

دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية للتنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناجمة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطريقة الدرعية

الدكتور مالك توفيق حسن *

(تاريخ الإيداع 20 / 8 / 2014. قُبل للنشر في 14 / 1 / 2015)

□ ملخص □

إن التطور العمراني المستمر للعديد من المدن أدى إلى نشوء حاجة متزايدة لمنشآت البنى التحتية. لذلك وبسبب محدودية المساحات الأرضية المتوفرة، أصبحت المنشآت تحت الأرضية مثل الأنفاق أكثر فعالية في توفير البنى التحتية المطلوبة. ولكن تنفيذ الأنفاق داخل المدن يتسبب بانتقالات و هبوطات لسطح الأرض فوق منطقة تنفيذ الأنفاق وأضراراً للمنشآت الواقعة عند سطح الأرض أو تحت سطح الأرض. وعليه أصبح التنبؤ بالهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق مسألة أساسية في عملية تخطيط و تصميم المشاريع، رغم صعوبة التنبؤ و حساب هذه الهبوطات بشكل دقيق. يتناول هذا البحث الأسباب الرئيسية لهبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق بالطريقة الدرعية، كما يلخص تأثير عدد من العوامل الهامة على هذه الهبوطات. من أجل ذلك تم استخدام النمذجة العددية ثنائية الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية (FEM) لمحاكاة مشروع النفق المعتبر. وتم مقارنة نتائج التحليل العددي مع نتائج القياسات الحقلية، حيث أظهرت المقارنة أن نتائج التحليل العددي بالنسبة للهبوطات متقاربة مع نتائج القياسات الحقلية بدقة مقبولة. و تم استخدام النموذج العددي (2D FE-Model) المعايير لإجراء الدراسة البارامترية.

الكلمات المفتاحية: الأنفاق السطحية -هبوط سطح الأرض - الطريقة الدرعية لتنفيذ الأنفاق - حوض الهبوط -طريقة العناصر المنتهية FEM

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

Finite Element Analysis to predict the Ground Settlements due to Excavation of shallow Tunnels with Shield Methods

Dr. Malek Tawfik Hasan*

(Received 20 / 8 / 2014. Accepted 14 / 1 / 2015)

□ ABSTRACT □

The growth of many cities has resulted in the increasing need for infrastructures. As urban space becomes more limited, subsurface structures such as tunnels are becoming more efficient in providing the required infrastructure. But the construction of tunnel projects can cause ground settlements and a restriction of services, and damage to surface or other subsurface structures. The prediction of tunnel induced ground settlements therefore becomes a key issue in the planning and designing process, but it's difficult to forecast and calculate settlement accurately.

This paper deals with main causes of surface settlement caused by shield construction, and summarizes the influence of several important parameters to ground surface settlements. Therefore, a two-dimensional numerical modeling by finite element method (FEM) was performed to simulate the considered tunnel projects. The obtained results were compared with the field measurements. The comparison depicts that the presented method gives an acceptable prediction of the ground settlements. The calibrated 2D FE-Model is used to perform a parametric study.

Keywords: Shallow Tunnels –Ground Surface Settlement –Shield Tunneling Method- Settlement Trough –Finite Elements Method

*Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia , 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 بانقالات وهبوطات لسطح الأرض فوق منطقة تنفيذ الأنفاق وهذه الهبوطات الناتجة عن التنفيذ تسبب غالباً أضراراً للمنشآت الواقعة عند سطح الأرض أو تحت سطح الأرض. هذا البحث يتناول دراسة انتقالات وهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية المنفذة بالطريقة الدرعية و طرق التنبؤ بمقدار هذه الهبوطات و شكلها و امتدادها ودراسة أهم العوامل المؤثرة فيها.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية باستخدام الطريقة الدرعية من خلال دراسة عددية بطريقة العناصر المنتهية (FEM) تتضمن نمذجة رياضية و دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على قيم هبوط سطح الأرض و على شكل و أبعاد حوض الهبوط المتشكل و أهم هذه العوامل هي:

1. دراسة تأثير بعض الخواص الجيو تكنولوجية لطبقات التربة المحيطة بالنفق $(k_0/c'/\phi')$.

2. دراسة تأثير العمق النسبي للنفق (H/D) .

3. دراسة تأثير لبعض العوامل المتعلقة بالآليات التنفيذ.

كما أن هذا البحث سوف يساهم في تسليط الضوء على التأثير المتبادل بين تقنيات تنفيذ الأنفاق و التربة المحيطة بها، كما يوضح الآليات النازمة لهبوط سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق.

بسبب الأضرار المتعددة التي يمكن تسببها الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية داخل المدن المزدهمة، أصبح تقدير الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق من أساسيات مراحل التخطيط الناجح لمشاريع الأنفاق وكذلك التصميم و التنفيذ لمثل هذه المنشآت الضخمة، و من شأن التنبؤ الموثوق لهذه الهبوطات أن يوفر كلفة اقتصادية كبيرة، عن طريق المعرفة المسبقة في المواقع التي تحتاج إلى إجراءات أمان وقائية خاصة و نوعية و حجم هذه الإجراءات بهدف تقليل الأضرار و المخاطر على الأبنية و المنشآت المتواجدة عند سطح الأرض و توفير كلفة اقتصادية مرتبطة بإعادة تأهيل هذه المنشآت و صيانتها.

منهجية البحث:

يعتمد البحث على المنهج التحليلي المقارن و يتضمن المراحل التالية:

1. إجراء نمذجة مستوية (2D-Model) لنفق بطريقة (FEM) و القيام بمقارنة نتائج النموذج مع قياسات حقلية مرجعية لمشروع منفذ بهدف معايرة النموذج و التحقق من دقة النتائج.

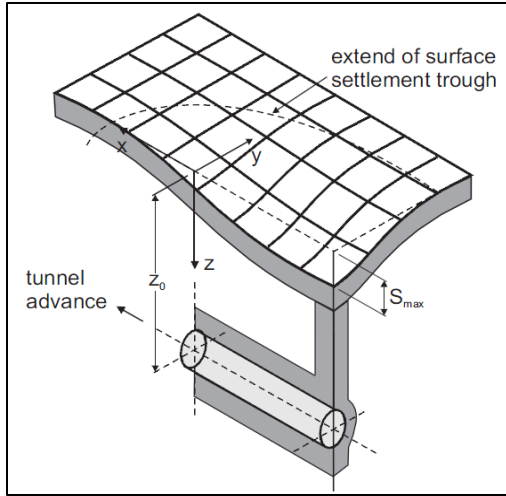
2. القيام بتحليل النموذج المعايير وإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على الهبوطات في التربة الناتجة عن تنفيذ النفق في الاتجاه العرضاني و ذلك بالنسبة لقيمة الهبوطات و لشكل و أبعاد حوض الهبوط المتشكل.

3. مقارنة نتائج التحليل العددي مع الطرق النظرية و الطرق التجريبية و النصف تجريبية المبسطة المستخدمة في الحياة العملية من أجل التنبؤ بالهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية.

4. إجراء دراسة بارامترية.

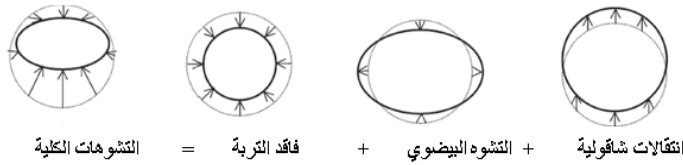
1) هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ النفق وطرق التنبؤ به (دراسة مرجعية):

لتنفيذ الأنفاق داخل المدن وخصوصاً في حالة التربة الضعيفة وبوجود المياه الأرضية تستخدم الطريقة الدرعية

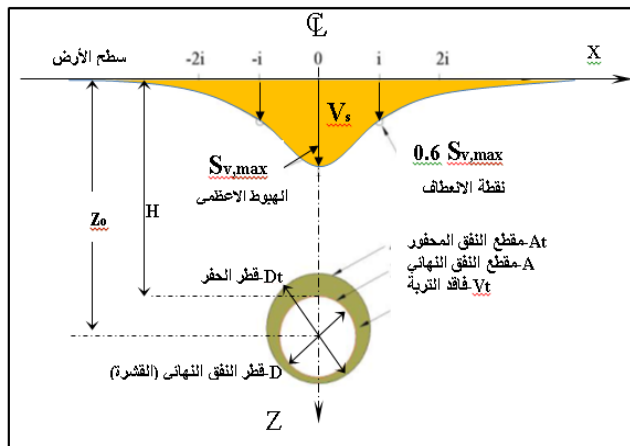


شكل(1): الشكل الفراغي لحوض الهبوط المتشكل فوق منطقة تنفيذ النفق حسب [2] (Attewell et al., 1986)

المغلقة ذات التدعيم الدائم لجبهة الحفر (مثل الدرع الهيدروليكي و درع توازن ضغط التربة). و أثناء التنفيذ تحدث انتقالات وتشوهات للتربة المحيطة بالنفق، والتي يمكن أن تصل حتى سطح الأرض و خصوصاً في حالة الأنفاق السطحية، وتؤدي إلى تشكل حوض هبوط عند سطح الأرض (Settlement trough) يمثل المنطقة المتأثرة بعمليات التنفيذ كما يوضح الشكل (1). يمكن التمييز بين الهبوطات في الاتجاه الطولاني للنفق (Longitudinal Direction) والهبوطات في الاتجاه العرضاني العمودي على محور النفق (Transverse Direction). تحدث التشوهات الكلية (هبوطات) كمجموع للتشوهات الناتجة عن فاقد التربة (Ground loss) بسبب عمليات حفر و تنفيذ النفق والتي بدورها تنتج عن التشوهات القطرية للتربة حول الحفيرة المنفذة خلف وأمام الدرع و كذلك نتيجة الانتقالات القطرية للدرع، وعن التشوه البيضي لقسرة النفق (Ovalization)



شكل(2): التشوهات الكلية المسببة لهبوطات سطح الأرض



شكل 3/ : هبوطات سطح الأرض الناتجة عن الأنفاق في المقطع العرضي.

وعن الانتقالات الشاقولية نتيجة تفرغ التربة كما يوضح الشكل 2/ في الشكلين (1 و 3) تعبر $(S_{v,max})$ عن الهبوط الشاقولي الأعظمي لسطح الأرض الناتج عن التنفيذ، و تمثل H سماكة طبقات التغطية فوق النفق الذي

قطره D و قطر الحفر D_t ، أما Z_0 فتتمثل عمق محور النفق عن سطح الأرض. فاقد التربة يرمز له بالرمز V_t و يعبر عن حجم التربة الذي تشوه إلى داخل النفق بعد الحفر، و يمثل معامل فاقد التربة (GLR: Ground Loss Ratio) أو معامل فاقد الحجم V_L (Volume Loss) عن النسبة بين فاقد التربة و حجم مقطع الحفر في المتر الطولي وهو مرتبط بشدة بتجهيزات و تقنيات التنفيذ. وتتراوح هذه النسبة في الطريقة الدرعية (1%–0.5%)، بينما في

الطريقة (النمساوية الجديدة) NATM أو طرق الحفر المتتابع (3%–0.8%)، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$GLR = V_L = \frac{V_t}{A_t} \approx \frac{V_s}{A_t} \quad (1)$$

حيث: V_s يمثل حجم حوض الهبوط و يعطى بالعلاقة التالية: (2)

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v,max}$$

إن هبوطات سطح الأرض نتيجة تنفيذ النفق يمكن أن تنتج عن عوامل متعددة أهمها: عوامل تتعلق بنوع التربة وخواصها، وعوامل تتعلق بتقنيات التنفيذ، وعوامل تتعلق بأبعاد النفق (عمق النفق و قطره)، و توجد عدة طرق لتقدير هذه الهبوطات والتي يمكن تقسيمها إلى:

الطرق التجريبية و النصف تجريبية :

معظم الأبحاث المتعلقة بدراسات هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق بالاتجاه العرضاني تستند بشكل أساسي على الأبحاث التي قام بها (Peck, 1969). حيث أشار (Peck, 1969) إلى إمكانية وصف حوض الهبوط بالاتجاه العرضاني من خلال تابع التوزيع النظامي لغوص وهذا الوصف الرياضي لاقى قبولاً واسعاً منذ ذلك الحين، وأعطى العلاقة التالية لحساب الهبوط الشاقولي بالاتجاه العرضاني في أية نقطة على سطح الأرض تبعد عن محور النفق الشاقولي مسافة x :

$$S_v(x) = S_{v,max} \cdot e^{(-x^2/2 \cdot i^2)} \quad (3)$$

حيث: $S_{v,max}$ الانتقال الشاقولي الأعظمي لسطح الأرض فوق محور النفق، i هي المسافة الأفقية بين النقطة المعتبرة و محور النفق و التي توافق نقطة انعطاف منحنى الهبوط الشاقولي و تعبر عن عرض حوض الهبوط و تدعى (معامل عرض حوض الهبوط).

تم نشر عدد كبير من العلاقات التي تعتمد على طرق مختلفة لتقدير كل من $S_{v,max}$ و i من قبل عدد من الباحثين و التي تعتمد في معظمها على ربط المعطيات الجيوتكنيكية مع تقنيات التنفيذ الخاصة بالنفق. حيث قام (Mair et al, 1983) بتقديم علاقة لحساب الهبوط الأعظمي اعتماداً على نسبة الفاقد الحجمي الناتج عن التنفيذ من خلال دمج العلاقتين (1 و 2) كما يلي:

$$S_{v,max} \approx GLR \cdot \frac{At}{i \cdot \sqrt{2\pi}} = \frac{V_L \cdot D^2}{i} = \frac{V_s}{i \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

و قدم (Ecrelebi, 2005) العلاقة التالية لتقدير قيمة الهبوط الأعظمي لسطح الأرض فوق محور النفق:

$$S_{v,max} = 0.785 \cdot \gamma \cdot Z_o \cdot \frac{4 \cdot R^2}{i \cdot E} \quad (5)$$

حيث: Z_o و R تمثلان عمق محور النفق و نصف قطره على الترتيب، في حين أن γ و E تمثلان القيم المكافئة لكل من الوزن الحجمي و معامل مرونة طبقات التربة المحيطة بالنفق. و يمكن تلخيص أهم العلاقات الواردة في المراجع المختلفة لحساب و تقدير قيمة المعامل i في الجدول /1/.

الطرق النظرية التحليلية:

تنطلق الطرق النظرية التحليلية من افتراض سلوك مرن للتربة المحيطة بالنفق، حيث قدم (Limanov, 1957) علاقة تحليلية تعتمد على نظرية المرونة لحساب هبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق أو حفريات المناجم و التي تعطي الهبوط الأعظمي حسب العلاقة التالية:

$$S_{v,max} = \left(1 - \nu^2\right) \frac{p_r}{E} \left[4 \cdot R^2 \cdot Z_o / (Z_o^2 - R^2)\right] \quad (6)$$

حيث أن: ν ، E هي معامل بواسون و معامل مرونة التربة على الترتيب، و R ، Z_o هي نصف قطر النفق (نصف قطر المقطع المحفور) و عمق النفق على الترتيب، أما $p_r = \sigma_z \cdot \frac{1+k}{2}$ فهو ضغط التربة المؤثر قطرياً و k معامل ضغط التربة الجانبي و (σ_z) هو ضغط التربة الشاقولية عند محور النفق.

جدول (1). علاقات حساب معامل عرض حوض الهبوط (i)

ملاحظات	علاقة i	الباحث
(n=0.8 - 1)	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_o}{R}\right)^n$	(Peck, 1969)[10]
بالنسبة للغضار المسبق الانضغاط و الرمل المرتص	$i=0.25(1.5*Z_o+0.5*R)$	(Atkinson & Potts, 1977)[11]
بالنسبة الرمل المخلخل	$i=0.25(Z_o+R)$	
للترية الغضارية	$\frac{2i}{D} = \frac{Z_o}{D}$	(Mair et al, 1981-3)[7]
بالنسبة للغضار: (K=0.5)	$i = 0.43 * Z_o + 1.1$	(O'Reilly & New, 1982)[9]
(K=0.4-0.7)	$i = k * Z_o$	
للترية الغضارية	$i = 0.5 * Z_o$	(Rankin, 1988)[9]
للترية الغضارية	$\frac{2i}{D} = 1 + 0.58\left(\frac{Z_o}{D}\right)$	(Lee et al, 2002)[5]

قدم (Sagaseta, 1987) بعض العلاقات التحليلية لتعيين حقل التشوهات في التربة المتجانسة والايزوتروبية الغير قابلة للانضغاط (v=0.5) نتيجة فاقد التربة بسبب حفر النفق واقترح العلاقة التالية لتقدير الهبوط الأعظمي:

$$S_{v, \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_t}{\pi} \cdot \frac{1}{Z_o} \quad (7)$$

اقترح (Bucek, 2009) علاقة بديلة لعلاقة Peck تعطي منحني تغير هبوط سطح الأرض فوق النفق بدلالة نصف عرض حوض الهبوط (L) كما يلي:

$$S_v(x) = S_{v, \max} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)^4 \cdot e^{\left(\frac{4x}{L}\right)} \quad (8)$$

طرق التحليل العددي و منها طريقة العناصر المنتهية (FEM)

تعتبر طريقة العناصر المنتهية (FEM) من الطرق المستخدمة بشكل كبير لحل مسائل معقدة مثل مسألة الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق، و قام العديد من الباحثين في العقود الثلاثة الأخيرة باستخدام هذه الطريقة في التنبؤ بالهبوطات الناتجة عن الأنفاق مثل (Foxall, et al., 2012 [5] / Moeller and Vermeer, 2008 [9]). تسمح الطرق العددية بالتمذجة الكاملة للتأثير المتبادل بين التربة و أعمال تنفيذ النفق و بإدخال تأثير طريقة التنفيذ و خواص التربة (الأبعاد، الإجهادات الابتدائية، سلوك التربة، مراحل الحفر، ...)، كذلك تسمح بتحديد شامل لكل بارامترات التصميم. الطريقة الأكثر استخداماً من طرق التحليل العددي هي تحليل ثنائي البعد بطريقة العناصر المنتهية (FEM) في المستوي العمودي على محور النفق.

2) النمذجة العددية بطريقة العناصر المنتهية (FE-Modeling):

5-1) البرنامج المستخدم (FE-Program):

تم في هذه البحث استخدام برنامج 8.5-8.2-5 PLAXIS, Ver. هو برنامج يستخدم طريقة العناصر المنتهية من أجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيو تكنولوجية، وبتيح إمكانية استخدام عدد كبير من

قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الإجهادي-التشوهي للتربة، إضافةً لإمكانية دراسة الفعل المتبادل بين المنشأ والتربة من خلال عناصر تماس خاصة (interface elements)، وإمكانية نمذجة مراحل تقدم التنفيذ وأخذ التشوهات التي تحصل في قشرة النفق بعد التنفيذ من خلال معامل (Contraction) الذي يأخذ بعين الاعتبار فاقد التربة الناتج عند تشوهها داخل النفق.

5-2) معطيات النفق و القياسات الحقلية (Tunnel data & Field measurements):

يهدف التحقق لاحقاً من صلاحية نتائج التحليل العددي بطريقة FEM و معايرة سلوك النموذج المستخدم للتربة تم إجراء نمذجة عددية بطريقة العناصر المنتهية لنفق (Heinenrood Tunnel)، الذي تم تنفيذه في هولندا عام 1998، بطول (L=1350 m) و قطر خارجي للنفق (Da=8.3m). أما عمق النفق فقد بلغ (H=11.35m) اعتباراً من سطح الأرض وحتى قمة النفق. استخدم في تنفيذ هذا النفق درع هيدروليكي (Slurry Shield) معتمداً على تدعيم دائم أمامي، و قشرة النفق عبارة عن حلقات من قطع بيتونية مسلحة مسبقة الصنع بعرض (d=1.5m) و بسماكة (0.35m)، على أن يكون الفراغ المتبقي بين قطر الحفر الخارجي (8.55m) و قطر قشرة النفق الخارجية (8.3m) مساوياً لـ (25cm)، حيث سيتم حقنه بالمونة الإسمنتية (Grout) خلف الدرع مباشرة. تم في هذا المشروع إجراء العديد من برامج القياسات الحقلية المرافقة للتنفيذ شملت قياس هبوطات سطح الأرض فوق النفق والموضحة في الجدول (2)[5][9]، أما بالنسبة لطبقات التربة في الموقع ومناسبيها وسماكاتها وخواصها وكذلك منسوب المياه الأرضية فهي ملخصة في الجدول (3).

جدول (2). القياسات الحقلية لهبوطات سطح الأرض في نفق (Heinenrood [5])

Sv	X
[cm]	[m]
0	-19.97
-0.1	-16.72
-0.7	-10.41
-1	-8.41
-1.7	-6.19
-2.6	0

جدول (3). خواص طبقات التربة حول نفق (Heinenrood Tunnel) [5, 9]

الطبقة	Depth[m]	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ' [°]	c '[kpa]	E [Mpa]	v	k_o
الطبقة الأولى: ردم (Fill)	0.0	16.5	17.2	27	3	5.5	0.34	0.58
الطبقة الثانية: رمل (sand)	-4.0	19.9	20	35	0	27	0.3	0.47
الطبقة الثالثة: غضار (clay)	-23.25	20	20	31	7	11	0.32	0.55
المياه الأرضية GWL	-1.50							

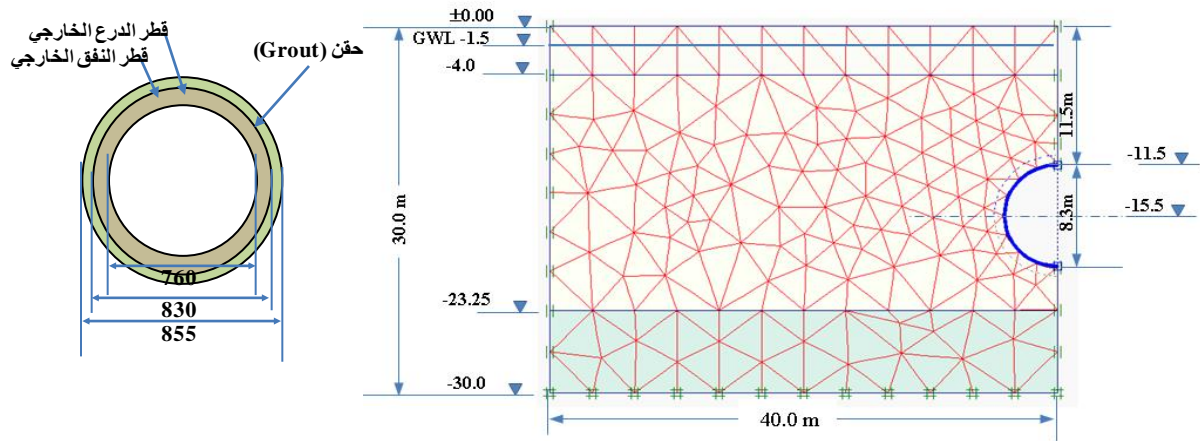
5-2) النموذج العددي (2D - FE - Model):

تم استخدام طريقة الوسط المستمر لنمذجة النفق وطبقات التربة المحيطة به، حيث تم اختيار الأبعاد الهندسية للنموذج العددي 2D كنصف نموذج في شروط التناظر وبشكل مناسب يحقق الاشتراطات الواردة في توصيات (Meissner, 1996) كما يلي:

- عرض النموذج: $w=(4-5)*D$ ، تم اختيار (w=40m)

- بعد محور النفق عن أسفل النموذج $h=(1.5-2.5)*D$ ، تم اختيار (h=14.5m)

الشكل (4) يبين الأبعاد الهندسية للنموذج المستخدم، والشروط الطرفية (في الحدود الجانبية ممنوع الانتقالات الأفقية، أما الحدود السفلية فالانتقالات الشاقولية والأفقية ممنوعة، عقد قشرة النفق الواقعة على محور التناظر أيضاً ممنوعة من الدوران إضافةً للانتقال الأفقي). تم تقسيم النموذج إلى عدد من العناصر المثلثية الشكل (triangular 15 Nodes Element) عددها (283). أما بالنسبة لخواص التربة المستخدمة في نمذجة السلوك المصرف لطبقات التربة المحيطة بالنفق من خلال قانون مور-كولومب (MC-Model) فقد تم تلخيصها في الجدول (4). الدرع المعدني المستخدم وكذلك لقشرة النفق تم نمذجتها من خلال عناصر (Beam elements) ذات سلوك مرن خطي و خواصها موضحة في الجدول (5)، حيث تم تخفيض الصلابة على الانعطاف (EI) إلى (EI/4) لأخذ تأثير الفواصل بين القطع البيتونية المسبقة الصنع بعين الاعتبار.



شكل (4): (a) الأبعاد الهندسية للنموذج و شبكة العناصر المنتهية (FE-net & FE-model) (b) أبعاد النفق و الدرع

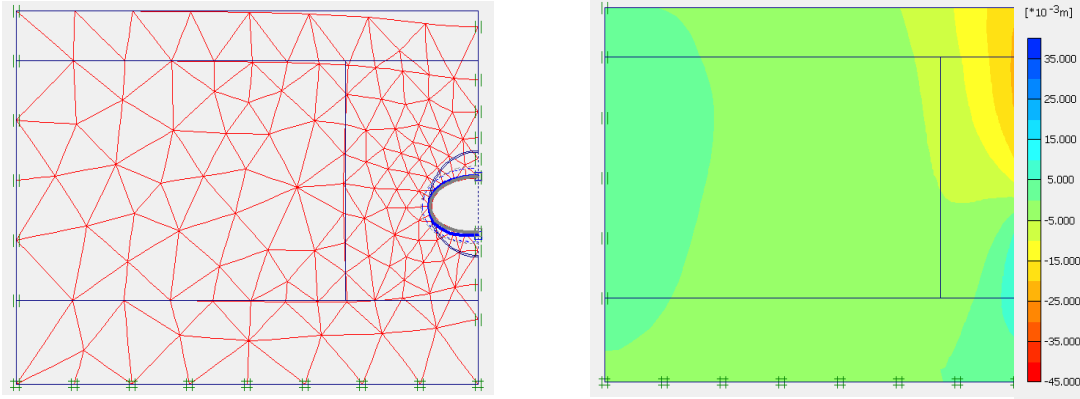
جدول (4). خواص طبقات التربة حول نفق (Heinenrood Tunnel)

قانون مور-كولومب (Mohr-Coulomb - Model : MC-Model)									
k_o	ν	E [Mpa]	ψ [°]	c' [kpa]	ϕ' [°]	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{unsat} [kN/m ³]	Depth [m]	الطبقة
0.58	0.34	5.5	0	3	27	17.2	16.5	0.0	الطبقة 1
0.47	0.3	27	5	0	35	20	19.9	-4.0	الطبقة 2
0.55	0.32	11	1	7	31	20	20	-23.25	الطبقة 3

جدول (5). خواص قشرة النفق و الدرع و مادة الحقن المستخدمة في تنفيذ نفق (Heinenrood Tunnel)

t [cm]	E [Mpa]	ν	EI [Mpa]	EA [GN/m]	γ [kN/m ³]	M-Model	Modeling	
35	30000	0.15	26.8	10.5	24	liner elastic	Beam Elements	قشرة النفق (lining)
			6	30		liner elastic	Beam Elements	الدرع المعدني (Shield)
25	10000	0.2			20	liner elastic	Triangular El.	مادة الحقن (Grouting)

تم في مرحلة الحساب اعتبار جميع مراحل حفر النفق و تركيب القشرة ، حيث أنه في المرحلة الأولى تم إلغاء تفعيل التربة داخل الدرع و تفعيل الدرع، أما في المرحلة الثانية فقد تم إلغاء تفعيل الدرع المعدني و تفعيل قشرة النفق و كذلك تفعيل مادة الحقن بين الدرع و القشرة و ذلك مع إضافة معامل تقلص (C: Contraction factor) لقشرة النفق. تم حساب الإجهادات الابتدائية وكذلك الانتقالات و الإجهادات الثانوية المتشكلة حول النفق في النموذج و خصوصاً الانتقالات الشاقولية على سطح الأرض. و الشكل (5) يوضح الانتقالات الشاقولية التي حدثت نتيجة تنفيذ النفق، حيث أن قيمة الانتقال الأعظمي لسطح الأرض فوق النفق بلغت (-2.56cm).

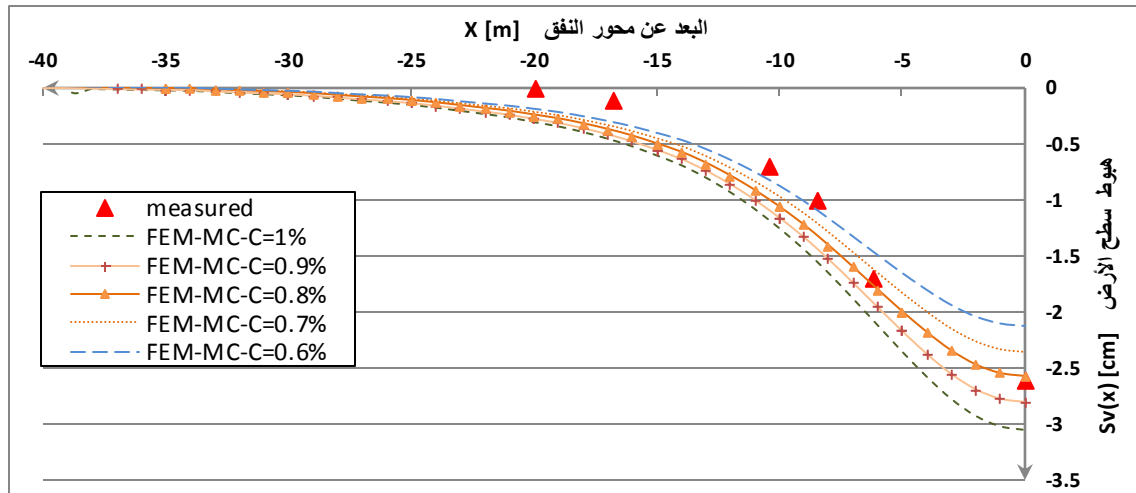


الشكل(5): (a) الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق (b) الشبكة المشوهة بعد تنفيذ النفق (مكبرة 50 مرة).

النتائج والمناقشة:

1) معايرة النموذج والتحقق من دقة النتائج (Model Calibration & Validation):

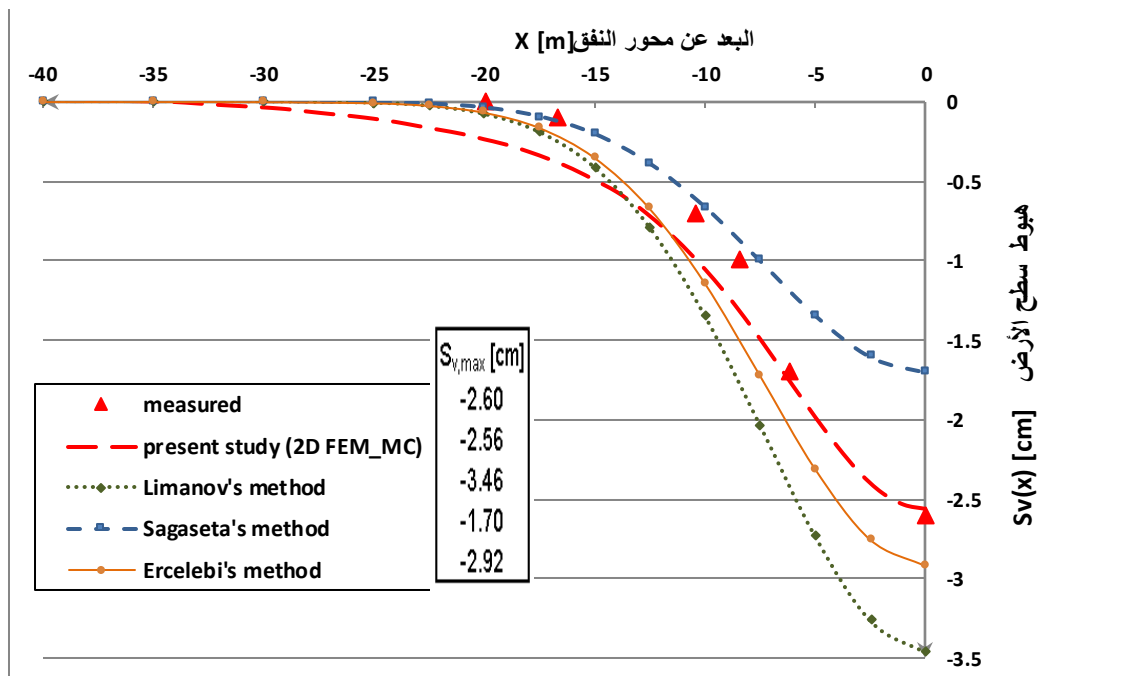
يهدف التحقق من دقة النتائج التي تم التوصل إليها تم مقارنة قيم هبوطات سطح الأرض المقاسة حقلياً أثناء تنفيذ نفق (Heinenrood Tunnel) مع قيم الهبوطات المحسوبة من النموذج العددي للنفق باستخدام قانون مور-كولومب لنمذجة سلوك التربة و أظهرت المقارنة،الموضحة في الشكل (6)، أن منحنى حوض الهبوط المحسوب من اجل معامل تقلص قدره (C=0.8%) يعطي اقرب قيم للقياسات الحقلية المنفذة على سطح الأرض. حيث أن قيمة الهبوط الأعظمي لسطح الأرض المحسوب فوق محور النفق بلغ قيمة (-2.56 cm) و هي قريبة جداً من القيمة المقاسة و قدرها (-2.6 cm)، لكن حوض الهبوط المحسوب أعرض من حوض الهبوط المقاس.



الشكل (6): مقارنة بين نتائج نموذج الـ FEM والقياسات الحقلية المرجعية بالنسبة لهبوطات سطح الأرض فوق النفق

لقد تم إجراء التحليل باستخدام قانون مور - كولومب في هذه الدراسة لنتائجها الجيدة مقارنةً بالقياسات الحقلية و كذلك لسهولة الحصول على البارامترات المطلوبة و توفرها.

إضافةً للمقارنة بين نتائج التحليل العددي و بين القياسات الحقلية تم إجراء مقارنة بين نتائج النموذج العددي و بين العلاقات التجريبية و النصف تجريبية و العلاقات النظرية المستخدمة بكثرة في الحياة العملية. و تظهر المقارنة الموضحة في الشكل (7) شكل حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض فوق النفق المحسوبة وفق العلاقات المختلفة المذكورة في الفقرة (3).



الشكل (7) مقارنة بين نتائج هبوط سطح الأرض فوق النفق المحسوب من نموذج FEM

والقياسات المرجعية و العلاقات النظرية و التجريبية و النصف تجريبية

وتظهر المقارنة أن قيم الهبوط الأعظمية المحسوبة وفق طريقة (Sagasetta, 1987) هي أصغر بوضوح من القيم المقاسة حقلياً، بينما قيم الهبوط المحسوبة وفق طريقة (Limanov's method, 1957) هي أكبر قليلاً من القيم المقاسة. ويبين الشكل (7) أيضاً أن علاقة (Ecrelebi, 2005) تعطي مقارنةً بالعلاقات الأخرى القيم الأقرب لنتائج القياسات الحقلية، في حين أن أقرب النتائج للقيم المقاسة حقلياً هي تلك المحسوبة وفق نتائج التحليل العددي المقدمة في هذه الدراسة. ويمكن إعادة التفاوت بين نتائج الطرق المبسطة المختلفة المذكورة أعلاه إلى الافتراضات والتبسيطات المستخدمة في هذه العلاقات والتي تهمل تأثير بعض العوامل، لذلك تعطي نتائج جيدة في بعض الحالات و نتائج متباينة في حالات أخرى.

مما سبق نلاحظ أن النتائج التي تم الحصول عليها من خلال التحليل العددي باستخدام نموذج ثنائي الأبعاد من حيث قيم الانتقالات الشاقولية و شكل حوض الهبوط الناتج عن تنفيذ النفق مقارنة بدقة مقبولة من نتائج القياسات الحقلية التي أجريت على النفق أثناء التنفيذ من خلال نظام مراقبة حديث نسبياً، و كذلك مع العلاقات المختلفة المستخدمة في الحياة العملية وبالتالي يمكن استخدام هذا النموذج لإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على هبوطات سطح الأرض فوق النفق.

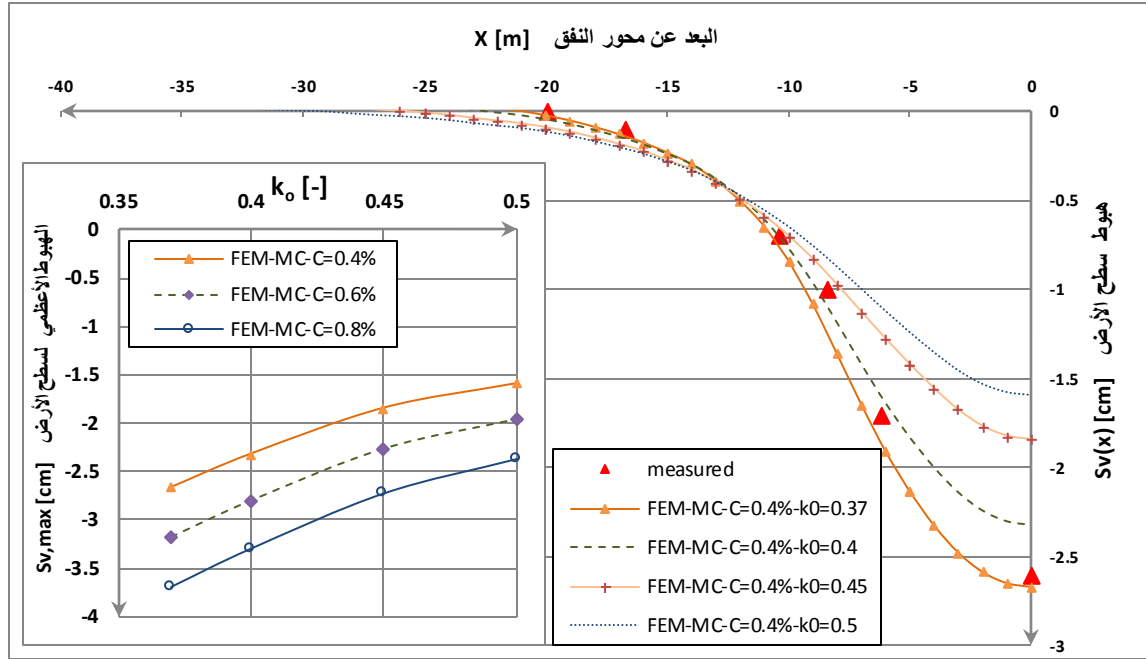
2) دراسة المتغيرات (Parametric study):

من أجل دراسة تأثير الخواص الجيوتهكنيكية لطبقات التربة المحيطة بالنفق (مثل معامل ضغط التربة الجانبي k_0 ، و التماسك 'c'، و زاوية الاحتكاك الداخلي 'φ') و كذلك لدراسة تأثير عمق النفق أو النسبة بين عمق النفق إلى قطره (H/D) تم إجراء دراسة بارامترية من أجل مجالات تغيير هذه العوامل.

• دراسة تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (k_0):

نظراً لأهمية معامل ضغط التربة الجانبي (k_0) و تأثيره على نتائج حساب الهبوط في طرق التحليل العددي تم إجراء عدداً من الحسابات على النموذج مع تغيير قيم (k_0) من (0.37-0.5) و ثبات بقية العوامل. و قد أظهرت النتائج أنه مع تزايد قيم k_0 ينخفض الهبوط الأعظمي لسطح الأرض (كما يوضح الشكل 8) و كذلك يزداد عرض حوض الهبوط المتشكل على سطح الأرض (شكل 9). حيث أن زيادة k_0 من 0.4 حتى 0.5 يسبب تناقص الهبوط الأعظمي من -2.32cm إلى -1.58cm و كذلك يسبب ازدياد نصف عرض الهبوط من 22.5m حتى 30m من أجل نفس قيمة معامل التقلص، أي أن زيادة k_0 بنسبة 25% يسبب تناقص الهبوط الأعظمي بمقدار 32% و ازدياد نصف عرض حوض الهبوط بنفس النسبة تقريباً.

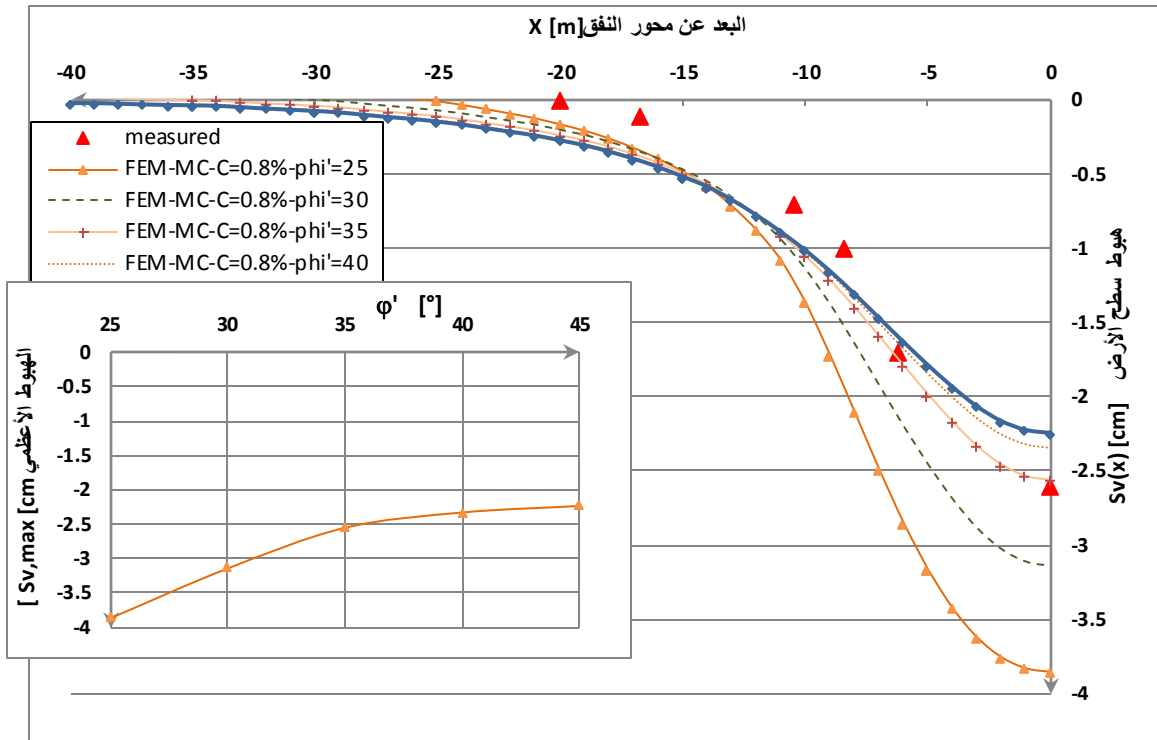
ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة k_0 يؤدي إلى تناقص التشوهات الجانبية الأمر الذي يسبب تناقص الهبوطات فوق النفق و زيادة عرض حوض الهبوط و هذه النتيجة تتوافق مع نتائج الأبحاث السابقة [9].



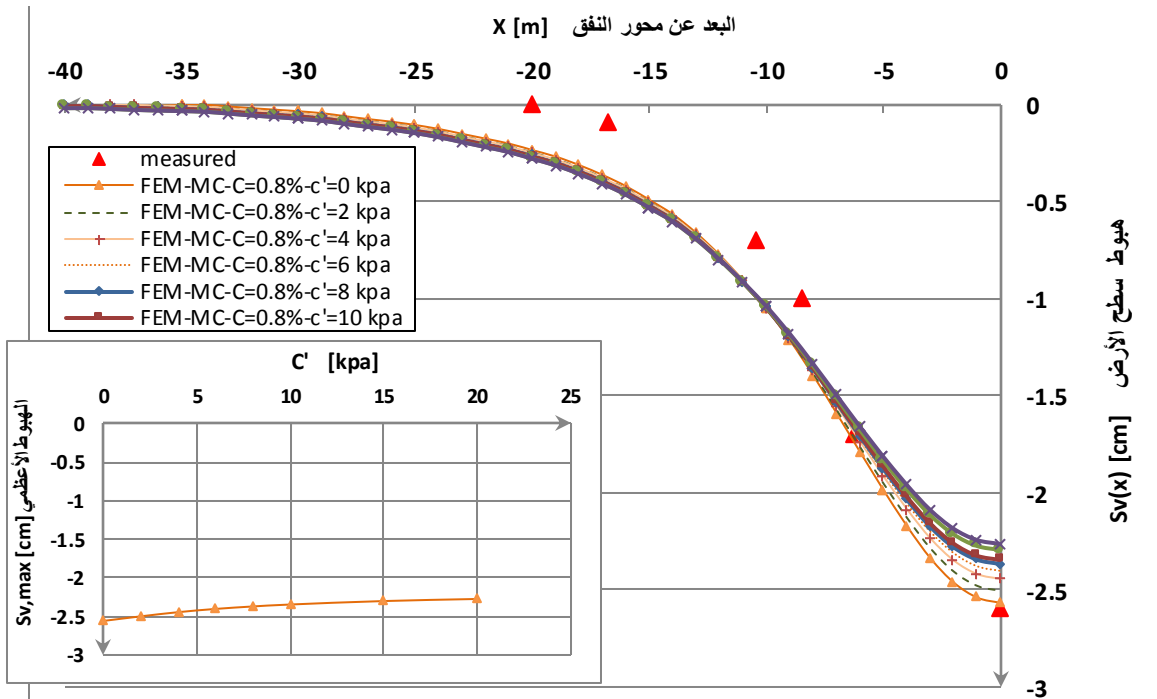
الشكل (8) تأثير المعامل k_0 على شكل و أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض

• دراسة تأثير مقاومة التربة على القص (c' , ϕ'):

أظهرت الدراسة أن لمقاومة القص من خلال البارامترات (c' , ϕ') لقانون مور-كولومب (MC-Model) تأثيراً على الانتقالات و الهبوطات التي ترافق تنفيذ النفق، حيث تتناقص الهبوطات الأعظمية فوق النفق و يزداد عرض حوض الهبوط كلما زادت مقاومة القص (كما يوضح الشكلان (9) و (10)). و يكون تأثير زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ' أكبر من تأثير التماسك c' ، حيث أن زيادة ϕ' من 25° إلى 35° مثلاً أدت إلى تناقص الهبوطات الأعظمية بمقدار 1.3cm أي بنسبة قدرها 33% تقريباً و إلى تزايد نصف عرض حوض الهبوط من 25 إلى 35م بنسبة 40% تقريباً من أجل نفس قيمة معامل التقلص (شكل 9). في حين من جهة أخرى أدى زيادة التماسك بمقدار 10 kpa إلى تناقص الهبوط الأعظمي فقط بمقدار اقل من 9% مع تغير طفيف جداً في عرض حوض الهبوط (شكل 10).



الشكل (9) تأثير زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ' على شكل و أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض

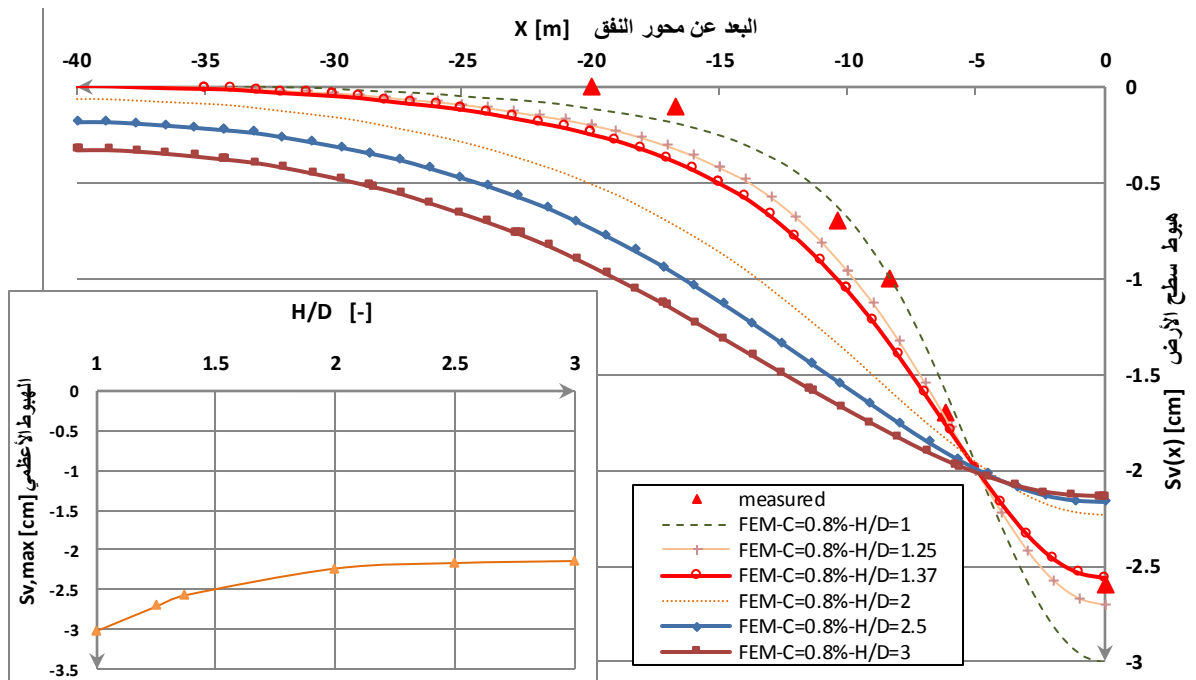


الشكل (10) تأثير التماسك c' على شكل و أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض

ومن الجدير ذكره أن هذا التأثير لـ (c', ϕ') يرتبط بنوع التربة و باعتبار أن التربة المحيطة بالنفق المدروس رملية فإن تأثير ϕ' أكبر من تأثير c' و لكن بالنسبة للتربة المتماسكة يمكن أن يكون تأثير التماسك أوضح.

•دراسة تأثير عمق النفق النسبي (H/D):

بهدف دراسة تأثير عمق النفق النسبي تم إجراء عدد من التحليلات العددية على نماذج ذات أعماق مختلفة للنفق عن سطح الأرض مع ثبات قطر النفق و بقية العوامل و الأبعاد الهندسية الأخرى. الشكل (11) يبين تغير شكل و أبعاد حوض الهبوط وقيم الهبوط الأعظمي مع تغير النسبة (H/D). يوضح الشكل (11) أن العمق النسبي للنفق (H/D) في حال الأففاق السطحية (H/D<2) له تأثير فعال على قيم و شكل هبوطات سطح الأرض فوق النفق، حيث أن ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) من 1 حتى 2 يؤدي إلى ازدياد نصف عرض حوض الهبوط من 32 حتى 58 م تقريباً وعلى الترتيب أي بنسبة 81% و تتناقص بسيط في قيم الهبوط الأعظمي من 3cm- حتى 2.23cm أي بنسبة 26% و من أجل (H/D>2~3) يستمر ازدياد عرض حوض الهبوط و لكن تتناقص الهبوط الأعظمي يصبح مهماً.

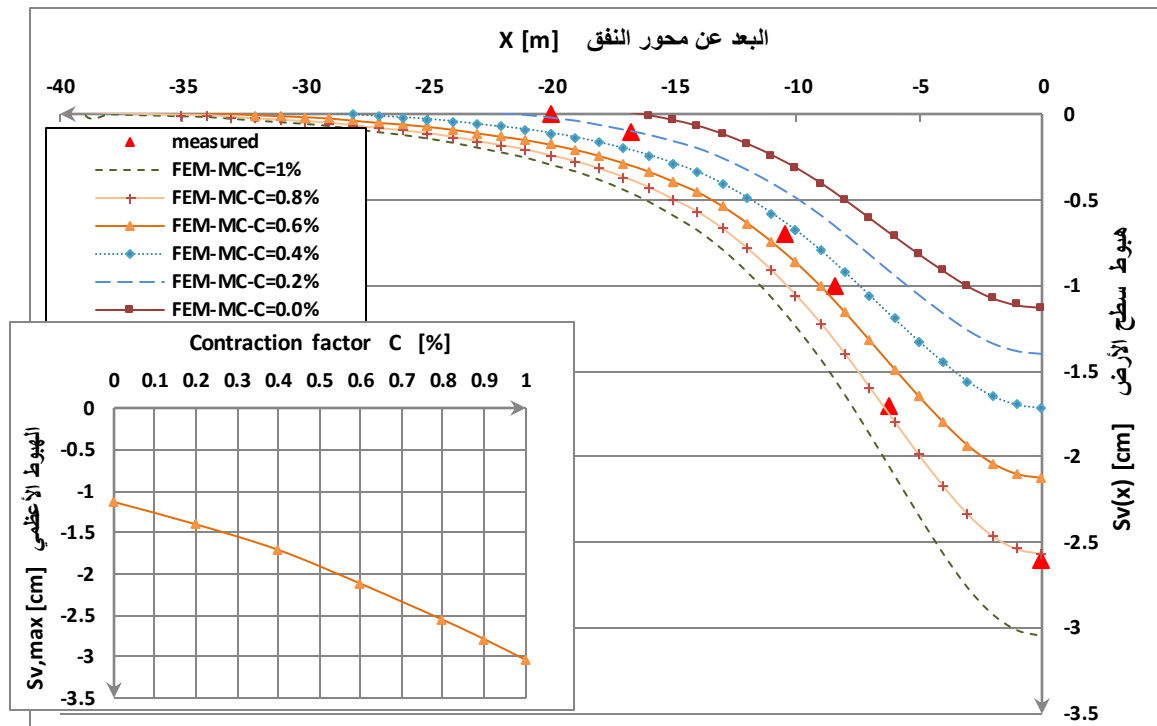


الشكل (11) تأثير عمق النفق (H/D) على شكل و أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض

•دراسة تأثير معامل التقلص C (Contraction Factor):

توجد طرق مختلفة لنمذجة فاقد التربة الحجمي (Ground loss/Volume loss) بسبب عمليات التنفيز وحفر التربة داخل النفق، والطريقة المستخدمة في هذه الدراسة هي طريقة معامل التقلص الذي يأخذ بعين الاعتبار تشوهات التربة داخل النفق أثناء التنفيز من خلال تناقص حجمي لفشرة النفق بنسبة ممثلة في المعامل (C) و هي تعبر عن فاقد التربة كنسبة من مقطع النفق و تتراوح هذه النسبة بين 0.5-1% بالنسبة للطرق الدرية و تكون أكبر في الطرق الأخرى ذات الحفر المتتابع مثل الطريقة النمساوية الجديدة (NATM) و تبلغ فيها 0.8-2%. أظهرت دراسة المتغيرات أن لمعامل التقلص C تأثير كبير على قيم و على شكل حوض الهبوط و تغيره بنسب صغيرة نسبياً يؤدي إلى تغيرات كبيرة و ملحوظة. و الشكل (12) يظهر أن زيادة قيمة C من 0.4% حتى 0.8%

يؤدي إلى تزايد الهبوط الأعظمي من -1.71cm حتى -2.56cm أي بنسبة 150% ، كما يؤدي إلى زيادة نصف عرض حوض الهبوط من 29m حتى 35m بنسبة 20%.



الشكل(12) تأثير معامل التقلص (C) على شكل و أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي لسطح الأرض

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث و من خلال نتائج التحليل العددي ودراسة المتغيرات بطريقة الـ FEM و على ضوء أهداف البحث التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات يمكن تلخيص أهمها فيما يلي:

1. أظهرت نتائج التحليل العددي باستخدام طريقة الـ (FEM) تقارب جيد بين قيم هبوطات سطح الأرض و شكل و أبعاد حوض الهبوط المحسوب من خلال نموذج ثنائي الأبعاد للنفق و التربة المحيطة (2D-FE-Model) مع نتائج القياسات الحقلية على نفق منفذ في الواقع. كما بينت إمكانية التوصل إلى نتائج قريبة جداً للقياسات الحقلية من خلال نماذج (2D) لدراسة الهبوطات و من استخدامها في التصميم.

2. أظهرت نتائج المقارنة بين طرق الحساب المبسطة التحليلية و التجريبية المستخدمة في الحياة العملية و بين قيم القياسات الحقلية نتائج متباينة، حيث أن قيم الهبوط الأعظمية وفق طريقة (Sagassetta, 1987) هي أصغر من القيم المقاسة حقلياً بنسبة 35%، بينما قيم الهبوط المحسوبة وفق طريقة (Limanov's, 1957) هي أكبر من القيم المقاسة بنسبة 33%. في حين أن علاقة (Ecrelebi, 2005) أعطت نتائج قريبة نسبياً من القياسات الحقلية ، بينما أقرب النتائج للقيم المقاسة حقلياً هي تلك المحسوبة وفق نتائج التحليل العددي (FEM-Model) المقدمة في هذه الدراسة.

3. بينت الدراسة البارامترية أن قيم الهبوط الأعظمي و شكل و أبعاد حوض الهبوط المتشكل فوق النفق يتأثر بشكل فعال بمعامل ضغط التربة الجانبي (k_0) و بالعمق النسبي للنفق (H/D) و بمقاومة القص لطبقات التربة

المحيطة بالنفق و لكن العامل الأكثر حساسية بالنسبة للهبوطات هو المعامل C المرتبط بتقنية التنفيذ والممثل في هذه الدراسة بمعامل التقلص (Contraction factor) المعبر عن فاقد التربة الحجمي كنسبة من حجم مقطع النفق في المتر الطولي، حيث أن زيادة معامل التقلص C بنسب صغيرة تسبب تزايد كبير نسبياً في قيم الهبوط الأعظمي و بشكل شبه خطي وكذلك إلى تزايد في عرض حوض الهبوط.

4. أظهرت الدراسة أن زيادة معامل ضغط التربة الجانبي k_0 إلى ازدياد ملحوظ لعرض حوض الهبوط و تناقص ملحوظ لقيم هبوط سطح الأرض. و نفس النتيجة تم التوصل لها بالنسبة لزاوية الاحتكاك الداخلي ρ' ، بينما لم تثبت الدراسة وجود تأثير فعال للتماسك ضمن الحدود المدروسة بالنسبة للتربة الحالية.

5. أثبتت الدراسة أن العمق النسبي للنفق (H/D) في حال الأنفاق السطحية ($H/D < 2$) له تأثير فعال على قيم و شكل هبوطات سطح الأرض فوق النفق، حيث أن ازدياد العمق النسبي (H/D) حتى 2 يسبب ازدياد ملحوظ في عرض حوض الهبوط و تناقص بسيط في قيم الهبوط الأعظمي و من أجل ($H/D > 2$) يستمر ازدياد عرض حوض الهبوط و لكن الهبوط الأعظمي يصبح مستقراً عند قيمة محددة.

التوصيات:

يوصى بتوسيع مجال البحث مستقبلاً من خلال إجراء أبحاث تأخذ بعين الاعتبار كل مما يلي:

1. دراسة التأثير الفراغي على هبوطات سطح الأرض من خلال نماذج ثلاثية الأبعاد (3D-FE-Model)
2. دراسة تأثير شكل و أبعاد المقطع العرضي للنفق على هبوطات سطح الأرض.
3. دراسة تأثير تكنولوجيا تنفيذ النفق على الهبوطات و خصوصاً تدعيم جبهة الحفر الأمامية.
4. دراسة تأثير هبوط سطح الأرض الموافق لتنفيذ النفق على الأبنية و المنشآت المتواجدة على السطح.

المراجع:

- [1] Atkinson, J.H., and Potts, D.M., "Subsidence above shallow tunnels in soft ground", *Jnl. Geotech. Eng. Div., ASCE, GT4*, PP. 307-325, 1977.
- [2] Attewell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R., "Soil Movements induced by tunneling and their Effects on Pipelines and Structures", Blackie, Glasgow, 1986.
- [3] Bucek, R., "Assessment of risk of building damage due to tunnelling", 2009, www.groundloss.com
- [4] Ercelebi, S., H. Copur, N. Bilgin, and C. Feridunoglu, "Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels via 3D FE and empirical methods", in *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Erdem & Solak (eds), Taylor & Francis Group, London, PP.163-169, 2005.
- [5] Foxall, W., Cunningham, C., Mellors, R., Templeton, D., Dyer, K., White, J., "Detection and Characterization of Underground Facilities by Stochastic Inversion and Modeling of Data from the New Generation of Synthetic Aperture Satellites", *Final Report of U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory*, 2012.
- [6] Limanov, J.A., "Infolge Tunnelbau in kambrischen Tonen Leningrad", *Inst. Inzh.Zhelezu, Transport*, 1957.
- [7] Mair, R.J, Gunn, M.J. and O'Reilly, M.P., "Ground Movement Around Shallow Tunnels in Soft Clay", *10th International Conference on soil mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, PP. 323-328, 1983.
- [8] Meissner, H., "Tunnelbau unter Tage-Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 Numerik in der Geotechnik". *Geotechnik*, 19 (2):PP. 99-108, 1996.

[9]Moeller, S.C., and Vermeer, P.A.,“On numerical simulation of tunnel installation”,*Tunn. Underg. Space Tech.*, 23, PP. 461 – 475, 2008.

[10]Peck, R.B., “Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground”,*Proceedings 7th international Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, State-of-the-Art Volume, PP. 225-290,1969.

[11]PLAXIS. “Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses-*User's Manual*”, Version 8.2-8.5,Delft, The Netherlands, 2005.

[12]Sagasetta, C., “Analysis of underground soil deformation due to the ground loss”,*Geotechnique*, Vol. 37, No. 3, PP. 301-330, 1987.