيرة لطرق تحليل الانحدار في معالجة عدد كبير من العوامل إلا أنها لم توظف بشكل فعلي للتعلم بدراسة آليات الانهيار في محيط الأنفاق كما يقترح هذا البحث.

أهمية وأهداف البحث

يتناول هذا البحث موضوع الانهيارات الصخرية التي يمكن أن تنتج عن حفر الأنفاق في الأوساط الصخرية المتطبقة، حيث يمكن أن تؤدي أعمال الحفر لتكسر الطبقات الرقيقة التي تعلو النفق مسببة انهيارات قد تمتد لعدة أمتار في الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق. قد تحدث هذه الانهيارات بالرغم من تدعيم حفريات النفق وذلك في حال اعتماد طريقة حفر أو تدعيم غير ملائمة.

تتجلى أهمية البحث في تحليل العوامل المؤثرة على حدوث هذه الانهيارات وعمق انتشارها في محيط الأنفاق المنفذة بالطرق التقليدية، الأمر الذي يمكن أن يساعد على اقتراح حلول مساعدة لتجنبها والحد من أضرارها.

تهدف هذه الدراسة إلى التوصل لآلية للتنبؤ بعمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات النفق اعتماداً على عوامل متمثلة بسماكة التغطية أعلى النفق وحالة الإجهادات السائدة في محيط حفريات النفق، بالإضافة لعوامل متعلقة بخصائص الفواصل المنتشرة في الوسط الصخري وطريقة حفر وتدعيم النفق. كما أن هذا البحث سوف يساهم في تسليط الضوء على العوامل المسيطرة والتي يمكن أن تلعب الدور الرئيسي في نشوء وتطور مناطق الانهيارات.

1. انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق

إن انهيار حفريات الأنفاق المنفذة في الصخور هو أمر مرتبط بقيم الإجهادات السائدة في محيط الحفريات وبخصائص الوسط الصخري المحفور. فعند مستو منخفض للإجهادات في محيط الحفريات يكون الانهيار محكوماً باستمرارية وتوزع الفواصل الطبيعية في الصخر، أما عندما تزداد الإجهادات في محيط النفق تسيطر على عملية الانهيار الفواصل الجديدة الناجمة عن تزايد الإجهادات والتي تنتشر في محيط حفريات النفق.

غالباً ما يشار لهذا النوع من الفواصل والتصدعات الناتجة عن تزايد الإجهادات في محيط حفريات الأنفاق بحالة انهيار مفاجئ Brittle Failure. عند تنفيذ الأنفاق على أعماق متوسطة تتوضع

مناطق الانهيار هذه بالقرب من محيط حفرة النفق، بينما في حال سماكات التغطية الكبيرة تمتد الانهيارات في كامل محيط الحفر لأعماق كبيرة. عادةً ما يعبر عن مقاومة القص للصخور بمعيار كولومب الذي يعتمد استخدام ثابتين هما التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي، بينما اقترح Hoek and Brown [6] معيار انهيار تجريبي أصبح مستخدماً بشكل واسع في ميكانيك الصخور بسبب مقدرته على تمثيل العلاقة اللاخطية بين الإجهادات الرئيسية الأعظمية والأصغرية، يعطى بالمعادلة التالية:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

حيث أن:

σ_1, σ_3 : قيم الإجهاد الرئيسي الأعظمي والأصغري لحظة الانهيار.

σ_c : هي المقاومة على الضغط المحوري للصخر السليم.

s : ثابت يعبر عن درجة تشقق الصخر قيمته أقل من واحد للصخر المشقق ويساوي 1 للصخر السليم، يحسب من العلاقة:

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9} \right)} \quad (2)$$

m_b : ثابت يعبر عن نوع الصخر المتشقق ويحسب من العلاقة:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28} \right)} \quad (3)$$

m_i : ثابت يأخذ قيمته بحسب نوعية الصخر السليم.

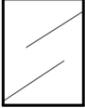





GSI: دليل المقاومة الجيولوجية اقترح من قبل Hoek بهدف تقييم خصائص الصخور في مختلف الظروف الجيولوجية. يعتمد تحديد قيمة GSI على الملاحظات الحقلية لكل من خصائص الكتل الصخرية وخصائص الفواصل المنتشرة على سطح الصخر عموماً.

عند حساب قيمة الدليل GSI تقسم الصخور كما يبين الجدول 1 إلى مجموعات تتدرج من صخور سليمة قليلة التشققات إلى صخور محطمة مقسمة إلى عدد كبير جداً من الكتل. بينما تتراوح

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

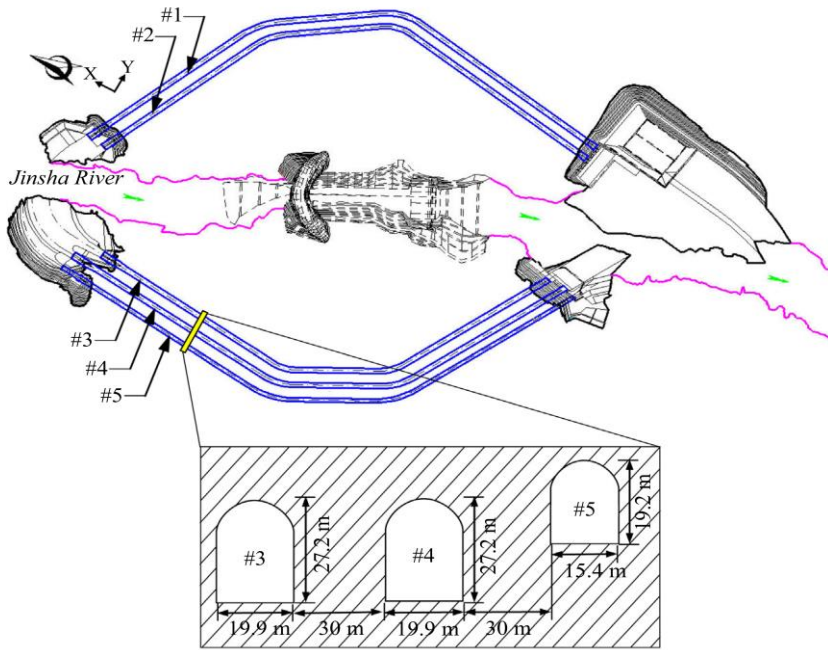
خصائص الفواصل من خشنة جداً، متقاطعة وغير خاضعة للتجوية إلى فواصل انسيابية حاوية على مواد مالئة ناعمة.

جدول 1: تقييم GSI بناءً على خصائص الكتل الصخرية وخصائص فواصل الصخر [6].

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS	DECREASING SURFACE QUALITY →				
		90	80	70	60	50
 Intact or Massive صخور سليمة أو بتشققات قليلة متباعدة	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
 Blocky صخور مقسمة إلى بلوكات، مع وجود ثلاث مجموعات من التشققات		80	70	60	50	40
 Very Blocky صخور مكونة من قطع صغيرة، أربع مجموعات تشققات أو أكثر.		70	60	50	40	30
 Blocky/Disturbed/Seamy صخور متصدعة، مجموعات شقوق عديدة متقاطعة، وجود سطوح تطبق أو استحالة		60	50	40	30	20
 Disintegrated صخور ضعيفة، متصدعة بشكل كبير إلى حطام دائري وزاوي القطع.		50	40	30	20	10
 Laminated/Sheared صخور مفتتة تشققات متقاربة جداً مع وجود سطوح استحالة أو قص.		N/A	N/A	N/A	N/A	10

2. معطيات الدراسة

يتناول هذا البحث تحليل معطيات مأخوذة من الدراسات المرجعية لمجموعة أنفاق محطة Wudongde للطاقة الكهرومائية المنفذة في الصين [24], [23]. يتضمن البحث معطيات ثلاثة أنفاق تحويل متجاورة ومتوازية ذات الأرقام (3, 4, 5) المبينة في الشكل 1. الأنفاق الثلاثة متوضعة ضمن وسط صخري مكون من طبقات صخور استحالية واندفاعية رقيقة هشة تتكون بشكل عام من طبقات من الدولوميت الرخامي الرمادي مع طبقات من صخر كلسي ودولوميت. يبلغ سمك الطبقة الواحدة من الطبقات الرقيقة 10-50mm، وسمك الطبقات الرقيقة للغاية أقل من 10mm. تبلغ أطوال هذه الأنفاق الثلاثة 1472m، 1614m، 1700m على التوالي، تبلغ سماكة التغطية أعلى الأنفاق 3, 4 القيمة 830m وأعلى النفق 5 تبلغ 842m، المقطع العرضي للأنفاق قوسي أبعاده موضحة في الشكل 1.



الشكل 1: المسار والمقطع العرضي للأنفاق 3, 4, 5 لمحطة تحويل Wudongde [23].

انهارت الأنفاق الثلاثة بشكل متكرر أثناء عمليات التنفيذ، لذلك تم إجراء مراقبة حقلية دقيقة وموسعة حيث تم تسجيل أعماق الانهيارات في نقاط مراقبة بالإضافة لتحديد قيم العديد من العوامل التي يمكن أن تلعب دوراً في حدوث هذه الانهيارات. سيتم توظيف قيم القياسات الحقلية التي سجلت في نقاط المراقبة الموزعة على امتداد الأنفاق الثلاثة ليتم تحليلها ودراسة العلاقة فيما بينها باستخدام طريقة تحليل الانحدار.

3. التنبؤ بعمق الانهيار عن طريق توظيف تحليل الانحدار المتعدد

3.1 تحليل الانحدار المتعدد: Multiple regression analysis

تعد طرق تحليل الانحدار المتعدد من أهم وأقوى أساليب التحليل الإحصائي الذي يربط مجموعة من المتغيرات بطريقة تمكن من التنبؤ بقيمة تابع y مرتبط بأكثر من متغير x_i (ولهذا يسمى متعدد كونه يعتمد على العديد من المتغيرات على خلاف تحليل الانحدار البسيط الذي يربط تابع y مع متغير واحد فقط x). يتم في تحليل الانحدار استخدام البيانات المتوفرة لبناء نموذج تنبؤي قادر على توصيف الظاهرة المدروسة بناءً على مجموعة من النماذج المقترحة كأمثلة يبني عليها التنبؤ.

تعتمد عمليات التنبؤ باستخدام تحليل الانحدار على توظيف قيم أولية x_i للمتغيرات يقترحها الموديل المدروس بناءً على أمثلة معطاة، حيث يتم الوصول إلى تابع التنبؤ y بعد إضافة قيمة الخطأ ε_i المسمى خطأ التنبؤ في معادلة الانحدار التي تعطى بالصيغة التالية:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \varepsilon_i \quad (4)$$

حيث أن β_i هي معاملات الانحدار التي تعبر عن مساهمة كل متغير x_i في التنبؤ بقيمة y . يعبر خطأ التنبؤ ε_i (أو ما يسمى بالقيمة المتبقية Residual value) عن الفرق بين القيم المقاسة y_i والقيم المتوقعة \bar{y}_i للتابع المدروس في معادلة الانحدار. كلما كانت قيمة خطأ التنبؤ أقل كانت دالة التنبؤ أفضل وأدق، حيث يحسب خطأ التنبؤ من العلاقة التالية:

$$\varepsilon_i = y_i - \bar{y}_i \quad (5)$$

إن المعادلة 4 هي واحدة من جملة معادلات يبلغ عددها n تكون نظام المعادلات التالي:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \varepsilon_1 \\
 y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \varepsilon_2 \\
 y_3 &= \beta_0 + \beta_1 x_{31} + \beta_2 x_{32} + \dots + \varepsilon_3 \\
 y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \varepsilon_n
 \end{aligned} \tag{6}$$

حيث يمكن تمثيل هذه المعادلات وكتابتها بشكل مصفوفات كما يلي:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

إن دقة التنبؤ وتقليل الأخطاء المتوقعة إلى أدنى حد هو هدف أساسي في عملية التنبؤ بطريقة تحليل الانحدار حيث تعتبر الدقة مؤشر لكفاءة أداء النموذج المقترح. من أجل الحكم على مدى الدقة وجودة التنبؤ في النموذج المقترح وفيما يخص تحليل الانحدار فإن هناك ثلاث مؤشرات مهمة للجودة وهي:

- معامل التحديد R^2 : وهو مقياس إحصائي يمثل نسبة التباين لمتغير تابع يتم تفسيره بواسطة المتغيرات المستقلة في نموذج الانحدار، تقع قيمته بين 0 و 1.
- الخطأ المعياري للانحدار (MSE) Mean Square Error ويمثل متوسط مربعات الأخطاء ويحسب من العلاقة:

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n} \tag{8}$$

- جذر متوسط مربعات الأخطاء (RMSE) Root Mean Square Error ويعطى بالعلاقة التالية:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \tag{9}$$

إذ أنه كلما انخفضت قيمة RMSE كلما كان النموذج أكثر دقة، وكانت جودة التنبؤ أعلى.

3.2 النموذج المقترح

تم توظيف طريقة تحليل الانحدار المتعدد للتنبؤ بعمق الانهيار أعلى حفرة النفق، والمقصود بعمق الانهيار في هذا البحث هو: مقدار امتداد الانهيار بدءاً من محيط حفرة النفق باتجاه الأعلى ضمن الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق.

تم في المرحلة الأولى بناء قاعدة البيانات حيث اقترحت ستة عوامل سجلت قيمها بالإضافة لقيم أعماق الانهيارات المسجلة في مقاطع القياس المدروسة.

العوامل التي وظفت في هذه الدراسة كعوامل مؤثرة في حدوث انهيار الوسط الصخري في محيط مجموعة الأنفاق المدروسة هي التالية:

- سماكة التغطية أعلى النفق وتتراوح بين 60m كحد أدنى وحتى 560m كحد أقصى على كامل امتداد كل من الأنفاق الثلاثة الذي يزيد عن 1.4km.
- الحالة الإجهادية في محيط حفرة النفق متمثلة بنسبة الإجهادات الرئيسية الأصغر إلى الأعظمية σ_3/σ_1 .
- دليل المقاومة الجيولوجية GSI: الذي تم تحديده بناءً على خصائص الكتل الصخرية والفواصل التي تحتويها والمأخوذة من التحريات الجيوهندسية. تراوحت قيم هذا العامل بحسب الدراسة الحقلية بين 12-56 مما يؤكد وبحسب تصنيف [6] Hoek أن الوسط الصخري يصنف من ضعيف جداً إلى متوسط المقاومة.
- عامل يأخذ بعين الاعتبار اتجاه الفواصل بالنسبة لمحور النفق متمثلاً بقيمتي الزاوية Dip والزاوية بين محور النفق واتجاه Strike للفواصل. حيث قسمت قيم هذا العامل إلى 6 حالات بحسب قيم الزاويتين المذكورتين كما يبين الجدول 2:

جدول 2: القيم العددية الممثلة لمعامل اتجاه الفواصل [24].

القيمة المقابلة	مجال قيم الزاوية بين محور النفق واتجاه Strike	مجال قيم الزاوية Dip (°)
1	0-20	35-50
2	20-40	35-50
3	0-20	50-65
4	20-40	50-65

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

65-80	0-20	5
65-80	20-40	6

- طريقة حفر النفق: تم توظيف ثلاث طرق لحفر مجموعة الأنفاق المدروسة وهي 1. حفر بمقطع مجزأ 2. حفر بنصف مقطع 3. حفر بمقطع كامل. لإدخال هذا العامل في تحليل الانحدار تم التعبير عن هذه الطرق الثلاث بالقيم العددية 1, 2, 3 على التوالي، حيث أظهرت التحريات الحقلية أن عمق الانهيار كان أصغرياً عند حفر النفق بمقطع مجزأ، وأعظماً عند الحفر بمقطع كامل.
- مقاومة التدعيم: صنفت مقاومة التدعيم المستخدم في أربع مستويات للمقاومة: ضعيف، متوسط، قوي وقوي جداً، تم التعبير عن هذه المستويات بأربع قيم عددية هي على التوالي 0, 1, 2, 3 كما يبين الجدول 3:

جدول 3: القيم العددية الممثلة لعامل مقاومة التدعيم [24].

مستوى مقاومة التدعيم	نظام التدعيم	القيمة المقابلة
ضعيف	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد الحفر.	0
متوسط	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موضعية عند الحاجة.	1
قوي	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد	2

	الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موزعة بانتظام وشدادات موضعية عند الحاجة.	
قوي جداً	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موزعة بانتظام وشدادات موضعية عند الحاجة، بالإضافة لتقوية التدعيم بتنفيذ أقواس فولاذية.	3

تضمنت قاعدة البيانات معطيات 49 مقطع قياس متوزعة على الأنفاق الثلاثة [24] حيث حددت قيم كل من العوامل الستة المذكورة أعلاه بالإضافة لقيم عمق الانهيار المقاسة لكل حالة من الحالات المدروسة.

نفذت هذه الدراسة باستخدام تطبيق Regression Learner الموجودة في بيئة MATLAB R2017a وذلك كأحد الخيارات المتعددة لطرق تحليل الانحدار المتاحة ضمن البرنامج.

4. النتائج والمناقشة

تم في هذا البحث الدمج بين الإحصاء الكلاسيكي متمثلاً بنموذج تحليل الانحدار مع التقنيات الذكية أو تعلم الآلة المتاح في بيئة ماتلاب للتنبؤ بقيمة عمق الانهيار Z في محيط الأنفاق المدروسة. إن الغاية الأساسية من توظيف الطرق الذكية هي الوصول للتنبؤ بقيمة عمق الانهيار بناءً على معطيات تدريب للبرنامج ودون تحديد علاقة تربط المتغيرات المقترحة بعمق الانهيار ليتم استخدامها في تحليل الانحدار. بمعنى آخر إن المعادلة التي تربط المتغيرات مع تابع الانحدار تبنى على معطيات التدريب وتبقى مخفية ضمن بنية الموديل المستخدم التي تنجز تحليل الانحدار بشكل آلي.

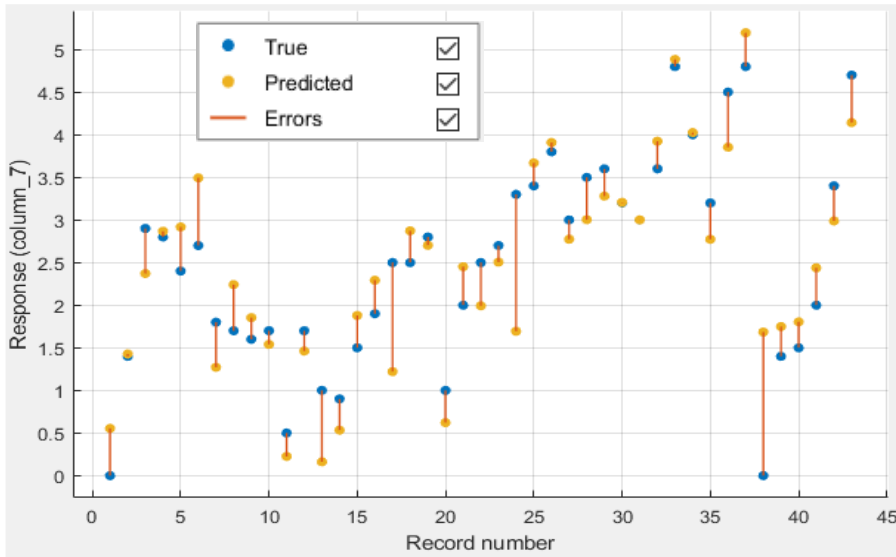
تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

تم توزيع معطيات 43 مقطع قياس لتدريب البرنامج وذلك بإدخال قيم العوامل الستة المذكورة أعلاه لكل مقطع مدروس كما تم تزويد البرنامج بقيم عمق الانهيار المقاسة حقلياً في كل من المقاطع المدروسة. تم توزيع نسبة 5% من معطيات التدريب للتحقق من مدى صحة التدريب وفق عملية cross validation. يوفر البرنامج إمكانية المقارنة بين عدد كبير من نماذج الانحدار Linear regression, svm, trees من أجل اختيار النموذج الأكثر ملائمة لمعطيات التدريب المدروسة. تكون قيمة RMSE هي العامل الأساسي الذي يعتمد عليه في المقارنة بين النماذج، كما يعطي البرنامج قيم مؤشرات الجودة الأخرى الخاصة بكل نموذج MSE, R², MAE. في نهاية مرحلة التدريب تم اعتماد نموذج الانحدار الخطي الذي أعطى أقل قيمة لـ RMSE والتي بلغت 0.56 كما يبين الجدول 4 قيم باقي مؤشرات الجودة:

جدول 4: قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التدريب.

قيم مؤشرات الجودة- مرحلة التدريب			
عدد المقاطع المدروسة	RMSE	MSE	R ²
43	0.56	0.31	0.79

يبين الشكل 2 نتائج التنبؤ في نهاية مرحلة التدريب موضعاً قيم الفروقات Errors كما يعطيها البرنامج بين القيم المقاسة حقلياً والقيم التي تم التنبؤ بها في هذه المرحلة.

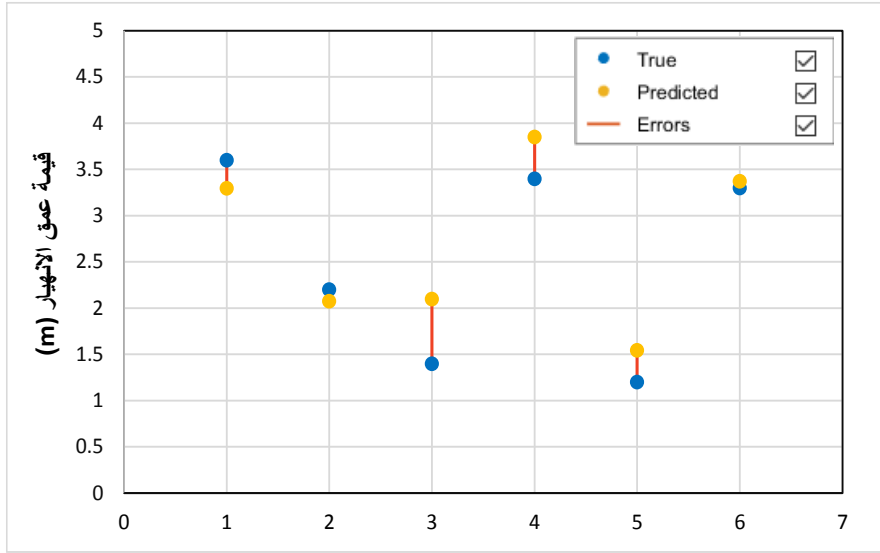


شكل 2: نتائج مرحلة التدريب - قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة التدريب في 43 مقطع قياس.

بعد إتمام مرحلة التدريب تم في المرحلة التالية (validation) توظيف البرنامج للتنبؤ بقيم عمق الانهيار في ستة مقاطع جديدة موزعة في الأنفاق الثلاثة المدروسة.

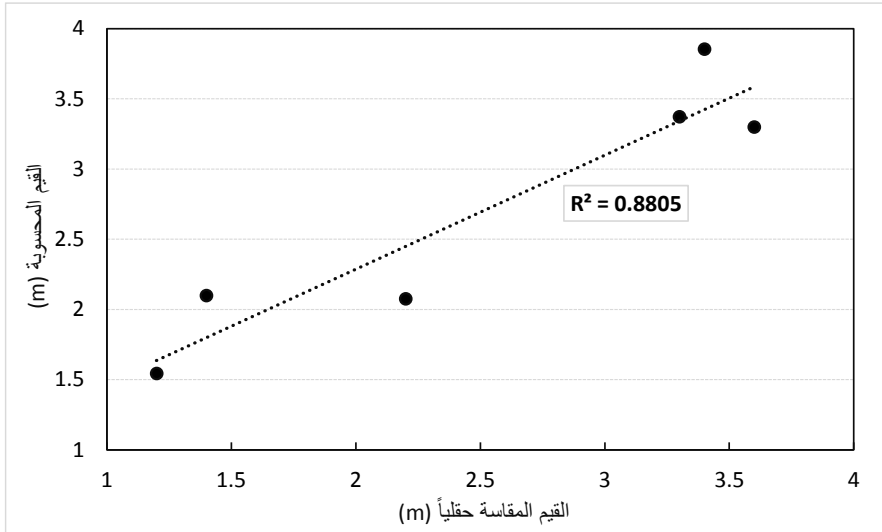
تم اعتماد العوامل الستة التي سجلت قيمها بناءً على التحريات الحقلية وسيقوم البرنامج بالتنبؤ بقيم عمق الانهيار بناءً على هذه المعطيات وعلى التدريب الذي تم إنجازه في المرحلة الأولى.

يبين الشكل 3 نتائج التنبؤ في نهاية مرحلة validation في كل من المقاطع الستة المدروسة حيث نلاحظ أن القيم المحسوبة عن طريق البرنامج مقارنة جداً للقيم المقاسة حقلياً، وأن قيم الفروقات قد تناقصت مقارنةً بنتائج مرحلة التدريب المبينة سابقاً.



الشكل 3: نتائج مرحلة التنبؤ - قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة validation في 6 مقاطع قياس.

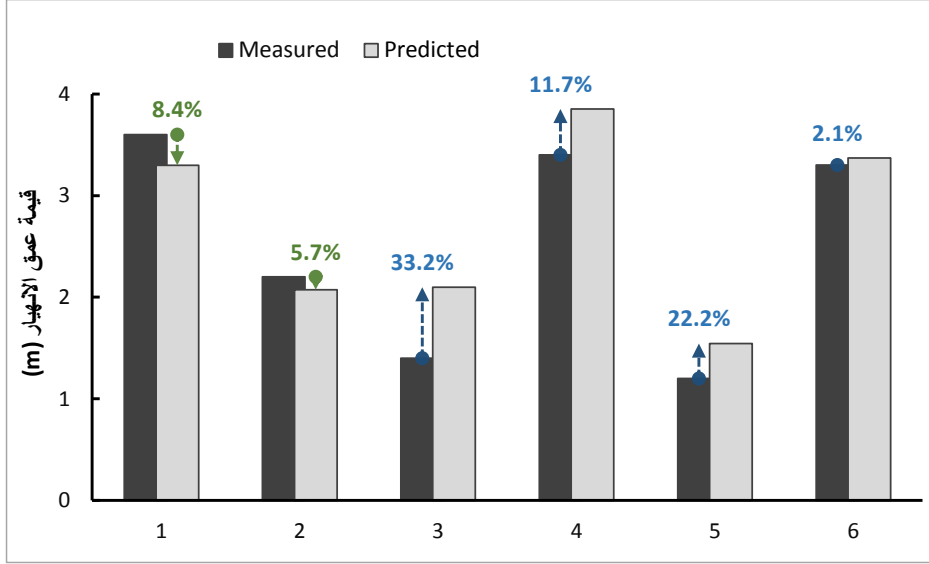
تمت مقارنة نتائج التنبؤ مع القيم المقاسة حقلياً في المقاطع الستة المدروسة كما يبين الشكل 4 فوجد أن قيمة دليل الجودة R^2 في نهاية هذه المرحلة تساوي 0.88.



الشكل 4: نتائج مرحلة التنبؤ - مقارنة القيم المقاسة /المحسوبة لعمق الانهيار في نهاية مرحلة التنبؤ في المقاطع الستة.

من أجل تقييم دقة النتائج والمقارنة بشكل أوضح في كل مقطع من المقاطع الستة المدروسة، نستعرض في الشكل 5 الفروقات بين القيم المقاسة والقيم التي تتبأ بها موديل الانحدار في كل مقطع قياس، حيث نجد أن نسبة الخطأ بين القيم المحسوبة/المقاسة لا تزيد عن 33% كحد أقصى في المقطع الثالث، بينما تكون القيم في باقي المقاطع أكثر تقارباً.

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق



الشكل 5: نتائج مرحلة التنبؤ - الفروقات بين قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة التنبؤ في المقاطع الستة.

يبين الجدول 5 قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التنبؤ النهائية والتي توضح الأداء الجيد للتنبؤ مقارنةً مع نتائج مرحلة التدريب المبينة في الجدول 4:

جدول 5: قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التنبؤ.

قيم مؤشرات الجودة - مرحلة التنبؤ			
عدد المقاطع المدروسة	RMSE	MSE	R ²
6	0.39	0.15	0.88

بناءً على النتائج السابقة نجد أن المنهجية المقترحة قادرة على إعطاء قيم عمق الانهيار الصخري المتوقع حدوثه في محيط حفريات النفق معتمداً على توظيف ستة عوامل تأخذ بعين الاعتبار: سماكة التغطية أعلى النفق، قيم الإجهادات الرئيسية المؤثرة في محيط النفق، خصائص الوسط الصخري

(بشكل أساسي خصائص واتجاه الفواصل)، طريقة حفر النفق ونوع التدعيم المستخدم. لا بد أن نذكر أن الشرط الأساسي والذي يعتبر إحدى صعوبات المنهجية المقترحة هو ضرورة إجراء مراقبة وقياسات حقلية دقيقة وشاملة (لحالات انهيار سابقة ولخصائص الوسط الصخري كذلك لطريقة الحفر والتدعيم) من أجل بناء قاعدة بيانات يتم توظيفها في تدريب البرنامج ليكون قادراً على القيام بالتنبؤ.

كما ذكر أعلاه، بنيت قاعدة البيانات في هذا البحث على قيم ستة عوامل ولأن طريقة البحث اعتمدت على دمج الذكاء الصناعي مع طريقة تحليل الانحدار فلا يعطي البرنامج أية علاقة رياضية (تربط قيمة عمق الانهيار مع العوامل الستة) كما هو الحال في طرق تحليل الانحدار التقليدية المبنية على معادلة محددة. لذلك ولتحديد دور كل من العوامل المقترحة في هذا البحث تم إجراء دراسة بارامترية لتحديد أهمية هذه العوامل.

5. تحليل متغيرات الدراسة Sensitivity Analysis

قبل البدء بالدراسة البارامترية تم الرجوع لقاعدة البيانات وحساب القيم الوسطية لكل عامل من العوامل الستة التي اعتمدت في الدراسة آخذين بعين الاعتبار أن بعض العوامل (كطريقة الحفر والتدعيم ومعامل اتجاه الفواصل) تم تمثيلها بقيم عددية ستؤخذ أيضاً كحالة اعتبارية وسطية. تم افتراض حالة نفق باعتبار القيم الوسطية التي تم حسابها حيث درست العوامل التالية:

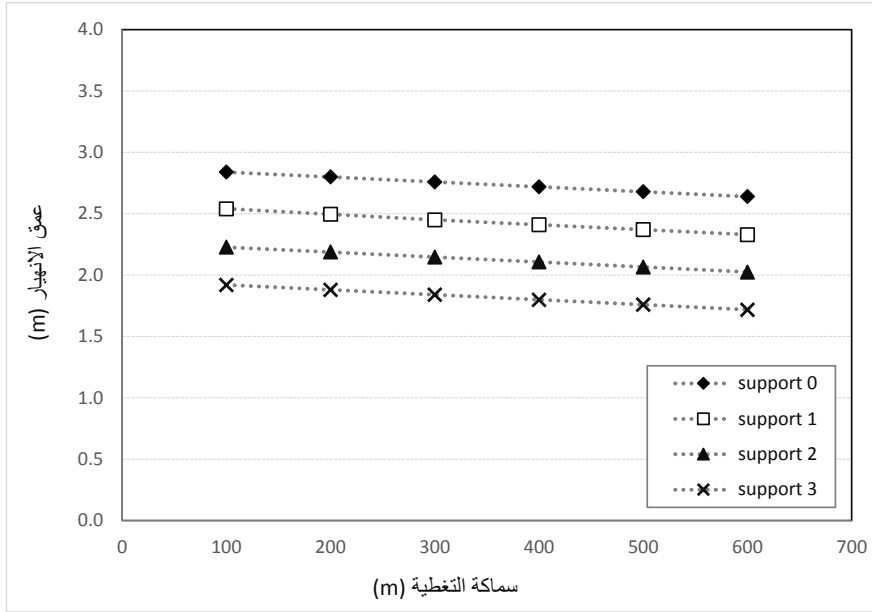
5.1 تأثير سماكة التغطية أعلى النفق ونوع التدعيم المستخدم

تم دراسة تغير سماكة التغطية أعلى النفق بين قيمة أصغر 100m وقيمة أعظم 600m، حيث تم تثبيت باقي العوامل على قيمها الوسطية. تم اعتبار حفر النفق بنصف مقطع وإعطاء عامل اتجاه الفواصل القيمة 3 بينما تم أخذ حالات التدعيم الأربعة المذكورة في الجدول 3 لدراسة تأثير هذا العامل بنفس الوقت.

يبين الشكل 6 أن عمق الانهيار أعلى النفق يتناقص بازدياد سماكة التغطية أعلى النفق وذلك بغض النظر عن طريقة التدعيم المستخدمة. يمكن تفسير هذه النتيجة بأن تنفيذ الأنفاق على أعماق كبيرة يسمح بنشوء ظاهرة الضغط الجبلي في محيط النفق والتي تزيد من مقاومة الوسط

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

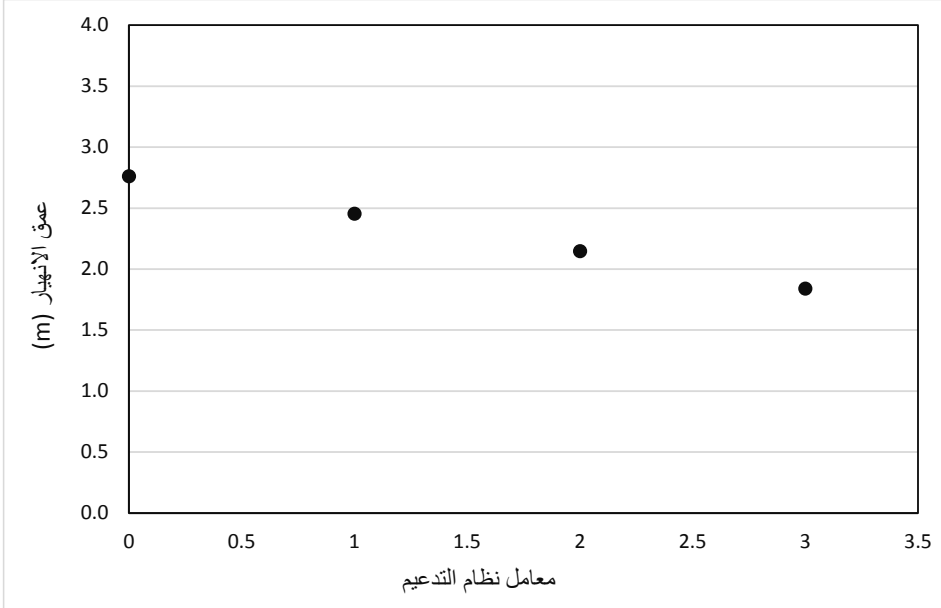
المحفور وتقلل من الانهيارات المحتملة. بينما عند تنفيذ الأنفاق على أعماق قليلة قد لا تنشأ هذه الظاهرة وبالتالي سيكون تأثير الحمولات الناتجة عن الوزن الذاتي لطبقة التغطية أعلى النفق أكبر في هذه الحالة.



الشكل 6: تأثير تغيير سماكة التغطية أعلى النفق على قيم عمق الانهيار باعتبار استخدام أنواع التدعيم الأربعة.

يبين كذلك الشكل 6 الدور الهام لنظام التدعيم المستخدم، حيث نجد أن استخدام نظام تدعيم أكثر مقاومة يقلل من عمق الانهيار الأمر الذي يتوافق مع الملاحظة الحقلية ويؤكد صحة عمل نظام التنبؤ المقترح. يمكن القول أن نوع التدعيم المستخدم يلعب دوراً أكثر أهمية من سماكة التغطية أعلى النفق فعلى سبيل المثال: عند استخدام نظام تدعيم من النوع 2 (جدول 3) وتغيير سماكة التغطية أعلى النفق من 100m إلى 600m فإن ذلك ترافق مع انخفاض في عمق الانهيار مقداره 20cm. بينما نلاحظ في الشكل 7 أنه إذا اعتبرنا تنفيذ النفق تحت سماكة تغطية وسطية 300m

نلاحظ انخفاض عمق الانهيار بمقدار 90cm تقريباً عند الانتقال من حالة تدعيم ضعيف جداً (ممثلاً بالقيمة 0) إلى حالة تدعيم قوي جداً (تدعيم رقم 3).



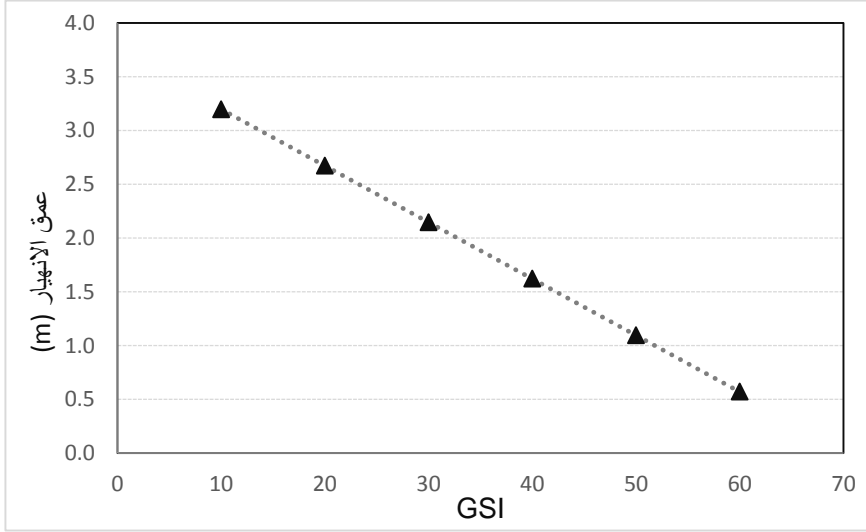
الشكل 7: تأثير نوع نظام التدعيم المستخدم على قيم عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفرية النفق.

5.2 تأثير دليل المقاومة الجيولوجية GSI

باعتبار تنفيذ النفق تحت سماكة تغطية وسطية 300m حفر بنصف مقطع مع تدعيم من النوع 2 وإعطاء عامل اتجاه الفواصل القيمة 3. يبين الشكل 8 أن ازدياد قيمة دليل المقاومة الجيولوجية يترافق مع تناقص قيمة عمق الانهيار في محيط النفق. فعند حفر النفق في وسط ضعيف جداً قيمة GSI له تساوي 10 تكون قيمة عمق الانهيار المتوقعة 3.2m وتتناقص هذه القيمة حتى تصبح 0.57m عند تنفيذ النفق في وسط صخري متوسط المقاومة تبلغ قيمة GSI له 60.

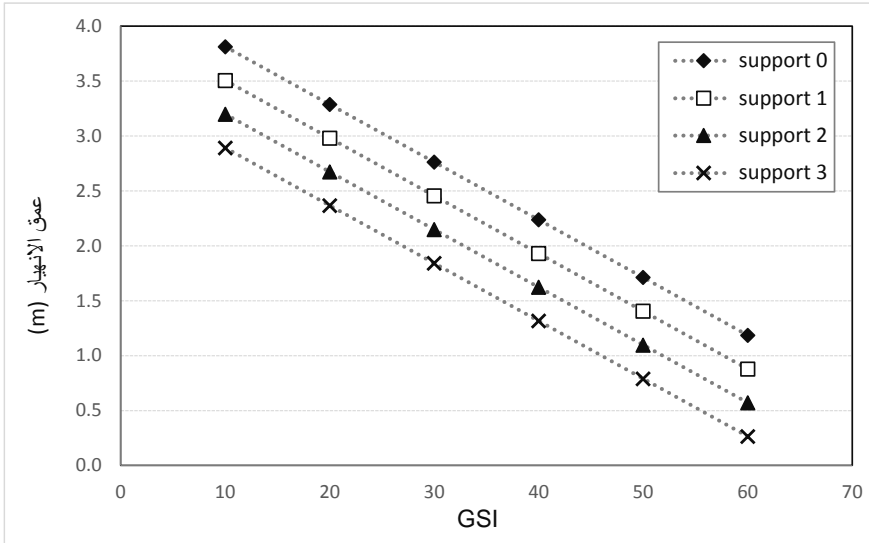
تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

إن تغيير قيمة GSI بين حده الأدنى والأعلى (زيادة مقاومة الوسط الصخري) ترافق مع انخفاض قيمة عمق الانهيار بمقدار 2.6m وهي نتيجة تبين الأهمية العظمى لهذا العامل وتأثيره على تطور الانهيارات الصخرية في محيط النفق.



الشكل 8: تأثير قيمة GSI على قيم عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات النفق مدعم بالنظام رقم 2.

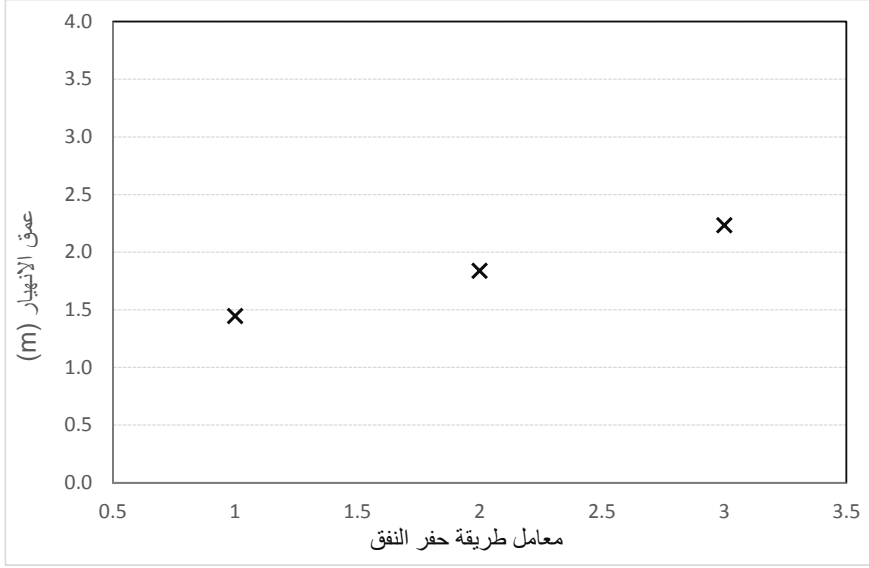
تم تكرار الحسابات من أجل كل نوع من أنواع التدعيم الأربعة المستخدمة في الموقع حيث اكدت الحسابات نفس النتيجة كما يبين الشكل 9. كذلك يؤكد الشكل انخفاض قيم عمق الانهيار عند استخدام نظام تدعيم أقوى (بشكل مشابه للنتيجة التي تم التوصل إليها عند دراسة تأثير سماكة التغطية أعلى النفق).



الشكل 9: تأثير تغير قيم GSI على قيم عمق الانهيارات عند استخدام أنواع تدعيم مختلفة.

5.3 تأثير طريقة حفر النفق

بينت دراسة تأثير هذا العامل أن الحفر بمقطع كامل (الممثل بالرقم 3) ترافق مع قيم أكبر لعمق الانهيار بالمقارنة مع حالة الحفر بنصف مقطع (حالة رقم 2) أو بمقطع مجزأ (حالة رقم 1) كما يبين الشكل 10. نلاحظ أن الحفر بمقطع مجزأ ترافق مع عمق انهيار قيمته 1.45m، وبلغ عمق الانهيار 1.84m عند الحفر بنصف مقطع، بينما ازدادت القيمة إلى 2.23m عند الحفر بمقطع كامل.



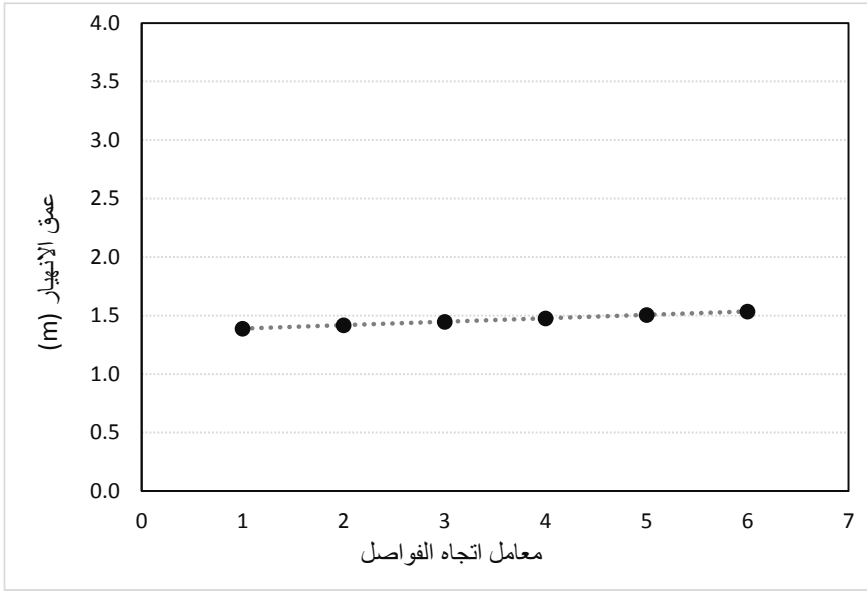
الشكل 10: تأثير طريقة حفر النفق على قيم عمق الانهيار الصخري في محيط النفق.

إن نتائج التنبؤ هذه تتوافق مع نتائج القياسات الحقلية التي أكدت أن الحفر بمقطع كامل قد يتسبب بنشوء انهيارات تمتد لأعماق أكبر في الوسط الصخري نتيجة تفريغ كتلة كبيرة من الصخور دفعة واحدة.

بالاعتماد على النتائج السابقة نجد أن الحل الأساسي لحماية محيط النفق عند الحفر بمقطع كامل يكون باستخدام نظام تدعيم قوي يقلل من قيمة عمق الانهيار المحتمل حدوثه.

5.4 تأثير اتجاه الفواصل

تضمن العامل الذي سمي "اتجاه الفواصل" قيمتين هما: قيمة زاوية ميل الفواصل Dip وقيمة الزاوية بين محور النفق واتجاه Strike للفواصل كما بين الجدول 2. لإجراء الدراسة البارامترية تم تغيير قيمة هذا العامل من 1 إلى 6 وذلك باعتبار حالة نفق منفذ على عمق 300m حفر بمقطع كامل ومدعم بنظام تدعيم 3 ضمن وسط صخري تبلغ قيمة GSI له 30. بينت النتائج أن هذا العامل ليس له أي تأثير يذكر على قيمة عمق الانهيار كما يوضح الشكل 11:



الشكل 11: تأثير العامل "اتجاه الفواصل" على قيم عمق الانهيار في محيط النفق.

إن التفسير الأساسي لهذه النتيجة يمكن أن يعود إلى أن هذا العامل يتضمن قيم زاويتين مختلفتين وأن تمثيله بقيمة عددية تتراوح من 1 إلى 6 لم يعبر عن دوره الحقيقي عند توظيفه في طريقة تحليل الانحدار. كان من الأجدر توظيف قيمة الزاوية Dip في كل حالة من الحالات المدروسة لكن عدم توفر القيم الحقلية التفصيلية لهذه الزاوية أو للزاوية بين محور النفق واتجاه Strike كان عائقاً أمام التعمق في دراسة هذا العامل بالشكل المطلوب.

6. الاستنتاجات والتوصيات

بينت الدراسة امكانية توظيف إحدى تقنيات التحليل الاحصائي وهي طريقة تحليل الانحدار مدمجاً مع الذكاء الصناعي للنتبؤ بعمق الانهيارات الصخرية في محيط مجموعة من الأنفاق المنفذة بالطريقة التقليدية NATM. اعتمدت الخوارزمية المقترحة على توظيف جزء من معطيات الدراسة للقيام بمرحلة من التعلم الآلي تؤهل الموديل المستخدم للقيام بتحليل الانحدار للنتبؤ بعمق الانهيار في محيط النفق.

بيّن التحليل الذي أجري لعدد من المقاطع المرجعية لأنفاق منفذة في أوساط صخرية ومعرضة للانهيّارات مقدرة النظام المقترح على التنبؤ بقيم أعماق الانهيّارات في محيط حفرية النفق. كما بينت الدراسة البارامترية التي أجريت للعوامل المقترحة في الدراسة أن انهيار الصخور في محيط النفق هو عملية معقدة مرتبطة بالعديد من العوامل المتعلقة ببعضها البعض، فطريقة الحفر والتدعيم مرتبطة بخصائص الوسط الصخري ومدى مقاومته.

بينت الدراسة في الحالة المرجعية المأخوذة أن تنفيذ النفق على أعماق كبيرة يمكن أن يقلل من أعماق الانهيّارات المحتملة في محيط النفق. كما تبين أن الحفر بمقطع مجزأ ترافق مع قيم أقل للانهيّارات بالمقارنة مع حالتي الحفر بنصف مقطع أو الحفر بمقطع كامل. إن العامل GSI المعبر عن دليل المقاومة الجيولوجية للوسط الصخري كان من أهم العوامل وأكثرها تأثيراً حيث تناقصت قيم أعماق الانهيّارات عند ازدياد قيم GSI.

كما بينت الدراسة البارامترية لجميع العوامل السابقة أن التدعيم المستخدم له دور هام في تقليل قيم عمق الانهيّار بغض النظر عن طريقة الحفر أو خصائص الوسط الصخري المحفور. في حين تبين أن العامل المقترح للتعبير عن اتجاه الفواصل في هذه الدراسة لم يكن ملائماً ليوظف بطريقة تحليل الانحدار وكان لا بد من الحصول على قيم فعلية لزاوية ميل أو اتجاه الفواصل لتوظف في هذا البحث.

اعتماداً على نتائج هذا البحث لا بد أن نشير إلى بعض التوصيات الآتية:

- ضرورة اختبار المنهجية المقترحة في معالجة حالات أنفاق أخرى بظروف جيولوجية مختلفة ويتوفر قاعدة بيانات أكثر شمولية ليتم التحقق من النتائج التي تم التوصل إليها.
- التوسع في دراسة دور اتجاه الفواصل في حدوث حالات الانهيّار في محيط الأنفاق.
- دراسة تأثير معامل الزمن (التأخير في تدعيم محيط حفرية النفق) في حدوث الانهيّارات وهو أحد العوامل الهامة التي تدرس عند تنفيذ الأنفاق بالطريقة NATM. نذكر أن دراسة هذا العامل يتطلب مراقبة حقلية متضمنة تسجيلات لقيم هذه الفواصل الزمنية في المقاطع المدروسة ليصار إلى ادخالها في قاعدة البيانات كأحد عوامل الدراسة (الأمر الذي لم يكن متاح في بحثنا هذا).

7. المراجع

- [1] Li L., Li S.C., Zhang Q.S. (2010). Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels. *Rock and Soil Mechanics*. 31(2), 523-528.
- [2] Wang C.B., ZHU H.H. (2008). Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 30(3), 450-456.
- [3] Li L., Li S.C., Chen J., Li J., Xu Z., Shi S. (2011). Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 30 (7). 1345-1355.
- [4] Zhu W.S., He M.C. (1995). *Stability of Surrounding rock under complex conditions and dynamic construction mechanics of rock mass*. Beijing: Science Press.
- [5] Martin C. D., Kaiser P. K., McCreath. D. R. (1999). Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*. 36(1), 136-151.
- [6] Hoek E., Brown E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 34 (8), 1165–1187.
- [7] Li L., Wang Q., Li S., Huang H., Shi S., Wang K., Lei T., Chen D. (2014). Cause Analysis of Soft and Hard Rock Tunnel Collapse and Information Management. *Polish Journal of Environmental Studies*. 23(4),1227-1233.
- [8] Wang H. T., Wang L. G., Li S. C., Wang Q., Liu P., Li X. J. (2019). Roof collapse mechanisms for a shallow tunnel in two-layer rock strata incorporating the influence of groundwater. *Engineering Failure Analysis*. 98, 215-227.
- [9] Qiao S., Cai Z., Tan J., Xu P., Zhang Y. (2020). Analysis of collapse mechanism and treatment evaluation of a deeply buried hard rock tunnel. *Applied Sciences*. 10(12), 4294.

- [10] Fraldi M., Guarracino F. (2011). Evaluation of impending collapse in circular tunnels by analytical and numerical approaches. *Tunneling and underground space technology*. 26(4), 507-516.
- [11] Huang F., Zhu H., Xu Q., Cai Y., Zhuang X. (2013), The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel–Scaled model tests and numerical analysis. *Tunneling and underground space technology*. 35, 207-218.
- [12] Wagner H. (1987). Design and support of underground excavations in highly stressed rock. In *Proceedings of the 6th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal. Vol. 3. Edited by G. Herget and S. Vongpaisal. A.A. Balkema, Netherlands. 1443–1457.
- [13] Hasanpour R. (2014). Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM. *Computers and Geotechnics*. 57, 37-52.
- [14] Castro L.A.M., McCreath D.R., Oliver P. (1996). Rock mass damage initiation around the Sudbury Neutrino Observatory cavern. In *Proceedings of the 2nd. North American Rock Mechanics Symposium*, Montreal. Vol. 2. Edited by M. Aubertin, F. Hassani, and H. Mitri. A.A. (1997). Balkema, Rotterdam. 1589–1595.
- [15] Martin C.D. (1997). Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. *Canadian Geotechnical Journal*. 34(5), 698–725.
- [16] Pelli F., Kaiser P.K., Morgenstern N.R. (1991). An interpretation of ground movements recorded during construction of the Donkin–Morien tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*. 28(2), 239-254.
- [17] Nguyen T. C., Do A. N., Pham V. V., Alexandr G. (2022). Multiple linear regression analysis model and artificial neural network model to calculate and estimate the blast induced area of the tunnel face. A case study Deo Ca tunnel. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 63(3), 43-52.
- [18] Farhadian H., Katibeh H. (2017). New empirical model to evaluate groundwater flow into circular tunnel using multiple regression analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 27(3), 415-421.

- [19] Jakubowski J., Stypulkowski J. B., Bernardeau F. G. (2017). Multivariate linear regression and CART regression analysis of TBM performance at Abu Hamour phase-I tunnel. Archives of Mining Sciences. 62(4), 825-841.
- [20] Singh D. K., Aromal V., Mandal A. (2020). Prediction of surface settlements in subway tunnels by regression analysis. International Journal of Geotechnical Engineering, DOI: 10.1080/19386362.2018.1477294
- [21] Shi S., Zhao R., Li S., Xie X., Li L., Zhou Z., Liu H. (2019). Intelligent prediction of surrounding rock deformation of shallow buried highway tunnel and its engineering application. Tunnelling and Underground Space Technology. 90, 1-11.
- [22] Xue Y., Li X., Li G., Qiu D., Gong H., Kong F. (2020). An analytical model for assessing soft rock tunnel collapse risk and its engineering application. Geomech. Eng. 23(5), 441-454.
- [23] Niu X. Q., Si B. X., Weng Y. H. (2011). Feasibility Study Report of the Wudongde Hydropower Station on the Jinsha River, First paper: Comprehensive Statement (Pivotal Project). Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, China.
- [24] Chen D. F., Feng X. T., Xu D. P., Jiang Q., Yang C. X., Yao P. P. (2016). Use of an improved ANN model to predict collapse depth of thin and extremely thin layered rock strata during tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology. 51, 372-386.

[25] علي بلال، نقلا محمد، الطحان إبراهيم. (2023). منهجية العمل بطريقة التحليل الهرمي APH وتطبيقاتها ضمن مجال الهندسة الجيوتكنيكية. مجلة جامعة البعث، المجلد 45، العدد 3، 11-44.

[26] بوبو ريم. (2018). التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن حفر الأنفاق السطحية باستخدام منهجية شعاع الدعم الآلي Support Vector Machin، مجلة جامعة البعث، المجلد 40، العدد 24، 153-176.