

دراسة أثر تشكل فراغات في التربة المحيطة ببطانة النفق على سلوكها الإنشائي حالة دراسة بطنانة نفق بداما (سورية)

المهندس بدر الدين العسلي*

الدكتور المهندس ساطع بدوي***

الدكتور المهندس محمد مروان الهيب**

الملخص

يعد نفق بداما واحداً من أنفاق السكك الحديدية الثمانية التي تقع بين مدينتي حلب واللاذقية. وأنشئ عام 1971-1972 وتعاين بعض أجزائه حالياً من التدهورات وتسرب المياه الجوفية من خلال الشقوق التي ظهرت في البطانة البيتونية.

ونتيجة لتسرب المياه من التربة المحيطة بالنفق إلى داخله تشكلت فجوات في التربة خلف البطانة. ونظراً إلى أن وجود هذه الفجوات لم يؤخذ بالحسبان في مرحلة التصميم فإنه من الممكن أن يؤثر وجودها على السلوك الإنشائي للبطانة نتيجة لتطبيق إجهادات جديدة لم تؤخذ بالحسبان في أثناء التصميم، الأمر الذي يؤدي إلى ظهور تدهور أو انهيار في هذه البطانة.

هدف هذا البحث إلى دراسة أثر تشكل هذه الفجوات على السلوك الإنشائي لبطانة نفق بداما ودورها في ظهور بعض التدهورات التي يعاني منها النفق حالياً، واعتمدنا في ذلك على منهجية الانتقال من الملاحظات الحقلية إلى النمذجة العددية التي يمكن من خلالها مقارنة الملاحظات الحقلية بنتائج التحليلات. وتبين بنتيجة التحليل أن قيمة الاجهاد المؤثر في بطانة النفق يتعلق بحجم الفراغ خلف البطانة. وأن هناك توافقاً بين الحالة الراهنة للبطانة وبين نتائج التحليل العددي.

الكلمات المفتاحية: نفق، بطانة، تدهور، فراغات تربة، طريقة العناصر المميمة.

* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس بدر الدين العسلي بإشراف الدكتور المهندس محمد مروان الهيب ومشاركة الدكتور المهندس ساطع بدوي

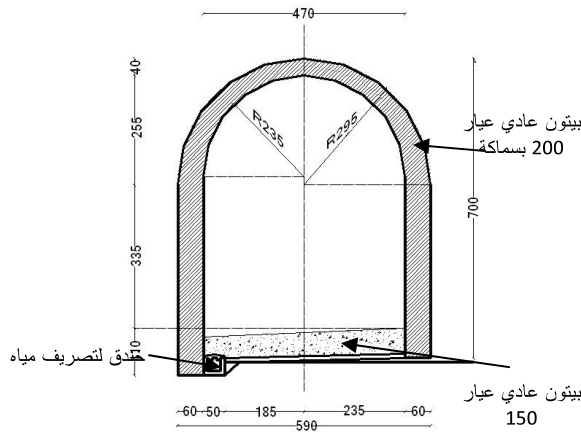
** المدرسة العليا للمناجم - جامعة نانسي - فرنسا

*** كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

مقدمة: Introduction

تشكل فجوة بجوار نفق بيتوني دائري الشكل قطره 4م مطور على عمق 10م ووجد أن عزوم الانعطاف وقوى القص المتشكلة في البطانة تزداد بازدياد هذه الفجوة. وأظهرت هذه الدراسات أهمية الالتصاق الكامل بين المنشأة المطورة ذات المقطع الدائري والتربة المحيطة بها. ولكن لا توجد حتى الآن دراسة حالة بطانة نفق بجدران مستقيمة يعلوها قوس مع وجود فجوات خلفها.

هدف هذا البحث إلى دراسة حالة تشكل فجوات خلف بطانة النفق الثالث (نفق بداما) الواقع على خط سكة حديد حلب اللاذقية ومقطعه العرضي عبارة عن جدران مستقيمة يعلوها قوس دائري (الشكل 1)^[6] وأثرها في إعادة توزيع الجهود والقوى الداخلية في بطانة النفق البيتونية.



الشكل (1) المقطع العرضي لنفق بداما^[6] (الواحدة سم)

1 - منهجية البحث: Research Methodology

تم اتباع منهجية في هذا البحث تجمع بين الملاحظات الحقلية والنمذجة العددية حيث تعرف على واقع هذه المنشآت النفقية وتغير حالتها منذ إنشائها وحتى الآن من خلال المشاهدات الحقلية في أثناء الزيارات المتعددة لنفق بداما موضوع الدراسة فضلاً عن المعلومات المتوفرة من الوثائق المتاحة المتعلقة

تختلف طرائق دراسة بطانة الأنفاق وحساب الإجهادات المؤثرة فيها، فهي تتدرج من الطرائق التجريبية والطرائق التحليلية (Terzaki, Protodyakonov^[1], Morgan^[8], Wood; Sagaseta^[9], Verruijt) إلى الطرائق المتطورة التي تعتمد النمذجة العددية (Mairet; Swoboda; Lee and Rowe; Leca and Clough^[10]; Augarde and (Burd.

وتفترض هذه الطرائق وجود تماس كامل بين بطانة النفق والتربة المحيطة به وذلك على كامل محيط النفق. وهذا الأمر يمكن أن يكون صحيحاً وخصوصاً في المراحل الأولى من إنشاء النفق واستثماره، ولكن تتغير حالة هذا التماس في المراحل التالية حيث يمكن أن تتشكل فراغات خلف بطانة النفق وذلك نتيجة لنشوء فجوات وراء هذه البطانة نتيجة لرشح المياه الجوفية من خلال الفواصل والشقوق الموجودة في التربة والبطانة أو انحلال بعض الترب بهذه المياه وانتقالها مع المياه المتسربة إلى داخل النفق وخصوصاً إذا تعرضت البطانة لحمولات ديناميكية مثل مرور القطارات^[16,17] حيث تسرع هذه الحمولات في عملية تسرب المياه خلال الشقوق. فكيف يؤثر وجود هذه الفراغات على سلوك البطانة وتوزيع القوى الداخلية ضمنها وهذا ما سوف يدرس ضمن هذا البحث.

درس Baker^[20] انهيار أنبوب صرف مطور من البيتون المسلح دائري الشكل بقطر 1.2م في تربة غضارية. يوجد فراغ من الأسفل بطول نحو 20م بين الأنبوب وبين التربة التي تحيط به. ونشأ عن ذلك ظهور عدة شقوق في قمة الأنبوب وعند منسوب مركزه على طول 300م. كذلك درس Dang^[17] أثر

باللاذقية وقدره 10.2% وعمق أعظمي للنفق بالنسبة إلى الجبل قدره 114م.

ويأخذ شكل المقطع العرضي لبطانة النفق في أغلب مساره شكل جدران مستقيمة مع قوس دائرية في الأعلى^[3] كما في الشكل (1) وقد نفذت البطانة من البيتون العادي دون حديد تسليح ومن العيار M-200 وبسماكة 60 سم.

3 - الحالة الفنية الراهنة لنفق بداما : Actual Situation of Badama Tunnel

من خلال دراسة الوثائق المتوفرة والتقييم البصري والأولي للحالة الفنية للنفق يظهر أنه يعاني من مشاكل هندسية على طول محوره ولكنها تختلف من حيث الشدة والتصنيف ويمكن تصنيفها إلى ثلاثة أقسام^[6]:

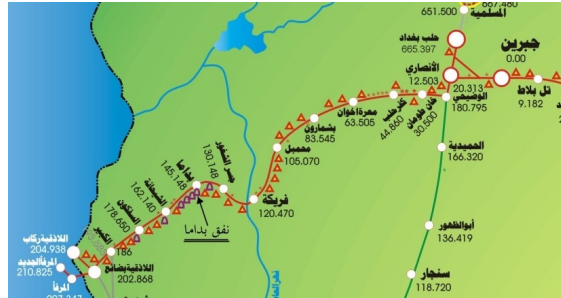
1 - القسم الأول يمكن تقييم الحالة الفنية الراهنة فيه لبطانة النفق بأنها قابلة للاستثمار حيث تعاني بطانة النفق فيها من تشققات عشوائية غير كثيفة ويوجد أماكن تسرب ورشح للمياه الجوفية تقع عند فواصل الصب بشكل رئيسي. وعلى الرغم من وجود هذه العيوب إلا أنها لا تفقده صلاحية الاستثمار.

2 - القسم الثاني تظهر فيه عيوب على شكل تشققات في الجدران بأبعاد أكثر وضوحاً الشكل (4)^[7] (طول شقوق يصل إلى 30م ، تقاطع الشقوق، عرض الشق 4-5مم) وهذه العيوب تخفض من قدرة تحمل البطانة ولكن ليس إلى حد الوصول إلى انهيار مفاجئ للبطانة، ومن ثمّ يمكن تصنيف الحالة الفنية لهذا القسم بأنها حرجة أو حدية.

بالموضوع . ولتحليل هذه المعطيات وتصوير الوضع المستقبلي لهذا النفق تم اللجوء إلى النمذجة العددية التي من خلالها يمكن مقارنة النتائج بالملاحظات الحقلية، وعلى ضوء ذلك تم الحصول على بعض النتائج وطرح بعض التوصيات.

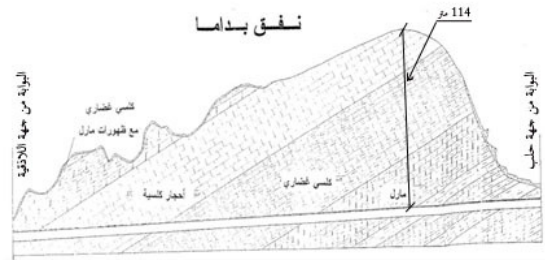
2 -معلومات عن نفق بداما: Badama Tunnel Information

يقع نفق بداما (النفق الثالث) قرب محطة بداما للقطارات على محور الخط الحديدي حلب اللاذقية بين محطتي بداما وبيبار (الشكل 2).



الشكل (2) موقع نفق بداما (النفق الثالث)

ويبلغ طول النفق 1885.8 م. ويقع النفق وفق المعلومات المتوفرة في تربة كلسية ومارل وأحجار كلسية^[4] وذلك كما هو موضح بالشكل (3)^[6].



الشكل (3) المقطع الطولي لنفق بداما^[6]

بني النفق في عامي 1971-1972 ويقع النفق على مسار مستقيم مع ميل باتجاه واحد من بداما باتجاه



الشكل (6) شقوق وتسريب مياه وتمليح في القوس^[6]

إن مجرى تصريف المياه في حدود هذا القسم ممتلئ برسوبيات فضية اللون تمثل حبيبات التربة المنحلة والمنجرفة بالمياه المتسربة. ومن معلومات الكادر المشرف على استثمار النفق فإن مجرى قناة التصريف يمتلئ في هذا القسم بالانجرافات خلال شهر واحد بعد تعزيله بالكامل^[5] كما في الشكل (7)^[7]



الشكل (7) انسداد مجرى التصريف بالتربة المنحلة^[7]

4 - الفراغات خلف بطنانة النفق: Voids Behind Tunnel Lining

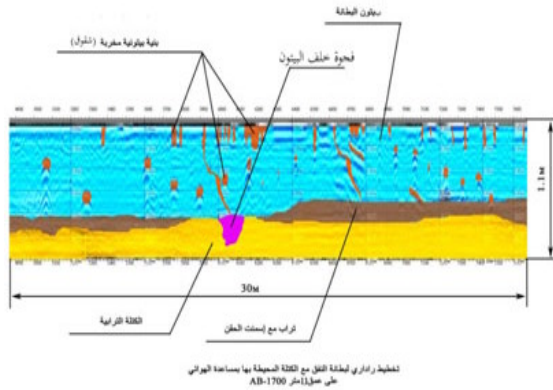
سنعتمد في هذا البحث نتائج الفحص الجيوراڊاري الذي قام به الفريق الروسي من جامعة هندسة النقل والمواصلات في سانت بطرس بورغ الذي قام بدراسة بطنانة النفق والكتلة الجبلية المحيطة بها ولعمق يصل حتى 5م بمساعدة جهاز الجيوراڊار من نوع (oko) وتم المسح من مسافة 0.4م من البطنانة^[6] كما في الشكل (8). وكان من أهداف هذه الدراسة تحديد أماكن وجود الفراغات خلف البطنانة وأحجام هذه



الشكل (4) شق بعرض 5م في القسم الثاني من النفق^[7]
3 - القسم الثالث وهو بطول نحو 300 م وتلاحظ فيه عيوب وتشوهات في البطنانة على شكل تشققات طويلة ومائلة في الجدران وبعرض يصل 5م كما في الشكل (5)^[6] والشكل (6)^[6]، وتوجد فتحات غير مغلقة محفورة ضمن البطنانة في أثناء تنفيذ أعمال الإصلاحات السابقة ويلاحظ وجود تسربات للمياه في أماكن متعددة. ويوجد تسريب كبير للمياه من التشققات (تصل كمية المياه المتسربة من جدران النفق إلى داخله النفق 27 م³/يوم في فصل الشتاء)^[6] وتحمل المياه المتسربة جزيئات التربة من خلف الجدران وفي المصارف مما يوحى بتشكيل فراغات خلف البطنانة مما قد يؤدي إلى تغيير في قيم الإجهادات المطبقة على البطنانة^[18]. وإن وجود هذه العيوب يمكن أن يؤدي إلى تخفيض قدرة تحمل البطنانة ومن ثمّ يمكن تصنيف حالة هذا الجزء بأنها متدهورة وغير مسموح بها.



الشكل (5) شقوق وتسريب مياه في الجدار اليميني من النفق^[6]



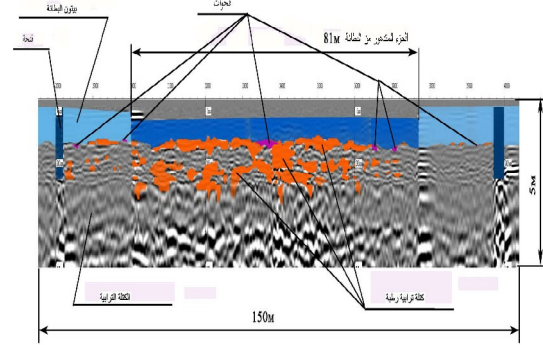
الشكل (9) [6] مسح جيوراداري لمسافة 30م من جدار نفق بداما ولعمق 1,1 متر ولمسافة 30 متراً من الحلقة 287 إلى الحلقة 289

يتضح مما سبق أن الحالة الفنية لبطانة نفق بداما تتصف بوجود الكثير من التشوهات التي تظهر على شكل تشققات وتسرب مياه ووجود مناطق فارغة خلف البطانة لا يوجد فيها التصاق تام بين التربة والبيتون. ويمكن أن تكون هذه الفراغات الموجودة خلف البطانة أحد الأسباب التي يمكن أن تؤدي إلى زيادة التدهور في هذه البطانة. ولذلك كان لا بد من دراسة هذه الظاهرة وتحديد أثر هذه الفراغات على السلوك الانشائي لبطانة النفق.

5 - النمذجة العددية: Numerical Modeling

يتم استخدام النمذجة العددية لدراسة سلوك المنشآت وفهمها مهما كانت معقدة إذ إنها قليلة الكلفة وتسمح بالتعديل وإعادة الحسابات بشكل سهل مقارنة بالطرائق التجريبية. وهناك العديد من الطرائق العددية وإحدى هذه الطرائق هي طريقة العناصر المميزة (DEM(Distinct Element Method) وهي التي سنستخدمها في هذا البحث.

الفراغات. ومعرفة سماكة البطانة وأماكن وجود الشقوق الداخلية فيها.



الشكل (8) مسح جيوراداري لمسافة 150م من جدار النفق ولعمق 5 م [6].

تمت إعادة المسح الجيوراداري بواسطة الهوائي AB-1700 في المناطق التي أظهرت نتيجة المسح السابق أنها كثيرة العيوب والتشوهات (الجزء الأزرق الغامق على الشكل 8) وهذا الجهاز يسمح بدراسة التشوهات الحاصلة على عمق 1متر بدقة كبيرة كما في الشكل (9) [6] الذي يوضح مسحاً لمنطقة الجدار اليميني من النفق لمسافة 30 م من الحلقة 285 حتى الحلقة 289 من بطانة النفق حيث يظهر المسح وجود فجوة بين البطانة البيتونية والتربة المحيطة وذلك على ارتفاع متر واحد من أسفل الجدار اليميني [6]. ويلاحظ نتيجة المسح تشكل الشقوق في البطانة قرب منطقة تشكل الفجوات وأنها تقطع البطانة البيتونية بالكامل لتصل إلى الفجوة خلف البطانة.

1-5 طريقة العناصر المميزة Distinct Element Method

وهذا (Universal Distinct Element Code) البرنامج يسمح بدراسة السلوك المتداخل بين العناصر المستمرة والانقطاعات ويعتمد هذا البرنامج قانونين مهمين في الحساب:

- قانون نيوتن للحركة لحساب التسارع الناتج من القوى المطبقة على الكتل ثم السرعة ثم الانتقال في الانقطاع. وهذا يعني أن الحساب يتم بشكل ديناميكي.

$$\gamma = \frac{\sum F}{\sum M} \dots \dots \dots (1)$$

حيث: γ التسارع الناتج
M الكتلة
F القوة المطبقة

- قانون هوك أو قانون المرنة الذي يسمح بحساب الجهود والانقطاعات في الكتل.

ويتم حساب القوى المؤثرة في الانقطاع من معرفة الانتقالات فيه حيث يتم تمثيله بنابض مرونة ويحسب بالمعادلة:

$$F = K \cdot U \dots \dots \dots (2)$$

إذ: K معامل صلابة النابض F القوة المؤثرة
U الانتقال الناتج

وإذا تم تمثيل الانقطاع بنابض مماسي وآخر ناظمي تقسم القوة إلى مركبتين:

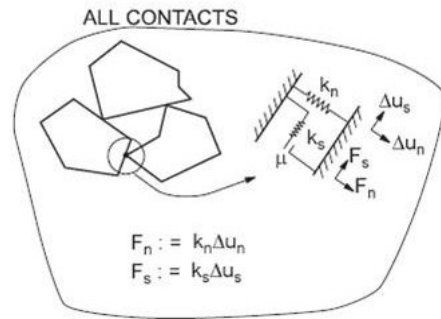
$$F_n = K_n \cdot U_n \quad F_s = K_s \cdot U_s$$

إذ: K_n, K_s معاملات الصلابة الناظمي والمماسي للانقطاع.

ويتمتع برنامج UDEC بإمكانية إنجاز أنواع التحليلات المختلفة الستاتيكية والديناميكية والحرارية... ويحتوي على مولد ذاتي للألفاق^[11]. لذلك سيتم

تعُد دراسة الأوساط الهندسية غير المستمرة (التي تحوي انقطاعات) من المسائل الهندسية المعقدة^[12]. ولذلك تم اقتراح نظرية العناصر المميزة من قبل Peter Cundall 1971. ووفقاً لهذه الطريقة يتم تمثيل الوسط المدروس غير المستمر بمجموعة من البلوكات التي تتفصل عن بعضها بواسطة الفواصل (الانقطاعات). وتؤثر كل بلوكة في البلوكة المجاورة من خلال هذا الفاصل^[12].

يمكن التعبير في هذه الطريقة عن سلوك العناصر من خلال معادلة حركة للكتلة. ويتم وضع نابضين (أحدهما ناظمي والآخر مماسي) بين العناصر الصلبة اللذين يقومان بوصل عنصرين متجاورين مع بعضهما وذلك من أجل التعبير عن قوى التأثير المتبادل بينهما(الشكل 10).



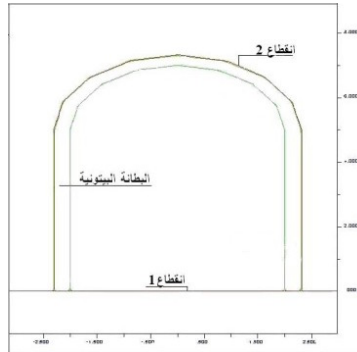
الشكل (10) تمثيل الانقطاع بنابض ناظمي ونابض مماسي

ويتم حل معادلة الحركة لكل عنصر من النموذج ثم يتم إجراء تكاملات عددية وسلسلة من الحسابات التي تتبع حركات البلوكات لحساب القوى الداخلية والانتقالات الناشئة نتيجة لتطبيق الحمولات^[13].

2-5 برنامج التحليل: Analysis Program

من أهم البرامج والكودات التي تعتمد طريقة العناصر المميزة في إنجاز التحليلات هو برنامج UDEC

- استخدام هذا البرنامج في عمليات التحليل ضمن هذا البحث.
- انقطاع رقم (1) ضروري من أجل نمذجة النفق بوجود الانقطاعات وله خواص تماثل خواص الوسط المحيط وهذا يسمح بالاستمرارية.
- انقطاع رقم (2) يمثل سطح التلاقي بين التربة وبيتون البطانة.



الشكل (12) الانقطاعات في النموذج المدروس

3-3- الحالات المدروسة: Studied Cases

تمت نمذجة مجموعة من الفراغات حيث تم تمثيل الفراغ بنصف دائرة عند محيط النفق قطرها هو الطول الذي لا يوجد فيه تماس بين التربة والبتانة. وبحيث يزداد قطر هذه الدائرة أي الطول الذي لا يكون فيه تماس بين البطانة والتربة نتيجة لوجود الفراغ (L) على أربع مراحل تمثل 0% و 3% و 6% و 9% من محيط البطانة البيتونية. وذلك كما هو موضح بالشكل (13)، حيث يمكن أن توجد فراغات بأحجام مختلفة في مناطق أخرى خلف البطانة البيتونية. وحسبت النسبة كما يأتي:

$$D = 4.65 * 2 + 3.14 * 2.95 = 18.57 \text{ m} : D \text{ محيط النفق}$$

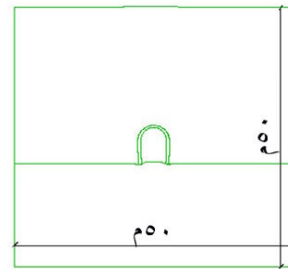
(مسافة عدم التماس): L قطر الدائرة الممثلة للفجوة

$$L / D = 0.03 \rightarrow L = 18.75 * 0.03 = 0.56 \text{ m}$$

6 - النموذج العددي: Numerical Model

6-1- أبعاد النموذج: Model Limits

أنشئ نموذج رياضي وفق طريقة العناصر المميزة لدراسة أثر وجود الفراغات خلف البطانة البيتونية للنفق على سلوك هذه البطانة. ويبين الشكل (11) نموذج النفق المدروس الذي يتوافق مع مقطع الأنفاق موضوع الدراسة. وتم افتراض أن التربة حول النفق في المقطع المدروس متجانسة وحالة الدراسة حالة تشوهات مستوية بالنسبة إلى البطانة والتربة المحيطة بها^[19]. وتؤثر على النفق حمولة الوزن الذاتي للبتانة ووزن وضغط التربة المحيطة بالنفق. إذ يتم حساب هذه القوى مباشرة من قبل البرنامج وفقاً للخواص المدخلة لكل من البيتون والتربة. ويجب التنويه إلى أن الفراغ الفعلي خلف البطانة البيتونية يكون ثلاثي الأبعاد ولكن ستنم دراسته على أساس أنه ثنائي البعد على افتراض أن طول هذا الفراغ في اتجاه محور النفق يكون طويلاً بشكل كافٍ لتكون المسألة مسألة تشوهات مستوية وذلك من أجل تسهيل الحسابات^[14].



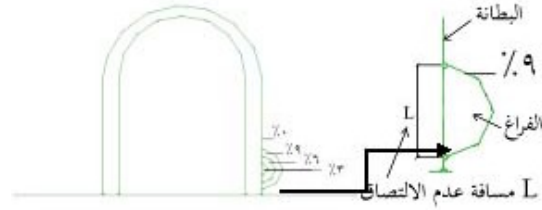
الشكل (11) النموذج الرياضي للنفق المدروس

6-2- الانقطاعات في النموذج: تم تمييز نوعين

من الانقطاعات ضمن النموذج المدروس الشكل(12):

الجدول 3- خواص الفاصل بين التربة والبطانة [20,21]

الخواص الهندسية	الرمز	الوحدة	القيمة
معامل الصلابة الناظمي	jkn	Pa	1E7
معامل الصلابة المماسي	jks	Pa	1E6
معامل الاحتكاك	jfric	Degree	35
معامل التماسك	jcoh	Pa	1E10



الشكل (13) الفراغات المفترضة خلف البطانة

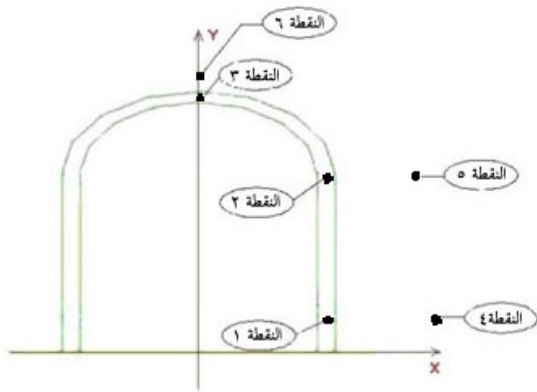
6-4- خواص المواد والانقطاعات: Materials and joints Properties

تمت دراسة تأثير الفراغات على الإجهادات المؤثرة في بطانة النفق والتربة المحيطة بها عن طريق مراقبة التغير في قيم هذه الإجهادات مع زيادة حجم هذه الفراغات خلف البطانة. وتم إجراء التحليلات للدنة بافتراض سلوك النموذج مرن لدن elasto-plastic behavior. وتمت مراقبة الإجهادات والتشوهات في ست نقاط ثلاث منها في البطانة وثلاث أخرى في التربة المحيطة كما هو مبين بالشكل (14).

يوضح الجدول (1) الخواص الهندسية لبيتون البطانة. وهذه القيم هي نتيجة للاختبارات الحقلية التي قمنا بإجرائها على بيتون البطانة ومن اختبارات الدراسات السابقة على هذه النفق [3,6].

الجدول 1- الخواص الهندسية لبيتون البطانة [3,6]

الخواص الهندسية	الرمز	الوحدة	القيمة
الوزن الحجمي	γ	kg/cm ³	2400
معامل المرونة الحجمي	K	Pa	66.67E8
معامل القص	G	Pa	40E8
زاوية الاحتكاك	Φ	Degree	45
معامل التماسك	C	Pa	5E6
مقاومة الشد	T	Pa	5E6



الشكل (14) النقاط المرصودة في البطانة والتربة المحيطة

ويوضح الجدول (2) الخواص الهندسية للتربة الصخرية المحيطة بالنفق والتي هي عبارة عن أحجار كلسية وهذه القيم أخذت أيضاً من التجارب الحقلية واختبارات الدراسات السابقة [3,6].

الجدول 2- الخواص الهندسية للتربة المحيطة

بالنفق [3,6]

الخواص الهندسية	الرمز	الوحدة	القيمة
الوزن الحجمي	γ	kg/cm ³	1800
معامل المرونة الحجمي	K	Pa	66.67E6
معامل القص	G	Pa	40E6
زاوية الاحتكاك	Φ	Degree	45
معامل التماسك	C	Pa	5E5
مقاومة الشد	T	Pa	4E5

6-5- نتائج التحليل: Analysis Results

بانجاز التحليلات للحالات المختلفة ورصد قيم $S_{xx}, S_{yy}, X_{dis}, Y_{dis}$ في النقاط الست المدروسة وجدت القيم التالية كما في الجدول (4) إذ:

S_{xx} : الإجهادات الأفقية (Pa).

S_{yy} : الإجهادات الشاقولية (Pa).

X_{dis} : الانتقالات الأفقية (m).

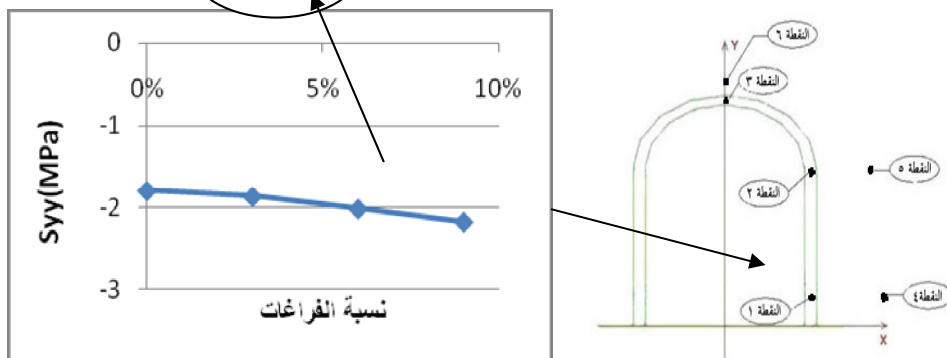
Y_{dis} : الانتقالات الشاقولية (m).

ويبين الجدول (3) خواص الفاصل بين الصخر والبطانة البيتونية (انقطاع 2) حيث تم اعتماد هذه القيم بناء على الدراسات السابقة [20,21].

الجدول - 4 -

النقطة	الانتقال / الإجهاد المرصود	دون فراغات %0	فراغ %3	فراغ %6	فراغ %9
1	Xdis (m)	-1.44E-01	-1.56E-01	-1.61E-01	-1.67E-01
	Ydis(m)	-6.81E-02	-7.39E-02	-7.34E-02	-6.90E-02
2	Xdis(m)	-5.07E-02	-5.69E-02	-5.70E-02	-5.87E-02
	Ydis(m)	-7.04E-02	-7.63E-02	-7.59E-02	-7.10E-02
3	Xdis(m)	3.26E-04	-1.65E-03	1.06E-03	1.08E-03
	Ydis(m)	-3.07E-02	-2.63E-02	-2.50E-02	-2.67E-02
4	Xdis(m)	-1.20E-01	-1.46E-01	-1.55E-01	-1.38E-01
	Ydis(m)	-5.61E-02	-8.46E-02	-8.41E-02	-9.11E-02
5	Xdis(m)	-4.91E-02	-5.50E-02	-5.52E-02	-4.77E-02
	Ydis(m)	-8.24E-02	-8.94E-02	-9.02E-02	-8.33E-02
6	Xdis(m)	4.75E-04	-8.94E-05	7.09E-04	1.60E-03
	Ydis(m)	-3.43E-02	-3.49E-02	-3.39E-02	-3.31E-02
1	Sxx(Pa)	1.89E+05	1.94E+05	2.44E+05	2.31E+05
	Syy(Pa)	-1.79E+06	-1.86E+06	-2.01E+06	-2.17E+06
2	Sxx(Pa)	-2.71E+05	-2.74E+05	-2.85E+05	-3.08E+05
	Syy(Pa)	6.81E+05	3.63E+05	-2.99E+05	-7.17E+05
3	Sxx(Pa)	-2.30E+05	-1.54E+05	-1.33E+05	-2.96E+05
	Syy(Pa)	-4.32E+05	-3.95E+05	3.48E+05	5.14E+05
4	Sxx(Pa)	-8.70E+04	-9.58E+04	-1.55E+05	-2.14E+05
	Syy(Pa)	-1.85E+05	-2.12E+05	-3.37E+05	-4.33E+05
5	Sxx(Pa)	-1.74E+05	-1.77E+05	-1.74E+05	-2.11E+05
	Syy(Pa)	-3.03E+05	-3.08E+05	-2.91E+05	-3.11E+05
6	Sxx(Pa)	-2.26E+05	-2.38E+05	-1.54E+05	-1.79E+05
	Syy(Pa)	-3.89E+05	-3.89E+05	-3.54E+05	-3.53E+05

ويبين الشكل (15) العلاقة بين نسبة الفراغ وبين S_{yy} للنقطة 1 من البطانة : انهيار التربة

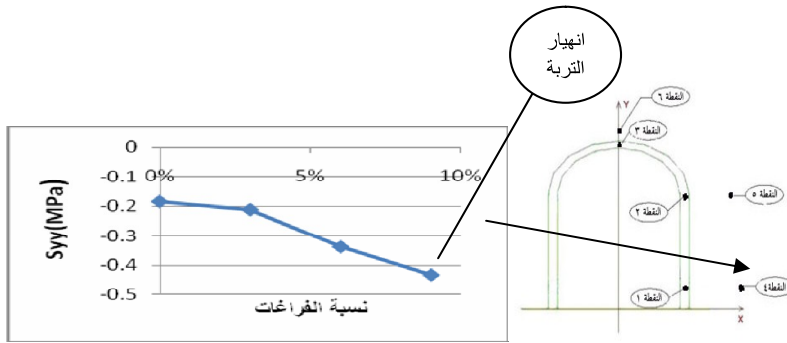


الشكل (15) العلاقة بين الإجهادات الشاقولية والفراغات حول البطانة عند النقطة 1

ونلاحظ من المخطط أن الإجهاد الشاقولي له علاقة بنسبة الفراغات حيث يزداد الإجهاد الشاقولي كلما زادت نسبة الفراغات حول البطانة. وقد وجد أن هذه الإجهادات المؤثرة في التربة تتجاوز مقاومة التربة على القص عندما يصل الطول الذي لا يوجد فيه تماس بين التربة والبطانة (قطر الدائرة التي تمثل

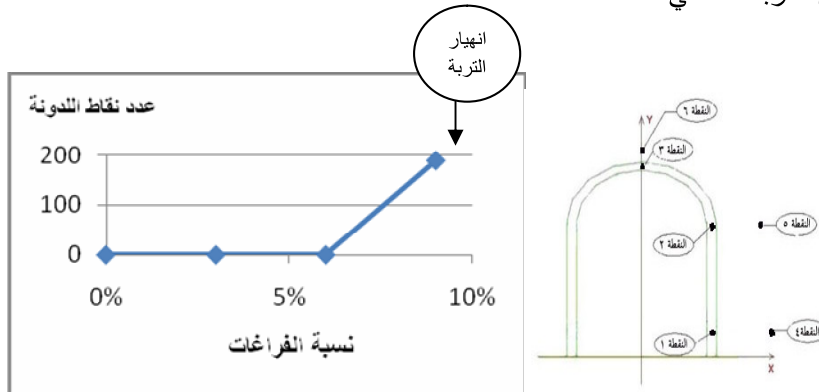
الفجوة) نحو 9% من محيط المقطع العرضي للبطانة وهذا سينتج عنه انهيار في التربة.

ويبين المخطط (16) أيضاً أن الإجهاد الشاقولي في النقطة 4 (الواقعة في التربة) يزيد كلما زادت نسبة الفراغات حول البطانة وأنها تتجاوز أيضاً مقاومة التربة عند نسبة فراغات 9%.



الشكل (16) العلاقة بين الإجهادات الشاقولية والفراغات حول البطانة عند النقطة 4 (تربة)

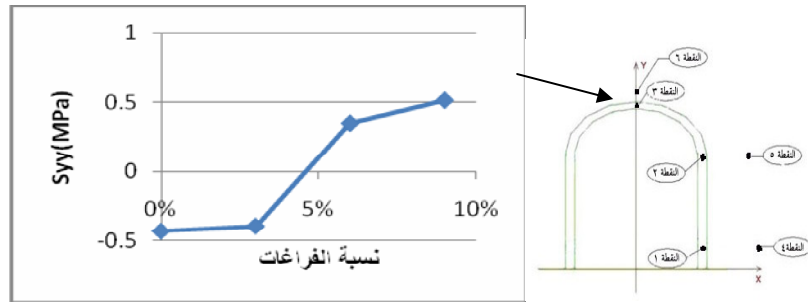
ويوضح الشكل (17) العلاقة بين عدد نقاط اللدونة في النموذج المدروس وبين نسبة الفراغات حول البطانة ونلاحظ فيه ارتفاع عدد هذه النقاط عندما تصبح نسبة الفراغات 9% أي عندما تصبح التربة في حالة انهيار.



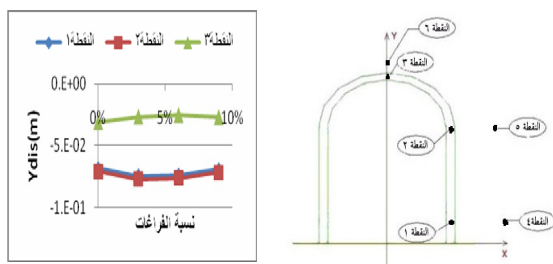
الشكل (17) العلاقة بين عدد نقاط اللدونة في النموذج والفراغات حول البطانة

ونلاحظ من الشكل (18) أن الإجهادات الشاقولية عند قمة النفق تغير إشارتها عند نسبة فراغات نحو 4.5% حيث تتحول من إجهادات ضاغطة إلى إجهادات شادة

مما قد يعرض البطانة في هذه النقطة للتشقق إذا تجاوزت قيمة الإجهادات مقاومة البطانة على الشد.



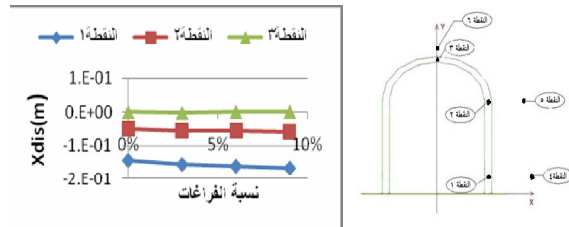
الشكل (18) العلاقة بين الإجهادات الشاقولية والفراغات حول البطانة عند النقطة 3 من البطانة



الشكل (20) العلاقة بين الانتقالات الشاقولية ونسبة الفراغات للنقاط 1،2،3 من البطانة

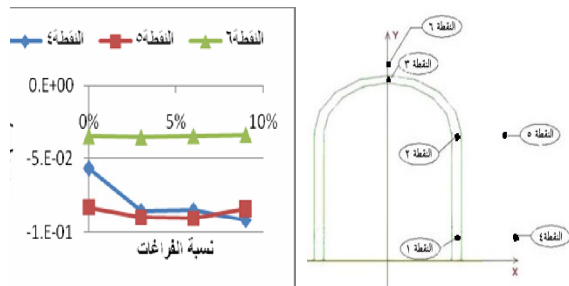
ويوضح الشكل (19) العلاقة بين الانتقالات الأفقية لثلاث نقاط من البطانة مع نسبة الفراغات. ويظهر من المخطط أن الانتقال الأفقي للنقطة 1 الواقعة عند أسفل الجدار تقريباً هي الأكثر انتقالاً وذلك كون مقطع النفق مفتوحاً من الأسفل. وقيمة هذا الانتقال تزداد بازدياد نسبة الفراغات. أما النقطة 2 الواقعة عند بداية القوس فهي أقل انتقالاً بالاتجاه الأفقي من النقطة 1. أما النقطة 3 الواقعة في محور قوس النفق فاننتقالها معدوم تقريباً مقارنة بالنقطتين السابقتين وذلك كون النموذج متناظراً وهذه النقطة تقع على محور التناظر.

الشكل (21) العلاقة بين الانتقالات الشاقولية ونسبة الفراغات للنقاط 1،2،3،4 من البطانة وبرسم العلاقة بين الانتقالات الشاقولية للنقاط الثلاث من التربة 4،5،6 مع نسبة الفراغات خلف البطانة كما في الشكل (21) نلاحظ أن انتقال النقطة 4 الأقرب إلى الفجوة قد زاد انتقالها بشكل متسارع عندما تشكلت الفجوة وارتفعت النسبة من 0% إلى 3% وازداد هذا الانتقال بزيادة نسبة الفراغات حتى تجاوز قيمة انتقال النقطة 4 من التربة قرب بداية القوس عندما بلغت نسبة الفراغات نحو 7%.



الشكل (19) العلاقة بين الانتقالات الأفقية ونسبة الفراغات للنقاط 1،2،3 من البطانة

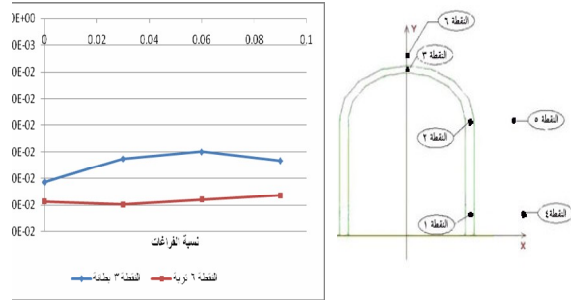
ويبين الشكل (20) العلاقة بين الانتقالات الشاقولية ونسبة الفراغات لنقاط البطانة الثلاث 1،2،3 حيث يظهر أن انتقالات النقطتين 1 و2 متقاربة كونهما تقعان على الجدار الشاقولي نفسه للنفق حيث ينزاح هذا الجدار شاقولياً كعنصر إنشائي واحد.



الشكل (21) العلاقة بين الانتقالات الشاقولية ونسبة الفراغات للنقاط 4،5،6 من التربة

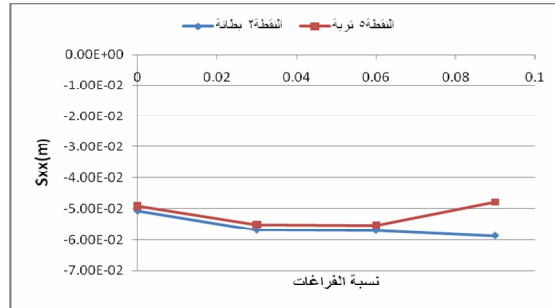
دراسة أثر تشكل فراغات في التربة المحيطة ببطانة النفق على سلوكها الإنشائي حالة دراسة بطانة نفق بداما (سورية)

ويرسم العلاقة بين الانتقالات الشاقولية للنقطة 3 من البطانة عند قمة النفق والنقطة 6 من التربة مع نسبة الفراغات خلف البطانة كما في الشكل (22) نلاحظ أن انتقال النقطة 6 من التربة أكبر من انتقال النقطة 3 من البطانة وهذا يعني أن التربة فوق النفق تتنضغط ولا تحدث فجوات في هذه المنطقة في حالتنا هذه.

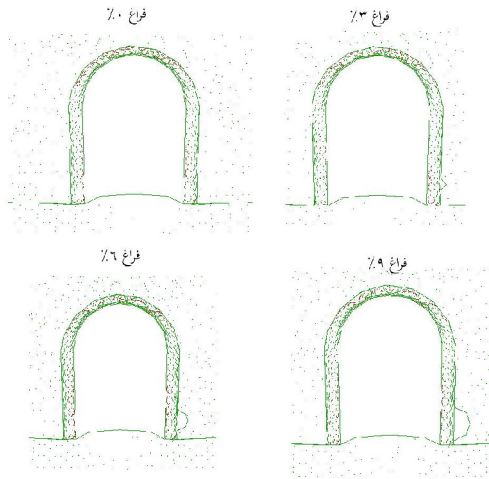


الشكل (22) العلاقة بين الانتقالات الشاقولية ونسبة الفراغات للنقطتين 3 و6 (تربة وبطانة)

ويرسم العلاقة بين الانتقالات الأفقية للنقطة 2 من البطانة عند بداية القوس والنقطة 5 من التربة مع نسبة الفراغات خلف البطانة كما في الشكل (23) نلاحظ أن انتقال النقطة 3 من البطانة أكبر من انتقال النقطة 5 من التربة عند نسبة فراغات 9% وهذا يعني أن البطانة ستنتقل أفقياً بشكل أكبر من البطانة مما يتيح إمكانية تولد فجوة في هذه المنطقة.

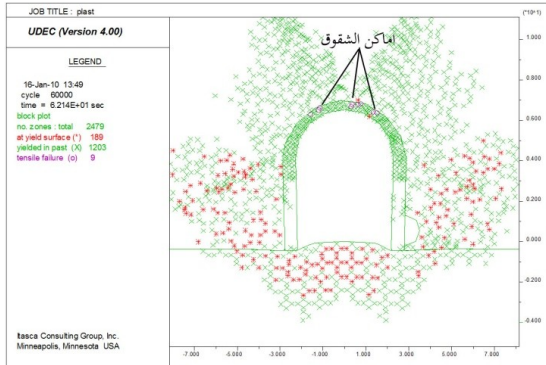


الشكل (23) العلاقة بين الانتقالات الأفقية ونسبة الفراغات للنقطتين 2 و5 (تربة وبطانة)



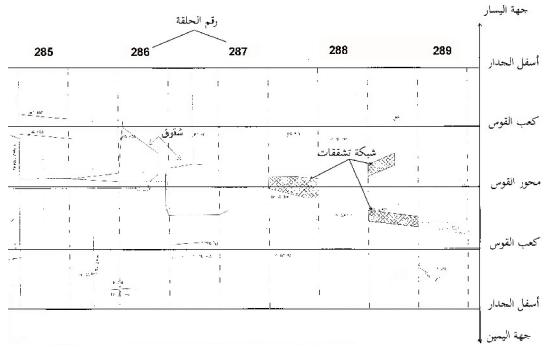
الشكل (24) الإجهادات الرئيسية في بطانة النفق للحالات المدروسة

ويبين الشكل (25) الانتقالات الحاصلة في البطانة والتربة المحيطة للحالات المدروسة حيث يظهر أن انتقالات التربة خلف جدار النفق تزداد باتجاه الفراغ خلف البطانة كلما زادت نسبة هذا الفراغ، وأن هذه الانتقالات تتركز أكثر عند ناحية الفجوة كلما كانت هذه الفجوة أكبر.



الشكل (27) نقاط المرونة واللدونة في البطانة والتربة

ونلاحظ من الشكل أن هناك نقاط لدونة تشير إلى إمكانية حصول تشققات عند قمة قوس النفق بالنسبة إلى البطانة فضلاً عن نقاط لدونة أخرى في التربة وهذا يتوافق مع خرائط العيوب الموضوعة للنفق في المنطقة الواقعة من الحلقة 287 إلى الحلقة 289 من النفق الثالث^[6] وهذه الخريطة مبينة في الشكل (28) حيث يظهر أماكن وجود شبكة تشققات في ثلاثة مواضع من سقف النفق تتوافق مع أماكن تشكل النقاط اللدنة الناتجة من النمذجة العددية.



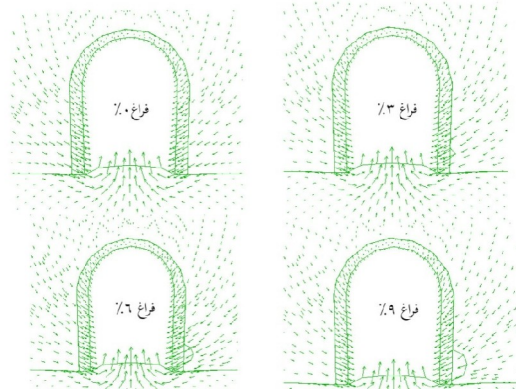
الشكل (28) خريطة العيوب للنفق الثالث بين الحلفتين

289- 285

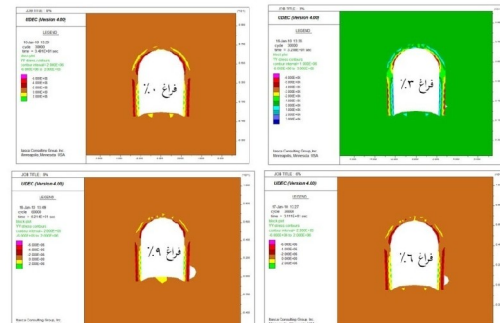
7- نتائج: Results

درس السلوك الإنشائي لبطانة النفق وعلاقته بوجود الفراغات خلف هذه البطانة وذلك عن طريق التحكم

ويوضح الشكل (26) الإجهادات الشاقولية الناشئة في البطانة البيتونية والتربة المحيطة بها للحالات المدروسة ونجد من الشكل أن الإجهادات الشاقولية تزداد كلما زادت نسبة الفراغات خلف الجدار سواء كانت هذه الإجهادات ضاغطة أو شادة.



الشكل (25) الانتقالات في النموذج للحالات المدروسة



الشكل (26) الإجهادات الشاقولية في البطانة وما حولها للحالات المدروسة

وبيين الشكل (27) مخطط النقاط اللدنة في النموذج

في حالة نسبة الفراغ 9% :

بحجم هذه الفراغات حيث تمت الدراسة عددياً عن طريق النمذجة الرياضية ووجدنا النتائج الآتية:

1- يتأثر السلوك الإنشائي لبطانة النفق بوجود الفراغات حول محيط هذه البطانة.

2- ترتبط قيمة الإجهاد المؤثر في بطنانة النفق بحجم الفراغ خلفه وكلما كان حجم الفراغ أكبر كان الإجهاد المؤثر على البطانة أكبر.

3- وجد أن تأثير الفراغ أخطر عند قمة النفق حيث يغير الإجهاد إشارته من السالب إلى الموجب وهذا مؤشر لحدوث شقوق محتملة في البطانة البيتونية إذا تجاوزت هذه الإجهادات مقاومة الشد المسموحة لبيتون البطانة.

4- إن المسح الجيوراداري للمناطق المحيطة بالنفق يكشف أماكن الفراغات. ومن ثمّ يمكن تقدير أحجامها ومعالجتها لمنعها من الازدياد عن نسب معينة (في حالتنا 9% من محيط البطانة) نظراً إلى أنها إذا تجاوزت هذه القيمة يمكن أن تحدث زيادة كبيرة في الإجهادات المؤثرة في البطانة مما قد يؤدي إلى حدوث تدهور أو انهيار في بطنانة النفق.

5- أظهرت نتائج التحليل أن أماكن تشكل للشقوق في قمة النفق تتوافق مع أماكن الشقوق في الواقع الفعلي للنفق وهذا دليل على صحة طريقة النمذجة المعتمدة.

6- تبين أنه وفقاً للنمذجة العددية والتحريات الجيوفيزيائية تمت معرفة أهمية تشكل فراغات

8 - توصيات: Recommendations

- يمكن معالجة الفراغات المتشكلة خلف البطانة بحقنها بالبيتون بضغط حقن ليست كبيرة (1 بار مثلاً) حتى امتلاء هذه الفجوات تماماً. ويمكن بعد ذلك إذا اقتضى الأمر تثبيت البطانة بالصخر في هذه المنطقة بواسطة الشدادات (Anchors).
- يمكن تطوير البحث في هذا المجال بدراسة نموذج ثلاثي أبعاد للنفق والفجوة خلف البطانة.
- يمكن تحريك الفجوة على محيط البطانة أو نصف محيطها (باعتبار النفق متناظراً) وإجراء التحليلات المناسبة لتحديد المكان الأخطر لتوضع الفجوة على محيط البطانة من أجل أخذ الاحتياطات لمنع تشكلها في هذا الموضع.

- جدول الرموز والمصطلحات: Terms and Symbols Table

γ	الوزن الحجمي
Φ	زاوية الاحتكاك
K	معامل المرونة الحجمي
G	معامل القص
C	معامل التماسك
T	مقاومة الشد
M	الكتلة
F	القوة المطبقة
Kn	معامل الصلابة الناظمي للانقطاع.
Ks	معامل الصلابة المماسي للانقطاع.
DEM	طريقة العناصر المميزة
UDEC	الكود العالمي للعناصر المميزة

- Journal of Geotechnical Engineering 118 (4), 558–575.
- المراجع
1. شحادة، نضال، الأنفاق والمنشآت المطمورة، منشورات جامعة حلب، 1995.
 2. حمزة، محمد مروان، ميكانيك التربة والصخور، مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية، منشورات جامعة حلب، 2002م
 3. دراسة التشققات في نفق بداما، وحدة الأعمال والدراسات الهندسية، حلب، 2003.
 4. التقرير التفصيلي لخبراء شركة RVP KOEHNE البلغارية لصيانة أنفاق خط حلب - اللاذقية، مركز أمهان للاستشارات الهندسية، حلب، 2004.
 5. الدراسة البلغارية لتقوية الأنفاق على خط حلب - اللاذقية، المؤسسة العامة للخطوط الحديدية السورية، حلب.
 6. الدراسة الروسية لأنفاق السكك الحديدية على محور حلب- اللاذقية، المؤسسة العامة للخطوط الحديدية السورية، حلب 2006.
 7. سكر، نسيم، تحليل البطانات لأنفاق الخطوط الحديدية السورية وإعادة تأهيلها، رسالة ماجستير، حلب، 2006.
 8. Morgan, D.H., 1971. A contribution to the analysis of stress in a circular tunnel. Geotechnique 11 (3), 37–46.
 9. Sagaseta, C., 1987. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. Geotechnique 37 (3), 301–320.
 10. Leca, E., Clough, W., 1992. Preliminary design for NATM tunnel support in soil.
 11. Itasca Consulting Group, Inc, Universal Distinct Element Code User's Guide, 2000, USA.
 12. Matsuoka, S. Masuda. A study on simulation of tunnel lining which involves cracks. Proceedings of Japan society civil engineers No. 554/III-37. Tokyo, 1996
 13. Idris T. Al Heib M. Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures - Tunnelling and Underground Space Technology. TUST-D-06-00083R1 Accepted Impact factor of this journal 2006: 0.278 Journal Citation Reports® 2007, published by Thomson Scientific
 14. Augarde, C.E., Burd, H.J., 2001. Three-dimensional finite element analysis of lined tunnels. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 25, 243–262.
 15. Romer, Michael 'Detachment of Shotcrete Linings due to Long Term Interaction with Ground Water' Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 2004.
 16. Arun P. Jaganathan, Erez Allouche, Neven Simicevic. Numerical modeling and experimental evaluation of a time domain UWB technique for soil void detection. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009.
 17. M.A. Meguid, H.K. Dang. The effect of erosion voids on existing tunnel linings. Tunnelling and Underground Space Technology 24 (2009) 278–286.
 18. S. Xu, V. Guglielmetti, P. Grasso. A system for direct and continuous measurement of the void around the

- lined steel pipe. Geotechnical and Geological Engineering 17, 99–121.
21. Hoek, 2000 Hoek, E., 2000. Practical Rock engineering. Rock Mass Properties. rocscience.com on line, pp. 161–203 (Chapter 11).
22. Janssen, 1997 H.J.M. Janssen, Structural masonry. In: A.A. Balkema, Editor, Numerical studies with UDEC. Centre for civil engineering research and codes, Rotterdam, Netherlands (1997) ISBN 90 5410680 8, pp. 96–106.
19. S.C. M ller, P.A. Vermeer. On numerical simulation of tunnel installation. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, Issue 4, July 2008, Pages 461-475.
20. Talesnick, M., Baker, R., 1999. Investigation of the failure of a concrete-shield of a TBM during excavation. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 21, Issues 3-4, May-July 2006, Page 256.