

Analytical Study of the Rock Squeezing Induced Failure in Deep Tunnels. Case Study: 16th of October Dam Tunnel

Dr. Mohannad Mhanna*

(Received 15 / 7 / 2023. Accepted 20 / 8 / 2023)

□ ABSTRACT □

Rock squeezing causes additional loads on the deep tunnels, and the intensity of these loads increases with time, especially when the strength of the rock surrounding the tunnel is weak compared to the overburden pressure. This research aims to analyze the causes of the failure of tunnel of 16th Tishreen Dam, with the proposal of appropriate rehabilitation measures. The tunnel was subjected to various deformations, including buckling and spalling of sidewalls, floor heave and extremely large convergence reaching failure state of tunnel lining.

For this purpose, the research was carried out in three stages: the technical reports were firstly reviewed parallel to geotechnical investigation of surrounding soil. Later, the main and secondary causes of deformations were analyzed and the tunnel's vulnerability to the rock squeezing phenomenon was evaluated according to empirical equations. the third stage proposed appropriate rehabilitation measures. These measures included a rigid supporting system consisting of: closed steel ribs (IPE200), grout injection, ground anchors and new lining of reinforced concrete consisting of shotcrete layer and and a second layer of cast-in-place concrete. Consequently, the main causes of large deformation were identified and the heavy support system is verified to control the deformation and put the tunnel into service again.

Keywords: Deep tunnels, Rock squeezing, tunnel lining, grout injection, shotcrete.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Assistant Professor- Department of Geotechnical Engineering- Faculty of Civil Engineering- Tishreen university- Lattakia- Syria. mohanadmohana@tishreen.edu.sy

دراسة تحليلية لانهايار الأنفاق العميقة تحت تأثير ظاهرة الانضغاط الصخري والحلول التدعيمية الملائمة. دراسة حالة: نفق سد 16 تشرين

د. مهند مهنا*

(تاريخ الإيداع 15 / 7 / 2023. قُبِلَ للنشر في 20 / 8 / 2023)

□ ملخص □

تسبب ظاهرة الانضغاط الصخري (Rock Squeezing) حمولات إضافية على الأنفاق العميقة، وتزداد شدة هذه الحمولات مع الزمن خصوصاً عندما تكون نسبة مقاومة الصخر المحيط بالنفق ضعيفة مقارنة بالإجهادات الشاقولية المؤثرة على النفق العميق. هدف البحث الحالي إلى تحليل أسباب انهيار نفق سد 16 تشرين في محافظة اللاذقية مع اقتراح الحلول التدعيمية المناسبة لإعادة النفق إلى الخدمة الاستثمارية؛ إذ تعرض النفق المدروس لتشوهات وانهايات متنوعة تضمنت تشطي والتواء الجدران الجانبية، انتفاخ وارتفاع القاعدة البيتونية مع انضغاط شديد لمقطع النفق وصولاً لمرحلة انهيار القشرة النفقية في عدد من المقاطع.

ولتحقيق الهدف، أنجز البحث على ثلاث مراحل: تضمنت المرحلة الأولى مراجعة التقارير التقنية الخاصة بدراسة النفق وتنفيذه على التوازي مع أخذ عينات من التربة المحيطة بالنفق وإجراء التجارب المخبرية اللازمة، تليها المرحلة الثانية وهي تحليل أسباب الانهيار الرئيسية والثانوية وتقييم تأثير النفق بظاهرة الانضغاط الصخري بناء على معادلات تجريبية مرجعية. أما المرحلة الثالثة فتناولت تقديم الحلول التدعيمية المناسبة لإعادة النفق إلى وضعه الاستثماري؛ إذ تضمنت هذه الحلول تنفيذ نظام تدعيم صلب مكون من: إطارات معدنية مغلقة (IPE200)، حقن التربة على محيط النفق، تنفيذ أنكورات معدنية في أرضية النفق، استبدال القشرة المتضررة وصب قشرة بيتونية جديدة مكونة من طبقة بيتون مقذوف وأخرى مصبوبة بالمكان.

بالنتيجة حُدد السبب الرئيس المسبب للانهيارات والتشوهات المختلفة الحاصلة في القشرة النفقية، إضافة لتنفيذ الحلول التدعيمية المقترحة وصولاً إلى التحكم في التشوهات الحاصلة وإعادة النفق المدروس إلى الخدمة.

الكلمات المفتاحية: الأنفاق العميقة، الانضغاط الصخري، القشرة النفقية، حقن التربة، البيتون المقذوف.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* مدرس - قسم الهندسة الجيوتكنيكية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

mohanadmohana@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تتنوع العوامل التي يمكن أن تسبب أضراراً أو انهياراً في الأنفاق كما تختلف مظاهر هذه الأضرار والانهيارات. يمكن عموماً تصنيف هذه العوامل إلى ثلاث فئات مختلفة تتعلق كل منها على حدة بمجموعة عوامل فرعية أخرى، هذه الفئات الثلاث هي: ضغط التربة، تسرب المياه، مشاكل في تصميم وديمومة القشرة النفقية. يمكن أن تحدث تشوهات كبيرة في الأنفاق المحفورة في الصخور الضعيفة تحت تأثير القيم المرتفعة للإجهادات الشاقولية مقارنة بمقاومة الصخر وصلابته الضعيفة نسبياً. تستمر هذه التشوهات عموماً مع الزمن ويلاحظ أحياناً حدوث تشوهات وأضرار كبيرة بعد فترة زمنية طويلة من انشاء النفق (Wu et al., 2020). يعتمد مقدار التشوه الحاصل في النفق بشكل كبير على نسبة مقاومة الصخر إلى الاجهادات الشاقولية المطبقة والظروف الجيولوجية الحقلية (Arora et al., 2021). يظهر الجدول (1) قائمة بعدد من الحالات الدراسية التي تطرقت لمشاكل الانهيارات والتشوهات الحاصلة في الأنفاق العميقة تحت تأثير ظاهرة الانضغاط الصخري وذلك وفقاً للعديد من الدراسات المرجعية العالمية.

الجدول (1): أمثلة عالمية مرجعية عن ظاهرة الانضغاط الصخري والبارامترات الأساسية المتوافقة مع كل حالة.

المرجع	ϵ %	σ_{cm}/P_0	القطر الاعتباري D (m)	العمق H (m)	اسم النفق والموقع
Barla et al., 2008	18	0.23	5.5	310	Saint Martin La Porte tunnel- فرنسا
Wang et al, 2021	3	1.3-2.2	5.2	260	Tawarazaka tunnel- اليابان
De la Fuente et al., 2019	0.9- 1.8	0.35-2.5	8.6	1067	Fréjus road tunnel بين إيطاليا وفرنسا
Barla & Borgna, 1999	3.3- 4.2	0.19-0.32	4.8	150- 200	Pinglin Tunnel- تايوان
(Arora et al, 2021)	>30	0.06	5.5	600	Yacambu-Quibor tunnel- غرب فنزويلا
(Hoek., 2000)	20	0.25	10	300	Nathpa Jhakri tunnel, الهند
(Basnet, 2013)	12.5	0.43	5.4	252.2	Chameliya headrace tunnel نيبال
Goel et al, 1995	8.9	0.1	4.8	900	Maneri – ultarkashi power tunnel, الهند

يعد تحليل خطر الانضغاط الصخري وتقييم إمكانية حدوثه، ومن ثم اتخاذ الاجراء الكفيلة بتأمين استقرار النفق من التحديات الصعبة في هندسة الأنفاق (Aksoy et al., 2012; Liu et al., 2021). يجب أن يتم تحليل التشوهات

الكبيرة الناتجة عن ظاهرة الانضغاط الصخري مع أخذ العوامل المختلفة مثل بارامترات تخفيض مقاومة الصخر، خواص الزحف على المدى الطويل (Agan, 2016; Wu et al., 2017).
 (Fraldi and Guarracino, 2010) استخدموا قانون هوك براون في دراستهم التحليلية لميكانيزم الانهيار مع التركيز على الانهيارات المتلاحقة للمقطع الدائري للنفق العميق. من ناحية أخرى، استخدمت التحريات والقياسات الحقلية كمنهجية فعالة في تقييم الأنماط المختلفة من التشوهات تحت تأثير ظاهرة الانضغاط الصخري مثل ارتفاع القاعدة، تضيق الجوانب، وصولاً للانهيار التام للقشرة (De La Fuente., 2018; Iasiello et al., 2021). إضافة لماسبق، طوّرت عدد من المنهجيات لتقديم حلول تدعيمية للأنفاق المتعرضة لظاهرة الانضغاط باستخدام طريقة استجابة الوسط (ground response) وتقنية التقارب والتطويق (Convergence–confinement method) وعليه حساب صلابة نظام التدعيم المطلوب لضمان استقرار القشرة النفقية ومقاومتها للإجهادات الإضافية الناتجة عن تراكم طاقة تشوهات الانضغاط مع الزمن (Oke et al., 2018; Sakai and Schubert, 2019).

أهمية البحث وأهدافه:

نظراً للظروف الجيولوجية والخصائص الجيوتكنيكية المتباينة على طول امتداد الأنفاق العميقة، فإن أسباب الانهيارات ومقدار التشوهات الحاصلة تختلف من نفق لآخر؛ لذلك يعدّ تمييز أسباب الانهيار والمقترحات التدعيمية بشكل تلقائي أمراً غير مجدياً. يستلزم دراسة ظاهرة الانضغاط الصخري المزيد من تحليل آليات التشوه وتقديم خبرات هندسية لحالات حقلية جديدة مع تقديم طرق التدعيم المناسبة وفق الظروف الحقلية. تم اختيار نفق سد 16 تشرين كحالة دراسية لتحليل التشوهات الكبيرة والانهيارات الحاصلة بالاعتماد على منهجية متكاملة تتضمن تحليل الظروف الجيولوجية والخصائص الجيوتكنيكية إضافة لتقييم أنماط التشوه وصولاً إلى تقديم حلول تدعيمية عملية أثبتت جدواها في إعادة النفق للاستثمار ووضعه في الخدمة من جديد.

طرائق البحث ومواده:

إن استخدام الطرق التحليلية التجريبية في دراسة استقرار الأنفاق العميقة لا يحتاج إلى مدة زمنية كبيرة لإجراء الحسابات، كذلك يمكننا من التقييم المبدئي لتأثير الوسط المحيط بالنفق بظاهرة الانضغاط مع الزمن مما يتيح للمصمم الإمكانية السريعة في اتخاذ إجراءات التدعيم والاحتياطات الهندسية الملائمة لضمان استقرار النفق على المدى الطويل. نظراً لذلك قدم هذا البحث دراسة موسعة عن ظاهرة الانضغاط النفقي بالاعتماد على الملاحظات الحقلية للظروف الجيولوجية والخصائص الجيوتكنيكية، إضافة لتوظيف المعادلات التجريبية في تقييم قابلية الوسط المحيط للانضغاط مع الزمن وتوليد تشوهات تراكمية مع الزمن. وأنجز البحث وفق ثلاث مراحل أساسية:

- مراجعة الدراسات التصميمية للنفق مع إجراء تحريات وقياسات حقلية لاستخلاص الخصائص الفيزيائية والميكانيكية اللازمة في تقييم مقاومة الوسط المحيط بالنفق.
- استخدام المعادلات التجريبية المختلفة في تقييم قابلية النفق للانضغاط مع الزمن على المدى الطويل.
- اقتراح الحلول التدعيمية المناسبة بالاعتماد على الاجهادات المتوقع تطبيقها من الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق.

1. وصف الحالة الدراسية (Case study):

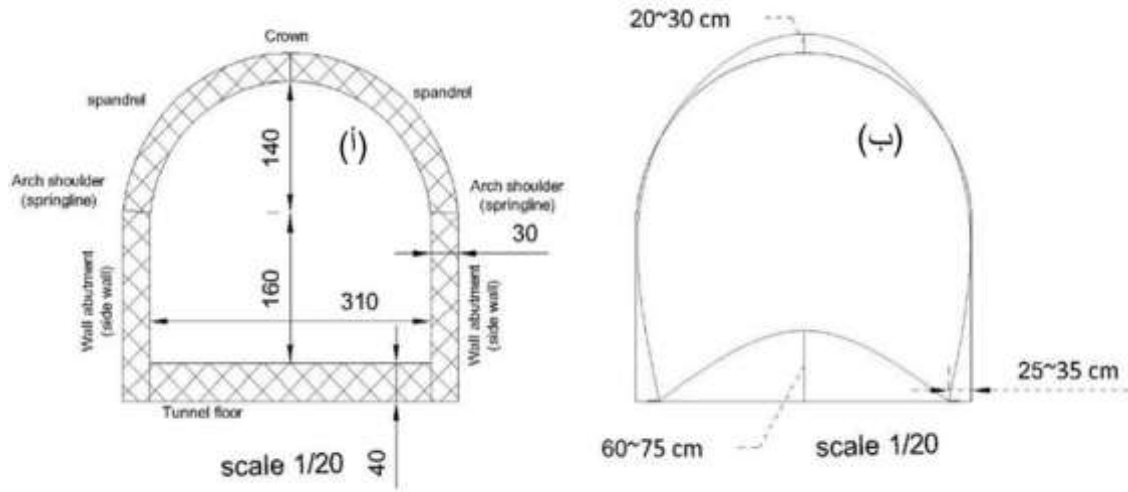
1.1.2. الموقع المدروس:

يُعدّ النفق المدروس تابعاً لمنشأة سد 16 تشرين ويقوم بمهمة تحويل مياه الري من بحيرة السد إلى السهل الشمالي بطول يقدر بحوالي 7295m بغزارة تصميمية حدها الأقصى $6\text{m}^3/\text{s}$. يمر النفق تحت سطح الأرض بأعماق تتراوح بين 14m إلى أكثر من 250m. تبين في أثناء البدء بموسم الري للعام 2021 وبعد فتح بوابة النفق لاسترجار المياه أن الغزارة الخارجة من النفق هي أقل بكثير من الغزارة الداخلة من البوابات، كما لوحظ ارتفاع منسوب المياه على مدخل النفق مما يشير إلى وجود عائق أمام مرور المياه. نظراً لأهمية النفق تم الاستعانة بفرقة خاصة للدخول إلى النفق لتحديد المشكلة حيث تبين وجود عائق من القطع البيوتونية المتكسرة أمام المياه نتيجة انهيارات في بلاطة الأرضية، وارتفاع وتشوه السكة المعدنية في أرضية النفق، وتشوه في جدران وسقف النفق وبما يشكل حاجزاً ارتفاعه حوالي 2m . منسوب محور النفق عن سطح البحر بحدود 66m وسطياً، ويتراوح ارتفاع سطح الأرض الطبيعية أعلى النفق من (100m) عند بداية الجزء الأول المتضرر من النفق إلى (150m) مع الابتعاد عن بئر النزول كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل 1: الموقع العام للنفق بالنسبة لسد 16 تشرين مع توضيح بئر النزول والمنطقة المتضررة.

تم حساب النفق تصميمياً على القوى الشاقولية والأفقية متمثلة في وزن طبقات التربة والصخور أعلى النفق إضافة لدفع التربة الجانبي على جدران النفق. يلاحظ في حساب كل المقاطع إدخال ضغط انتفاخ يساوي $15\text{t}/\text{m}^2$ كقوة موزعة بانتظام على جميع جوانب النفق متضمنة القمة والأرضية. لوحظ إدخال الدارس لتأثير قوس الضغط المخفف للإجهادات أعلى النفق واقتصار الحمولة المؤثرة على عمود تربة لا يتجاوز ارتفاعه 14.78m أعلى النفق كما هو موضح بالشكل (2).

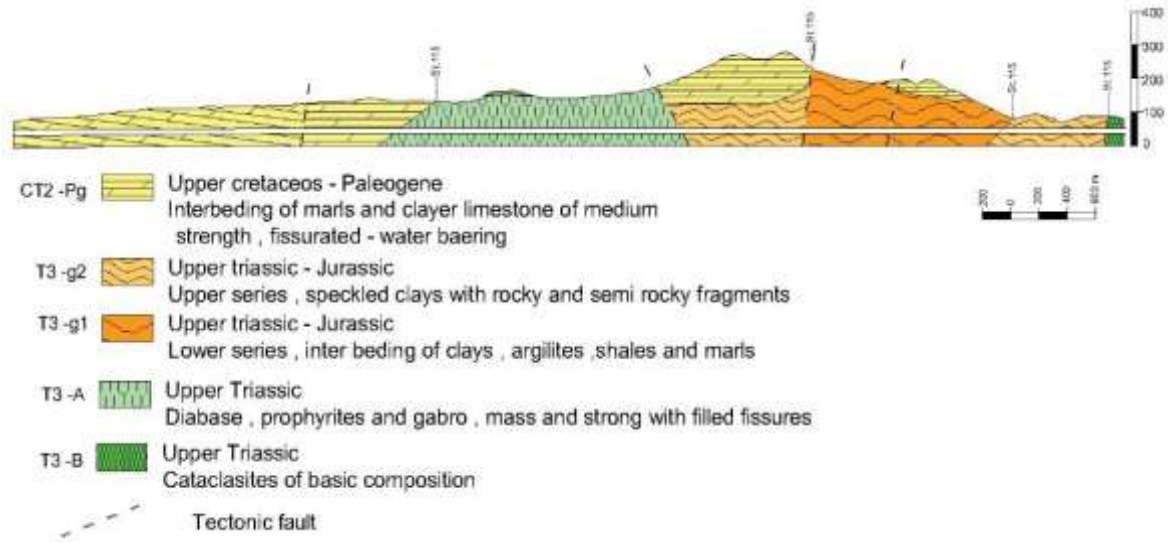


الشكل 3: أبعاد المقطع الثالث من النفق حيث تركز الضرر والانهيار: (أ) الشكل الأصلي، (ب) الشكل بعد التشوه.

1.2 جيولوجية الموقع والتصنيف الهندسي لتربة الموقع:

تُظهر دراسة الخرائط الجيولوجية والطبوغرافية الواردة في الدراسة التصميمية لـ 16 تشرين وملحقاته وكذلك العمود الستراتيجرافي العام للخريطة الجيولوجية لرقعة اللادقية خصوصاً الجزء الخاص بمنطقة النفق المتضرر، أن مسار النفق يتضمن أربع تشكيلات جيولوجية معقدة تحوي مجموعة من الصدوع بشكل مكثف وتتميز بتغيرات مفاجئة في التشكيل الجيولوجي وفق الترتيب الآتي وكما هو موضح بالشكل (4):

- يتضمن القسم الأول (حتى St. 1+15) صخور مستقرة من الدياباز والبورفيريت ويلاحظ وجود مناطق تشققات غالباً ما تكون مليئة بالكوارتز والكالسيت والفيلدسبار.
- القسم الثاني (حتى St. 8+00) يتكون من طبقات غضارية غنية بمواد مثل الكاتاكلاسيت والميلونيت وبقايا صخرية مختلفة.
- القسم الثالث (حتى St. 48+00) يتميز بوجود رسوبيات غضارية متناوبة مع طبقات رقيقة من الراديولاريت والأرجيليت وتتداخل أحياناً مع الحجر الكلسي والمارل، قساوة الصخر التصميمية في هذا الجزء ضعيفة نسبياً. هذه القسم يحتوي الجزء المتضرر من النفق حالياً.
- القسم الرابع (بين St. 48+00 والمخرج) عبارة عن توضع طبقات صخرية أفقية إلى مائلة بزوايا معينة تحتوي على المارل وحجر كلسي وغضاري وحجر كلسي مشقق مشبع، ويعد القسم الرابع أكثر استقراراً نسبياً ولكنه يخضع لعوامل التجوية وتأثيراتها بسهولة.



الشكل 4: المقطع الجيولوجي لامتداد محور النفق

تم على التوازي مراجعة التقارير الجيوتكنيكية الخاصة بدراسة النفق إضافة لأخذ عينات حقلية من التربة المحيطة بالنفق ودراستها مخبرياً لتحديد خواصها الفيزيائية والميكانيكية. تتلخص المواصفات الجيوتكنيكية للتربة المحيطة بالنفق المتضرر في الجدول (2).

الجدول (2): الخصائص الجيوتكنيكية لتربة الموقع المحيطة بالنفق في المنطقة المتضررة

القيمة	الوحدة	الخاصية	
2.13-2.3	gr/cm ³	الكتلة الحجمية	
292-344	kN/m ²	مقاومة الضغط غير المحصور	
25-75	MN/m ²	معامل مرونة الصخر	
13.9-17.8	°	زاوية الاحتكاك الداخلي	
127-152	kN/m ²	التماسك	
200-250	kN/m ²	ضغط الانتفاخ	
14-20	%	Bieniawski., (1989)	تقييم الكتلة الصخرية بحسب بينيافسكي (RMR)
V- very poor rock	-		رتبة الصخر وتصنيفه
10 hours for 2.5m span	min/m		زمن ثبات الكتلة الصخرية التقديري
10	-	Hoek and Brown., (1997)	مؤشر المقاومة الجيولوجي (GSI) $GSI = RMR_{89} - 5$
0.021-0.037		Barton., (2002)	جودة الكتلة الصخرية حسب بارتون (Q)

بحسب الكود المصري لميكانيك التربة والصخور إضافة لتصنيف (Bieniawski 1989) يمكن تصنيف تربة الموقع في الجزء المتضرر من النفق اعتماداً على الخصائص المعطاة لكل من (الكثافة، قيم مقاومة الضغط، معامل القساوة وبارامترات القص) على أنها: طبقات غضارية ذات خصائص انفاجية، كثافتها منخفضة إلى متوسطة. درجة مقاومة التربة المحيطة منخفضة حيث متوسط زمن الصمود للكتلة الصخرية يقدر بـ 30 دقيقة لمجاز مقداره 1m دون تدعيم

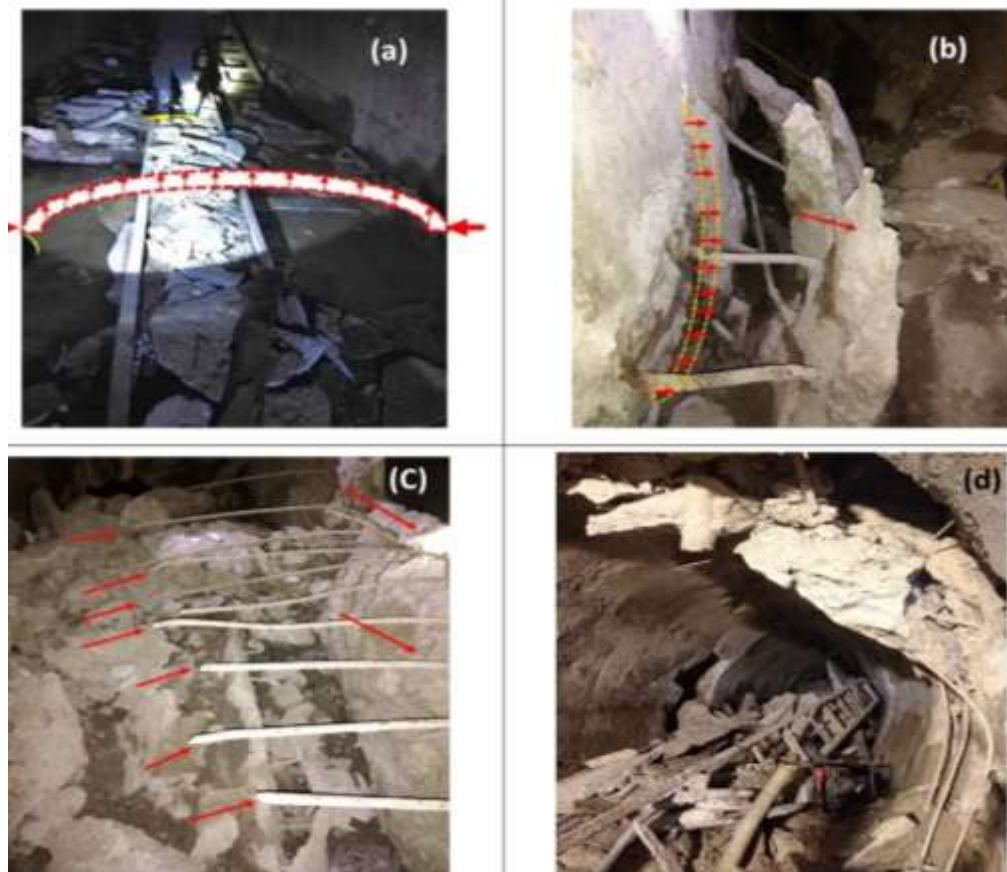
الجدول (3): تحديد زمن ثبات الكتلة الصخرية وفق رتبة الصخر وخصائصه التقديرية (Bieniawski 1989)

Meaning of rock classes					
Class number	I	II	III	IV	V
Average stand up time	20 yrs for 15m span	1 yrs for 10m span	1 week for 5m span	10 hrs for 2.5m span	30 min for 1m span
Cohesion of rock mass (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Friction of rock mass (deg)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

3.2. التشوهات والأضرار الحاصلة في النفق:

بعد إجراء مجموعة من القياسات الحقلية وتوثيق الأضرار الحاصلة في النفق يمكن تصنيف التشوهات الحاصلة في النفق ضمن المجموعات الآتية (انظر الشكل 5):

- ارتفاع قاعدة النفق وصولاً لتشظي القاعدة وانتهيارها الانفجاري، لتشكل عائقاً من الأنقاض البيتونية بسماكة تصل إلى 75cm أمام جريان المياه في النفق. تراكفت هذه الظاهرة مع انفصال السكة الحديدية وخروجها عن الخدمة في جميع المناطق التي حصل فيها تهدمات.
- انهيار جوانب النفق في بعض الأجزاء وانسلاخات متتالية للجدران الجانبية للقشرة النفقية في الزوايا السفلية، حيث وصل تضيق جوانب النفق إلى 35cm في بعض الحالات. قيم التضيق الجانبي لجدران النفق كانت أكبر بكثير من التضيق الحاصلة عند قوس وتاج النفق العلوي، كذلك فإن الحركة الشاقولية لأرضية النفق كانت أكبر بكثير من الانتقال الشاقولي لتاج النفق.
- أظهرت التحريات الحقلية وتجارب أخذ الجزرات البيتونية بأن سماكة القشرة النفقية تتراوح بين (30-35cm).



الشكل 5: أنماط التشوه المختلفة الملاحظة لنفق سد 16 تشرين: (a) ارتفاع القاعدة والتواء السكة، (b) تشظي وتضيق الجدران الجانبية، (c) انهيار الأرضية البيتونية وانقطاع حديد التسليح، (d) تضيق المقطع الكلي وصولاً للانهايار شبه التام.

- إضافة لما سبق، أوضحت الزيارات الحقلية والمشاهدات الأولية عدداً من النقاط التنفيذية المؤثرة والتي يمكن تلخيصها بما يلي:
1. عدم الالتزام بتنفيذ الحقن الاسمنتي خلف القشرة (الموصى به في الدراسة التصميمية) وبالتالي ضعف العمل المشترك بين قشرة النفق والترية المحيطة.
 2. عدم تنفيذ انكورات التدعيم المؤقت الموصى بها في الدراسة التصميمية (قضبان 20mm بتباعد 1m) والتي كان من الممكن لها المساهمة جزئياً بتخفيض تشوهات القشرة النفقية خصوصاً في بلاطة القاعدة.
 3. عدم تعريض قاعدة الجدار في الزاوية السفلية للمقطع العرضي، حيث تعتبر الزاوية السفلية لمقطع النفق من شكل نعل الفرس (D-shaped) أماكن تركيز إجهادات وبالتالي نقاط ضعف محتملة يجب العمل على تقويتها.
 4. تعد نسبة التسليح وعتار البيتون المشار إليها في الدراسة التصميمية قيمة منخفضة جداً، مع ملاحظة عدم امتداد حديد التسليح بين القاعدة والجدران الجانبية وبالتالي خلل في العمل المشترك في الجزء السفلي من النفق.

3. التحليل الهندسي لمشكلة نفق سد 16 تشرين:

أظهرت المشاهدات الحقلية و القياسات الأولية التي قمنا بتنفيذها على المسار المتضرر حدوث تشوهات كبيرة في المقطع العرضي وبنسب مختلفة: حيث تضيق مقطع النفق في إحدى النقاط الواقعة على بعد (550m) من بئر النزول (من 310cm إلى 260cm) أي بتشوه عرضاني يصل لـ (16%) إضافة لارتفاع قاعدة النفق وتضيق المقطع الرأسي

(من 300m إلى 270cm) أي بتشوّه رأسي يصل لـ(10%) ومن المتوقع أن تكون قيمة التشوّه الرأسي في بعض النقاط أكبر من القيمة المشار إليها حيث تعذر أخذ قياسات دقيقة في المناطق المتهدمة بسبب تراكم الأتقاض والكتل البيتونية. إن شكل الانهيارات الحاصلة (تضييق المقطع الجانبي، تهشم الأرضية وتحطم أجزاء من القشرة الجانبية) إضافة لتحليل الظواهر المذكورة سابقاً يدفعنا إلى اعتبار ظاهرة الانضغاط النفقي (Tunnel squeezing) والانهيار بالتنشيطي (spalling failure) هي التفسير الرئيسي للأضرار الحاصلة بنفق عين البيضا. يمكن تعريف ظاهرة الانضغاط النفقي (Tunnel squeezing) بأنها التشوّهات الكبيرة المرتبطة بالزمن والناجمة عن الإجهادات العالية وتشوّهات القص في مناطق ممتدة على طول النفق، ويحدث عادة عندما تكون النسبة بين مقاومة الطبقات المحيطة بالنفق إلى الإجهادات الفعلية في قمة النفق أقل من 0.3 ويترافق مع نسبة تشوّهات تزيد عن 2.5%، وهذه الشروط جميعها متوفرة في حالة نفق سد 16 تشرين. حيث تقوم تراكيب محددة من الإجهادات المتولدة بدفع مناطق محددة حول النفق بقوى تزيد عن مقاومة القص الحدية للقشرة فتبدأ عندها بالتلدن والزحف (Creep)، يمكن أن تتوقف هذه التشوّهات خلال عملية انشاء النفق كما يمكن أن تستمر على فترة طويلة من الزمن (Hoek & Guevara, 2009).

أوضحت المشاهدات الحقلية والتحليل الهندسي للأضرار الحاصلة في النفق وجود تراكب لمجموعة من الأسباب المختلفة التي ساهمت بخلق وتحفيز ظاهرة الانضغاط النفقي، والتي يمكن شرح تأثيرها كالاتي:

1.3 تم تطوير عدة طرق تحليلية للتنبؤ بإمكانية باستقرار الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق أشهرها طريقة Peck التي تعتمد على معامل الاستقرار (N stability number) الذي يعطى بالعلاقة (1):

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma \cdot (C + \frac{D}{2}) - \sigma_t}{S_u} \quad \text{المعادلة (1)}$$

حيث:

γ : الوزن الحجمي للتربة

H: عمق محور النفق عن سطح الأرض الطبيعية ($H=C+ (D/2)$)

C: عمق الطمر فوق تاج النفق

D: قطر النفق

σ_t و σ_s : هي الضغط الداخلي في النفق والضغط السطحي الإضافي على الترتيب.

S_u : مقاومة القص غير المصرفة للتربة.

في حال كان رقم الاستقرار أكبر من [7] فهناك احتمال حدوث قص عام وانزلاق للتربة حول النفق كما هو موضح

بالجدول (4):

الجدول (4): معيار الاستقرار للأنفاق في الترب المتماسكة (Peck 1969)

Field observation	Ns
يمكن حفر النفق بدون صعوبات غير اعتيادية	1-5
يمكن للغضار أن ينضغط ويزحف بسرعة باتجاه الحفرة النفقية	5-6
يمكن حدوث انهيار قص بسبب حركة للتربة باتجاه جبهة الحفر حتى مع استخدام آلات الحفر الدرعية	6-7
يحدث انهيار بالقص العام مع حركة التربة باتجاه محور النفق	>7

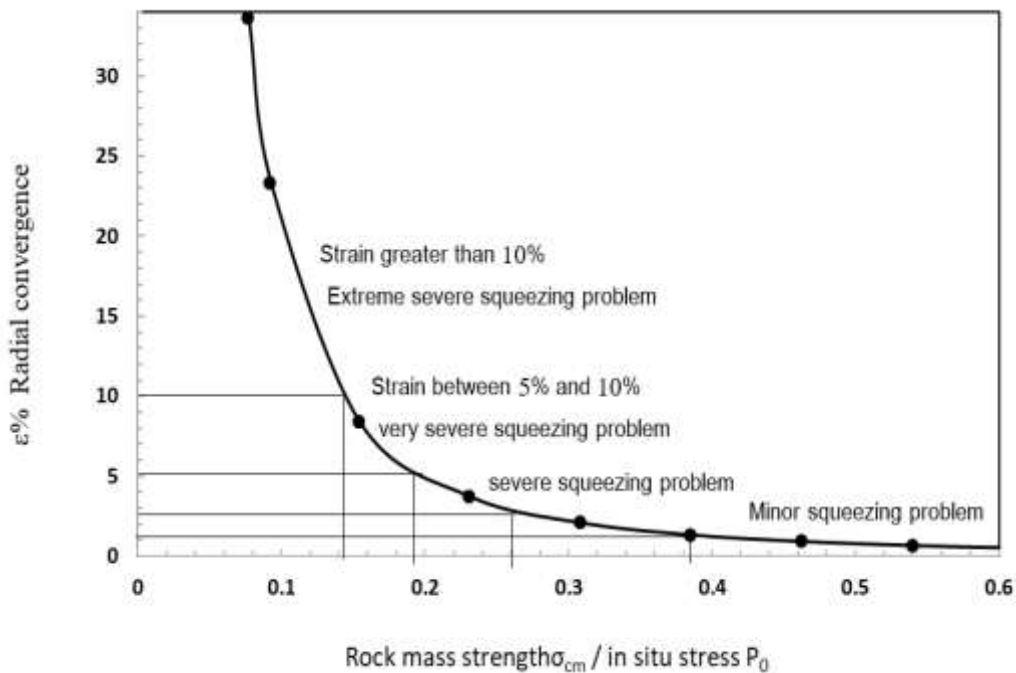
بتطبيق المعطيات التقريبية المتوفرة في حالة نفق سد 16 تشرين نجد أن:

$$N = \frac{22 \times 100}{150} = 14.6 > 7$$

وبالتالي فإن الكتلة الصخرية غير مستقرة (بدون تدعيم) وهناك احتمالية عالية جداً لحدوث انهيار قص عام وانتقالات كبيرة للتربة حول النفق كما هو موضح بالجدول (4). علاوة على ذلك فقد اقترح (Hoek and Guevara., 2009) معياراً لتقييم قابلية الانضغاط النفقي على المدى الطويل استناداً إلى علاقات رياضية ومخططات مستتبطة من نماذج عددية بطريقة العناصر المنتهية. تظهر العلاقة رقم (2) قيم التشوهات القطرية (ϵ_t) التقديرية اعتماداً على مقاومة الصخر (σ_{cm}) وقيم الاجهادات الحلقية (P_0):

$$\epsilon_t(\%) = 0.2 \frac{\sigma_{cm}^{-2}}{p_0} \quad \text{المعادلة (2)}$$

تبلغ قيم التشوهات القطرية في حالتنا الدراسية $\epsilon_t = 23\%$ وذلك من أجل ($P_0=3.24\text{MPa}$, $\sigma_{cm}=0.3\text{MPa}$) وعليه يمكن تقدير خطر الانضغاط من الشكل رقم (6) بناء على قيم التشوهات المحسوبة، حيث يظهر الشكل بوضوح قابلية النفق للتعرض لظاهرة الانضغاط الصخري بشدة كبيرة. نستنتج مما سبق أن كتلة التربة حول النفق (بدون تدعيم) بعيدة جداً عن الاستقرار وأن القشرة النفقية تلعب دوراً حاسماً ورئيساً في تلقي حمولات كبيرة ناتجة عن ضغوط وتشوه التربة المحيطة.



الشكل 6: تقييم مشاكل الأنفاق وفق مستويات التشوهات المتوقعة عند حفر النفق في الصخور الضعيفة نسبياً

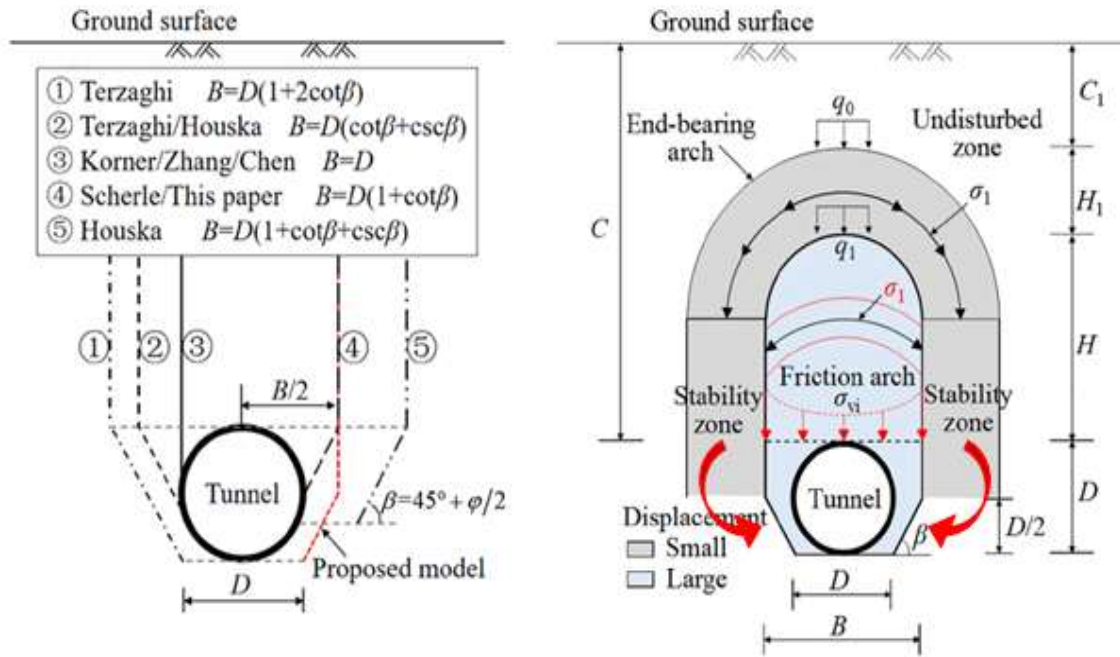
(Hoek and Marinos, 2000)

2.3. فيما يختص بمساهمة ظاهرة القوس (Arching effect) في تخفيف الضغوط على النفق، تساهم التربة جيدة المقاومة بإعادة توزيع الضغوط على القشرة النفقية عبر تشكيلها لقوس ضغط على ارتفاع محدد أعلى النفق. يوضح الشكل (7) ميكانيزم انتقال الاجهادات وظاهرة القوس المحتملة أعلى النفق.

وبالتالي فإن القشرة النفقية ستعرض لنوعين من الإجهادات المسيطرة:

- إجهادات شاقولية من القوس الاحتكاكي (friction arch) تسبب هبوطات رأسية عند تاج النفق،
- إجهادات أفقية ناتجة عن منطقة الاستقرار الجانبية لقوس الضغط (stability zone) ذات المواصفات الضعيفة نسبياً (كما في حالتنا الدراسية) والتي يتراكب عليها تأثير كل من قوس التحمل (end bearing arch) وقوس الاحتكاك إضافة لأي قوى مستجدة مع الزمن.

عندما نأخذ التربة الطبيعية كوسط غير مشبع فإن خصائصها الميكانيكية ستعتمد بشكل كبير على محتواها المائي ودرجة اشباعها، حيث يولد التماسك الظاهري في الحالات غير المشبعة ظاهرة القوس أعلى النفق مسبباً تخفيضاً لقيم الإجهادات المتولدة في القشرة النفقية. من جهة مقابلة، عندما تتسرب المياه إلى الوسط المحيط بالنفق (سواء من المياه الجارية داخل النفق أو المياه الجوفية أو الأعمال البشرية السطحية) فإن لهذه المياه الإضافية تأثير بسيط من ناحية الحملات التصميمية وتوزع الإجهادات حول النفق، ولكن تأثيرها الأساسي يتركز في تغيير مقاومة التربة حول النفق عند ازدياد الاشباع. في الواقع تنخفض الخواص الميكانيكية للتربة عند الاشباع، فيتناقص التماسك مؤدياً إلى إضعاف تأثير قوس التربة أعلى النفق، وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة في الحملات الفعالة المؤثرة أعلى النفق مما يولد إجهادات وتشوهات إضافية في قشرة النفق.



الشكل 7: ميكانيزم انتقال الاجهادات وأبعاد قوس الضغط (Lin et al, 2022)

مع الزمن وعندما تتجاوز الإجهادات المنقولة مقاومة التربة تبدأ طبقات التربة قرب قشرة النفق بالوصول لمرحلة الخضوع والتلدن ثم تنتقل الاجهادات تدريجياً إلى الطبقات المجاورة، فإذا ما كانت مقاومتها على القص منخفضة (كما في حالتنا) سيتوسع انتشار التلدن إلى مناطق أكبر. عملياً تتشكل وتنشأ منطقة خضوع شبه دائرية بقطر (dp) حول

النفق، بينما تبقى التربة خارج منطقة التلدن مستقرة ضمن الحالة المرنة، يزداد قطر منطقة التلدن بازياد كل من قطر النفق وعمق الطمر كما هو موضح بالعلاقة (2) (Hoek, 1998):

$$\frac{d_p}{d_0} = \left[1.25 - 0.625 \frac{p_i}{p_0} \right] \frac{\sigma_{cm} \left(\frac{p_i}{p_0} - 0.57 \right)}{p_0} \quad (3)$$

وذلك باعتبار (d_p) قطر منطقة التلدن، (d_0) القطر المكافئ للنفق، (P_0) الاجهاد الشاقولي المطبق، (P_i) مقاومة عناصر التدعيم (σ_{cm}) مقاومة الضغط للكثلة المحيطة بالنفق.

بتطبيق العلاقات السابقة على المعطيات المتوفرة لنفق سد 16 تشرين نجد أن قطر منطقة التشوهات اللدنة يمكن أن يصل حسابياً إلى مسافة 36m من قشرة النفق بأخذ تأثير المياه نسبياً على خصائص القص.

3.3. لوحظ ارتشاح وتسرب المياه إلى داخل النفق من خلال الشقوق الشعرية أو وصلات القشرة (غير المعزولة جيداً) في عدد من نقاط المسار المتضرر للنفق، تعتبر هذه المياه ناقل جيد للمواد الناعمة (غضار وسيلت إضافة للرمال الناعم) حيث يمكن لهذه المياه المرشحة أن ترسب خلال شهر حوالي (5Kg) من المواد الناعمة لكل متر طولي من النفق (Kulikova, 2018). يمكن أن يؤدي استمرار عملية الرش مع الزمن إلى تشكل فجوات وتكهفات (Cavity) خلف القشرة بأحجام تصل أحياناً إلى $7m^3$ ، وبالتالي تسبب إعادة توزيع الإجهادات وتركيزها في مناطق محددة من القشرة النفقية.

3.3. تسبب المياه الجارية داخل النفق المائي، أو تلك المتسربة من وسط التربة المحيط إلى داخل النفق، ترطيب قشرة النفق وتشكل بقعاً منفصلة على سطحه. من جهة ثانية فإن مواد الطمي والرسوبيات المنقولة مع المياه الجارية في النفق تسبب حت وتآكل لطبقة الأرضية وبالتالي يسبب جريان المياه داخل النفق مع مرور الزمن (وإغفال الصيانة اللازمة) أضراراً مركبة تتجلى بـ:

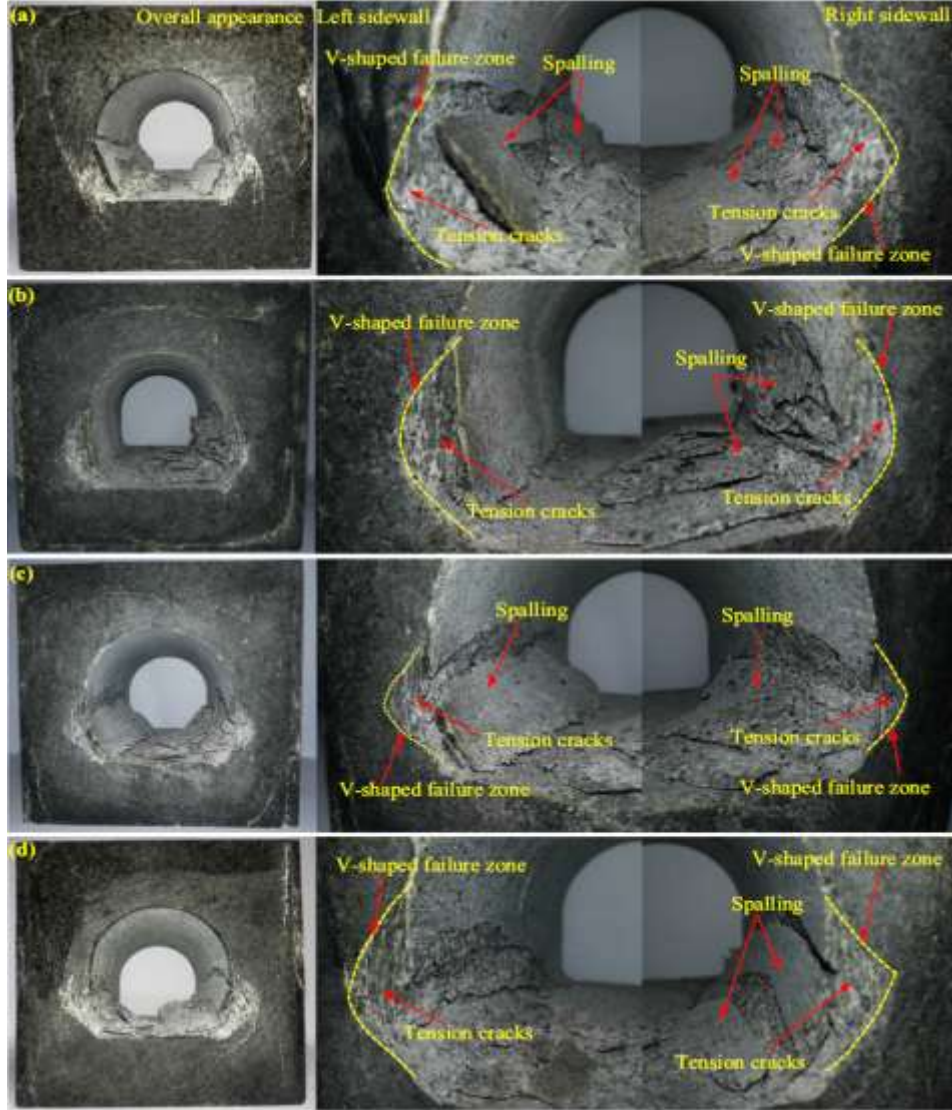
- أكاسيد ومواد ضارة منحلّة (كربونات الكالسيوم أو المغنيزيوم) تترسب على جدران النفق كعناصر عدائية للبيتون (abrasion agent) وتسبب ضرراً وتعباً للقشرة النفقية إضافة لصدأ حديد التسليح عند ارتشاح الكلس من البيتون.
- المواد الناعمة المحمولة مع المياه الجارية داخل النفق تسبب حت للطبقات السطحية من الأرضية بفعل التأثير الاحتكاكي للحبيبات الصلبة المنقولة مع التيار المائي وهذا يساهم أيضاً في إضعاف قشرة أرضية النفق مع الزمن. وبالتالي تساهم المياه الجارية داخل النفق وتلك المرشحة من خلال الفواصل والشقوق الشعرية بترسب مواد ضارة بالقشرة النفقية تؤدي لتعب المادة وضعف مقاومة المقاطع البيتونية مع الزمن.

5.3. كذلك وجد الباحثون المختصون بميكانيزم انهيار الانفاق أن الأنفاق غير الدائرية مثل نعل الفرس وشكل D تخضع عند التحميل الشاقولي المتزايد إلى تركيز في الإجهادات عند زوايا النفق السفلية مما يصنفها كنقاط ضعف تسبب ظهور تشققات أولية في القشرة النفقية، لذلك يوصي الباحثون بتقوية وتدعيم زوايا النفق لزيادة مقاومتها لتركيز الإجهادات الناتج عن الانضغاط النفقي وتقليل خطر التشظي (spalling failure).

أدت العوامل السابقة إلى انهيار أرضية النفق والجزء السفلي للجدران الجانبية عبر مراحل مع الزمن. يمكن تلخيص مراحل الانهيار كالاتي:

- تساقط جزيئات صلبة ناعمة من القشرة النفقية وظهور تشققات ميكروية،
- تطور التشققات وانتشارها
- تضييق المقطع الجانبي مع التواء وانبعاج الأرضية

(d) التنشيط والانهيار (تكسر كتل وانفصالها بالتتالي) ليشكل لدينا انهيار للأرضية والجوانب على شكل حرف V رأسه أسفل بلاطة الأرضية وضلعاه يستمران حتى قوس تاج النفق وهو ما يتوافق مع مراحل الانهيار التجريبية التي توصل لها الباحث (Si et al, 2020) في نموذجة المخبري والموضحة بالشكل (8).

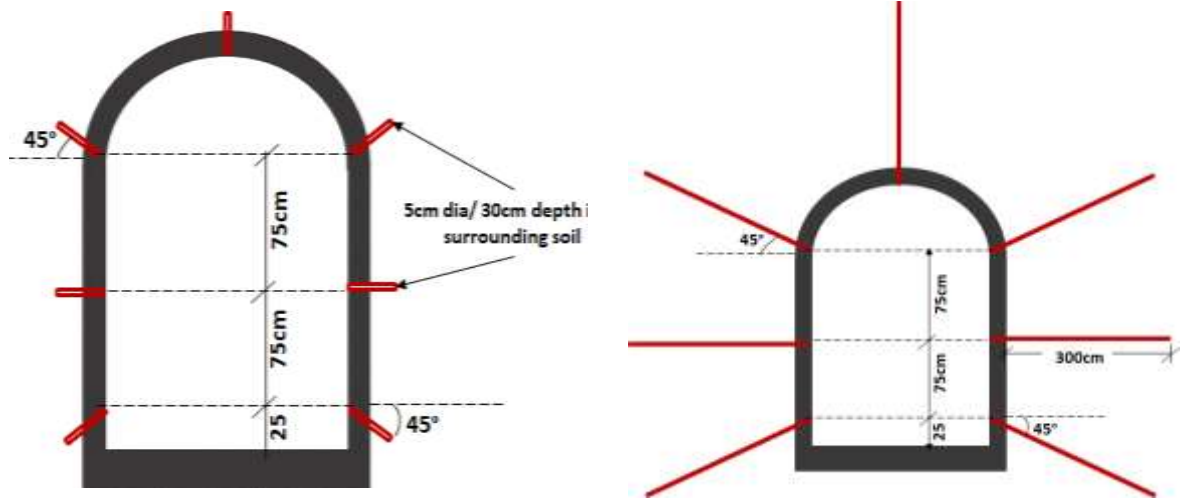


الشكل 8: توضيح مراحل الانهيار لموديل النفق المخبري بحسب دراسة (Si et al, 2020)

4. الحلول المقترحة لمعالجة مشكلة نفق سد 16 تشرين:

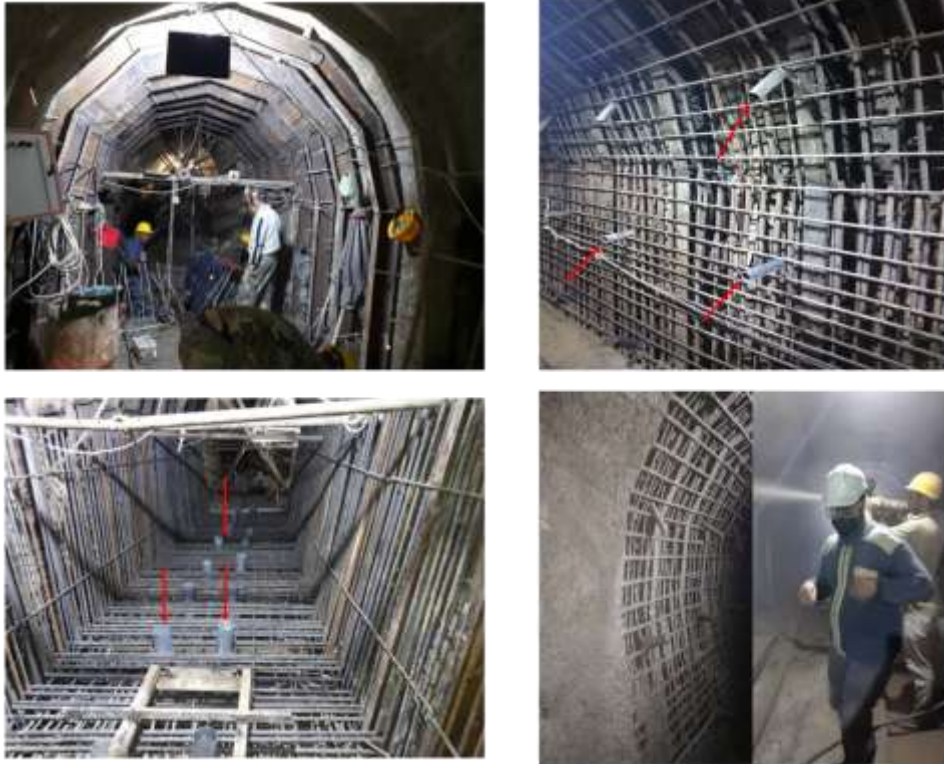
عند الوصول للمنطقة المتضررة تبدأ إزالة الأنقاض والقطع البيتونية المتهدمة عن مسار النفق تدريجياً وعلى خطوات صغيرة ترتبط بظروف الموقع وأمان العمل (تقدر الخطوة وسطياً بمسافة قدرها 250cm)، وذلك بعد التأكد من حماية العمال وتأمين استقرار مؤقت للقشرة النفقية لحين استكمال أعمال التدعيم اللاحقة، يتم ذلك عبر الخطوات الموضحة أدناه:

- يتم تنفيذ عربة نقل معدنية (Tunnel lining Trolley) مهمتها حماية العمال وضمان سير الأعمال التدرجيمية اللاحقة. تحدد أبعاد الترولي وتصمم بحيث يمكن لها العمل بحرية ضمن مقاطع النفق المتضيقة مع تضمينها لفتحات جانبية للحقن.
- ترحل الأنقاض والقطع المكسرة المتناثرة على الأرضية والتي تعيق عمل الآليات وفق خطوات (75cm) وسطياً وبحماية العربة المتحركة (Trolley) مع اتخاذ كافة إجراءات السلامة والأمان لحماية العمال.
- يتم على التوازي وضع عناصر معدنية (تيليسكوبية) عبارة عن أنابيب معدنية مجوفة (متغيرة الطول حسب المقطع المدعم) وذلك بقطر للأنبوب (3inch) يلحم على طرفيه صفائح معدنية (20×20cm). وتستخدم عند الامكانية عناصر شاقولية لسند الجزء الأخير على تربة الأرضية بعد تعزيلها. تساهم هذه الأنابيب بالتدعيم المؤقت للقشرة وتلقي جزء من الحمولات ريثما تنتهي اعمال التدعيم.
- تصب بلاطة القاعدة لأرضية النفق بسماكة لا تقل عن 60cm مسلحة بطبقتي تسليح.
- يتم تثبيت السكة الحديدية وضمان دخولها للاستثمار لتحريك الآليات وفق خطوات تعزيل الأنقاض.
- تكسر القشرة البيتونية القديمة المتضررة ويوسع مقطع النفق بخطوات لا تزيد عن 250cm منعاً لحدوث انهيارات في جسم التربة، وبمساعدة وحماية عربة النقل المعدنية المتحركة والأنابيب المعدنية.
- يرش فوراً طبقة أولى من البيتون المقذوف سريع التصلب لا تقل سماكتها عن 10cm مع وضع أنابيب بلاستيكية بقطر 1 inch على خطوات كل 1m أفقياً، وذلك تمهيداً لعمليات حقن لاحقة في الموقع.
- يتم تركيب إطارات معدنية مغلقة (IPE200) بتباعد وسطي بين الإطارين المتتاليين مقداره 75cm.
- ينفذ شبك تسليح بين الإطارات المعدنية ويلحم بشكل جيد على الإطارات.
- ترش طبقة ثانية من البيتون المقذوف لتغطي الإطارات المعدنية بشكل كامل وتعتبر هذه الخطوة جزءاً من الحل النهائي والذي يتضمن مبدئياً:
- تركيب هيكل التسليح المحسوب وفق الدراسة الانشائية مع أخذ سماكات البيتون المقذوف بالاعتبار والذي يعتبر كما أشرنا سابقاً جزءاً من الحل.
- يركب الكوفراج وتصب قشرة بيتونية مسلحة (مصبوبة بالمكان) بحيث لا تقل السماكة الكلية للبيتون المقذوف والمصبوب بالمكان عن (60cm).
- تكرر هذه الخطوات على مراحل حتى الانتهاء من تدعيم منطقة الانهيار.
- يتبع ذلك تقوية بلاطة الأرضية عن طريق زرع أنكورات بقطر لا يقل عن 25mm وبعمق لا يقل عن 4m كل 1m من مسار الأرضية.
- يتم بعد الانتهاء من عمليات الصب حقن الجوانب من خلال الأنابيب المزروعة سابقاً في القشرة بمونة اسمنتية خاصة، حيث يتم تنفيذ الحقن في المشروع على مرحلتين كما هو موضح بالشكل (9): الأولى عبارة عن حقن ملء (Filling grouting) الغاية منه ملء الفجوات خلف القشرة النفقية وتأمين العمل المشترك بين التربة المحيطة والقشرة النفقية بعمق لثقب الحفر لا يقل عن 30cm بحيث يخترق التربة المجاورة للقشرة ويتم ضخ الحقن باستمرار حتى الملء التام ورفض الحقن (grout refusal). المرحلة الثانية: عبارة عن حقن تقسية (Consolidation grouting) الغاية الأساسية منه تقوية التربة المجاورة عن طريق زيادة نسبية في صلابتها وبالتالي مقاومتها للضغوط الحقلية. كما يساهم هذا الحقن في التخفيض النسبي للضغوط الجانبية للتربة على القشرة النفقية.



الشكل 9: مخطط توزيع ثقوب الحقن الخاص بالملء حول المقطع العرضي للقشرة النفقية.

قطر الثقب الأصغري المحفور للحقن 5cm (2inch) وعمق الثقب يحدد بحيث لا يقل عن القطر الداخلي للنفق أي بحدود 3m. نسب المواد الداخلة في خلطة الحقن تكون موزعة مبدئياً على النحو الآتي (1 water:1cement) كما يمكن عند الحاجة استخدام خلطات بكتافات مغايرة بحسب الظروف الحقلية.



الشكل 10: صور توثيقية لبعض أعمال التدعيم الحاصلة في نفق سد 16 تشرين متضمنة أعمال الهيكل المعدني إضافة لأعمال الحقن والأنكورات الأرضية والبيتون المقذوف

تم تنفيذ إجراءات التدعيم المذكورة سابقاً كما هو موثق بالصور الموضحة بالشكل (10) وتم بعد ذلك تقييم الانتقالات والتشوهات الحاصلة حيث ماتزال مراقبة التشوهات مستمرة في أثناء كتابة هذا المقال. تشير القياسات الحقلية الأولية حدوث استقرار بأبعاد القشرة النفقية حيث لم يتجاوز الانتقال الأفقي لجدران النفق 1mm بعد ثلاث أشهر من انتهاء الأعمال التدعيمية وبالتالي يمكن القول إن القياسات الحقلية برهنت جدوى وفعالية الحلول التدعيمية المقترحة في تخفيض الانتقالات وسرعة التشوهات الحاصلة سابقاً.

الاستنتاجات والتوصيات:

قدم هذا البحث دراسة تفصيلية مستندة على تحريات حقلية ومخبرية وصولاً إلى إجراء تحليل هندسي للأسباب الرئيسية والثانوية التي سببت الانهيارات والتشوهات الحاصلة في نفق سد 16 تشرين. علاوة على ذلك فقد قدمت الدراسة حلولاً تدعيمية أثبتت فعاليتها المبدئية في زيادة استقرار القشرة النفقية وتأمين الغاية الاستثمارية من النفق. خلصت الدراسة إلى أن الانهيارات الحاصلة في نفق سد 16 تشرين ناتجة عن ظاهرة الانضغاط الصخري طويل الأمد تحت تأثير تراكم مجموعة من الأسباب المختلفة، والتي يمكن تصنيفها كالآتي:

1. ضغط التربة المتزايد نتيجة تلدن طبقات التربة تحت تأثير الاجهادات الشاقولية الكبيرة وانخفاض مقاومة التربة مع ازدياد الاشباع وبالتالي انخفاض فعالية ظاهرة التقوس المساعدة في تخفيف الضغوط.
2. إن سماكة القشرة البيتونية المنفذة للنفق صغيرة (وبالأخص بلاطة الأرضية بسماكة وسطية 20cm) وهذه السماكة لا تحقق الأمان إزاء الضغوط العالية المتولدة مع الزمن خصوصاً مع تدهور وتعب المادة للقشرة البيتونية بسبب التأثير المديد الضار للمياه الجارية والمتسربة من جهة علاوة على قابلية تربة القاعدة للانتفاخ والتغير الحجمي من جهة أخرى.
3. إهمال العديد من التفاصيل الإنشائية عند تنفيذ النفق مثل (حقن التربة حول القشرة، تنفيذ شدادات بتباعد 1m، توسعة قدم جدار النفق...) أدى إلى حمولات إضافية على أجزاء محددة من القشرة وضعف في العمل المشترك بين النفق والتربة المحيطة به.
4. شكل المقطع العرضي نعل الفرس (horse shoe, D-shaped) يساهم في توزيع الإجهادات وتركيزها في الزوايا السفلية لمقطع النفق والتي تصبح مع تراكم طاقة التشوهات نقطة ضعف محتملة وبؤرة انهيار محتملة.
5. أظهرت الدراسة ضرورة استخدام نظام تدعيم صلب لععادة تأهيل النفق، يتكون نظام التدعيم من: إطارات معدنية (IPE200)، أنكورات أرضية، استبدال القشرة البيتونية المتضررة بقشرة جديدة مكونة من بيتون مقذوف وبيتون مسلح مصبوب بالمكان بسماكة كلية 60cm، إضافة لحقن التربة في جوانب الجزء المتضرر.
6. النتائج الواعدة للقياسات الحقلية أثبتت فعالية نظام التدعيم مما قد يشكل مرجعاً لأعمال التدعيم المشابهة مع ضرورة الاستمرار بالمراقبة وتسجيل القياسات الحقلية في السنوات القادمة.

References:

1. Agan, C., (2016): Prediction of squeezing potential of rock masses around the Suruc Water tunnel. *B Eng Geol Environ* 75(2):451–468.
2. Barla, G., Borgna, S., (1999): Tunneling in squeezing ground condition. *Proceedings of ROOKSITE-99*. Bangalore, India.
3. Barla, G., Bonini, M., Debernardi, D., (2008): Time dependent deformations in squeezing tunnels. *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*. Goa, India.
4. Aksoy, C.O., Ogul, K., Topal, I., Ozer, S.C., Ozacar, V., Posluk, E., (2012): Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock. *Int. J. Rock Mech. Min.* 52, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.008>.
5. Arora k., Gutierrez M., Hedayat A., Xia C., (2021): Tunnels in squeezing clay-rich rocks. *Underground Space* (6), 432–445.
6. Bieniawski, Z.T., (1989): *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
7. Chern, J. C., Yu, C. W., Kao, H. C., (1998): Tunneling in Squeezing Ground. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 13.
8. Barton, N., (2002): Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (2), pp. 185-216.
9. Basnet, C. B., (2013): Evaluation on the Squeezing Phenomenon at the Headrace Tunnel of Chameliya Hydroelectric Project, Nepal, Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
10. De La Fuente, M. (2018): Tunneling under squeezing conditions: Effect of the excavation method. PhD thesis, Civil Engineering. Université Paris-Est. English NNT: 2018PESC1071.
11. De La Fuente, M., Sulem, J., Taherzadeh, R., Subrin, D., (2019): Tunneling in Squeezing Ground: Effect of the Excavation Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01931-4>
12. Fraldi, M., Guarracino, F., (2010): Analytical solutions for collapse mechanisms in tunnels with arbitrary cross sections. *International Journal of Solids and Structures* 47 216–223.
13. Goel, R. K., Jethwa, J. L., Paithankar, A. G., (1995): Indian experiences with Q and RMR systems,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 97–109.
14. Hoek, E., Brown, E.T., (1997): Practical estimates of rock mass strength *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 34 (8), pp. 1165-1186.
15. Hoek, E., (1998): Tunnel support in weak rock. In *Proc. Reg. Keynote address, Symposium of Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, China*, 20–22.
16. Hoek, E., 2000. Big tunnels in bad rock 2000 Terzaghi lecture. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 127, No. 9. September 2001, pages 726-740.
17. Hoek, E., Guevara, R., (2009): Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 42, No. 2, 389 - 418.
18. Iasiello C., Torralbo, J.C.G., Fernandez, C.T., (2021): Large deformations in deep tunnels excavated in weak rocks: Study on Y-Basque high-speed railway tunnels in northern Spain. *Underground Space* (6) 636–649.

19. Kulikova, E.Y., (2018): Defects of urban underground structure and their prediction. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012108.
20. Lin, X.T., Chen, R.P., Wu, H.N., Su,D., Meng, F., (2022): Calculation of earth pressure distribution on the deep circular tunnel considering stress transfer mechanisms in different zones. Tunneling and underground space technology 119-104211.
21. Liu B., Song Y, Chu Z., (2021): Time-dependent safety of lining structures of circular tunnels in weak rock strata. International Journal of Mining Science and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.12.003>.
22. Oke, J., Vlachopoulos, N., Diederichs, M., (2018): Improvement to the Convergence Confinement Method: Inclusion of Support Installation Proximity and Stiffness. Rock Mechanics and Rock Engineering. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1418-0>.
23. Peck, R. B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. In Proceedings 7th International Conference SMFE, State of the Art, 225–290.
24. Sakai, K., Schubert, W., 2019. Study on Ductile Support System by Means of Convergence Confinement Method. 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future, Okinawa, Japan.
25. Si, X., Huang, L., Li, X., Gong, F., (2020): Experimental Investigation of Spalling Failure of D-Shaped Tunnel Under Three-Dimensional High-Stress Conditions in Hard Rock. Rock Mechanics and Rock Engineering. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02280-3>.
26. Wang, X., Iura, T., Jiang, Y., Wang, Z., Liu, R., (2021): Deformation and mechanical characteristics of tunneling in squeezing ground: A case study of the west section of the Tawarazaka Tunnel in Japan. Tunnelling and Underground Space Technology 109-103697.
27. Wu, G.J., Chen, W.Z., Dai, Y.H., Yang, J.P., Tan, X.J., Tian, H.M. (2017): Application of a type of strain block FBG sensor for strain measurements of squeezing rock in a deep-buried tunnel. Meas Sci Technol 28(11):115001.
28. Wu, K., Shao Z., Qin, S., Boxiao L., (2020): Determination of Deformation Mechanism and Countermeasures in Silty Clay Tunnel. J. Perform. Constr. Facil., 2020, 34(1): 04019095.