

دراسة عددية ثلاثية الأبعاد لجبهة حفر نفق سطحي مدعمة بالأنابيب الطولية

الدكتور توفيق فياض*

الدكتور إياد سليطين**

روز عبد اللطيف أحمد***

(تاريخ الإيداع 25 / 6 / 2018. قُبِلَ للنشر في 13 / 9 / 2018)

□ ملخص □

يعد استخدام تقنية أنابيب الألياف الزجاجية (Fiber glass pipes) في تدعيم جبهة حفر الأنفاق من الطرق الفعالة جداً للحفاظ على استقرار جبهة الحفر، وبالتالي تخفيض هبوطات سطح الأرض وتشوهات جبهة الحفر والحفاظ على سلامة العمال والأليات المستخدمة في الحفر.

يقدم هذا البحث نتائج تحليل عددي بطريقة الفروقات المحدودة (برنامج $FLAC^{3D}$) لسلوك جبهة حفر نفق سطحي مدعم بالأنابيب الطولية الزجاجية، حيث تم وضع موديل عددي ثلاثي الأبعاد ومعايرته لبيان فعالية هذه التقنية وإجراء دراسة بارامترية لتحديد بارامترات التقنية الحدية (كثافة (عدد) الأنابيب (A) و طولها (L)). أظهرت النتائج أن تقنية التدعيم باستخدام الأنابيب الزجاجية تخفض الانتقالات (انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض) بشكل واضح مما يزيد من استقرار الجبهة، وأن هذه الانتقالات تقل بزيادة طول الأنابيب وبتزايد كثافة الأنابيب المزروعة في جبهة الحفر حتى الوصول إلى الكثافة الحدية، وعند الوصول إلى الطول الحدي يجب تجديد الأنابيب للحفاظ على استقرار عملية الحفر.

الكلمات المفتاحية: نفق، استقرار جبهة الحفر، التحليل بالفروقات المحدودة، تسليح جبهة الحفر، أنابيب ألياف زجاجية.

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

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

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

3D Numerical Analysis Of A Shallow Tunnel Face Reinforced By Longitudinal Pipes

Dr. Toufik Fayad *
Dr. Iyad Sliteen **
Rose Abed Allateef Ahmad ***

(Received 25 / 6 / 2018. Accepted 13 / 9 / 2018)

□ ABSTRACT □

Supporting tunnel face by Fiber glass pipes technology is an effective method to maintain the stability of tunnel face, thus reducing surface settlements, face deformation and maintaining the safety of the workers and the mechanisms used in tunneling.

This paper presents the results of finite-difference numerical analyses (FLAC3D program) on the behavior of a shallow tunnel face reinforced by longitudinal fiber glass pipes. A 3D numerical model has been calibrated and used to demonstrate the effectiveness of this technique, and perform a parametric study to determine the critical reinforcements parameters (the density (number of pipes)(A) and length (L)). The results indicate that the face reinforcement technique using longitudinal fiber glass pipes can significantly reduce the movements (face displacement and surface settlements), and thus improving the face stability. These movements decrease by increasing the length of the pipes and increasing the density of the pipes until reaching the critical density, and when we reach the critical length, the pipes must be renewed to maintain the stability of the tunneling process.

Keywords: Tunneling, Face stability, Finite-difference analysis, Face reinforcement, Fiberglass pipes.

* Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

** Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

مقدمة:

إن التطور العمراني المستمر للمدن ينتج عنه حاجة متزايدة لتنفيذ منشآت وبنى تحتية تلبي متطلبات النمو، ويدفع بشكل متصاعد إلى الاستخدام المتزايد للأنفاق بسبب محدودية المساحات الأرضية المتوفرة. ولكن تنفيذ الأنفاق داخل المدن يتسبب بانتقالات وهبوطات لسطح الأرض فوق منطقة تنفيذ الأنفاق وهذه الهبوطات الناتجة عن التنفيذ تسبب غالباً أضراراً للمنشآت الواقعة عند سطح الأرض أو تحت سطح الأرض، لذلك من الضروري جداً الحد من هذه الانتقالات بواسطة التدعيم.

تعتبر تقنية التدعيم بالأنابيب الزجاجية من الطرق الحديثة الفعالة في تدعيم جبهة الحفر والحفاظ على استقرارها، وهي تقنية واسعة الانتشار حول العالم وكانت موضوع اهتمام عدد كبير من الباحثين:

(Galli et al.,2004) بين إمكانية استخدام الطرق العددية (طريقة العناصر المنتهية FEM) وخصوصاً ثلاثية الأبعاد في نمذجة عملية الحفر والتدعيم وتركيب قشرة النفق وتحليل تشوهات جبهة الحفر وهبوطات سطح الأرض مستخدماً برنامج LUSAS 13.5 وأكد أن التدعيم باستخدام أنابيب الألياف الزجاجية يقلل من انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض. (Won g et al.,2004) ركز على سطح الترابط بين الأنابيب والترية والذي يعطي فكرة صحيحة عن القوى المتشكلة في الأنابيب، وجد أن الانتفاخ في جبهة الحفر يقل كلما زادت القوى في الأنابيب، وأنه كلما ابتعدنا عن جبهة الحفر قل الانتفاخ. (Proutzopoulos and Kavvadas, 2009) بينا أن الانتقالات الشاقولية تقل مع زيادة طول الأنابيب واقترحا طريقة لتسهيل عملية نمذجة الأنابيب وهي (النمذجة 2D) عن طريق استبدال الأنابيب بضغط مطبق على جبهة الحفر مساو للضغط الذي توفره الأنابيب، و أكمل (Proutzopoulos,2010) دراسته وجد أنه كلما زادت كثافة وطول الأنابيب المزروعة في جبهة الحفر كلما قل الانتفاخ، وتوصل إلى أن التدعيم بواسطة الأنابيب الزجاجية أكثر فعالية من التدعيم بواسطة المظلة حيث المظلة لا تقلل من انتفاخ جبهة الحفر بل من المنطقة المتلدة فوق الجبهة و يمكن الوصول لتدعيم مثالي في حال الجمع بين الطريقتين، أيضاً (Bourgeois and Seyedi Hosseininia,2010) اعتمد على طريقة العناصر المنتهية لنمذجة نفق عميق مدعم بنفس التقنية مستخدماً برنامج CESAR-LCPC، وجد أن هذه التقنية تقلل التقارب القطري في جدران النفق بنسبة 10% وأن القوى في الأنبوب تتناقص مع الابتعاد عن جبهة الحفر. الدراسات السابقة أكدت على إمكانية نمذجة طريقة التدعيم بالأنابيب الزجاجية بالاعتماد على الطرق العددية ومحاولة تسهيل عملية النمذجة قدر الإمكان، وركزت على بيان فعالية هذه التقنية في تخفيض الانتقالات ومقارنتها بطرق تدعيم أخرى، وبينت مدى تأثير بارامترات التقنية (كثافة الأنابيب وطولها) على الانتقالات الحاصلة، لكنها لم توجد البارامترات الحدية التي تؤمن الاستقرار.

تم في هذا البحث:

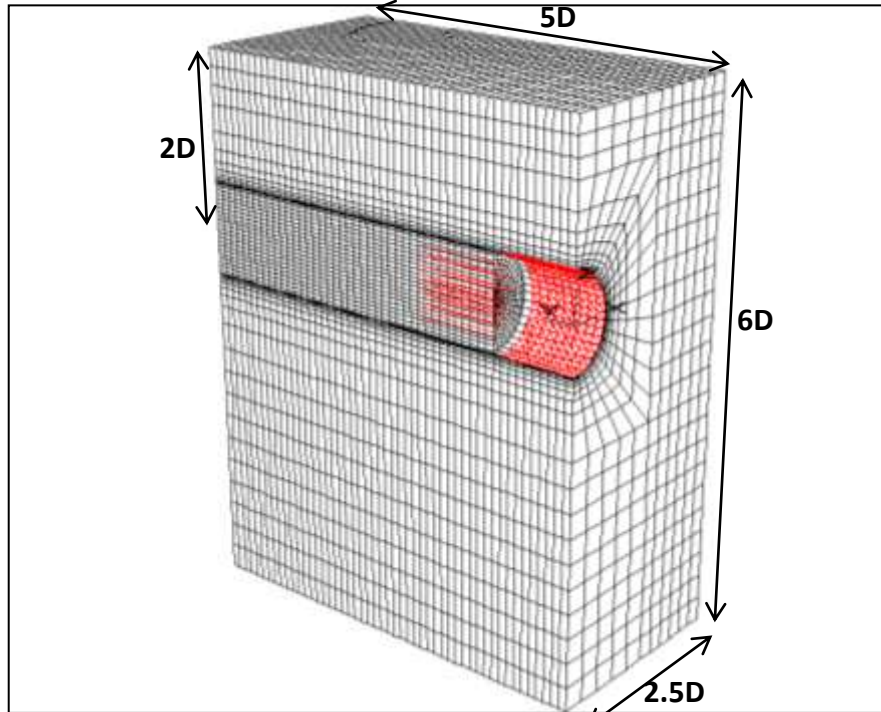
- 1 - إنشاء موديل عددي باستخدام طريقة الفروقات المحدودة برنامج (FLAC^{3D}) لنفق سطحي و تدعيم جبهة الحفر باستخدام أنابيب الألياف الزجاجية وتحقيق النموذج ودراسة الانتقالات الحاصلة خلال عملية الحفر.
- 2 - بيان فعالية تقنية التدعيم بالأنابيب الزجاجية في تخفيض الانتقالات.
- 3- دراسة أهم بارامترات التقنية وإيجاد البارامترات الحدية.

1- الموديل العددي وتحقيقه ودراسة الانتقالات:

1.1- الموديل العددي:

تم في هذا البحث استخدام برنامج $FLAC^{3D}$ وهو برنامج يستخدم طريقة الفروقات المحدودة ويتميز بأنه يقدم تحليل مثالي 3D قادر على محاكاة سلوك المنشآت ثلاثية الأبعاد المقامة على التربة والصخور والتي تتعرض لتشوّهات لدنة عندما تصل الإجهادات لحد الخضوع. يتم تمثيل المواد بواسطة عناصر متعددة السطوح من خلال شبكة ثلاثية الأبعاد والتي يمكن التحكم بها لتلائم الحالة المدروسة بشكل جيد، كل عنصر يسلك سلوكا محددًا (خطي أو لا خطي) وفق قانون (إجهاد/تشوه) مستجيبًا للقوى المطبقة والشروط الطرفية المفروضة.

تم إعداد نموذج عددي لنفق سطحي أبعاده مبينة بالشكل (1) بقطر $D=10m$ ، الارتفاع من مركز النفق حتى سطح الأرض $Z=20m$ والتربة حول النفق تربة رملية مواصفاتها مبينة بالجدول (1) لا يوجد مياه جوفية (الرمل غير مشبع)، تم اعتماد موديل MOHR-COULOMB للتربة، بالنسبة للشروط الطرفية النموذج ممنوع من الحركة الأفقية والشاقولية من الأسفل كما منعت الحركة الأفقية للجوانب الشاقولية، قشرة النفق بيتونية خواصها مبينة بالجدول (2)، تمت نمذجتها بواسطة عناصر إنشائية موجودة ضمن البرنامج (Shell)، الأنابيب الزجاجية تمت نمذجتها عددياً بواسطة عناصر إنشائية (Pile) خواص الأنابيب مبينة بالجدول (3) طول الأنابيب ($L=20m$) وكثافة الأنابيب (عدد الأنابيب المغروسة بالنسبة لمساحة مقطع النفق) ($A=0.57 \text{ nails}/m^2$) أي عدد الأنابيب 45 أنبوب موزعة على كامل جبهة الحفر كما في الشكل (2)، تمت نمذجة عملية الحفر بشكل متتابع (step-by-step) بحيث كلما تم حفر واحد متر من تربة النفق (خطوة الحفر 1m) يتم إزالة 1m من الأنابيب المغروسة في جبهة الحفر و يتم تركيب القشرة بعرض 1m وبالتالي تكون مسافة المنطقة غير المدعمة أمام جبهة الحفر 1m.



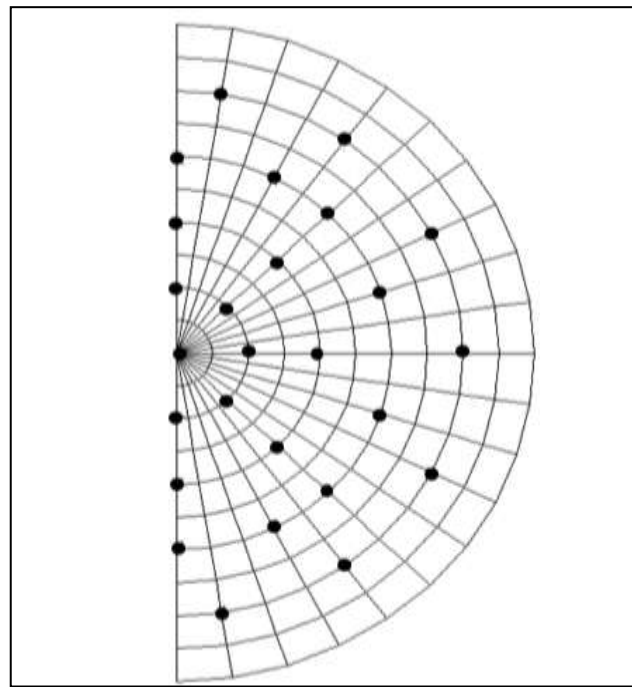
الشكل (1): الموديل العددي المستخدم في الدراسة

الجدول (1): بارامترات التربة المعتمدة في الموديل العددي

Parameter	Value
Young's modulus, E (Kpa)	43130
Poisson's ratio, ν	0.33
Cohesion ,C (Kpa)	12
Friction angle, ϕ (°)	36
Dilation angle, ψ (°)	6
Unit weight, γ (kn/m ³)	21

الجدول (2): بارامترات القشرة البيتونية المعتمدة في الموديل العددي

Parameter	Value
Unit weight, γ (kn/m ³)	25
Thickness, t (m)	0.3



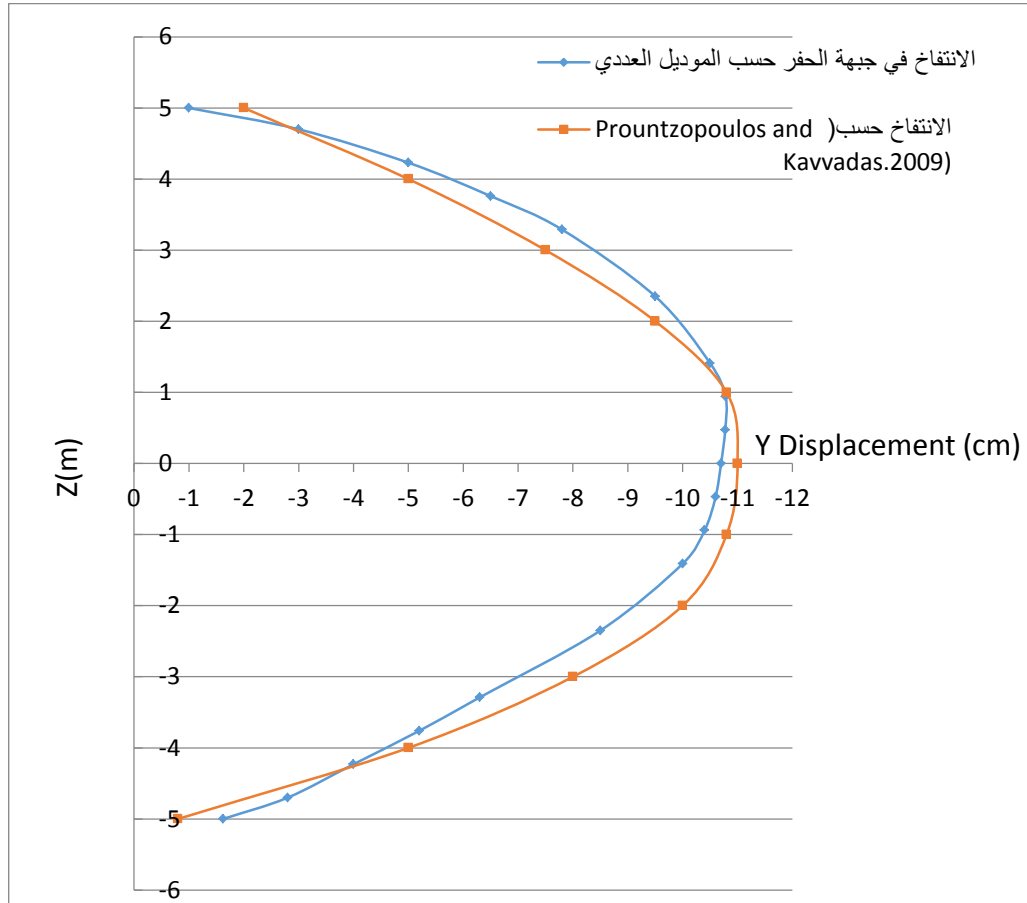
الشكل (2): توزيع الأنابيب الزجاجية على جبهة الحفر ($A=0.57 \text{ nails/m}^2$)

الجدول (3): خواص الأنابيب الزجاجية المعتمدة في البحث

Parameter	Value
Young's modulus, E (Gpa)	20
D (mm)	45
Poisson's ratio, ν	0.3

1- تحقيق الموديل العددي:

من أجل تحقيق الموديل العددي تم الحفر حتى $Y=10$ m بدون أنابيب التدعيم وتطبيق ضغط على جبهة الحفر $P_{eq}=0.3P_{ref}$ حيث أن $P_{ref}=N.F_y/A$ عدد الأنابيب المغروسة في جبهة الحفر، F_y قوة الشد الوسطية في الأنبوب و A مساحة مقطع النفق. تم رسم مخطط الانتفاخ في جبهة الحفر عند $Y=10$ m والمقارنة مع قيم الانتفاخ حسب الموديل المرجعي العددي الذي استخدمه (Prountzopoulos and Kavvadas. 2009) في دراسته مستخدماً طريقة العناصر المنتهية برنامج ABAQUS (لا يوجد قياسات حقلية في الدراسة المرجعية، حيث من الصعب الحصول على القياسات الحقلية في مجال الأنفاق)، حيث أظهرت النتائج بأن الفروقات لا تتجاوز 3% عند محور النفق وعند باقي النقاط حوالي 8% الشكل (3)، أي يمكن استخدام الموديل العددي في الدراسة البارامترية.



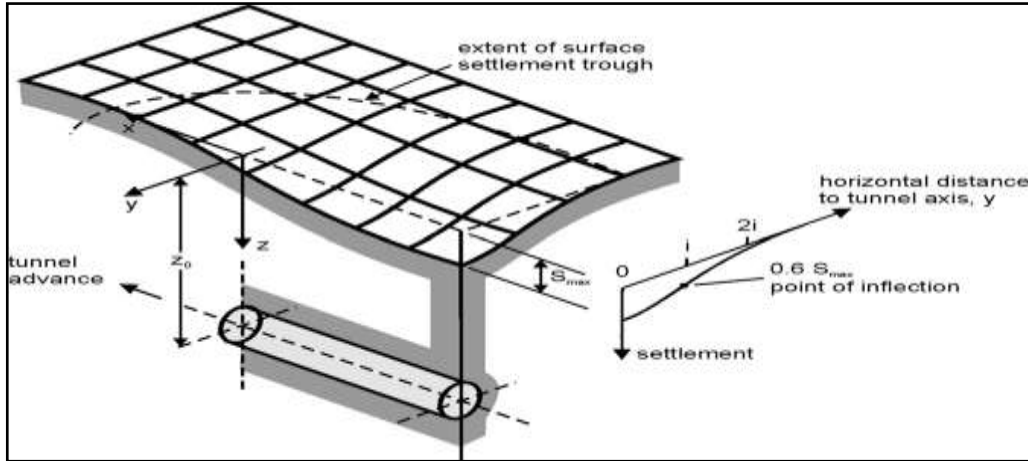
الشكل (3): مقارنة بين الانتفاخ حسب الموديل العددي و الانتفاخ حسب (Prountzopoulos and Kavvadas. 2009)

وتم أيضا إيجاد الهبوط بالاتجاه العرضي (اتجاه X) عند سطح الأرض بدون تدعيم بالأنابيب الزجاجية وبدون تطبيق ضغط على جبهة الحفر ومقارنته مع منحنى الهبوط حسب غاوس العلاقة (1) الشكل (4).

العلاقة (1)

$$S(x) = S(\max) \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

S_{\max} الانتقال الشاقولي الأعظمي لسطح الأرض فوق محور النفق، i هي المسافة الأفقية بين النقطة المعتبرة ومحور النفق والتي توافق نقطة انعطاف منحنى الهبوط الشاقولي وتدعى (معامل عرض حوض الهبوط).



الشكل (4): شكل حوض الهبوط مع تقدم الحفر (after Attewell et al., 1986) مع إظهار شكل الهبوط حسب غاوس (MOLLER AND VERMEER, 2008).

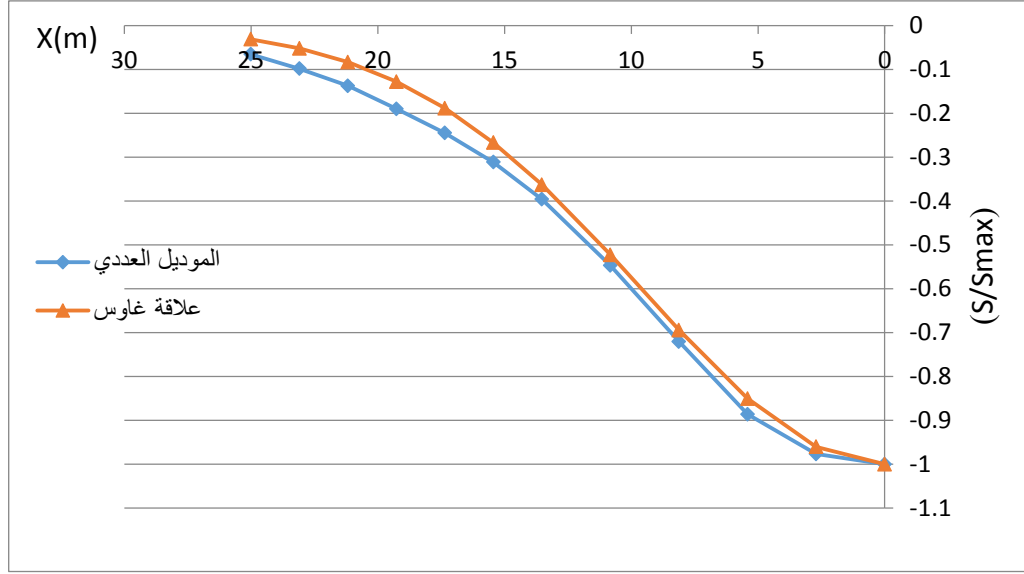
يوجد عدد كبير من العلاقات التي تعتمد على طرق مختلفة لتقدير i ، وهنا تم حساب قيمة i حسب العلاقة (2) (Atkinson & Potts, 1977):

$$i = 0.25(1.5 * Z_0 + 0.5 * R) \quad \text{العلاقة (2)}$$

R نصف قطر النفق، Z_0 العمق حتى محور النفق.

تم رسم العلاقة بين (S/S_{\max}) و X الشكل (5)، حيث أن قيمة S_{\max} للموديل العددي (بدون التدعيم بالأنابيب الزجاجية عند خطوة حفر $y=10\text{m}$) 1.53 cm .

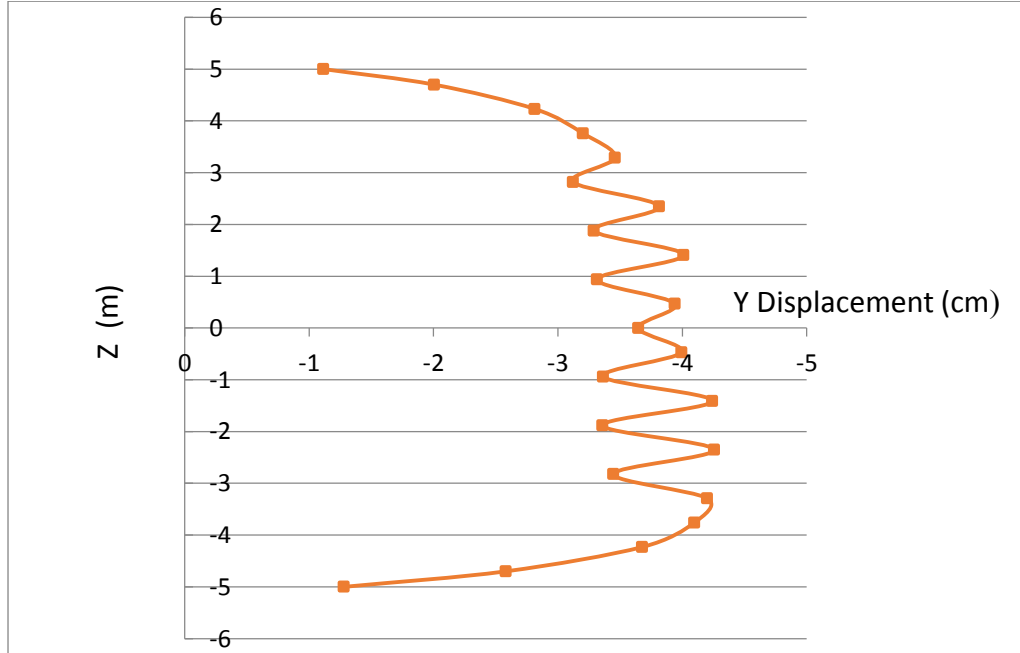
كما هو ملاحظ أن نتائج الموديل العددي متقاربة جدا مع منحنى غاوس، مما يؤكد صحة الموديل العددي وإمكانية استخدامه في الدراسة البارامترية.



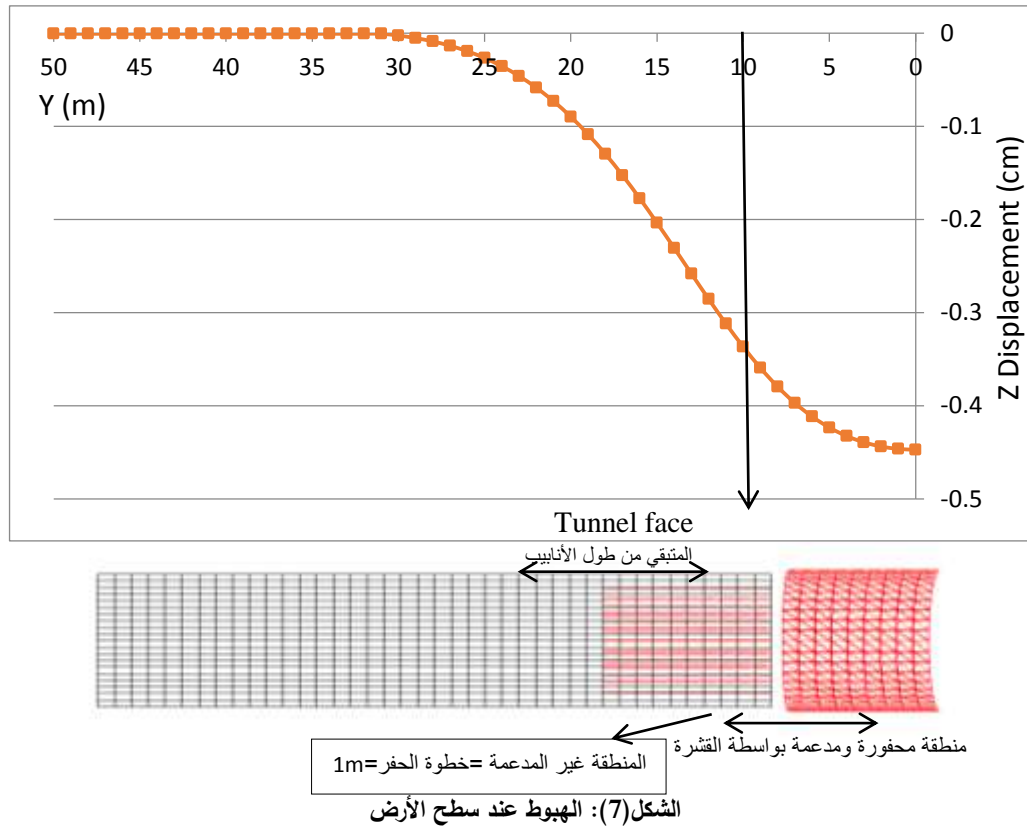
الشكل (5): مقارنة بين الهبوط عند سطح الأرض حسب الموديل العددي والهبوط حسب غاوس

1- دراسة الانتقالات:

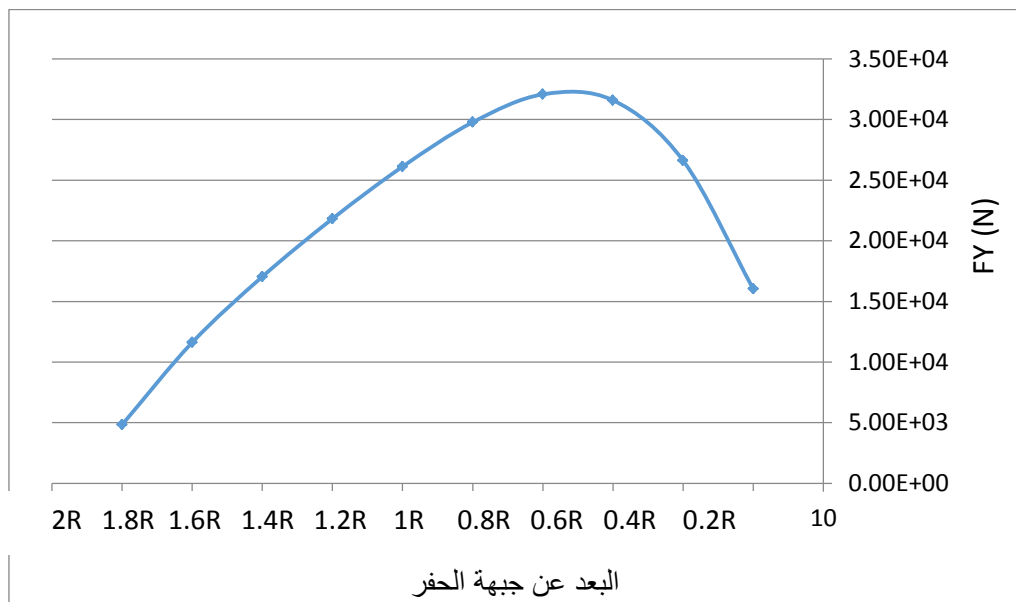
تم إيجاد انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض عند $y=10m$ ، يبين الشكل (6) مخطط الانتفاخ في جبهة الحفر وكما هو ملاحظ قيمة الانتفاخ الأعظمي تقريبا $4.3cm$. ويبين الشكل (7) قيم الانتقال الحاصل عند سطح الأرض، الانتقال الأعظمي عند بداية النفق تقريبا $0.45 cm$ ويقل الانتقال مع الابتعاد عن جبهة الحفر، ونلاحظ أن تأثير عملية الحفر (حوض الهبوط) ممتد حتى حوالي $2.7m$.



الشكل (6): الانتفاخ في جبهة الحفر

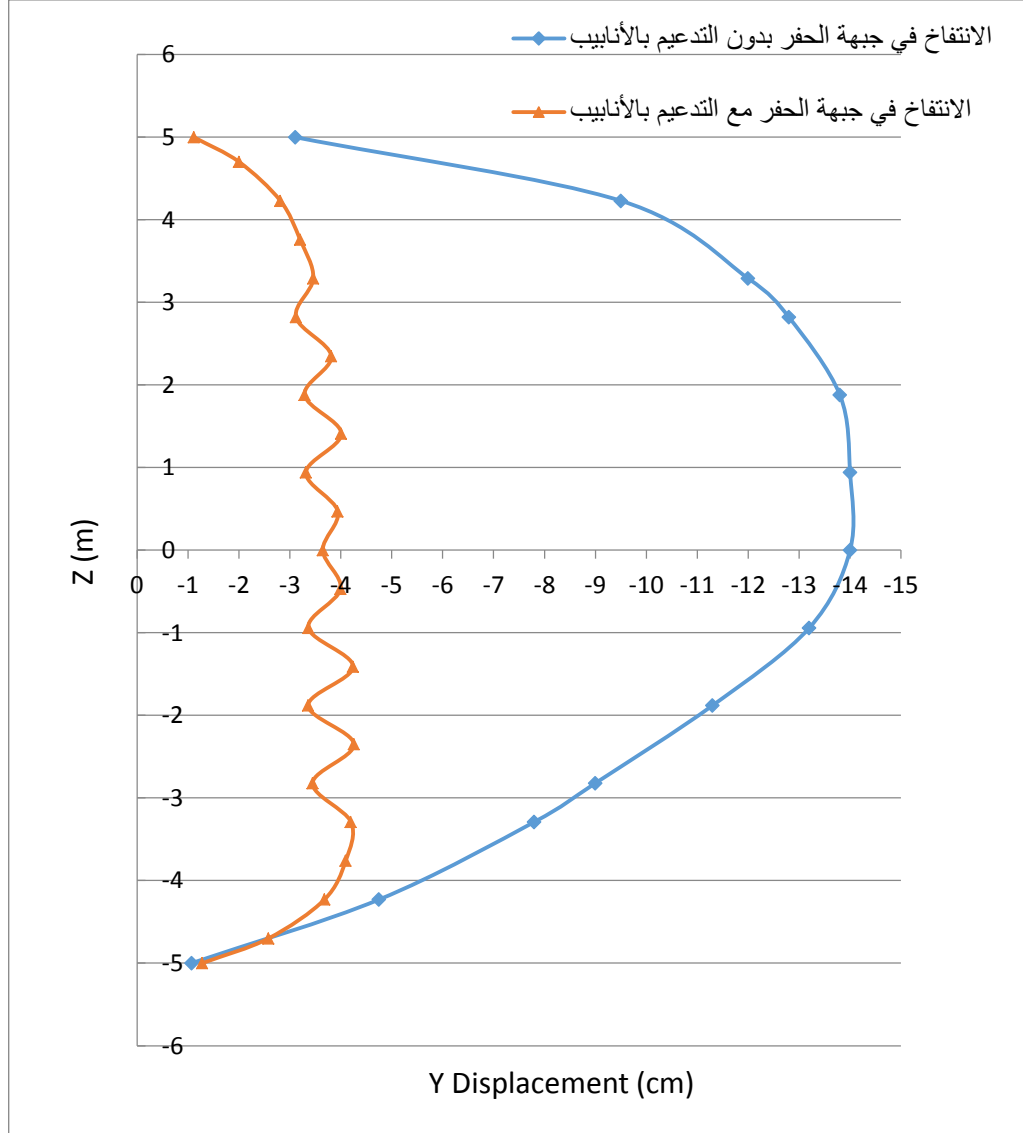


تم دراسة القوى المتشكلة في الأنابيب وهي قوى شد ناتجة عن الاحتكاك بين الأنابيب والترية. يبين الشكل (8) القوة في الأنابيب المحوري كما هو ظاهر قوة الشد تزداد مع الابتعاد عن جبهة الحفر حيث التربة مخلخلة حتى البعد $0.6R$ (R نصف قطر النفق) ثم تتناقص.

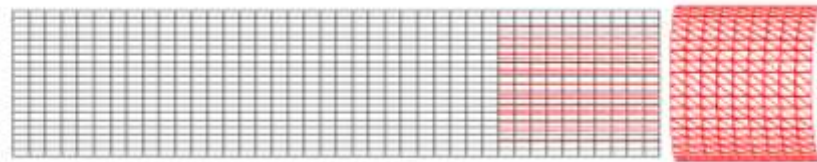
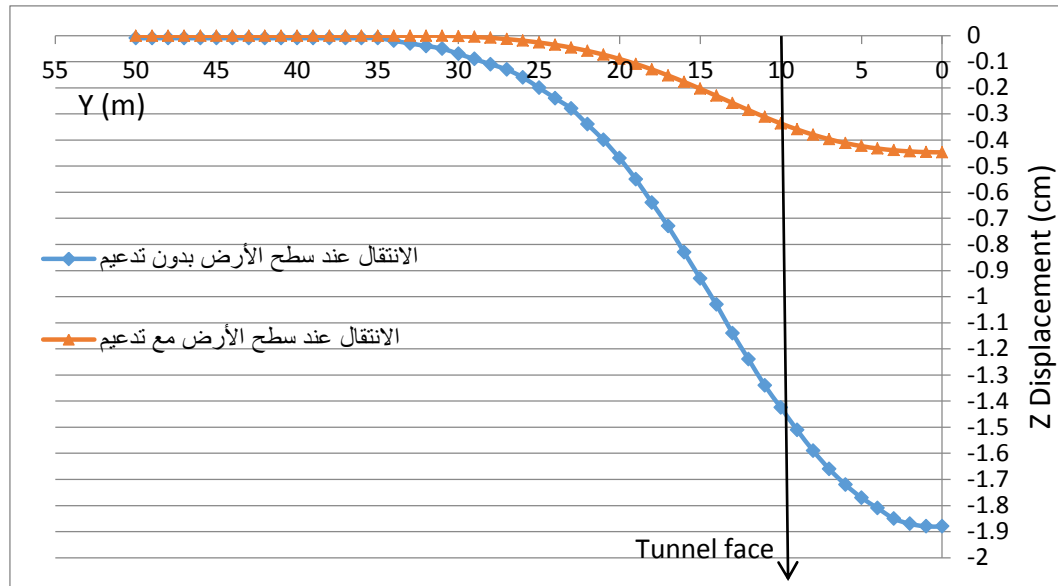


الشكل (8): تغير القوى في الأنابيب مع البعد عن جبهة الحفر

- 2- بيان فعالية تقنية التدعيم بالأنابيب الزجاجية في تخفيض انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض:
 لبيان فعالية تقنية التدعيم في تخفيض الانتقالات (الانتفاخ في جبهة الحفر والهبوط على سطح الأرض) تم إيجاد الانتقالات عند خطوة الحفر $Y=10\text{ m}$ في حالة النفق بدون تدعيم بالأنابيب الزجاجية ومقارنتها مع الانتقالات السابقة (في حالة التدعيم) يظهر الشكل (9) مقارنة الانتفاخ الحاصل في جبهة الحفر بين الحالتين.
 كما يبين الشكل (10) مقارنة الهبوط عند سطح الأرض بين الحالتين.



الشكل (9): مقارنة بين الانتفاخ في حالة التدعيم و بدون تدعيم بالأنابيب الزجاجية



الشكل (10): مقارنة بين الهبوط عند سطح الأرض في حالة التدعيم و بدون تدعيم بالأنابيب الزجاجية

يبين المخطط (9) أن الانتفاخ الأعظمي في حالة عدم التدعيم 14 cm وفي حالة التدعيم 4 cm، و المخطط (10) الهبوط الأعظمي عند سطح الأرض في حالة عدم التدعيم 1.9 cm و في حالة التدعيم 0.45cm أي أن تقنية التدعيم بالأنابيب الزجاجية **تخفض الانتقالات بنسبة أكثر من 70%**.

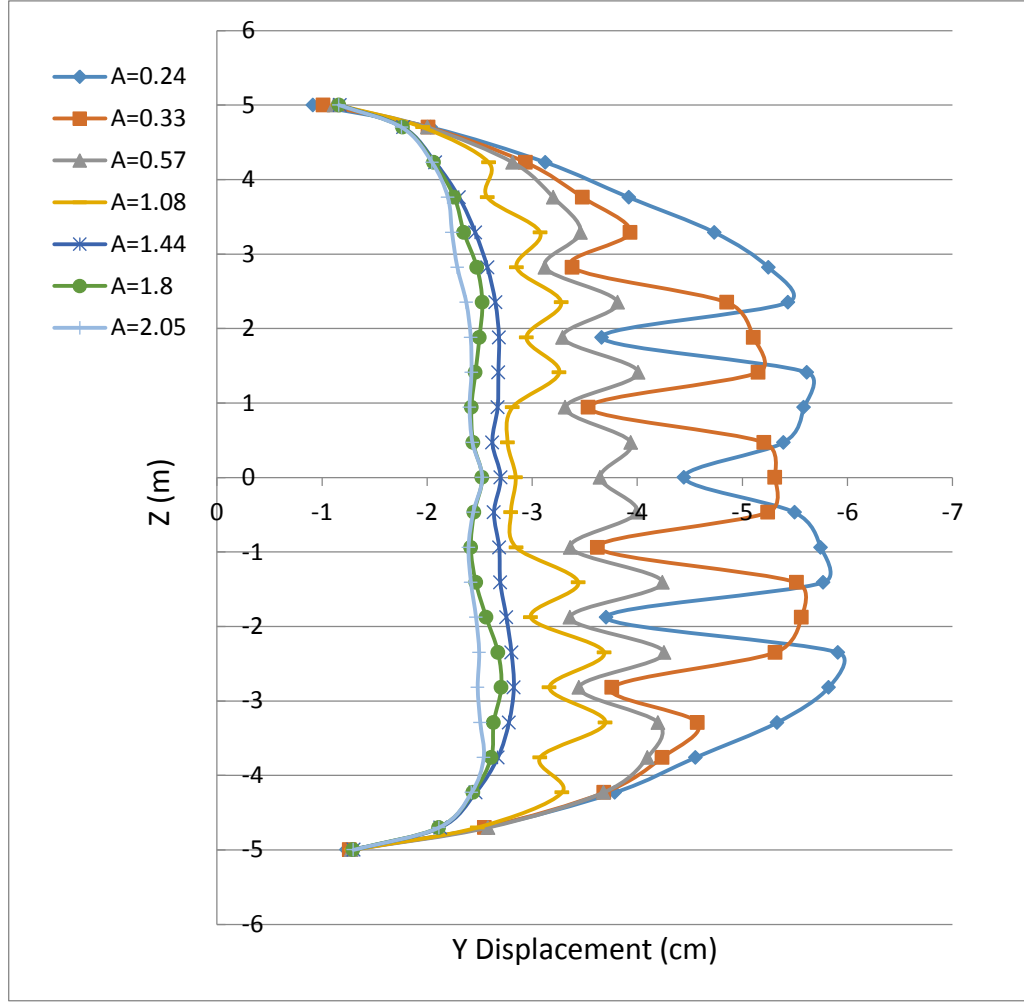
- 3- دراسة أهم بارامترات تقنية التدعيم وإيجاد البارامترات الحدية:
 1- كثافة الأنابيب (A):

كثافة الأنابيب هي عدد الأنابيب المغروسة في جبهة الحفر مقسومة على مساحة مقطع النفق أي عدد الأنابيب في المتر المربع من جبهة الحفر، ومن أجل دراسة تأثير الكثافة على الانتقالات تم إيجاد الانتقالات عند كثافات مختلفة :

$$A = (0.24, 0.33, 0.57, 1.08, 1.44, 1.8, 2.05) \text{ Nails/m}^2$$

(سيتم دراسة تأثير تغير الكثافة على الانتقالات فقط دون التطرق إلى دراسة القوى الداخلية في الأنابيب).

يبين الشكل (11) الانتفاخ في جبهة الحفر عند قيم الكثافات السابقة.



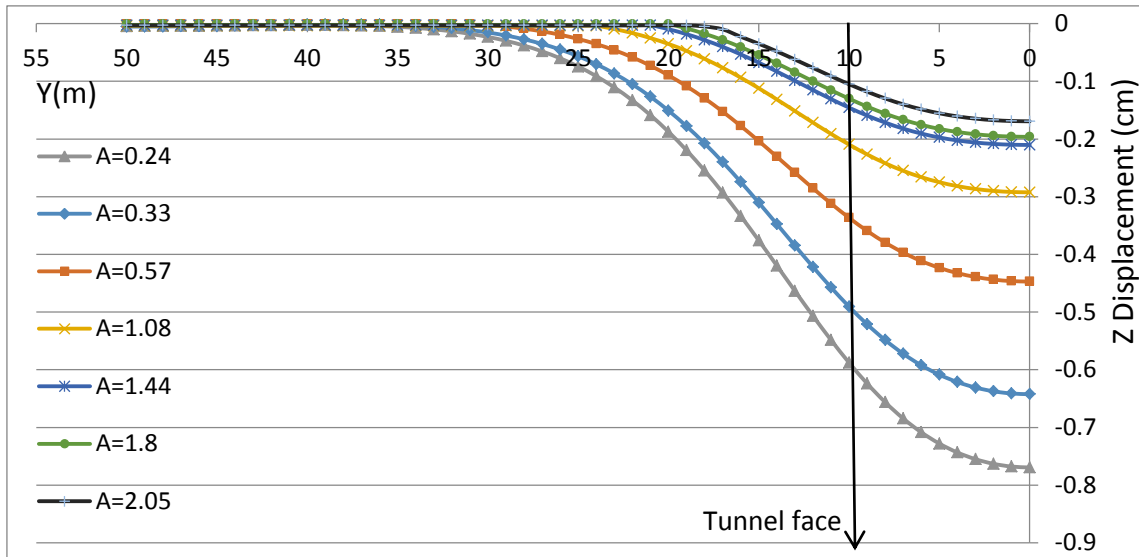
الشكل (11): الانتفاخ في جبهة الحفر مع تغير كثافة الأنايبب

نلاحظ من المخطط أنه كلما زادت كثافة الأنايبب قل الانتفاخ في جبهة الحفر إلى الكثافة $A=1.44$ nails/m² عندها تقريبا الانتفاخ ثابت حوالي 2.7 cm بعدها زيادة الكثافة لا تغير بشكل واضح في قيم الانتفاخ.

و يبين الشكل (12) قيم الهبوط في سطح الأرض مع تغير كثافة الأنايبب.

نلاحظ أن الهبوط عند سطح الأرض يقل مع زيادة كثافة الأنايبب حتى الكثافة $A=1.44$ nails/m² عندها قيمة الهبوط الأعظمي 0.2 cm بعدها زيادة الكثافة لا تؤثر كثيرا على الهبوط، كما أن أبعاد حوض الهبوط أيضا تقل مع زيادة كثافة الأنايبب حيث نلاحظ تغير من (30 m) عند الكثافة 0.24 حتى (20 m) عند الكثافة 1.44 بعدها لا يحصل تغيرا كبيرا في طول حوض الهبوط.

أي عند الكثافة $A=1.44$ nails/m² تكون جبهة الحفر مدعمة بالكامل (كل أنبوب مسؤول عن تدعيم مساحة معينة) وجميع القوى المتشكلة تكون قد انتقلت إلى الأنايبب وبالتالي زيادة عدد الأنايبب بعدها لن يكون له أي تأثير على الانتقالات أي لا داعي لهذه الزيادة.



الشكل (12): الهبوط عند سطح الأرض مع تغير كثافة الأنابيب

نستنتج مما سبق أن:

✓ **الكثافة الحدية للأنابيب $A=1.44 \text{ nails/m}^2$.**

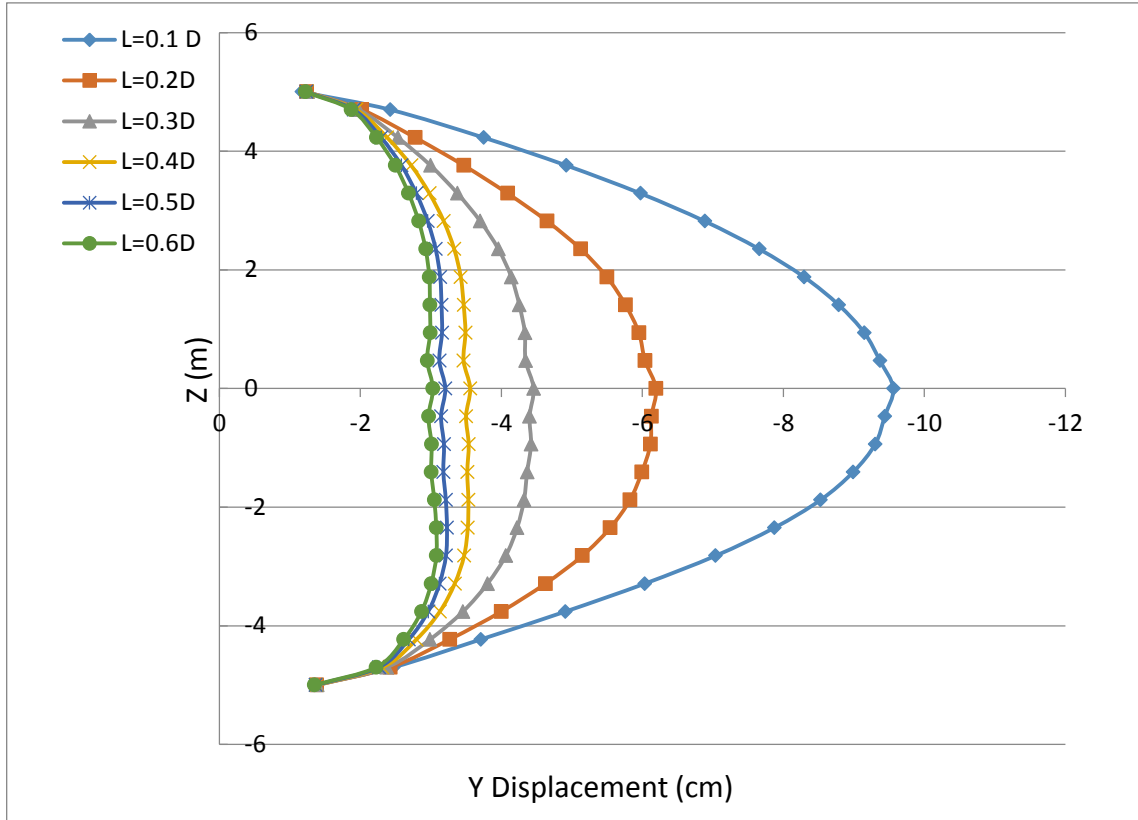
II- **طول الأنابيب (L):**

لدراسة تأثير تغير طول الأنابيب على الانتقالات تم إيجاد الانتقالات عند قيم مختلفة لطول الأنابيب:

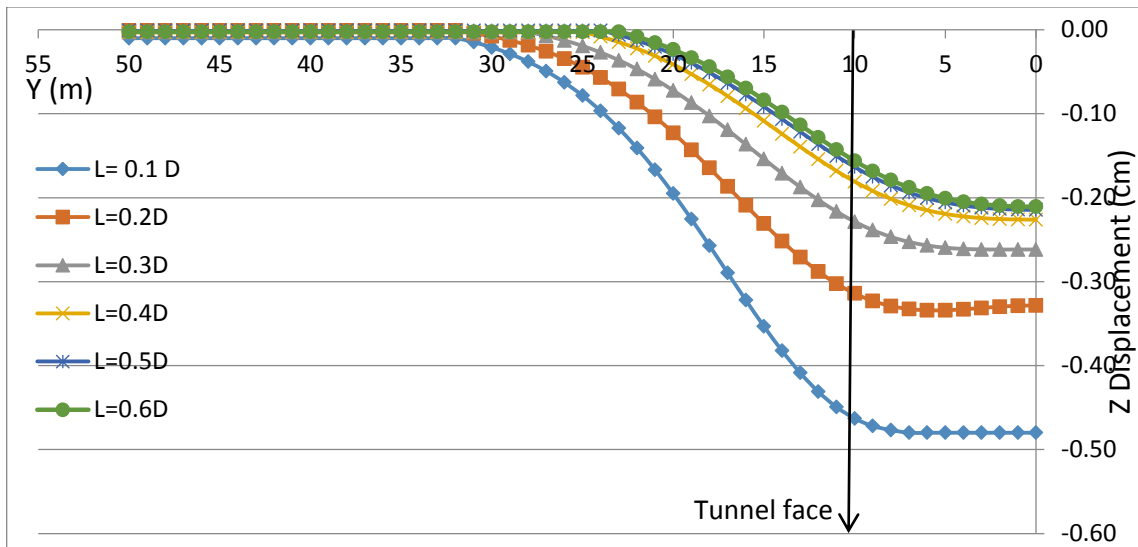
. $A=1.44 \text{ Nails/m}^2$ و بكثافة مساوية للكثافة الحدية $L=(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6)D$

يبين الشكل (13) تغير قيم الانتفاخ في جبهة الحفر عند قيم أطوال الأنابيب السابقة، حيث نلاحظ من المخطط أن الانتفاخ في جبهة الحفر يقل مع زيادة طول الأنابيب من انتفاخ بقيمة 9cm عند طول مساو ل $L=0.1D$ إلى 3.5cm عند الطول $L=0.4 D$ بعده لا يطرأ تغير كبير في قيم الانتفاخ.

ويبين الشكل (14) أن الهبوط عند سطح الأرض أيضا يقل مع زيادة طول الأنابيب من 0.45cm عند طول مساو ل $L=0.1D$ إلى 0.22cm عند الطول $L=0.4 D$ بعده لا تأثير كبير لزيادة الطول على قيم الهبوط.



الشكل (13): الانتفاخ في جبهة الحفر مع تغير طول الأنابيب



الشكل (14): الهبوط عند سطح الأرض مع تغير طول الأنابيب

من المخططين السابقين نجد أنه بعد الطول $L=0.4 D$ لا تغير كبير في قيم الانتقالات لذلك سنعتبره الطول الحدي، أي عندما يصل طول الأنابيب إلى هذا الطول يجب تجديد الأنابيب للحفاظ على استقرار عملية الحفر.

✓ **الطول الحدي للأنابيب $L=0.4 D$.**

الاستنتاجات والتوصيات:

تناول هذا البحث دراسة جبهة حفر نفق سطحي مدعومة بالأنابيب الطولية دراسة عددية عن طريق إنشاء موديل عددي ثلاثي الأبعاد باستخدام طريقة الفروقات المحدودة، حيث أكدت النتائج على إمكانية استخدام التحليل العددي في نمذجة الحفر المتتابع للأنفاق ونمذجة التدعيم باستخدام أنابيب الألياف الزجاجية، وبينت أن تقنية التدعيم هذه تخفض الانتقالات (انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض) بنسبة أكثر من 70%.

تم دراسة الانتقالات الحاصلة خلال الحفر (انتفاخ جبهة الحفر وهبوط سطح الأرض) ووجد أن هذه الانتقالات تقل مع زيادة كثافة الأنابيب المزروعة في جبهة الحفر حتى قيمة الكثافة الحدية، وتقل أيضا مع زيادة طول الأنابيب حتى قيمة الطول الحدي، وأن قيمة الكثافة الحدية للأنابيب $A=1.44 \text{ nails/m}^2$ لا داعي لاستخدام كثافة أكبر منها في التدعيم والطول الحدي للأنابيب $L=0.4 D$ عند الوصول إلى هذا الطول يجب تجديد الأنابيب للحفاظ على استقرار وتقدم عملية الحفر.

المراجع

1. Atkinson, J.H., Potts, D.M. *Subsidence above shallow tunnels in soft ground*. Jnl. Geotech. Eng. Div., ASCE, GT4, PP. (1977), 307-325.
2. LUNARDI, P. *The influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation*. Gallerie e grandi opere sotterranee, 52, (1997).
3. GALLI, G; RIMALDI, A; LEONARDI, A. *Three-dimensional modeling of tunnel excavation and lining*. Computers and Geotechnics 31 (2004).
4. WONG, H; TROMPILLE, V; DIAS, D. *Extrusion analysis of a bolt-reinforced tunnel face with finite ground-bolt bond strength*. Can. Geotech. j. vol 41, NRC Canada (2004), 326-341.
5. LUNARDI, P. *Design and construction of tunnels*. Progetto e costruzione di gallerie - Analisi delle deformazioni controllate nelle Rocce e nei suoli, Hoepli, Italy, 576, (2006).
6. MOLLER, S.C.; VERMEER, P.A. *On numerical simulation of tunnel installation*. Tunnelling and Underground Space Technology, 23.4: (2008), 461-475.
7. KAVVADAS, M; PROUNTZOPOULOS, G. *3D Analyses of Tunnel Face Reinforcement using Fibreglass Nails*. 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling Ruhr University Bochum, September (2009), 9-11.
8. PROUNTZOPOULOS, G. *Tunnel face reinforcement and protection - optimization using 3D finite element analysis*. National technical University of Athens, Greece, (2010).
9. BOURGEOIS; HOSSEININIA, S. *Analysis of a bolt-reinforced tunnel face using a homogenized model*. Numerical Methods in Geotechnical Engineering-Benz and Nordal (eds). Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-59239-0 (2010).
10. مالك توفيق حسن. دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية للتنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطريقة العددية. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية، (73)، 37-53، 2015، (1).