دراسة أثر الشقوق في سلوك بطانة الأنفاق البيتونية[1]

المهندس بدر الدين العسلي[2] الدكتور المهندس محمد مروان الهيب[3]
الدكتور المهندس ساطع بدوي[4]

الملخص

تعد الأنفاق من المنشآت المهمة وذات الكلفة العالية ولذلك فمن الضروري مرافبتها وتقييم أدائها وتحليل سلوكها الإنشائي من أجل الحفاظ على سلامتها خلال مدة الاستثمار.

قمنا في هذه الدراسة بعرض حالة أنفاق السكك الحديدية الموجودة في سورية والتي تقع على محور حلب-اللاذقية، وذلك من خلال المعاينة الحقلية التي أظهرت وجود تشققات في بطانة هذه الأنفاق.

واعتمدنا في نمذجة وتحليل البطانة المتشققة طريقة النمذجة العددية المعروفة بطريقة العناصر المميزة التي تسمح بدراسة الأوساط غير المستمرة. وركزنا في دراستنا على نوعية البيتون المستخدم من خلال معامل المرونة وسماكة البطانة البيتونية. وتبين نتيجة التحليل أن وجود الشقوق أدى إلى تغير في توزع الأجهادات والانتقالات في المقطع المدروس. وهذا التغير يرتبط بمرونة البيتون والخصائص الميكانيكية للشق.

[1] أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس بدر الدين العسلي بإشراف الأستاذ الـدكتور محمـد مروان الهيب والأستاذ الدكتور ساطع بدوي.

[2] كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.
[3] المدرسة العليا للمناجم- جامعة نانسي- فرنسا.
[4] كلية الهندسة المدنية- جامعة دمشق.

الفهرس

مقـدمة Introduction:

يتم إكساء الأنفاق بعد حفرها ببطانة بيتونية من أجل تأمين سلامة استثمارها. وهنـاك طرائق عديدة لإكساء الأنفاق بشكل دائم مثل استخدام بطانـات البيتـون العـادي أو المسلح[1]. ومن المعروف أن البيتون يتعرض للتدهور وتتأثر بطانة الأنفاق البيتونية بشكل مباشر وملحوظ بمدى هذا التدهور وآثاره مثل حالة وجود شقوق في البطانـة. حيث سيؤدي وجود هذه الشقوق حتماً إلى إضعاف هذه البطانة وإنقاص قدرة تحملها، الأمر الذي يدفعنا لدراسة مدى تأثير هذه الشقوق في بطانة النفـق وتحديـد سـلوكها الإنشائي اعتماداً على الملاحظات الحقلية والنمذجة العددية. والهدف من هذه الدراسـة هو معرفة تأثير تدهور البيتون في السلوك الإنشائي للبطانة والتربة المحيطـة بهـا. وتأتي أهمية دراسة هذا الموضوع بالنسبة لسورية من كون أن معظم الأنفاق القائمـة حالياً في سورية تم إكساؤها باستخدام بطانة بيتونية.

1- منهجية البحث: Research Methodology

اعتمدنا في دراستنا خلال هذا البحث منهجية الانتقال من الملاحظات الحقلية التي تمت مشاهدتها في بعض منشآت الأنفاق في سورية إلى النمذجة العددية. حيث تم التعـرف على واقع هذه المنشآت النفقية وتطورها منذ إنشائها وحتى الآن من خلال الزيـارات الحقلية لهذه المنشآت التي حصلنا من خلالها على معطيات تهم الوضع الحالي لهـذه الأنفاق. ولتحليل هذه المعطيات وتقدير وتفسير الوضع المستقبلي لهذه المنشآت اتبعنـا النمذجة العددية التي يمكن من خلالها مقارنة النتائج مع الملاحظـات الحقليـة [12]، ودراسة تأثير الشقوق على البطانة، ودراسة التأثير الميكانيكي المتبادل بـين التربـة والبطانة. وعلى ضوء ذلك حصلنا على بعض النتائج وتم طرح بعض التوصيات.

2- الأنفاق في سورية: Tunnels in Syria

تملك سورية عدداً قليلا من الأنفاق حيث يوجد فيها 13 نفقاً للخطوط الحديديـة بطـول إجمالي 7.5كم منها 8 أنفاق على محور حلب-اللاذقية. وهناك 5 أنفاق حجرية علـى

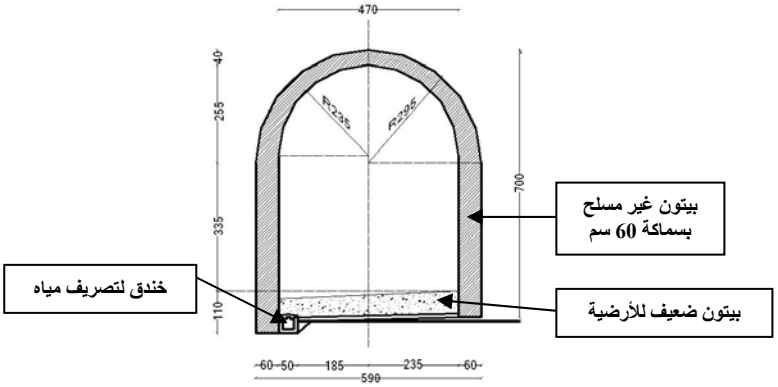
محور حلب- ميدان أكبس. أما في مجال النقل الطرقي فلا وجود لأنفاق تذكر. ويوجد 20 نفقاً لنقل المياه بطول إجمالي 15 كم بأطوال وأقطار مختلفة[7].

وموضوع الدراسة في هذا البحث هي الأنفاق الثمانية للسكك الحديدية على محور حلب – اللاذقية. حيث صممتْ هذه الأنفاق في المدة الواقعة ما بين عامي 1962-1965 من قبل شركة روسية، ونُفذَتْ من قبل شركة بلغارية عام 1971، ومع نهاية السبعينيات بدأت تظهر المشاكل في هذه الأنفاق على شكل رشوحات مائية تطورت حتى الآن ووصلت حد الخطورة [4]. ويبين الجدول (1) أطوال هذه الأنفاق.

رقم النفق	اسم النفق	الطول (متر)
1	نفق الشغر	1101.5
2	نفق الشندريش	625.8
3	نفق بداما	1862.9
4	نفق أوبين	296
5	نفق برادون	291.5
6	بين النفقين	206
7	الشيخانة	495
8	نفق السفكون	1600

جدول رقم (1) أطوال الأنفاق الثمانية على محور حلب – اللاذقية

ونُفذَتْ بطانة هذه الأنفاق من البيتون العادي غير المسلح ماركة M200. أما التربة المحيطة بهذه البطانة فهي ذات بنية صخرية مستقرة من الصخور الكلسية والمارل والتي لا تحتاج إلى تدعيم إضافي ولذلك تم حفر جميع هذه الأنفاق دون وضع تدعيم مؤقت إلا في أجزاء قليلة [5]. ولا توجد دراسات هيدرولوجية للمنطقة ولكنها تعد ذات هطولات مطرية كبيرة. وتمر في هذه الأنفاق قطارات حمولة القطبة فيها 22.5 طناً ولا يوجد معدل ثابت للمرور اليومي وسرعة القطارات فيها غير محددة بقيمة معينة ولكن لا تزيد على 80كم/سا. وتتراوح أعماق الأنفاق ما بين 0.6 م في نفق أوبين و 181.3 م في نفق بداما. ويبين الشكل(1) المقطع العرضي لهذه الأنفاق [4].



الشكل (1) المقطع العرضي للنفق (سم)

ونلاحظ من المقطع العرضي للنفق أن الجدران شاقولية بارتفاع 4.65 م وسماكة 0.6 م يعلوها قوس سماكته عند القمة 0.4 م. وارتفاع النفق القابل للاستثمار 7 م وعرضه عند القاعدة 4.7 م. وقد تم تنفيذ النفق من البيتون المصبوب في المكان على شكل حلقات متتابعة وتمت مراعاة وضع نقاط تصريف في جدران النفق لتصريف المياه الجوفية من التربة خلف الجدران إلى مصارف المياه داخل النفق.

3- العيوب التي تعاني منها الأنفاق على محور حلب – اللاذقية: Degradation of Tunnels on Aleppo- Lattakia Axis

نتيجة للجولات الميدانية التي جرت على هذه الأنفاق بتاريخ 7/2006م تبين بأنها تعاني من عيوب ومشاكل متعددة أهمها:

- توجد الشقوق باتجاهات وقياسات مختلفة ضمن بطانة هذه الأنفاق. منها مـا هـو مستقر ومنها ما هو متغير. وأغلبها في الجدران وعلى ارتفاع من 1 إلـى 3 م مـن أسفل النفق كما هو مبين في الشكل(2). وأغلب الشقوق الموجودة أفقية ويوجد شـقوق مائلة بزاوية 45° على الأفق. وبعض هذه الشقوق مفتوح ومنها ما هو مغلق وبعضها تتسرب من خلاله المياه الجوفية إلى داخل النفق الشكل (3).

الشكل (2) الشقوق الموجودة في البطانة

- وجود رشح كبير من المياه على السطوح الداخلية للبطانة وتحوله إلى تدفق مستمر في بعض الأجزاء الشكل (3). ويعد رشح المياه الجوفية أمراً بـالغ الأهميـة نتيجـة تأثيرات المياه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية في البيتون [7].

الشكل (3) رشح المياه من شقوق البطانة

- وجود فورانات طينية من أسفل جسم السكة وجوانبها، تصل إلى منسـوب الخـط الحديدي وتتجاوزه أحياناً [5] الشكل (4).

الشكل (4) فورانات طينية من أسفل الخط الحديدي

- انسداد معظم خنادق التصريف الموجودة على أحد جوانب النفق بمواد طينية تختلط مع الملحقات الواردة مع الرشوحات والمسيلات الموجودة على السطوح الداخلية للبطانة الشكل (5).

الشكل (5) انسداد خنادق التصريف

- وجود تشوهات ضمن الخط الحديدي (تغير ملحوظ في الميل الطولي – نفق السفكون).
- وجود الأثر السيئ لغاز الكربون ومن ثَم تفاقم ظاهرة الكربنة حيث ينحل غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج من عوادم القطارات في الماء الموجود في مسامات البيتون مكوناً محلولاً حمضياً يتفاعل مع المركبات القلوية الموجودة في بيتون البطانة مشكلاً كربونات الكالسيوم، وهذا يؤدي إلى انخفاض قلوية البيتون ومن ثَم إضعافه وزيادة قابليته للكسر [13]، وتزداد هذه الظاهرة خاصة مع الوجود الكبير للرطوبة والغازات المنطلقة من عوادم وقود القطارات المارة في النفق، وكل هذا أدى إلى زيادة الضعف في بيتون البطانة.

4- أعمال الإصلاح المنفذة على الأنفاق المدروسة Retrofit Works on Studied Tunnels

- نتيجة للوضع المتدهور لهذه الأنفاق قامت مؤسسة الخطوط الحديدية بالاستعانة ببعض الخبرات الأجنبية والمحلية لمعرفة واقع الأنفاق الحالي واقتراح الحلول المناسبة. وتعاملت هذه الجهات مع الموضوع من ناحية الدراسة والمراقبة والمعاينة، ومن ناحية المعالجة والإصلاح. فقامت شركة ترانس امبكس البلغارية عام 1988

بإجراء دراسة لتدعيم هذه الأنفاق تضمنت بشكل أساسي أعمال حقن [5]. وقد نفـذت أعمال التدعيم هذه شركة التوحيد السورية وهذه الأعمال هي:

- أعمال حقن في الأنفاق 7-6-5-4-3 عام 2002-2004 بخلطة من الرمل والاسمنت. ولكن كانت نتيجة الحقن سلبية حيث ظهرت شقوق جديدة (أفقية ومائلة) في البطانـة نتيجة عمليات الحقن لم تكن موجودة سابقاً، والسبب هو استعمال ضغوط عاليـة فـي أثناء تنفيذ الحقن.
- وضع مسامير فولاذية للتثبيت رؤوسها مرئية في الأنفاق 7-6-5 وهي عبارة عـن قضبان حديدية قطر 16 مم تمت إحاطتها وتثبيتها بالبيتون المحقون. وهـذه العمليـة أيضاً لم تكن ناجحة حيث لم يتم إجراء دراسـة جيوتكنيكيـة أو جيولوجيـة للتربـة والصخور المحيطة بالنفق لمعرفة الأطوال اللازمة من مسامير التثبيت للوصول إلـى طبقة صخرية مستقرة وثابتة. ولذلك تم في بعض الأماكن وضع قضبان تثبيت طولها يقع ضمن طبقة صخرية غير ثابتة مما أدى إلى شد هذه الكتل الصـخرية بمسـامير التثبيت باتجاه بطانة النفق مما أدى إلى تطبيق إجهادات إضافية على البطانة.

5- أسباب العيـوب الموجـودة فـي بطانـة الأنفـاق المدروسـة: Reasons of Degradation on Studied Tunnels

من خلال الملاحظات الحقلية نجد أن الأسباب التي أدت إلى ظهور العيوب الموجودة في بطانة الأنفاق هي:

- الضغط المتزايد على البطانة بسبب تدهور البنية الجبلية المحيطة وتغيـر سـلوكها [3].
- ازدياد ضغط الماء على البطانة بسبب ارتفاع منسوب المياه المحيطة بالنفق نتيجـة انسداد نظام التصريف.
- البطانة من البيتون العادي وليس المسلح. والنوع من البطانات ضـعيف لمقاومـة قوى الضغط الجانبي [9].
- وجود هبوط تفاضلي أسفل النفق مما يعرضه لإجهادات شد كبيرة.

- تحلل تربة التأسيس المكونة من الأحجار الكلسية الضعيفة بوجود الماء وأثر القوى الديناميكية مما يسبب الفورانات الطينية وتلدن السرير الترابي [14].
- شاقولية الجدران الجانبية ذات المقاومة الأقل للضغوط الجانبية من الجـدران ذات الشكل المنحني [11].
- عدم وجود نظام تأسيس للجدران التي تعمل كجدران استنادية بارتفاع كبيـر ممـا يجعل المقطع مفتوحاً من الأسفل.
- وجود فراغات خلف البطانة نتيجة ترك سقالات خشبية وغير ذلك.
- ظروف الاستثمار مثل وجود الدخان والاهتزازات الناتجة عن القطارات وغيـاب أعمال الصيانة سواء كانت صيانة وقائية أم صيانة معالجـة وإصـلاح للتـدهورات الموجودة [10].

6- النمذجة العددية للأنفاق المتـدهورة Numerical Modeling of Deteriorated Tunnels

6-1- مقدمة عن النمذجة العددية:

تتم دراسة الأنفاق باستخدام طرائق عددية مختلفة ومنها النمذجة العددية حيث تسـمح النمذجة العددية بتصميم ومتابعة تنفيذ وفهم ودراسة سـلوك منشـأ معقـد [18,19]. وسنقوم باستخدام النمذجة العددية هنا لفهم الواقع الراهن لسلوك بطانة النفق والتربـة المحيطة بها تحت تأثير وجود الشقوق في البطانة البيتونية، حيث تؤثر هذه الشـقوق (الانقطاعات) بشكل فعال في مقاومة وسـلوك الجملـة المدروسـة. وتعـد نمذجـة الانقطاعات أمراً معقداً حيث يجب أخذ الكثير من المعطيـات فـي أثنـاء النمذجـة بالحسبان.

وتسمح الطرائق العددية (العناصر المحددة المتناهية في الصغر- التكاملية...) بدراسة الأوساط المستمرة ولكن هذه الطرائق لا تسمح بدراسة الانقطاعـات والشـقوق فـي الأوساط الهندسية بالشكل الكافي [16].

ولنمذجة الانقطاعات يجب أن تسمح الطريقة العددية المستخدمة في عمليـة النمذجـة بتمثيل نوعين من السلوك: سلوك المادة الصلبة التي تمثل التربة والبيتـون، وسـلوك الانقطاعات التي يمكن أن تمثل الشقوق أو الفوالق أو المستويات الفاصلة بين طبقـات التربة. ولذلك اقترح Cundall (1971) طريقة العناصر المميزة التي تسمح بدراسـة سلوك جسمين مفصولين عن بعضهما بفاصل مع وجود تأثير لكل منهما في الآخر من خلال سلوك الفاصل الذي يمثل بنابضين ناظمي ومماسي لهما خواص معينة.

6-2- البرامج الحاسوبية المستخدمة في نمذجة الأوساط غير المستمرة:

هناك العديد من برامج العناصر المحددة وغيرها التي تمكن من نمذجة الفاصل حتـى امتداد معين ولكنها تعد محدودة التطبيق في مسائل الأوساط غير المستمرة للأسـباب الآتية [16]:

- لا تفي بالغرض عندما يزداد عدد الانقطاعات.
- غير قادرة على أخذ الانقطاعات الجديدة بالحسبان.
- حساب الجهود والانتقالات يعتمد على قوانين المرونة البسيطة.

أما برامج العناصر المميزة فتحقق ما يأتي:

- تسمح بالانتقالات والدورانات للعناصر المميزة بما فـي ذلـك الانفصـال التـام للعناصر.
- تأخذ بالحسبان الانقطاعات الجديدة بشكل أوتوماتيكي عند تقدم الحسابات.

ومن أهم برامج العناصر المميزة: UDEC (Universal Distinct Element Code), 3DEC (3 Dimension Distinct Element Code) , PFC (Particul Flow Code)

6-3- طريقة العناصر المميزة: Distinct Element Method

تطورت طريقة العناصر المميزة بدءاً من عام 1971 من قبل Cundall وتستخدم فـي المسائل التي تؤدي الانقطاعات فيها دوراً أساسياً. وتمثل الجملة المدروسة بمجموعـة من الكتل المنفصلة عن بعضها عن طريق الانقطاعـات. ويفتـرض أن الانتقـالات

الرئيسية للجملة تتم عبر الانقطاعات والمواد. وتعتمد هذه الطريقة 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.

$$\gamma = \frac{\sum F}{\sum M} \quad \text{.....(1)}$$

حيث: γ التسارع الناتج $\mathbf{M}$ الكتلة $\mathbf{F}$ القوة المطبقة

- قانون هووك أو قانون المرونة الذي يسمح بحساب الجهود والانتقالات في الكتل.

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

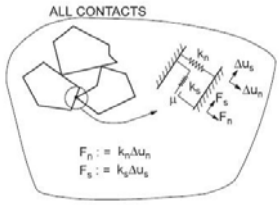
$$\mathbf{F = K \cdot U} \quad \text{.....(2)}$$

حيث: $\mathbf{K}$ معامل صلابة النابض $\mathbf{F}$ القوة المؤثرة $\mathbf{U}$ الانتقال الناتج

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

$$\mathbf{Fn=Kn.Un} \qquad \mathbf{Fs=Ks.Us}$$

حيث: $\mathbf{K_n}$, $\mathbf{K_s}$ معاملات الصلابة الناظمي والمماسي للانقطاع.



الشكل (6) تمثيل الانقطاع بنابض ناظمي ونابض مماسي

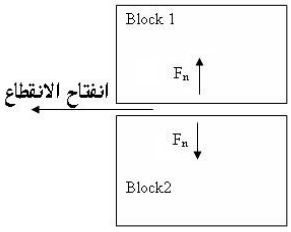
إن إدخال عامل التخامد في الحساب يسمح بإجراء حساب ستاتيكي, وتسمح هذه الطريقة باعتماد سلوكية غير مرنة. إذا تجاوزت القوى الناظمية والمماسية مقاومات الانقطاع يتغير سلوكه من مرن إلى غير مرن ويحدث الانهيار، ولتحديد وضع الاستقرار في الانقطاع يمكن استخدام معيار انهيار مور- كولومب [2]:

$$\tau = \sigma \, tg \, \varphi + C \ldots\ldots\ldots (3)$$

وينتج لدينا واحدة من ثلاث حالات:

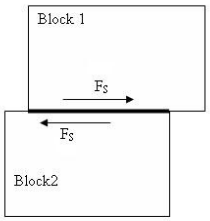
1- الانقطاع يخضع لانتقالات وقوى أقل من القيم الحدية وهنا يبقى الانقطاع كما هو.

2- القوى الناظمية هي قوى شد وتتجاوز القيم الحدية وهنا ينفصل الانقطاع تماماً الشكل (7) والقوى الناظمية مساوية الصفر.



الشكل (7) انفتاح الانقطاع نتيجة تجاوز القوى الناظمية للقيم الحدية

3- القوى المماسية أكبر من القيم الحدية المرتبطة بزاوية الاحتكاك والتماسك وهنا تنزلق إحدى الكتلتين على الأخرى الشكل (8).



الشكل(8) انزلاق الكتل نتيجة تجاوز القوى المماسية للقيم الحدية

4-6- برنامج التحليل UDEC (Universal Distinct Element Code):

يعتمد البرنامج طريقة العناصر المميزة في التحليل ويسمح بدراسة السلوك المتداخل بين العناصر المستمرة والانقطاعات [1]. ويستخدم بشكل واسع في تطبيقات أعمال المناجم والأنفاق والمنشآت تحت الأرضية واستقرار السدود والهندسة الزلزالية

والمنشآت تحت المائية. وتحتوي مكتبة البرنـامج علـى نمـاذج جـاهزة للبلوكـات والانقطاعات وبلوكات فارغة ونماذج مواد غير خطية لنمذجة الإمـلاءات. ويتمتـع بقدرة كاملة على إنجاز التحليلات الستاتيكية والديناميكية والحرارية ويحتـوي علـى مولد ذاتي للأنفاق. ولذلك تم استخدام هذا البرنامج في عمليات التحليل في هذا البحث.

7- النموذج العددي للنفق المدروس: Numerical Model

7-1- أبعاد النموذج:

لدراسة توازن الأنفاق الواقعة على محور خط حلب-اللاذقية تـم اعتمـاد النمـوذج العددي المبين بالشكل (9). عمق النفق وسطي ومساوي إلى 23 م وتم اعتمـاد أبعـاد النموذج المبين بحيث لا تؤثر الشروط الحدية في نتائج الحسابات وذلك وفقاً للعلاقـة المستخدمة في حالة نفق دائري في وسط متجانس والتي تنص على أن نبتعد عن النفق بمسافة من 10-5 أضعاف نصف قطر النفق حسب قيمة الخطأ المسـموح بـه. وقـد وضعت الشروط الحدية للنموذج على أساس أنها مسـاند متدحرجـة شـاقولياً علـى الجوانب، ووثاقات في الأسفل. وتم اعتبار الحالة حالة تشوهات مسـتوية لأن طـول النفق أكبر بكثير من ارتفاعه وعرضه [1]. وافترض أن التربة المحيطة بالنفق هـي تربة متجانسة ذات سلوك مرن-لدن يخضع لمعيار انهيار مور- كولومـب حيـث لا يوجد لدينا مقطع جيولوجي دقيق. وقد أعطيت التربة الخصائص الآتية:

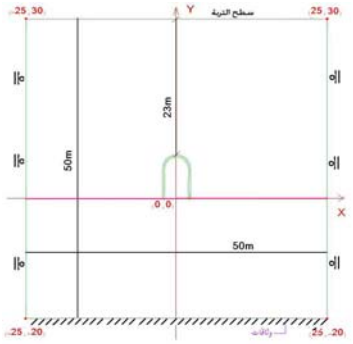
حيث: $E= 100\ MPa,\ \upsilon = 0.25,\ \Phi= 45°,\ C= 0.5\ MPa$

E: معامل مرونة التربة υ: معامل بواسون

Φ: زاوية احتكاك التربة C: تماسك التربة

ويخضع النموذج إلى الوزن الذاتي للتربة حتى سطح الأرض والبيتون [17] مما ينتج عنه جهود أفقية وشاقولية تزداد مع ازدياد العمق. وتم اعتبار البيتون مـادة مسـتمرة ذات سلوك مرن. وتم تحديد السلوك المرن من خـلال عامـل المرونـة E وعامـل بواسون υ ولم يتم إجراء تجارب على البيتون الموجود ولذلك تم اعتماد قيم من خلال

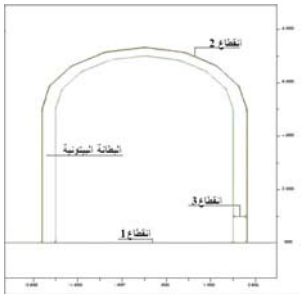
البحوث الموجودة في المراجع. ولا بد من إجراء تجارب مخبرية وحقلية لكي نـتمكن من إجراء دراسة حقيقية وواقعية.



الشكل (9) النموذج العددي المدروس

7-2- الانقطاعات في النموذج: بناء على الملاحظات الحقلية تم التمييز بين ثلاثة أنواع من الانقطاعات الشكل (10):

- انقطاع رقم (1) ضروري من أجل نمذجة النفق بوجود الانقطاعات، وله خـواص تماثل خواص الوسط المحيط به، وهذا يسمح بالاستمرارية.
- انقطاع رقم (2) يمثل سطح التلاقي بين التربة وبيتون البطانة.
- انقطاع رقم (3) يمثل الشقوق الموجودة في البطانة وتم اعتبارها تقطـع البطانـة بشكل كامل وهي أفقية كما ظهرت من الملاحظات الحقلية (الشكل 2).



الشكل (10) الانقطاعات في النموذج المدروس

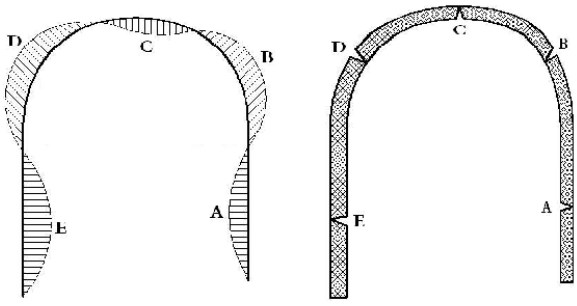
وبين الجدول (2) خواص هذه الانقطاعات التي تم اعتمادها في التحليل.

رقم الانقطاع	JKn (MPa)	JKs(MPa)	Jfri	Jcoh(MPa)
1	1000	1000	45°	1000
2	10	1	45°	10
3	10	1	35°	1000

جدول (2) خواص الانقطاعات في النموذج المدروس

7-3- النماذج المدروسة:

لتحديد تأثير الشقوق في سلوك البطانة ككل والوسط المحيط، وبناء على الملاحظات الحقلية تمت دراسة ثلاثة نماذج لبطانة النفق والتربة المحيطة، وهي نموذج البطانة البيتونية فيه خالية من الشقوق، والنموذج الثاني فيه شق واحد في البطانة يقع على ارتفاع متر واحد من أسفل جدار البطانة الشاقولي حيث لوحظ خلال المشاهدات الحقلية أن شقوق الجدار تبدأ بالظهور بدءاً من هذا الارتفاع، والنموذج الثالث فيه خمسة شقوق موزعة بشكل متناظر بما يتناسب مع قيم العزم الأعظمي المؤثر في البطانة كما هو مبين بالشكل (11) الذي يبين مخطط العزم المتوقع للمقطع ومناطق العزم الأعظمي التي يتوقع ظهور التشققات فيها.

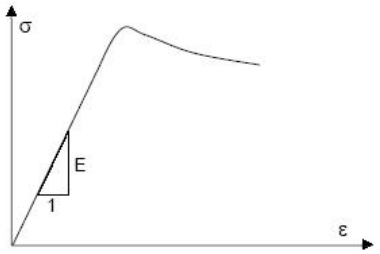


الشكل (11) مخطط عزم المقطع ومناطق توقع ظهور التشققات

8- الحالات المدروسة:

- نظراً لأن قيم الإجهادات والانتقالات المؤثرة في البطانة النفقية تتأثر بمعامل مرونة بيتون البطانة وذلك وفق قانون هووك العام $\sigma = E \cdot \varepsilon$.....(4)

والعلاقة المبينة في الشكل (11) تبين ذلك حيث E هو ميـل المنحنـى فـي النقطـة المدروسة قمنا بدراسة العلاقة بين معامل المرونة للبيتون المسـتخدم وبـين القـوى الداخلية المؤثرة في هذه البطانة من إجهادات وتشوهات.



الشكل (11) مخطط العلاقة بين الإجهادات σ والتشوهات ε

- ونظراً لأن الحمولات المؤثرة في البطانة تنتج عنها قوى ناظمية وعزوم انعطاف تتعلق قيم الجهود بأبعاد مقطع البطانة وعزم عطالته وفق العلاقة:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot Y \text{.....(5)}$$

لذلك قمنا بدراسة العلاقة بين سماكة البطانة البيتونية وقـيم الإجهـادات والتشـوهات الناشئة فيها. حيث:

A: المقطع العرضي N: القوة الناظمية المؤثرة في المقطع M: عزم الانعطاف

I: عزم العطالة Y: بعد الليف المدروس عن المحور السليم للمقطع

8-1- دراسة العلاقة بين معامل مرونة البيتون والقوى الداخلية المؤثرة في البطانة:

يمكن التعبير عن سلوكية المادة بمعامل المرونة الحجمي K ومعامل القص G, هـذا المعاملان مرتبطان بمعامل يونغ ومعامل بواسون بالعلاقتين:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \textbf{.....(6)}$$

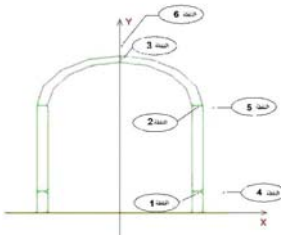
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \textbf{.....(7)}$$

وتتراوح قيم معامل مرونة البيتون E المستخدم في المنشآت بين: 10 GPa للبيتون الضعيف و50 GPa للبيتون القوي [8]. ولذلك سنقوم بدراسة العلاقة بين هذا المعاملE وبين الإجهادات والتشوهات الناتجة ضمن هذا المجال لأنه يمثل حالة بيتون البطانة. حيث تمثل القيم الكبيرة لـE المناطق التي يكون فيها بيتون البطانة جيداً. في حين تمثل القيم الضعيفة لـE المناطق التي يكون فيها بيتون البطانة متدهوراً. ويبين الجدول (3) القيم المدروسة لـ E وما يقابلها من قيم للمعاملين G K, والتي تم حسابها وفق العلاقتين (6) و(7) باعتبار معامل بواسون υ=0.25. وهذه القيم هي التي تم اعتمادها في الحسابات.

50	40	30	20	10	E (GPa)
33.33	26.67	20	13.33	6.67	K (GPa)
20	16	12	8	4	G (GPa)

جدول (3) قيم E, K, G المدروسة لبيتون البطانة

إن برنامج UDEC يسمح بحساب الجهود والانتقالات في كل نقاط النموذج المدروس وذلك حسب كثافة العناصر المحددة. ولكن لإيضاح ومناقشة النتائج تم اختيار عدد من النقاط التي تعكس سلوكية النفق تحت تأثير الحمولات وبوجود الشقوق وعدم وجودها في مقطعه؟ ولذلك تم حساب قيم الجهود الرئيسية العظمى والصغرى المؤثرة $\sigma_{max,}$ σ_{min} وكذلك قيم الجهود الشاقولية والأفقية σ_{xx}, σ_{yy}. كما تم حساب الانتقالات الأفقية والشاقولية , X_{dis}, Y_{dis}في ست نقاط من البطانة البيتونية والتربة المحيطة بها للحالات المدروسة ومواقع هذه النقاط مبينة بالشكل (12):

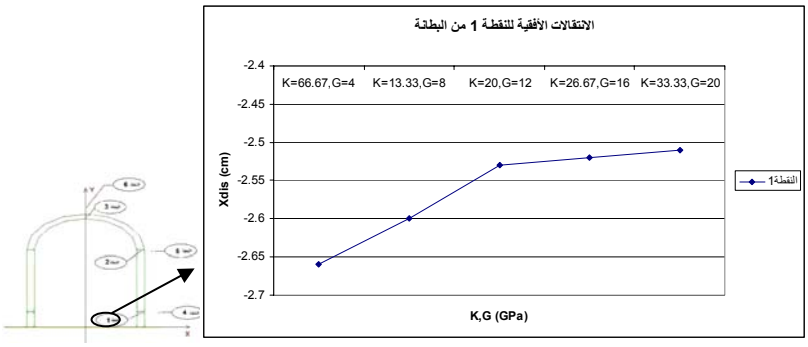


الشكل (12) النقاط المدروسة من البطانة والتربة

8-1-1- عرض النتائج وتحليلها:

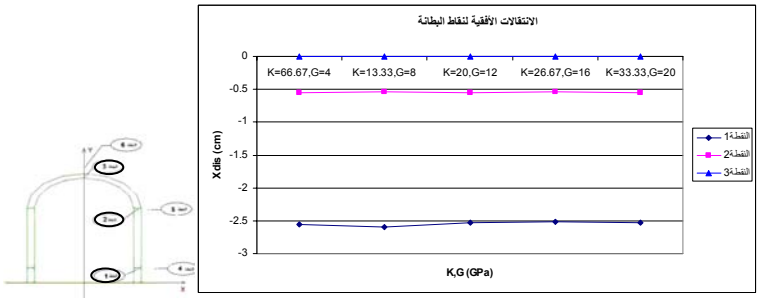
8-1-1-1- حالة نفق سليم وخال من الشقوق:

- يبين المخطط رقم (1) العلاقة بين الانتقالات الأفقية للنقطة 1 من البطانة وقيم K, G المدروسة فنلاحظ أن العلاقة عكسية بين الانتقالات وقيم المعاملين K, G لبيتـون البطانة. ولكن الفرق نسبياً محدود ولا يتجاوز 10%.



مخطط (1) الانتقالات الأفقية للنقطة 1 من البطانة

ويبين المخطط رقم (2) العلاقة بين الانتقالات الأفقية وبين قيم K, G المدروسة للنقاط المدروسة من البطانة. ونلاحظ أن قيم الانتقالات للنقطة 1 أكبر من قـيم الانتقـالات للنقطتين 2, 3 وذلك نظراً لأن مقطع النفق مفتوح من الأسفل والنقطة 1 تقع على عمق أكبر من النقطتين الأخريين. ويكاد يكون الانتقال الأفقي للنقطـة 3 معـدوماً كونهـا موجودة على محور تناظر المقطع والحمولات. وهذا يؤكد صحة النموذج المدروس.



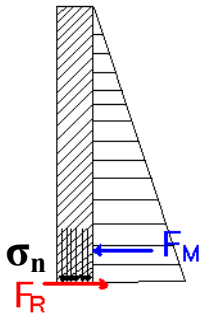
مخطط (2) الانتقالات الأفقية لنقاط البطانة-نفق دون شقوق

ومن الجدير بالذكر أن الانتقالات الأفقية في جدار النفق تنتج عن القوى الأفقية المؤثرة في هذا الجدار، هذه القوى التي تزداد بشكل خطي من أعلى الجدار باتجاه الأسفل الشكل (13). وإن الدفع الجانبي المطبق على الجدار عند أسفله تتم مقاومته فقط بواسطة قوى الاحتكاك الناتج بين الجدار البيتوني على كامل سماكته وبين التربة الواقعة أسفل منه. وتعطى قيم قوى الاحتكاك بالعلاقة:

$$F_R = \sigma_n \cdot t \cdot tg\ \varphi \ldots\ldots\ldots (8)$$

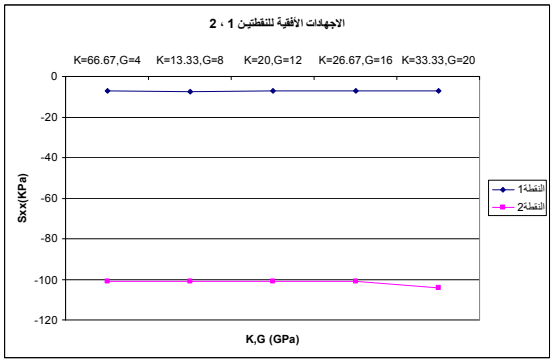
حيث: σ_n الإجهادات الشاقولية المؤثرة عند أسفل الجدار.

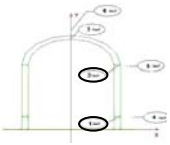
t : سماكة الجدار. φ: زاوية احتكاك التربة.



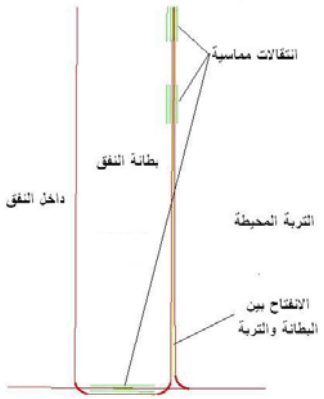
الشكل (13) الاجهادات المؤثرة في الجدار

ويرسم مخطط الإجهادات الأفقية للنقطتين 1, 2 (مخطط رقم 3) نجد أن الإجهادات الأفقية في النقطة 1 ضعيفة لا تتأثر بتغير قيم K, G للبيتون والسبب هو حصول انفتاح بين البطانة والتربة عند هذه النقطة الشكل (14). وهذا يؤدي إلى عدم انتقال الإجهادات من التربة إلى البطانة، وهذا يؤدي إلى ظهور نقاط تركز إجهادات جديدة مثل النقطتين 2 و 3.



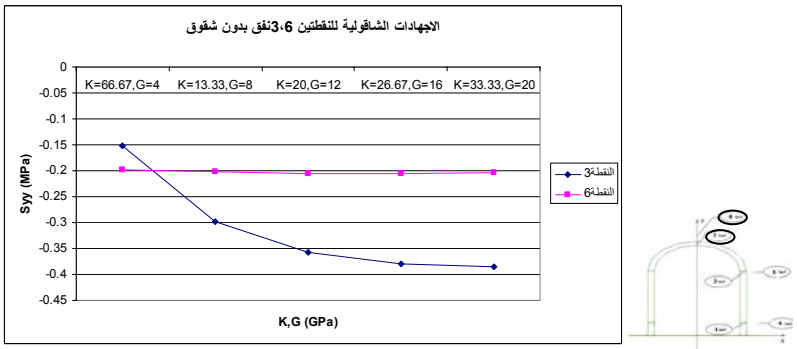


مخطط (3) الإجهادات الأفقية للنقطتين 1، 2 - نفق دون شقوق



الشكل (14) تمركز الانتقالات المماسية و أماكن الانفتاح بين جدار البطانة والتربة المحيطة – نفق دون شقوق

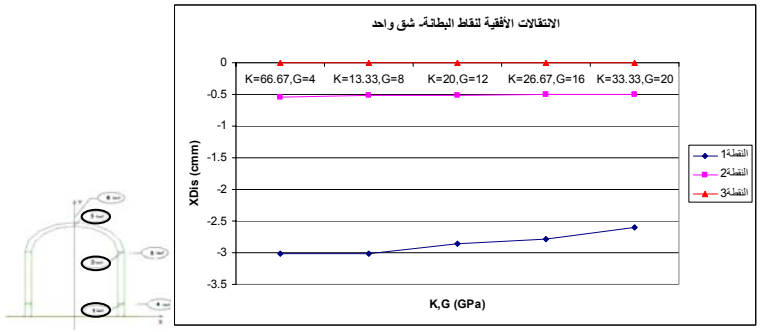
ومن المخطط رقم (4) الذي يمثل العلاقة بين الإجهادات الشاقولية للنقطة 3 الواقعة في البطانة والنقطة 6 الواقعة في التربة نلاحظ أنه عندما كان البيتون ضعيفاً (K, G قليلة) تناقصت إجهادات البيتون وإجهادات التربة أكبر من إجهادات البيتون أن التربة هـي العنصر الأقوى في هذه الحالة أما عندما زادت جودة البيتون أصـبح هـو العنصـر الأقوى وأصبح هو الذي يتحمل الإجهادات الكبرى بدلاً من التربة.



مخطط (4) الإجهادات الشاقولية للنقطتين 3، 6 – نفق دون شقوق

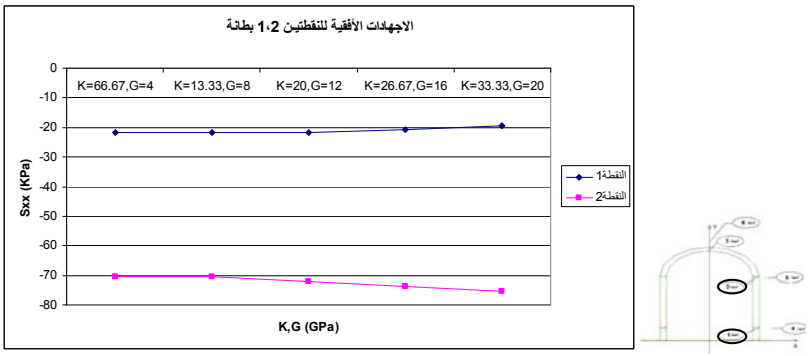
8-1-1-2- حالة نفق بشق واحد:

نلاحظ من المخطط رقم (5) أن النقطة 1 القريبة من الشق تأثرت كثيراً بنوع البيتون إذْ إن وجود بيتون ضعيف (K=66.67 GPa, G=4 GPa) مع وجود شق أدى مع بعضهما إلى ظهور انتقالات واضحة في البطانة (3 سم) أكبر بـ15 % من الحالة لمقطع دون شق. وهذا يتوافق تماماً مع الملاحظات الحقلية التي تظهر أن أماكن وجود الشقوق هي أماكن وجود البيتون الضعيف. ونلاحظ أيضاً أن العلاقة عكسية بين الانتقالات الأفقية وقيم K, G. ونلاحظ أيضاً أن النقطة 1 التي تقع تحت الشق مباشرة تتعرض للانتقال الأكبر بين النقاط المدروسة وهي تنتقل باتجاه النفق وهذا بسبب تأثير وجود الشق حيث يشكل الشق منطقة ضعف في بيتون البطانة.



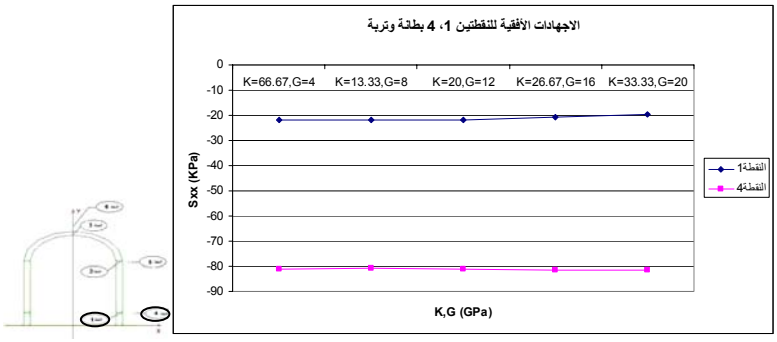
مخطط (5) الانتقالات الأفقية لنقاط البطانة – نفق بشق واحد

ويبين المخطط رقم (6) أن الإجهادات في النقطة 1 تتناقص بزيادة قيم K, G . ولكـن تغير هذه الإجهادات في هذه النقطة ضعيف نتيجة اعتماد السلوكية المرنـة للبيتـون وتركز الإجهادات في نقاط أخرى مثل النقطة 2، وهذا طبعاً نتيجة لوجود الشق الـذي نتج عنه إعادة توزيع للإجهادات وظهور نقاط تركز إجهادات جديدة يمكن أن تـؤدي إلى حدوث شقوق جديدة فيها.



مخطط (6) الإجهادات الأفقية للنقطتين 1، 2 من البطانة- نفق بشق واحد

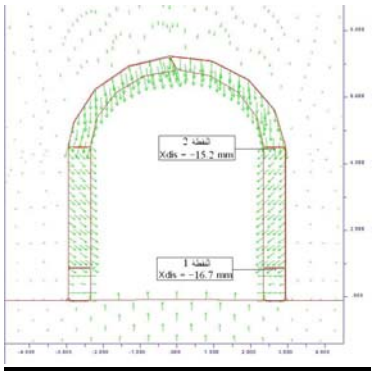
ويرسم مخطط الإجهادات الأفقية للنقطة 1 من البطانة والنقطة 4 من التربة (مخطـط رقم 7) نجد أن البيتون يتعرض لإجهادات أفقية في النقطة 1 أقل من الإجهادات التـي تتعرض لها النقطة 4 الواقعة في التربة المحيطة، وهذا يعني أن وجـود الشـق قـد أضعف بيتون البطانة في هذه المنطقة ولذلك قامت التربة بتحمل قيم الإجهادات عـن البيتون باعتبارها هي العنصر الأقوى في هذه الحالة.



مخطط (7) الإجهادات الأفقية للنقطتين 1، 4 – نفق بشق واحد

8-1-1-3-حالة نفق بخمسة شقوق:

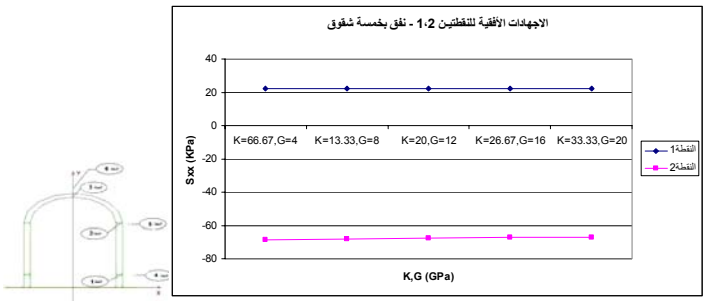
يبين الشكل (15) قيم الانتقالات لنفق بخمسة شقوق حيث أخذت قيمة معامل المرونة E = 10 GPa وقيمة معامل بواسون $\upsilon = 0.25$. ونلاحظ من الشكل أنه نتيجة لوجود الشقوق في مقطع البطانة أصبح كل جزء من مقطع البطانة يسلك سلوكاً يختلف عن سلوك الجزء الآخر.



الشكل (15) الانتقالات لنفق بخمسة شقوق

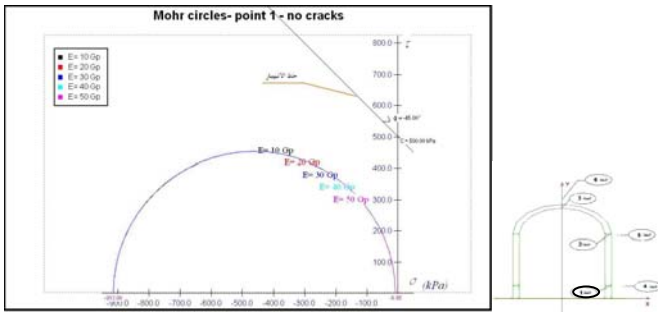
أي أنه نتيجة لوجود الشقوق في مقطع البطانة أصبح كل جزء منها يسلك سلوكاً يختلف عن سلوك الجزء الآخر. ونلاحظ أيضاً أن هناك فصلاً بين مقطع وآخر حيث في المقطع الواحد هناك تجانس في الانتقالات ولكن هذه الانتقالات تختلف بالنسبة

لمقطع آخر. ونلاحظ أن انتقال الجزء السفلي يتم فقط بشكل أفقي نتيجة لوجود الشـق وتلامس التربة مع البطانة عن طريق معامل الاحتكاك. وبرسم مخطـط الإجهـادات للنقطتين 1، 2 (مخطط رقم 8) نجد أن الإجهادات الأفقية في النقطة 1 إجهادات شـد ولذلك ربما احتاج المقطع في هذه المنطقة إلى حديد تسليح حيث يقاوم حديد التسـليح إجهادات الشد ويزيد من مقاومة المقطع بشكل ملحوظ ويرفع مـن عامـل صـلابته. ونلاحظ أيضاً أن الإجهادات لا تتغير بتغير قيم K, G وذلك بسبب وجـود الشـقوق وتعرض المقطع إلى انتقالات أفقية في هذه المنطقة الأمر الذي ينتج عنه انفتاح بـين البطانة والتربة. أما النقطة 2 التي تقع في مركز استناد القوس فتتنـاقص الإجهـادات فيها قليلاً بتزايد قيم K, G وهي اجهادات ضغط.

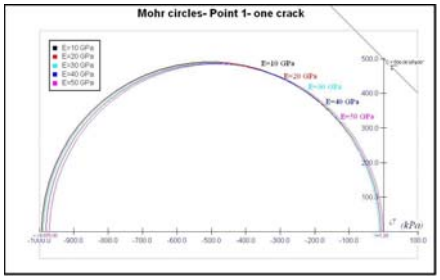


مخطط (8) الإجهادات الأفقية للنقطتين 1، 2 – نفق بخمسة شقوق

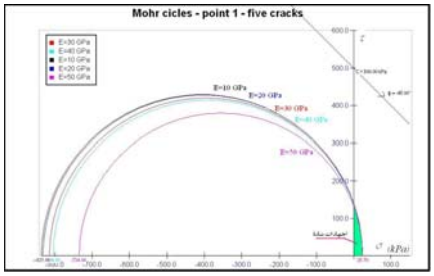
ولمعرفة كيفية تغير الإجهادات في البطانة نتيجة لظهور الشقوق فيها وازدياد عدد هذه الشقوق وحساب عوامل الأمان نقوم برسم دوائر مور للنقطة 1 في الحالات الثلاث المدروسة (الأشكال 18-17-16)



الشكل (16) دوائر مور للنقطة 1 لنفق دون شقوق



الشكل (17) دوائر مور للنقطة 1 لنفق بشق واحد



الشكل (18) دوائر مور للنقطة 1 لنفق بخمسة شقوق

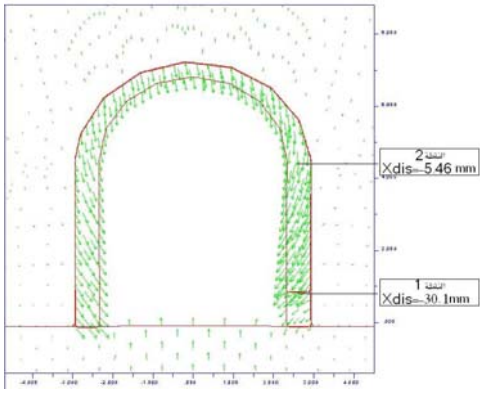
نلاحظ أن وجود الشقوق يساعد على ظهور إجهادات الشد ومن ثَم إمكانيـة ظهـور شقوق جديدة أو حدوث انهيار لأن البيتون الجيد يقاوم إجهادات الشد بشكل بسيط. أما البيتون السيئ فيتشقق منذ تنفيذه وهذه الشقوق تضعف مقاومته على الشـد والضـغط

أيضاً. وأنه كلما زادت قيم K, G قل إجهاد القص. وأن معامل مرونة البيتون يؤدي دوراً أكبر في حال وجود الشقوق.

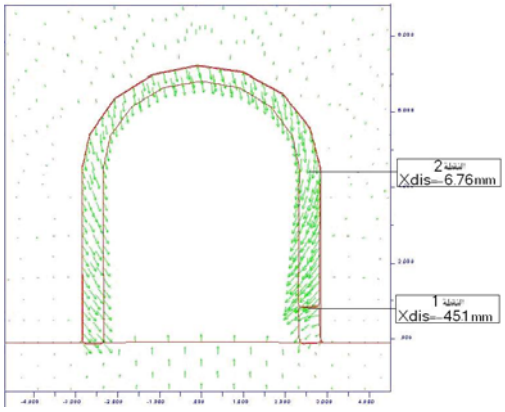
وإذا حسبنا قيم معامل الأمان نجد أنها تتراوح من 1.2 إلى 1.6 وهي قيم ضعيفة قياساً بالقيم المطلوبة لمثل هذه المنشآت (3 فأكثر) [15] ومن ثَم في حالة القيم المدروسة للتماسك والاحتكاك يجب زيادة قيم معامل الأمان.

8-2- دراسة العلاقة بين سماكة البطانة البيتونية وتوزع القوى الداخلية:

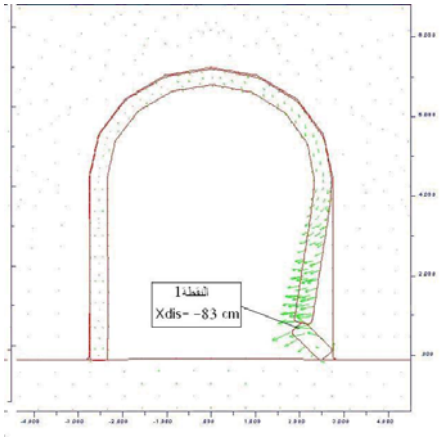
كما ذكرنا سابقاً تؤدي سماكة البطانة دوراً مباشراً في زيادة مقاومة المقطع للجهود المطبقة. وتؤثر بشكل مباشر في قيم الإجهادات والتشوهات الناتجة في مقطع البطانة. إن عامل عطالة المقطع يحسب بالعلاقة $I= bh^3/12$ وباعتبار أن عرض المقطع هو 1 م وارتفاعه (سماكته h) نجد أن تأثير السماكة كبير جداً في سلوك وتشوه البطانة. ولذلك تمت دراسة سماكات مختلفة للبطانة وهي: 60سم، 50سم، 40سم، 30سم. وذلك بعد تثبيت باقي المعاملات الأخرى التي تؤثر في قيم الإجهادات والتشوهات حيث أخذت الحالة التي تكون فيها قيمة معامل المرونة E = 10 GPa وهي الحالة الأسوأ وقيمة معامل بواسون $\upsilon = 0.25$. علماً أن السماكة الفعلية في قمة قوس البطانة هي 40 سم وسماكة الجدران 60 سم.



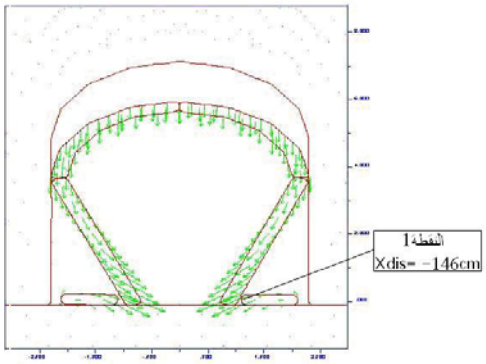
الشكل (19) الانتقالات لسماكة 60 سم مع وجود شق واحد



الشكل (20) الانتفالات لسماكة 50 سم مع وجود شق واحد



الشكل (21) الانتفالات لسماكة 40 سم



الشكل (22) الانتفالات لسماكة 30 سم

نلاحظ من الأشكال (19-20-21-22) أنه لو قلت السماكة عن السماكة الحالية مع وجود شقوق فالسلوك غير مستقر حكماً وسيؤدي ذلك إلى الانهيار. ونلاحظ أيضاً من الشكلين (19, 20) أن المقطع يتأثر بشكل محلي نتيجة تقليل السماكة، أما في الشكلين (21, 22) فالمقطع يتأثر بكامله والتشوه أكبر بشكل عام. أما في حالة وجود السماكة الحالية (60 سم) وبوجود طبقة جيدة بين التربة والبيتون تؤمن تلاصقاً جيداً فالوضع سوف يكون أفضل بكثير. ويمكن أن تكون هذه الطبقة من ملاط يتم حقنه في الفراغات الموجودة بين التربة والبطانة.

9- نتائج وتوصيات:

قمنا من خلال هذه الدراسة الأولية بعرض حالة أنفاق السكك الحديدية في سورية من خلال الملاحظات التي أكدت وجود تشققات في البطانة البيتونية لهذه الأنفاق. وقد تمت دراسة هذه الشقوق من خلال طريقة النمذجة العددية المعروفة بطريقة العناصر المميزة.

وقد وضعنا خلال هذه الدراسة بعض الافتراضات، ولكن لا بد من أجل سلامة النتائج ودقة التوصيات من إجراء دراسة مخبرية وحقلية للتأكد من القيم الحقيقية للبيتون. كما تجب معرفة المقاطع الحقيقية للصخور والترب.ولذلك نؤكد هنا أن هذه الدراسة لا

تعكس الواقع تماماً وإنما هي فقط لإعطاء منهجية لتحليل سلوكية النفق وبشكل يساعدنا على فهم هذا الواقع.

وقد سمحت هذه الدراسة بالتركيز على نوعية البيتون من خلال معامل المرونة وسماكة البطانة البيتونية وتبين بنتيجة التحليل ما يأتي:

- وجود الشقوق يؤثر في السلوك الإنشائي لبطانة النفق حيث يغير توزع الإجهادات في المقطع ويزيد الانتقالات ويؤثر في التربة وسلامة النفق ويساعد على ظهور إجهادات الشد.
- في حالة نفق ببطانة سليمة (خالية من الشقوق) من بيتون ذي عامل مرونة عالٍ، تظهر انتقالات ضعيفة نسبياً وإجهادات عالية في البطانة. وإذا ظهر شق أسفل جدار البطانة فسوف يؤدي إلى تغير في توزع الإجهادات والانتقالات وهذا التغير يرتبط بعامل مرونة البيتون وخصائص الشق من احتكاك وتماسك وعامل مرونة.
- في حال وجود خمسة شقوق تزداد الإجهادات والانتقالات وستنتهي بانهيار النفق. ويمكن القول إن بطانات الأنفاق المتشققة بكثافة عالية تشبه في سلوكها الإنشائي الأنفاق غير المبطنة تماماً من الناحية الميكانيكية.
- مقاومة مقطع البطانة متعلقة بسماكتها، ومع وجود الشقوق فيها يكون تأثيرها أكبر.
- يمكن تحسين مقاومة المقطع الحالي لبطانة النفق وذلك بزيادة التلاحم بين التربة وبيتون البطانة. ومن ثَم سوف ترتفع قيم عامل الأمان له من أجل القيم المدروسة للتماسك والاحتكاك.

أعطت هذه الدراسة بعض الإيضاحات لتفسير وضع الأنفاق الحالي ولابد من دراسات أخرى تأخذ بالحسبان عوامل المياه والهبوطات للوصول إلى تصور كامل يسمح بوضع حلول لتأمين سلامة المنشأت.

10- المراجع References:

1. شحادة، نضال، الأنفاق والمنشآت المطمورة، حلب، 1995.

2. حمزة، محمد مروان، ميكانيك التربة والصخور، مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية، 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. العسلي، بدرالدين، تأثير الأحمال الزلزالية على بطانة من الخرسانة المسلحة لأنفاق المترو على ضوء الدراسات المتوفرة لمترو مدينة دمشق، دمشق، 2002.

7. سكر، نسيم، تحليل البطانات لأنفاق الخطوط الحديدية السورية وإعادة تأهيلها، حلب،2006.

8. الفوال، زهير. عثمان، هاني. خشانة، غسان. موسوعة البيتون المسلح، مطبعة هاشم الكتبي، دمشق، 1988.

9.Bickel, J.; E. King, and T. Kuesel, Tunnel Engineering Handbook, Second Edition, Chapman & Hall, New York, 1996.

10. UIC Code 779-10R, Maintenance of Existing Railway Tunnels, International Union of Railways, 1990.

11. Szechy, Karoly. 'The art of tunneling', the university of technical science, Budapest, 1973.

12. American Concrete Institute Committee, Finite Element Analysis of Fracture in Concrete Structures, 446.3R, 1998.

13. M. Maslehuddin, Reinforcement Corrosion Due to Chloride-Sulfate Contamination and Carbonation, Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 23, Saudi Arabia, 1998.

14. Romer, Michael 'Detachment of Shotcrete Linings due to Long Term Interaction with Ground Water' Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 2004.
15. U.S. Department of Transportation, Highway and Rail Transit Tunnel Maintenance Manual, Federal Highway Administration and Federal Transit Administration, 2003.
16. Itasca Consulting Group, Inc, Universal Distinct Element Code User's Guide, 2000, USA.
17. 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
18. 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 Accepté Impact factor of this journal 2006: 0.278 Journal Citation Reports® 2007, published by Thomson Scientific
19. Al Heib M., Laouini H., Piguet J.P, Le choix de la position d'un ouvrage souterrain par rapport à l'orientation des contraintes principales naturelles ; Revue Française de Géotechnique, n°68, 3e trimestre 1994, pp 33-39 - Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XVI, N° 1-4, 1993, pp 3-15

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2007/10/8.