

## نمذجة عددية بطريقة العناصر المنتهية لتشوهات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية في الترب الطرية

الدكتور وائل حسين حرفوش \*

الدكتور مالك توفيق حسن \*\*

أشرف شبلي \*\*\*

(تاريخ الإيداع 24 / 5 / 2015. قُبل للنشر في 30 / 8 / 2015)

### □ ملخص □

تتناول هذه المقالة دراسة هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق السطحية باعتماد تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM، بافتراض شرط الحقل الأخضر، والذي يعني عدم وجود أية حمولات على سطح الأرض فوق النفق. وقد تم نمذجة المسألة باعتماد الحالة التشوهية المستوية باعتماد سلوك من-لدن لا خطي لنمذجة السلوك الاجهادي - التشوهي التربة وفق موديل (Hardening Soil Model: HS-Model). تتضمن هذه المقالة مقارنة بين نتائج التحليل العددي و قياسات الحقلية مرجعية لمشاريع منفذة كما تتضمن دراسة بارامترية لأغلب العوامل التي تؤثر على هبوط سطح الأرض.

**الكلمات المفتاحية:** تشوهات سطح الأرض - حوض الهبوط - الأنفاق السطحية - طريقة العناصر المنتهية FEM

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

## Finite Element Modeling of the Ground Surface Deformations induced by shallow Tunnels in Soft Ground

Dr. Wael H. Harfoush\*  
Dr. Malek T. Hasan\*\*  
Ashraf Shebly\*\*\*

(Received 24 / 5 / 2015. Accepted 30 / 8 / 2015)

### □ ABSTRACT □

In this paper, ground surface settlement induced by tunneling have been studied using 2D finite element analysis. By assuming greenfield conditions, which means that there is no loads on the soil surface above the tunnel.

A FE study was conducted in which an elasto-plastic constitutive model was adopted to model the soil behavior (MC,HS).

This paper include Comparison between actual field measurements with (FEM) results, and parametric study for the most factors that influence ground surface settlement.

**Keywords:** Ground Surface Deformations–Settlement Trough–Shallow Tunnels–Finite Elements Method (FEM)

---

\*Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia –Syria.

\*\*Assistant Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia –Syria.

\*\*\*Postgraduate, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia –Syria.

## مقدمة:

إن بناء الأنفاق داخل المدن المزدهمة يحمل العديد من المخاطر، حيث أن عمليات تنفيذ الأنفاق تسبب انتقالات في التربة قد تصل إلى سطح الأرض بشكل هبوطات تمتد عبر منطقة تأثير محددة، هذه الهبوطات يمكن أن تسبب أضرار متعددة على المنشآت فوق سطح الأرض (أبنية و غيرها) وكذلك على المنشآت تحت أرضية. وهذه الأضرار التي قد تنشأ، تتطلب كلفة اقتصادية كبيرة من أجل إعادة تأهيل هذه المنشآت و صيانتها. و لهذه الأسباب أصبح تقدير الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق داخل المدن المزدهمة من أساسيات مراحل التخطيط الناجح لمشاريع الأنفاق و كذلك التصميم، 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.

## أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى دراسة تشوهات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية في التربة الطرية باعتماد تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM، بافتراض شرط الحقل الأخضر، و الذي يعني عدم وجود أية حمولات على سطح الأرض فوق النفق من خلال دراسة تأثير أهم العوامل المؤثرة على هذه التشوهات و على شكل و أبعاد حوض الهبوط المتشكل وهي:

1. تأثير النسبة بين عمق النفق و قطره و ذلك بتثبيت القطر و تغيير سماكة التربة أعلى النفق ثم بتثبيت السماكة و تغيير القطر.
2. تأثير خواص التربة المحيطة بالنفق.
3. تأثير معامل التقلص (Contraction factor).

يساهم هذا البحث في توسيع الفهم الهندسي لهذه المشكلة، بهدف التقدير المبدئي لقيم الهبوط قبل البدء بتنفيذ النفق استناداً إلى تقنيات التنفيذ المعتمدة وخواص التربة للموقع المعتمد لتنفيذ النفق، وذلك لاتخاذ الإجراءات الوقائية المناسبة للتقليل من تأثير الهبوط على المنشآت أعلى النفق.

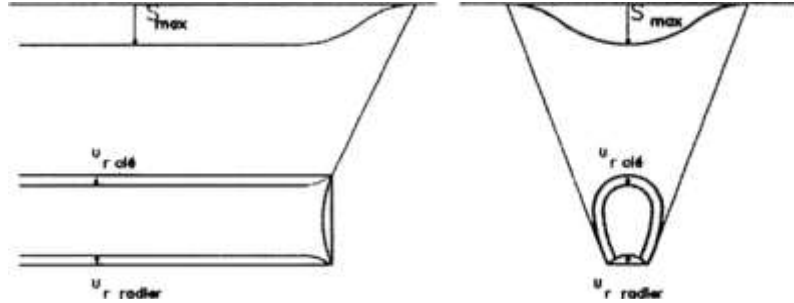
## منهجية البحث:

تم تقسيم البحث إلى مرحلتين أساسيتين:

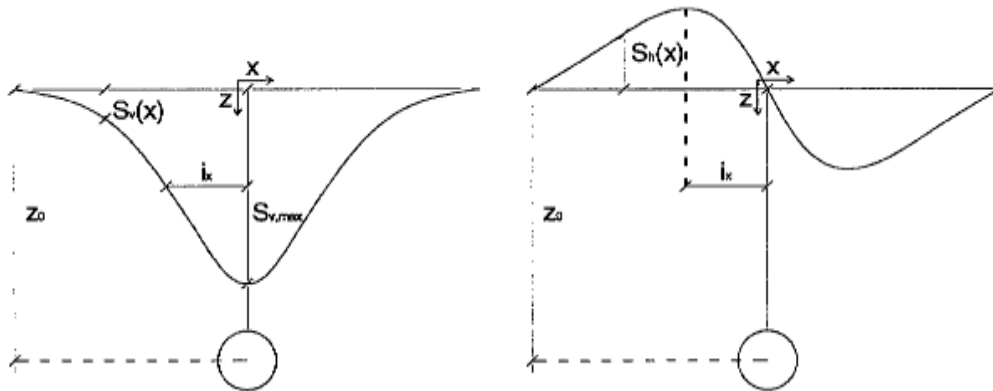
1. إجراء نمذجة عددية لنفق سطحي منفذ في تربة طرية تم فيه إجراء قياسات حقلية بهدف معايرة النموذج العددي و التحقق من صلاحية النتائج من خلال مقارنة نتائج النموذج مع القياسات الحقلية المرجعية.
2. استخدام بارامترات قانون المادة من النموذج المعايير من أجل تحليل عددي وإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على تشوهات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ النفق في الاتجاه العرضاني.

## الدراسات و الأبحاث السابقة:

يترافق تنفيذ الأنفاق السطحية و خصوصاً في الترب الطرية مع تشوهات عديدة لسطح الأرض و ينتج عنها تشكل حوض هبوط عند سطح الأرض يكون فيه الانتقال الأعظمي فوق محور النفق والشكل (1) يوضح شكل حوض الهبوط و الانتقالات الأعظمية في المقطع الطولي والعرضي للنفق. و تجدر الإشارة انه في هذه المقالة سيتم دراسة التشوهات و الانتقالات التي تحدث في المقطع العرضي فقط، و التي يمكن تقسيمها إلى قسمين تشوهات بشكل انتقالات شاقولية (هبوطات) و تشوهات بشكل انتقالات أفقية كما يوضح الشكل (2).



شكل(1):هبوطات سطح الأرض الناتجة عن الأنفاق في المقطع الطولي و العرض [1]



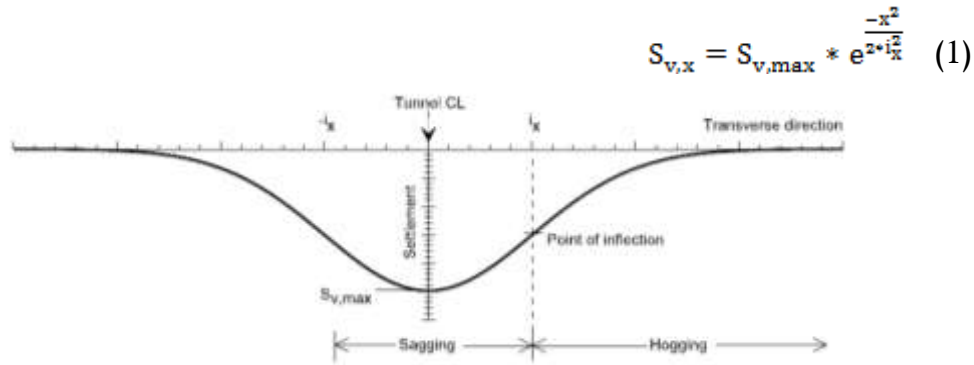
شكل (2): هبوطات شاقولية وانتقالات أفقية لسطح الأرض في الاتجاه العرضي

حيث يعبر (  $S_{v,max}$  ) في الشكلان (1 و 2) عن الهبوط الشاقولي الأعظمي لسطح الأرض الناتج عن تنفيذ النفق و يعبر ( $S_{h,x}$ ) عن الانتقالات الأفقية. و تقسم طرق حساب الهبوط الناتج عن تنفيذ الأنفاق إلى:

1. طرق تجريبية و نصف تجريبية.
2. طرق تحليلية نظرية.
3. طرق التحليل العددي.

الطرق التجريبية و النصف تجريبية:

أغلب المراجع و الأبحاث العلمية التي تناولت موضوع تشوهات سطح الأرض فوق الأنفاق السطحية تعود إلى الأبحاث التي قام بها ( Peck, 1969 ) والذي أعطى معادلة رياضية لحوض الهبوط عند السطح بالاتجاه العرضي من خلال تابع التوزيع النظامي لغوص (شكل 3) كما يلي:



الشكل (3) حوض الهبوط بالاتجاه العرضاني [3]

حيث  $-x$ : المسافة الأفقية حتى المحور الشاقولي للنفق.

$S_{v,max}$  - الانتقال الأعظمي لسطح الأرض فوق محور النفق.

$-i_x$  معامل عرض حوض الهبوط، و الذي يمثل الانحراف المعياري في معادلة غوص الأصلية، حيث يمكن من الشكل (3) استنتاج أن منحنى حوض الهبوط يحصل على ميل أعظمي عند نقطة الانعطاف ( $i_x$ ) المحددة بالمسافة الأفقية عن محور النفق، و هذه النقطة تقسم حوض الهبوط إلى منطقة وسطية و منطقتين طرفيتين.

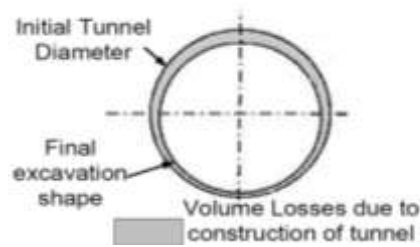
بمكاملة العلاقة (1) نحصل على حجم حوض الهبوط بوحدة الطول:

$$v_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s_v * d_x = \sqrt{2\pi} i_x * s_{v,max} \quad (2)$$

في التربة المنخفضة النفاذية كالغضار القاسي، رد الفعل الأولي للتربة على إنشاء النفق يمكن اعتباره غير مصرف، و بالتالي فإن حجم حوض الهبوط عند السطح يساوي حجم التربة التي تحفر زيادة عن الحجم النظري للنفق. ومن الشائع تحديد هذا الحجم الإضافي كنسبة من حجم النفق النظري بوحدة الطول ويعطى كنسبة مئوية :

$$VL = \frac{v_s}{\pi * \frac{D^2}{4}} \quad (3)$$

VL: فاقد الحجم (Volume Loss) موضح بالشكل (4)، D: قطر النفق الخارجي

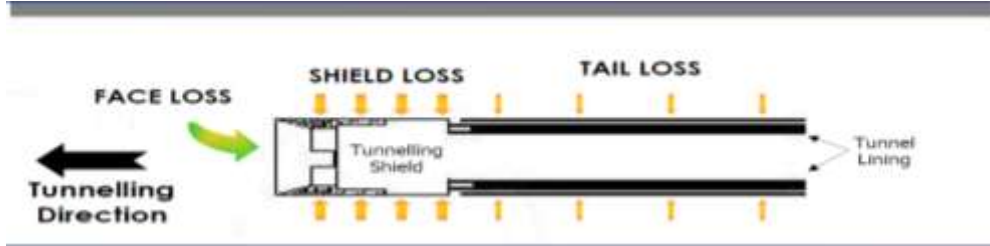


الشكل (4) فاقد الحجم المتشكل حول النفق [4]

فاقد الحجم عند استخدام الدروع ينتج من أربعة مصادر كما هو موضح في الشكل (5):

1. فاقد الحجم من واجهة الحفر : ينتج عن انتقالات التربة أعلى الدرع باتجاه الواجهة، هذه الانتقالات تعتمد على مستوى مقاومة التدعيم عند واجهة الحفر، و على خواص التربة و الخواص الهيدروليكية.

2. فاقد الحجم على طول الدرع: ينتج عن القطع الزائد للتربة، صعوبة توجيه الدرع، تضيق الدرع و ازدياد خشونة القواطع.
3. فاقد الحجم عند ذيل الدرع : ينتج عن الفراغ المتشكل خلف الدرع من سماكة الذيل، وحجم الفراغ بين الوجه الداخلي لقشرة الذيل و الوجه الخارجي لعناصر قشرة النفق.
4. فاقد الحجم الناتج عن تشوه القشرة النفقية.



الشكل (5) مصادر فاقد الحجم حول النفق [8]

بجمع العلاقات السابقة نحصل على العلاقة المعدلة التالية :

$$S_{v,x} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} * \frac{VL * D^2}{4 * i_x} * e^{\frac{-x^2}{i_x^2}} \quad (4)$$

(O'Reilly & New, 1982) أظهروا أن الانتقالات الأفقية لتربة السطح في الاتجاه العرضاني يمكن أن

تشتق من المعادلات السابقة بافتراض أن الانتقالات الناتجة تحصل باتجاه نقاط متوضعة على الخط العمودي المار بمركز النفق و تعطى بالعلاقة :

$$S_{h,x} = -\frac{-x * S_{v,x}}{z_0} \quad (5)$$

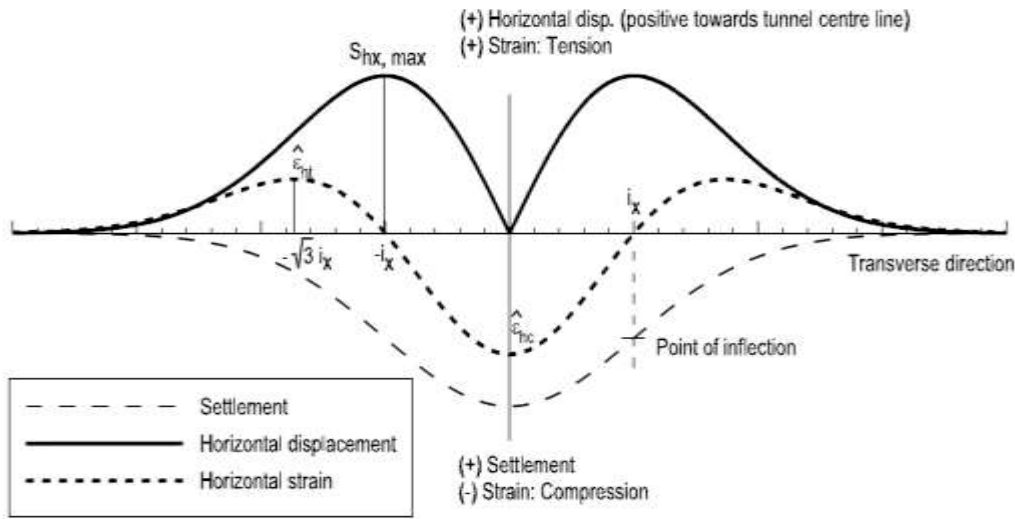
الشكل (6) يظهر الانتقالات الأفقية مع حوض الهبوط ، يمكن ملاحظة أن الانتقال الأفقي الأعظمي يحصل عند نقطة الانعطاف، التشوه الأفقي بالاتجاه العرضاني مبين بالشكل 6، يتم حسابه من الانتقال الأفقي مع الأخذ بعين الاعتبار ل: X:

$$\varepsilon_{hx} = \frac{S_{v,x}}{z_0} * \left( \frac{x^2}{i_x^2} - 1 \right) \quad (6)$$

هذه المعادلة تقود إلى ضغط يعرف بقيمة سالبة بينما القيمة الموجبة تشير إلى الشد، هذه الإشارات و التي هي

عكس الشائع استخدامه لتعريف التشوهات في ميكانيك التربة، سوف يتم اعتمادها عند وصف التشوهات الأفقية،

باعتبار إن التشوهات الأفقية معيار أساسي عند وصف تشوهات البناء الناتجة عن الهبوط.



الشكل (6) يبين توزيع الانتقالات السطحية الأفقية و التشوهات بالاتجاه العرضي مع حوض الهبوط [3]

يظهر الشكل (6) وجود منطقة منضغطة بين نقطتي الانعطاف ومنطقة مشدودة خارجهما، القيمة العظمى للتشوهات الأفقية  $\epsilon_{hx}$  تقسم إلى قيم أعظمية للضغط و للشد و  $\epsilon_{ht}$  و  $\epsilon_{hc}$ ، هذه القيم تحصل عند  $x=0$  و  $x = \sqrt{3}i_x$  على الترتيب .

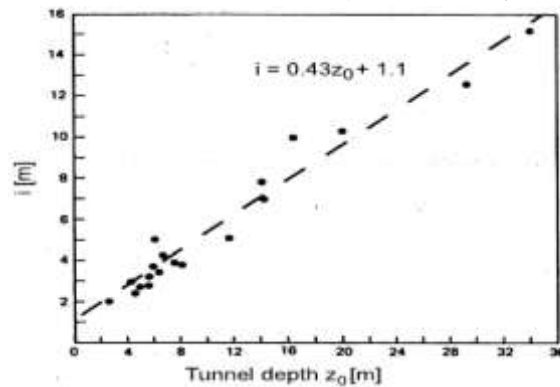
معامل عرض الحوض ( $i_x$ ): كما شرح سابقاً أن (i) يصف عرض حوض الهبوط. في نموذج الهبوط العرضي تم تعريفه بالمسافة إلى نقطة الانعطاف أو نقطة الانحدار الأعظمي من الخط العمودي المار بمركز النفق. (O`Reilly & New, 1982) قدموا (19) حالة لدراسة إنشاء نفق في الغضار و وضعوا معامل عرض الحوض (i) مقابل عمق النفق المدروس ( $Z_0$ ) كما هو مبين بالشكل (7) ومن المقاربة الخطية حصلوا على العلاقة:

$$i = 0.43Z_0 + 1.1 \quad (7)$$

حيث ( $Z_0, i$ ) مقياسه بالـ (m). الشكل (7) يظهر أن الخط المقارب يمر بالقرب من مركز الإحداثيات. (O`Reilly & New, 1982) بسطوا المعادلة فأصبحت:

$$i = K.Z_0 \quad (8)$$

من بياناتهم استنتجوا أنه بالنسبة للغضار ( $K=0.5$ ) ملائمة لأغلب أغراض التصميم، كذلك أشاروا أن هذه القيمة يمكن أن تتغير بين (0.4→0.7) للغضار الناعم و المتماسك.



الشكل (7) العلاقة بين موقع نقطة الانعطاف على السطح i وعمق النفق [3]

(Rankin, 1988) قدم نتائج دراسة مشابهة لكن مع قاعدة بيانات أوسع، ونتائجه أكدت القيمة (  $K=0.5$  )

للغضار:

$$(i = 0.5Z_0) \quad (9)$$

(Kimura & Mair, 1981) قدموا نتائج مشابهة من اختبارات الطرد المركزي ، علاوة على ذلك نتائجهم أشارت إلى أن القيمة (  $K=0.5$  ) يتم الحصول عليها بالاعتماد على درجة التدعيم ضمن النفق. لقد استنتجوا أن القيمة  $K$  تعتمد على تقنية حفر النفق.

سوف نورد العديد من العلاقات لتعيين معامل عرض الحوض (i):

الجدول (1)علاقات تجريبية و نصف تجريبية

ملاحظات	العلاقة	الباحث و التاريخ
(n=0.8 - 1)	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z}{R}\right)^n$	(Peck, 1969)
تربة رملية جافة	$i=0.25(C+D)$	(Atkinson & Potts, 1977)
التربة الغضارية	$\frac{2i}{D} = \frac{Z}{D}$	(Mair et al, 1981)
التربة الغضارية	$(i=K*Z)$	(O`Reilly & New, 1982)
التربة الغضارية	$(i=0.5*Z)$	(Rankin, 1988)
التربة الغضارية الطرية	$\frac{2i}{D} = 1 + 0.58\left(\frac{Z}{D}\right)$	(Lee et al 1999)

حيث: Z: العمق حتى محور النفق. R: نصف قطر النفق. C: سماكة التربة حتى أعلى النفق. D: قطر النفق.

**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 الثالث الأخيرة باستخدام هذه الطريقة في التنبؤ بالهبوطات الناتجة عن الأنفاق مثل ( Franzius, 1996 and Addenbrooke, 2003 ) و غيرهم كثيرين.

هذه الطرق تهدف إلى حساب هبوط التربة في كل نقطة ضمن التربة حول فتحة النفق. تسمح هذه الطرق بإدخال تأثير طريقة التنفيذ و خواص التربة ( الأبعاد ، الاجهادات الابتدائية ، سلوك التربة ، مراحل الحفر .....).

الطريقة الأكثر استخداماً تحليل ثنائي البعد ( FEM ) في المستوي العمودي على محور النفق.

أن الطرق العددية تسمح عند الضرورة بالنمذجة الكاملة للتأثير المتبادل بين التربة و أعمال تنفيذ النفق و الأبنية المتواجدة في الأعلى. هذه الطريقة يمكن استخدامها للحصول على قيم الحمولات المطبقة على بطانة النفق، وتقديم تقييم جيد لتصميم النفق، كذلك هذه التقنية تسمح بتحديد شامل لكل بارمترات التصميم. لكن تطبيقها يبقى معقد نسبياً فهو يحتاج إلى دقة عالية في النمذجة و المعطيات المستخدمة من خواص تربة و بطانة النفق بالإضافة إلى دقة إدخال التأثير المتبادل بين التربة و النفق والحاجة إلى الدقة في اختيار حدود النموذج.

تقود هذه الطرق في حالة الأنفاق السطحية إلى تمثيل غير دقيق لتأثير تنفيذ الأنفاق على سطح الأرض، وعملياً في الترب الأقل تماسكاً فإن الموديل ثنائي الأبعاد ( FEM ) يميل إلى توزيع التشوهات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق على



مساحة أعرض عن تلك المأخوذة من القياسات الحقلية، هذا ربما ينتج بسبب انتشار أفقي للتشوهات أكثر من الواقع و كذلك حوض الهبوط أعرض و بالتالي الهبوط الأعظمي للسطح أقل من الواقع.

**الطرق النظرية التحليلية:** تتطرق 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.

قدم (Sagaset, 1987) بعض العلاقات التحليلية لتعيين حقل التشوهات في التربة المتجانسة والايزوتروبية الغير قابلة للانضغاط ( $\nu=0.5$ ) نتيجة فاقد التربة بسبب حفر النفق.

### النمذجة العددية (FE-Modeling):

#### 1) البرنامج المستخدم (FE-Program):

تم في هذه البحث استخدام برنامج PLAXIS, Ver.8.2-5 هو برنامج يستخدم طريقة العناصر المنتهية من اجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيوتكنيكية، ويعطي إمكانية استخدام عدد كبير من قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الاجهادي-التشوهي للتربة، إضافة 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 عن تشوهها نحو داخل النفق نتيجة انضغاط قشرة النفق نحو الداخل.

#### 2-5) معطيات النفق و القياسات الحقلية:

الجدول (2) قياسات (Bangkok MRT) [1]

Sv	X
[mm]	[m]
0	-30
-0.2	-28
-1	-26
-0.6	-24
0.4	-22
-0.4	-20
-1.6	-18
-3.6	-16
-5.6	-14
-7.6	-12
-9.6	-10
-11	-8
-12.4	-6
-13.8	-4
-14.8	-2
-15	0

يهدف التحقق لاحقاً من صلاحية نتائج التحليل العددي بطريقة FEM و معايرة سلوك النموذج المستخدم للتربة تم إجراء نمذجة عددية بطريقة العناصر المنتهية لنفق (MRT Tunnel) الذي تم في تنفيذه في بانكوك، بقطر خارجي للنفق ( $Da=6.4m$ ). استخدم في تنفيذ هذا النفق درع هيدروليكي (Slurry Shield) يعتمد على تدعيم دائم أمامي، و قشرة النفق عبارة عن حلقات من قطع بيتونية مسلحة مسبقة الصنع بسماكة (0.3m)، فاقد الحجم الناتج في النقطة المدروسة ( $VL=0.95\%$ ) حيث سيتم حقنه بالمونة الاسمنتية (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). عمق النفق ( $H=17.1m$ ) اعتباراً من سطح الأرض وحتى مركز النفق، مناسب طبقات التربة وسماكتها وخواصها موضحة في الجدول (3).

جدول (3) خواص طبقات التربة حول نفق (MRT Tunnel)

قانون مور-كولومب (Mohr-coulomb – Model : MC-Model)									
$R_{inter}$	$\nu$	E [Mpa]	$\psi$ [°]	$c'$ [kpa]	$\phi'$ [°]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Depth [m]	الطبقة
1	0.33	5	0	5	22	16	15.5	0.0	الطبقة 1:
1	0.33	60	0	18	22	18	17.5	-15.0	الطبقة 2:
0.7	0.3	80	6	0	36	20	19	-20	الطبقة 3:

جدول (4) خواص قشرة نفق (MRT Tunnel)

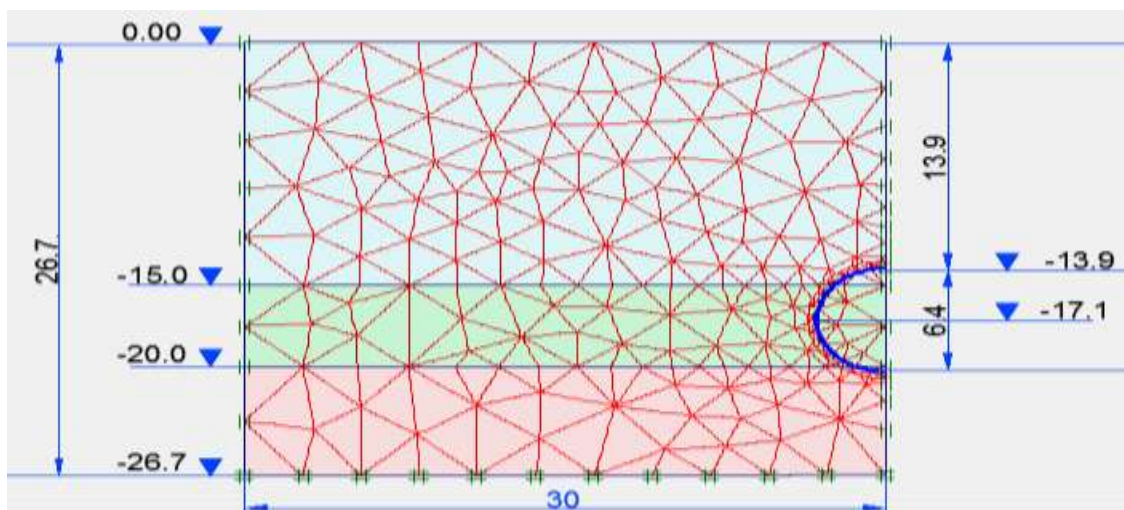
t [cm]	E [Mpa]	$\nu$	EI [MNm <sup>2</sup> ]	EA [GN/m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	M-Model	Modeling	
30	35000	0.15	19.7	10.5	24	liner elastic	Beam Elements	قشرة النفق (lining)

**3) 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 (Meissner, 1996). الشكل (8) 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 عناصر مثلثية مكونة من 15 عقدة (triangular 15 Nodes Element) عددها (336). إن خواص التربة المستخدمة لنمذجة سلوك طبقات التربة المحيطة بالنفق من خلال قانون مور-كولومب (MC-Model) وقانون (HS-Model) تم تلخيصها في الجدولين (4.3). أما بالنسبة لقشرة النفق فقد تم نمذجتها من خلال عناصر (Beam elements) ذات سلوك مرن خطي و خواصها موضحة في الجدول (4)، حيث تم تخفيض الصلابة على الانعطاف (EI) إلى (EI/4) لأخذ تأثير الفواصل بين القطع البيتونية المسبقة الصنع بعين الاعتبار.

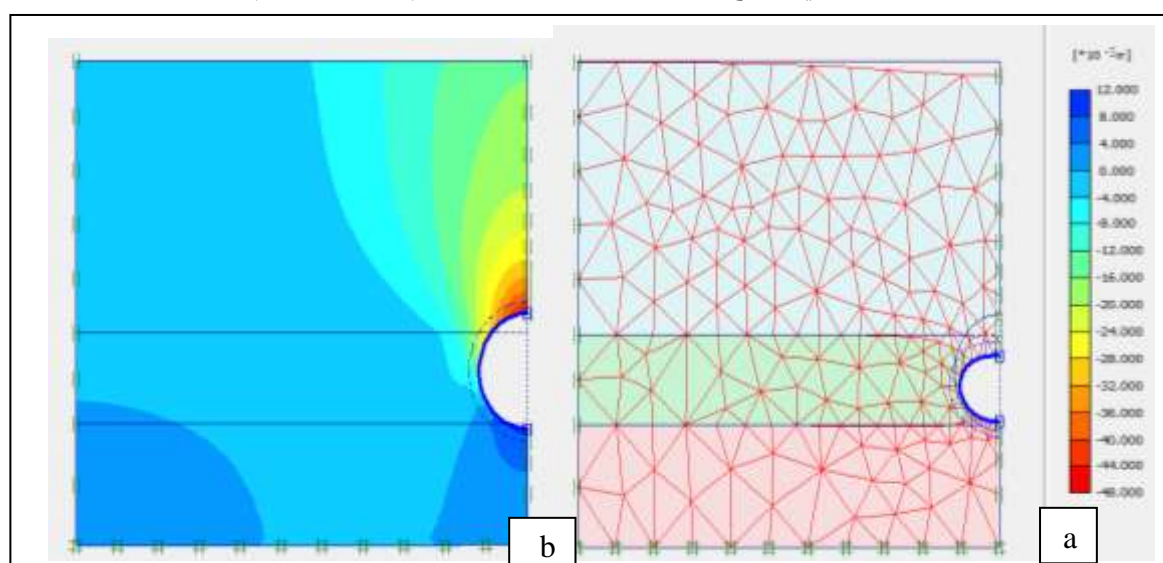
جدول (5) بارامترات الموديلات الحسابية (MRT Tunnel)

قانون (Hardening soil – Model : HS-Model)											
Ko [-]	$\nu$ [-]	$\nu_{ur}$ [-]	m [-]	$E_{ur}^{ref}$ [Mpa]	$E_{oed}^{ref}$ [Mpa]	$E_{50}^{ref}$ [Mpa]	$c'$ [kpa]	$\phi'$ [°]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	الطبقة
0.625	0.33	0.2	1	24.5	8.177	8.177	5	22	16	15.5	الطبقة 1:
0.625	0.33	0.2	1	202.9	67.6	67.6	18	22	18	17.5	الطبقة 2:
0.412	0.3	0.2	0.5	190	64.2	64.2	0	36	20	19	الطبقة 3:



الشكل (8): النموذج العددي المعتمد في التحليل

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 القشرة، أما في المرحلة الثانية إضافة معامل تقلص (  $C = \text{Contraction factor}$  ) لقشرة النفق. تم حساب الاجهادات الابتدائية والاجهادات الثانوية المتشكلة حول النفق و كذلك الانتقالات في النموذج و خصوصاً الانتقالات الشاقولية على سطح الأرض. و الشكل (9) يوضح الانتقالات الشاقولية التي حدثت نتيجة تنفيذ النفق، حيث أن قيمة الانتقال الأعظمي لسطح الأرض فوق النفق بلغت قيمة (-15.48 mm).



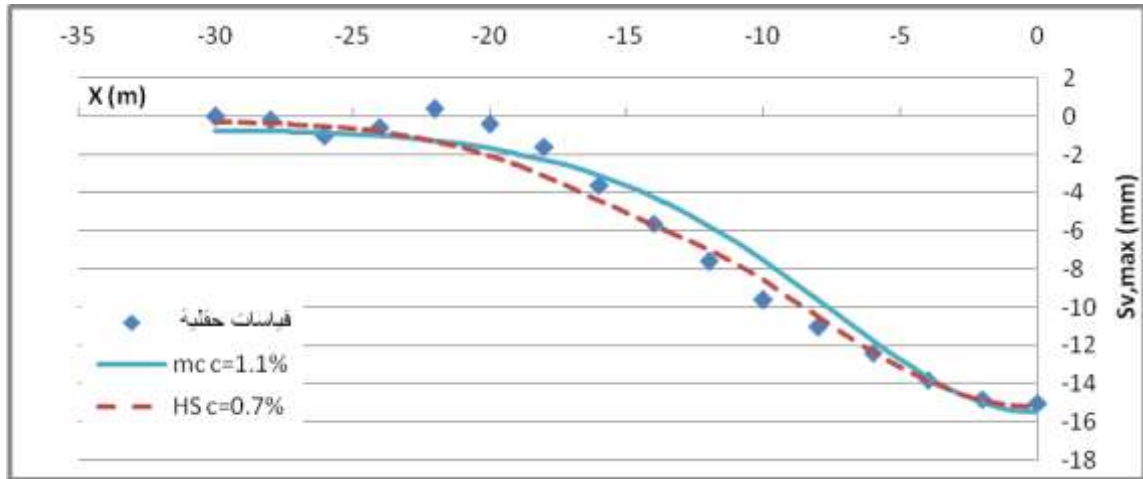
الشكل (9): (a) الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق (b) الشبكة المشوهة بعد تنفيذ النفق (مكبرة 50 مرة).

كذلك للتقليل من تأثير الشروط الطرفية عند الحدود الخارجية للنموذج على النتائج تم اختيار عدة أبعاد للنموذج يتغير فيها عرض النموذج ضمن القيم التالية (40,60,90)m، فوجد ان قيمة الهبوط عند (x=30m) تنخفض إلى أصغر قيمة عند عرض نموذج ( W=60m ) و بعدها تصبح التغيرات طفيفة، لذلك تم اعتماد عرض نموذج (W=10\*D) في الدراسة لاحقاً.

## النتائج والمناقشة:

### (1) معايرة النموذج والتحقق من صلاحية النتائج:

بهدف التحقق من دقة النتائج التي تم التوصل إليها تم مقارنة قيم هبوطات سطح الأرض المقاسة حقلياً أثناء تنفيذ نفق (Bangkok MRT) مع قيم الهبوطات المحسوبة من النموذج العددي للنفق باستخدام قانون مور كولومب. لقد أظهرت المقارنة الموضحة في الشكل (10)، أن منحنى حوض الهبوط المحسوب من أجل معامل تقلص قدره (C=1.1%) يعطي اقرب قيم للقياسات الحقلية المنفذة على سطح الأرض. حيث أن قيمة الهبوط الأعظمي لسطح الأرض المحسوب فوق محور النفق بلغ ( -15.48 mm ) وهي قريبة جداً من القيمة المقاسة و قدرها ( -15 mm ) كما يوضح الجدول (2)، لكن حوض الهبوط المحسوب أصيق من حوض الهبوط المقاس. كما تم إجراء تحليل للنموذج باستخدام (HS-Model) وأعطى نتائج جيدة مقارنة بالقياسات الحقلية عند قيمة لمعامل التقلص ( C=0.7% )، حيث تظهر النتائج أن (HS-Model) يعطي هبوط أعظمي فوق محور النفق أقل و حوض أعرض مقارنة مع (MC-Model).



الشكل(10): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Bankok)

### (2) الدراسة البارامترية:

تم إجراء دراسة بارامترية من أجل دراسة تأثير أهم العوامل و البارامترات المؤثرة على هبوطات سطح الأرض فوق النفق على ضوء أهداف البحث و ذلك على نماذج عددية مختلفة، يظهر الجدولان ( 7.6 ) خصائص التربة المعتمدة في الدراسة و النتائج كانت كما يلي:

جدول (6). خواص الغضار المرجعي المعتمد في الدراسة البارامترية حول نفق

Hardening – soil		(soft clay)	(medium clay)	(stiff clay)
Type		Drained	Drained	Drained
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	16	17.5	19
$\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	16.5	18	19.5
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	4166	12500	25000
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2504	10000	25000

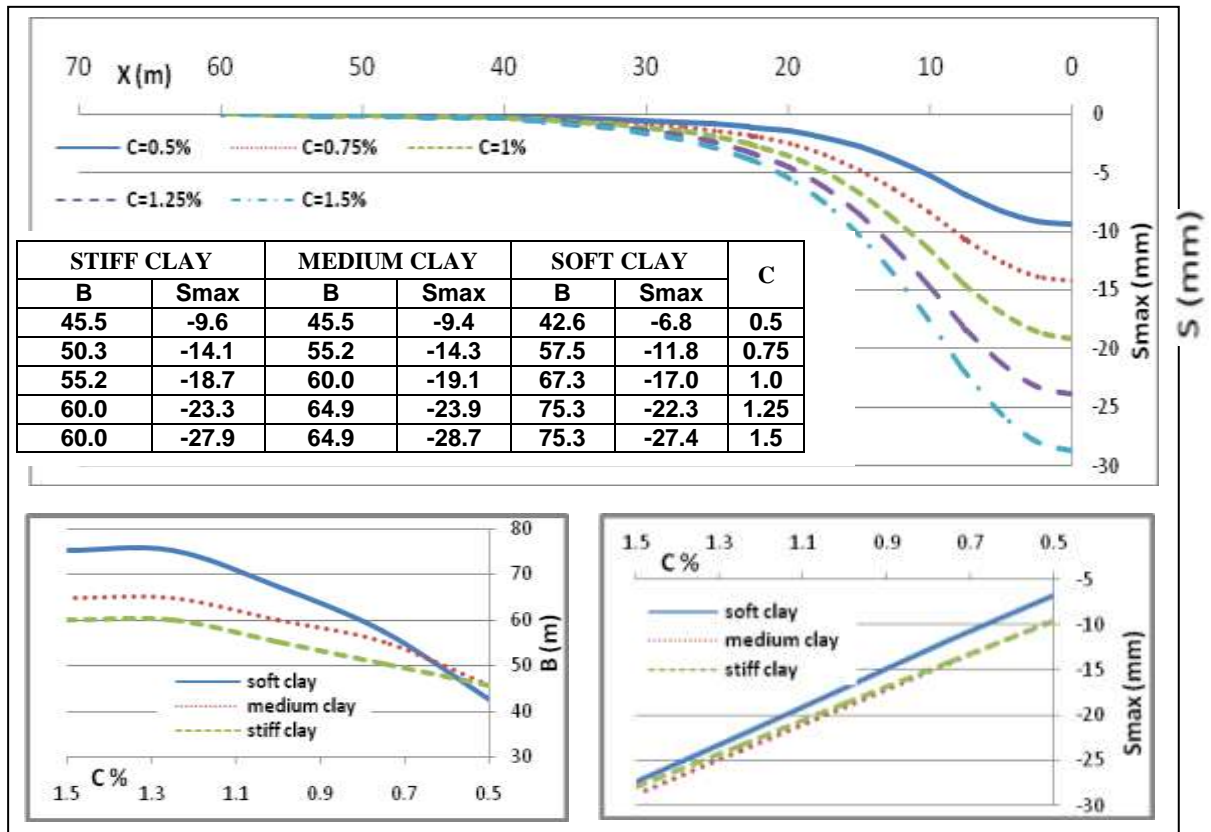
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	12500	37500	75000
$v_{ur}$	[-]	0.2	0.2	0.2
$C_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	2	10	15
$\phi$	[o]	24	26	28
$\psi$	[o]	0	0	0
m	[-]	0.9	0.8	0.7
$K_0$	[-]	0.593	0.562	0.531

جدول (7). خواص الرمل المرجعي المعتمد في الدراسة البارامترية

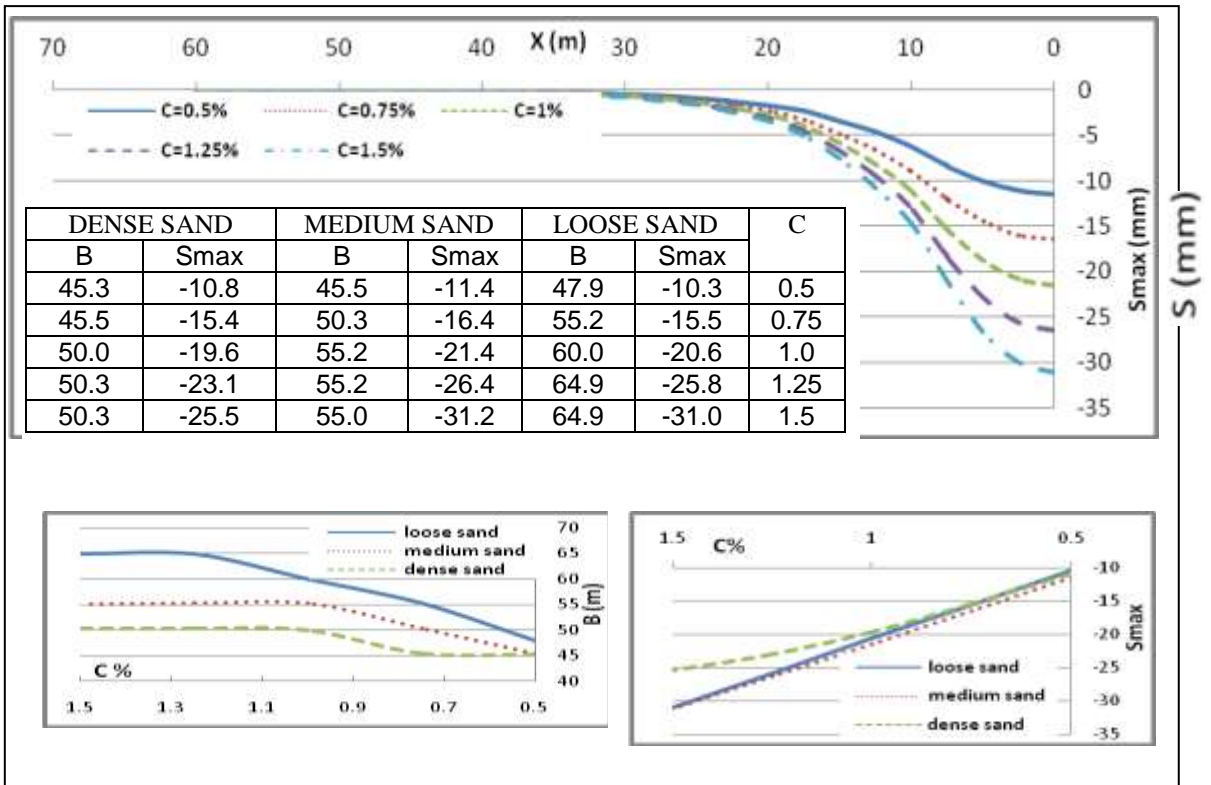
Hardening – soil		(loose sand)	(medium sand)	(dense sand)
Type		Drained	Drained	Drained
$\gamma_{unsat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	15	17.5	18
$\gamma_{sat}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	15.5	18	18.5
$E_{50}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	18750	50000	75000
$E_{oed}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	15000	45000	75000
$E_{ur}^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	56250	150000	225000
$v_{ur}$	[-]	0.2	0.2	0.2
$C_{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	0.2	0.2	0.2
$\phi$	[o]	30	35	40
$\psi$	[o]	0	5	10
m	[-]	0.7	0.6	0.5
$K_0$	[-]	0.5	0.426	0.357

#### - تأثير معامل التقلص (C%) :

نظراً لأهمية معامل التقلص (C%) و تأثيره على نتائج حساب الهبوط في طرق التحليل العددي تم إجراء عدد من الحسابات على النموذج المشكل مع تغيير قيم (C%) من (0.5-1.5) و ثبات بقية العوامل لأنواع مختلفة من الترب. و لقد أظهرت النتائج أنه مع تزايد قيم (C%) يزداد الهبوط الأعظمي لسطح الأرض وكذلك يزداد عرض حوض الهبوط المتشكل على سطح الأرض، كما يوضح الشكلان (11,12) لأنواع الغضار والرمل على الترتيب.



الشكل(11): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص للغضار.

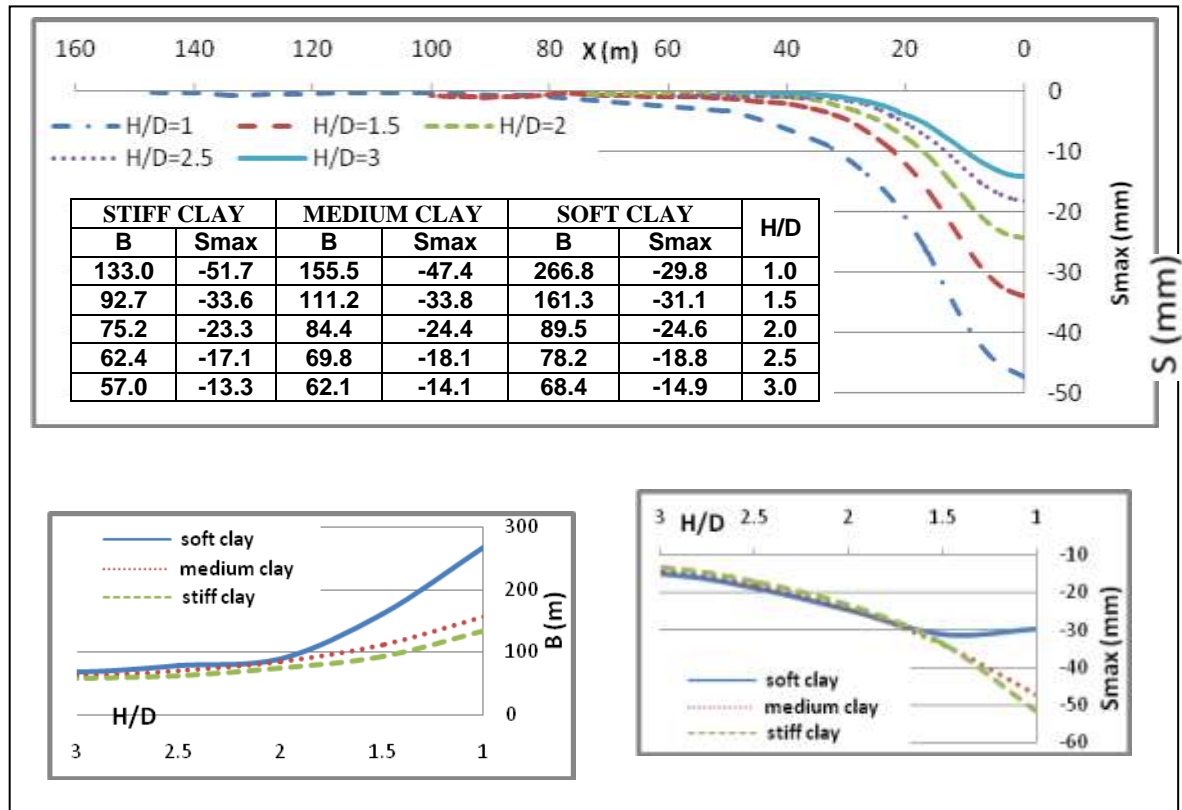


الشكل(12): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص للرمل.

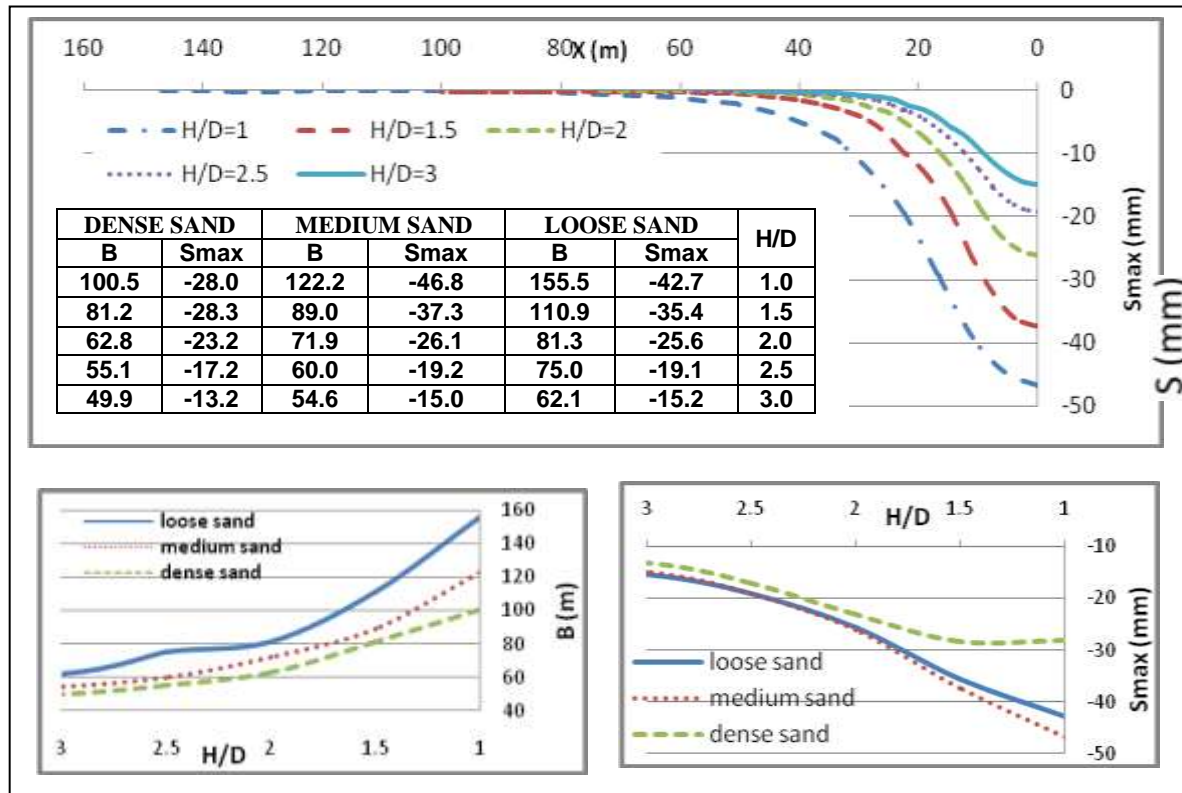
**-دراسة تأثير العمق النسبي للنفق (H/D):** بهدف دراسة تأثير عمق النفق النسبي تم إجراء عدد من التحليلات العددية على نماذج ذات أقطار مختلفة للنفق مع ثبات سماكة التربة فوق النفق و بقية العوامل و الأبعاد الهندسية الأخرى. يبين الشكلان (14,13) تغير شكل و أبعاد حوض الهبوط وقيم الهبوط الأعظمي مع تغير النسبة (H/D) للغضار و الرمل على الترتيب. حيث ان ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) يؤدي إلى تناقص عرض حوض الهبوط و تناقص في قيم الهبوط الأعظمي للترب، وذلك لأن تناقص قطر النفق يؤدي إلى تناقص عامل النقل الذي هو نسبة من قطر النفق و بالتالي تناقص التشوهات الحاصلة في التربة و تناقص الهبوط عند سطح الأرض. كما قمنا بدراسة تأثير عمق النفق النسبي بإجراء عدد من التحليلات العددية على نماذج ذات أعماق مختلفة للنفق مع ثبات قطر النفق و بقية العوامل و الأبعاد الهندسية الأخرى. يبين الشكلان (16,15) تغير شكل و أبعاد حوض الهبوط وقيم الهبوط الأعظمي مع تغير النسبة (H/D). حيث ان ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) يؤدي إلى تزايد عرض حوض الهبوط و تناقص في قيم الهبوط الأعظمي لمختلف أنواع الترب ما عدا الغضار الطري حيث يتزايد الهبوط الأعظمي تزايداً طفيفاً، وذلك يعود إلى أن زيادة سماكة التربة أعلى النفق يقلل من نسبة تشوهات التربة التي تصل إلى السطح مما يخفض من الهبوط عند السطح.

**-دراسة تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (K<sub>0</sub>):** نظراً لأهمية معامل ضغط التربة الجانبي (K<sub>0</sub>) و تأثيره على نتائج حساب الهبوط في طرق التحليل العددي تم إجراء عدداً من التحليلات العددية مع تغيير قيم (K<sub>0</sub>) من (0.5-1) للغضار و بين (0.35-0.5) للرمل مع ثبات بقية العوامل. لقد أظهرت النتائج أنه مع تزايد قيم K<sub>0</sub> ينخفض الهبوط الأعظمي لسطح الأرض، و كذلك يزداد عرض حوض الهبوط للغضار فيما يتناقص عرض حوض الهبوط للرمل كما يوضح الشكلان (18,17). ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة K<sub>0</sub> يؤدي إلى تناقص التشوهات الجانبية الأمر الذي يسبب تناقص الهبوطات فوق النفق.

**- دراسة تأثير صلابة التربة (E<sub>oed</sub>):** أظهرت الدراسة أن لصلابة التربة من خلال (E<sub>oed</sub>) تأثيراً على الانتقالات و الهبوطات التي ترافق تنفيذ النفق، حيث تتناقص الهبوطات الأعظمية فوق النفق و يتناقص عرض حوض الهبوط كلما زاد E<sub>oed</sub>. حيث أن زيادة E<sub>oed</sub> من 10Mpa إلى 15Mpa بنسبة 50% للغضار مثلاً أدت إلى تناقص الهبوطات الأعظمية للغضار بمقدار 2.42mm أي بنسبة قدرها 11.5% تقريباً و إلى تناقص عرض حوض الهبوط من 62.4 إلى 52.7م بنسبة 15.5% من أجل نفس قيمة معامل النقل (شكل 19). في حين من جهة أخرى أدى زيادة E<sub>oed</sub> للرمل بمقدار 20 Mpa (40-60Mpa) بنسبة 50% إلى تناقص الهبوط الأعظمي فقط بمقدار 2.33mm أي بنسبة قدرها 9.7% و إلى تناقص عرض حوض الهبوط من 55.2 إلى 50.3م بنسبة 8.8% (شكل 20).

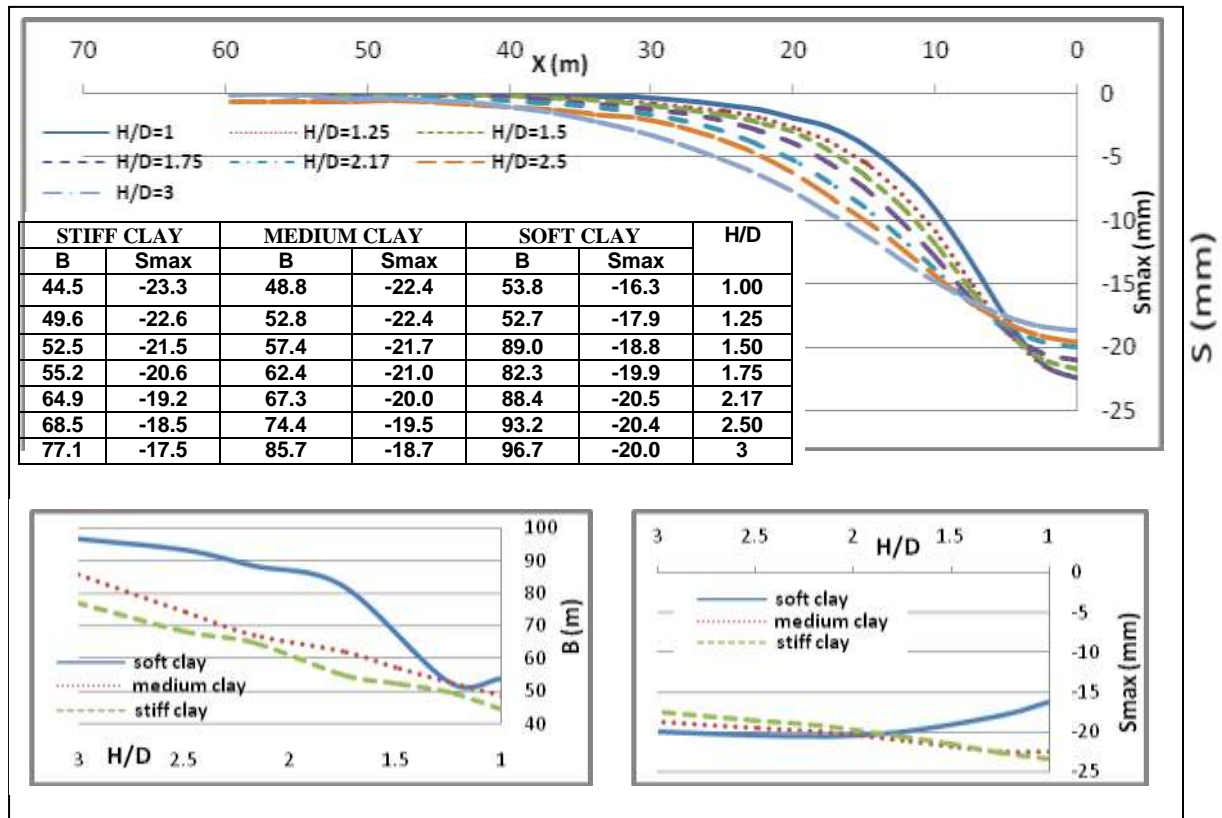


الشكل(13): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للغضار مع ثبات سماكة التربة أعلى النفق.

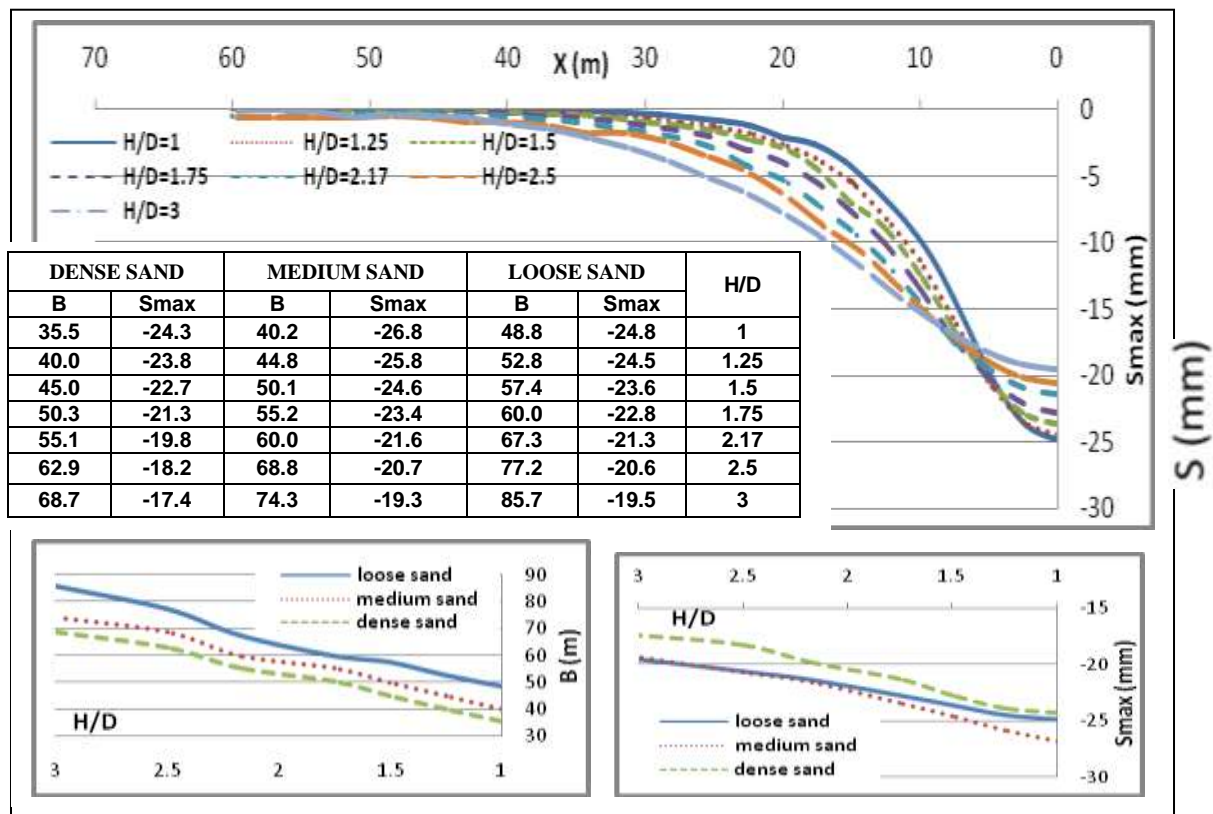


الشكل(14): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للرمل مع ثبات سماكة التربة أعلى النفق.

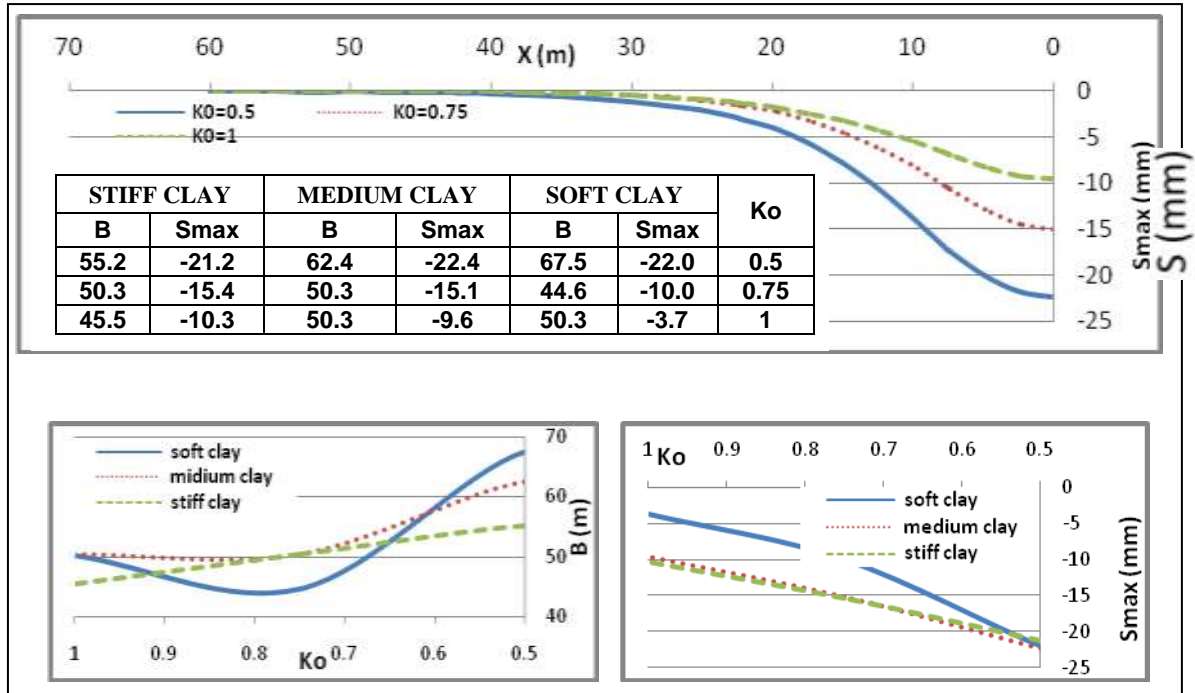




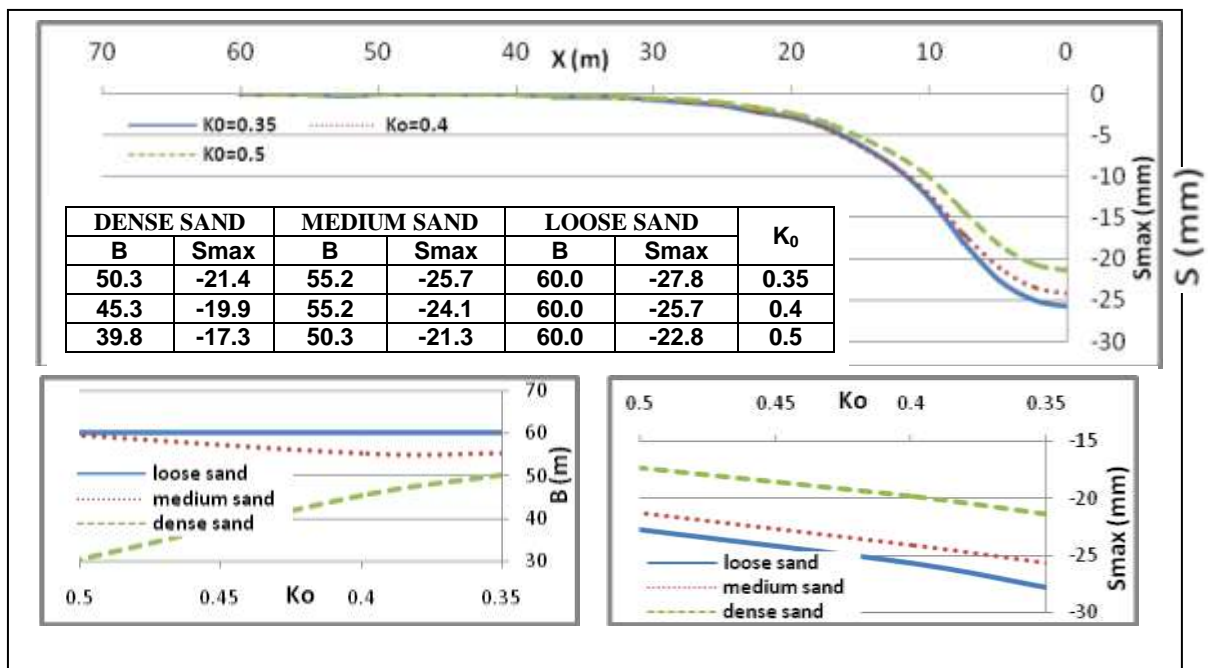
الشكل(15): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للغضار مع ثبات قطر النفق.



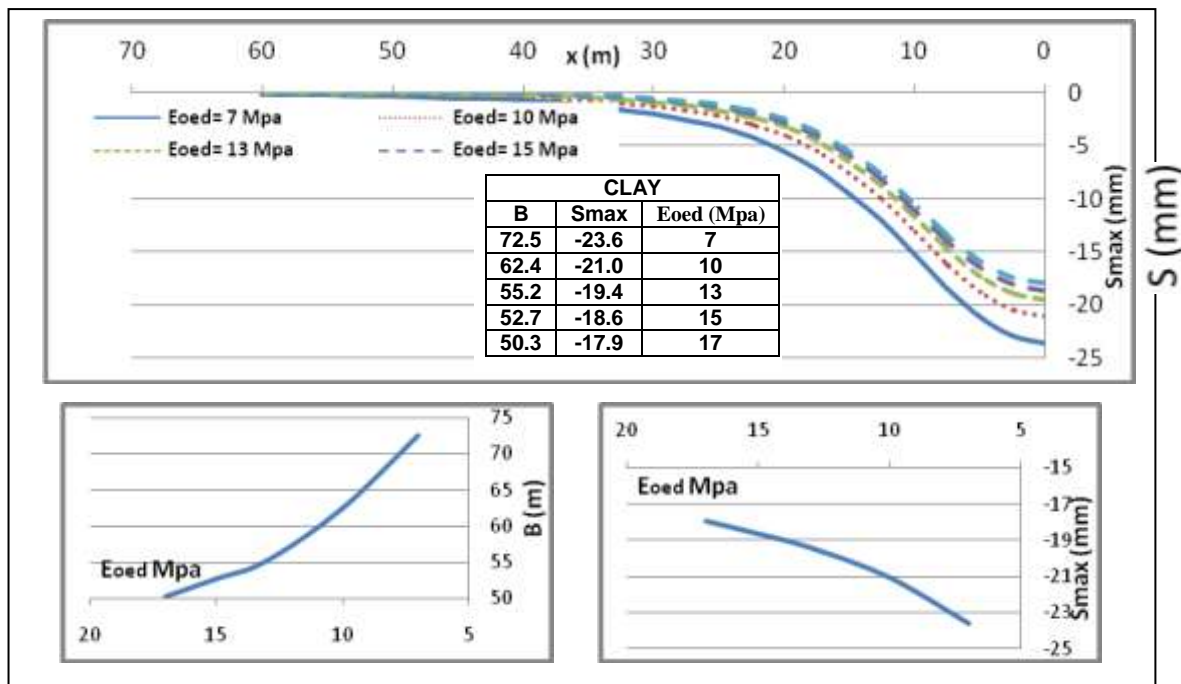
الشكل(16): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للرمال مع ثبات قطر النفق.



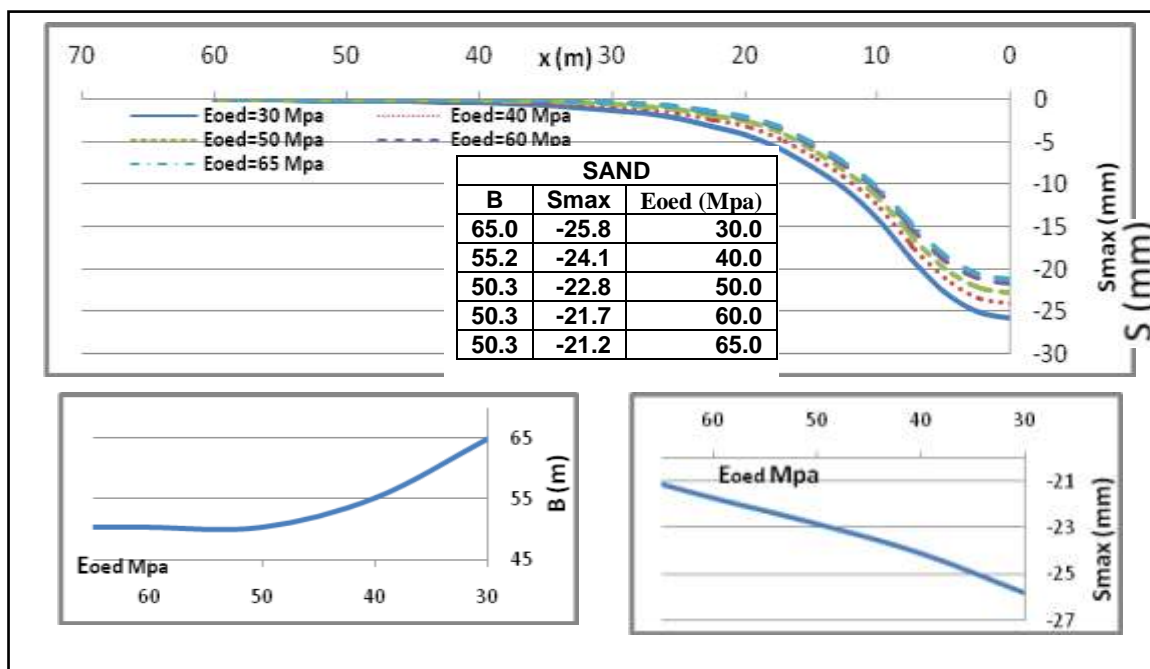
الشكل(17): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار.



الشكل(18): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للرمل.



الشكل(19): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير الصلابة للغضار.



الشكل(20): تغيير حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير الصلابة للرمل.

## الاستنتاجات والتوصيات:

يمكن من خلال نتائج التحليل العددي ودراسة المتغيرات بطريقة الـ FEM وانطلاقاً من الأهداف الموضوعية للبحث التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

1. بينت المقارنة بين نتائج التحليل العددي باستخدام طريقة الـ (FEM) و نتائج القياسات الحقلية على نفق منفذ في الواقع تقارباً جيداً بين قيم هبوطات سطح الأرض و شكل و أبعاد حوض الهبوط المحسوب من خلال نموذج ثنائي الأبعاد للنفق و الترب المحيطة (2D-FE-Model).
2. أظهرت نتائج المقارنة بين تحليل عددي باستخدام قانون مادة (MC) و تحليل عددي باستخدام قانون مادة (HS)، أن التحليل باستخدام (HS) يعطي حوض هبوط أعرض و أقل عمقا مقارنة مع تحليل النموذج باستخدام (MC).
3. بينت الدراسة البارامترية تأثيراً كبيراً لمعامل التقلص (C%) على قيم الهبوط و عرض الحوض لأنواع الترب المختلفة، حيث يزداد الهبوط بشكل خطي مع تزايد معامل التقلص، و يكون الهبوط للغضار الطرية أقل من الغضار المتوسط و القاسي عند القيم الصغيرة لـ C% ثم تتقارب عند القيم الكبيرة، أما عرض الحوض يكون أكبر للغضار الطرية. بالنسبة للرمال يكون الهبوط متقارب للرمال المخلخل و المتوسط أما الرمل المرتص فيكون هبوطه هو الأقل عند القيم المرتفعة لـ C%، في حين يكون عرض الحوض للرمال المخلخل هو الأكبر و الهبوط للرمال أكبر منه للغضار إلا أن الرمل المرتص يعطي هبوط أصغر عند قيم مرتفعة لـ (C%).
4. أظهرت الدراسة انه مع تناقص قطر النفق يتناقص الهبوط و عرض الحوض لأنواع الترب المختلفة، حيث يكون الهبوط للغضار الطرية هو الأقل وتتقارب قيم الهبوط للغضار عند قيم (D) الصغيرة، أما عرض الحوض فيكون أكبر في الغضار الطرية. بالنسبة للرمال فيكون الهبوط و عرض الحوض للرمال المرتص هو الأقل.
5. أثبتت الدراسة أن تزايد سماكة التربة أعلى النفق تؤدي إلى تزايد الهبوط للغضار الطرية و تناقصه لأنواع الترب الأخرى، كذلك يتزايد عرض الحوض لأنواع الترب المختلفة، كذلك يكون الهبوط للرمال أكبر منه للغضار، أما عرض الحوض يكون أقل منه للغضار.
6. أظهرت الدراسة أن تزايد معامل ضغط التربة الجانبي يؤدي إلى تناقص الهبوط لأنواع الترب المختلفة، حيث يكون هبوط الغضار الطرية هو الأقل بين أنواع الغضار بينما يكون الهبوط للرمال المخلخل هو الأكبر بين أنواع الرمل، و الهبوط للرمال المرتص هو الأقل بين أنواع الترب المختلفة.
7. بينت الدراسة أن تزايد صلابة التربة (Eoed) للغضار الصافي و أيضاً للرمال الصافي يؤدي إلى تناقص الهبوط و تناقص عرض الحوض.

## التوصيات:

يوصى بإجراء المزيد من الأبحاث مستقبلاً تأخذ بعين الاعتبار توسيع موضوع البحث في الاتجاهات التالية:

1. دراسة حوض الهبوط من خلال نماذج ثلاثية الأبعاد .
2. دراسة الهبوط في الاتجاه الطولاني مع أخذ تأثير تقنيات التنفيذ و خصوصاً تدعيم جبهة الحفر الأمامية.
3. دراسة تأثير هبوط سطح الأرض الموافق لتنفيذ النفق على الأبنية و المنشآت المتواجدة على السطح.

### المراجع:

- [1] ERIC L. ; BARRY N." *Settlements induced by tunneling in Soft Ground*", Tunneling and Underground Space Technology 22, 2007, 119–149.
- [2] FATTAH,Y,M, et al. "*Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground*". Acta Geotechnica an international journal for geo engineering, 2012,15.
- [3] FRANZIUS,N,J. "*Behavior of buildings due to tunnel induced settlement*".1PhD Dissertation,2 College of Science, Technology and Medicine, 2003,360.
- [4] FARREL,R. "*the response of surface structures to tunneling-induced ground movements*". Geotechnical research group, department of engineering, university of Cambridge, 2007,20.
- [5] GARNER,D,C, E.I.T. "*Subway Tunnel Design Using a Ground Surface Settlement Profile to Characterize an Acceptable Configuration*", Masters Candidate, Department of Civil Engineering, University of Arkansas – Fayetteville, 2010,14.
- [6] NAMAZI, E, et al. "*Ground Behavior Around a Tunnel Using Various Soil Models*", Department of Geotechnics and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2012,14.
- [7] PLAXIS. "*Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses-User's Manual*", Version 8.2,Delft, The Netherlands, 2005,421.
- [8] PICKHAVER,J. "*Numerical modeling of building response to tunneling*". Department of engineering science, university of oxford,63.
- [9] JONGPRADIST,P, et al. "*Numerical Simulations of Geotechnical Works in Bangkok Subsoil Using Advanced Soil Models Available in Plaxis and Through User-Defined Model*". King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2012,4.