

تحليل عددي ثنائي الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية لطرق نمذجة الأنفاق المنفذة باستخدام الدروع وتشوهات سطح الأرض الناتجة عنها

الدكتور وائل حسين حرفوش *

الدكتور مالك توفيق حسن **

أشرف شبلي ***

(تاريخ الإيداع 17 / 1 / 2018. قُبل للنشر في 5 / 11 / 2018)

□ ملخص □

تتناول هذه المقالة دراسة لطرق نمذجة تنفيذ الأنفاق وهبوط سطح الأرض الناتج عنها 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 مرن - لدن لا خطي لنمذجة السلوك الاجهادي - التشوهي التربة وفق موديلات (HS_{small}, HS) .

تتضمن هذه المقالة مقارنة بين نتائج التحليل العددي وقياسات حقلية مرجعية لمشاريع منفذة كما تتضمن طريقة مقترحة لنمذجة تنفيذ النفق والهبوط الناتج عنه.

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

A 2D numerical analysis by using the Finite Elements Method of the Modeling Methods of Closed Shield Tunneling and the Surface Subsidence induced by that

Dr. Wael H. Harfoush*
Dr. Malek T. Hasan**
Ashraf Sheble***

(Received 17 / 1 / 2018. Accepted 5 / 11 / 2018)

□ ABSTRACT □

In this paper, the modeling methods of tunneling and the surface subsidence induced by that have been studied by using two-dimensional numerical analysis according to the FEM method, assuming the green field condition, which means that there is no load 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 (HS, HS_{small}).

This article includes a comparison between the results of numerical analysis and field measurements to executed projects, and a suggested method for modeling tunnel excavation and surface subsidence induced by that.

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.

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

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

مقدمة:

إن تنفيذ الأنفاق داخل المدن المزدهمة يحمل العديد من المخاطر، حيث أن عمليات تنفيذ الأنفاق تترافق مع انتقالات في التربة قد تصل إلى سطح الأرض بشكل هبوطات تمتد على مساحة محددة، هذه الهبوطات يمكن أن تسبب أضرار متعددة على المنشآت المتواجدة فوق النفق سواء السطحية أو المتواجدة تحت سطح الأرض. وهذه الأضرار التي قد تنشأ، تتطلب كلفة اقتصادية كبيرة من أجل إعادة تأهيل هذه المنشآت وصيانتها. ولهذه الأسباب أصبح تقدير الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق داخل المدن المزدهمة من أساسيات مراحل التخطيط الناجح لمشاريع الأنفاق وكذلك التصميم، ومن شأن التنبؤ الموثوق لهذه الهبوطات أن يوفر كلفة اقتصادية كبيرة، عن طريق المعرفة المسبقة في المواقع التي تحتاج إلى إجراءات أمان وقائية خاصة ونوعية وحجم هذه الإجراءات بهدف تقليل الأضرار والمخاطر على الأبنية والمنشآت المتواجدة عند سطح الأرض. وذلك من خلال نمذجة عددية للمسألة تحاكي الواقع التنفيذي وتعطي نتائج جيدة مقارنة للحقيقة.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى دراسة طرق نمذجة تنفيذ الأنفاق وتشوهات سطح الأرض الناتجة عنها باعتماد تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM واقتراح طريقة قريبة من الواقع التنفيذي، بافتراض شرط الحقل الأخضر، والذي يعني عدم وجود أية حمولات على سطح الأرض فوق النفق.

يساهم هذا البحث في توسيع الفهم الهندسي لهذه المشكلة، كما يساهم في تسليط الضوء على أغلب الطرق المعتمدة في الدراسات العددية لنمذجة تنفيذ النفق والهبوط الناتج عنه 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.

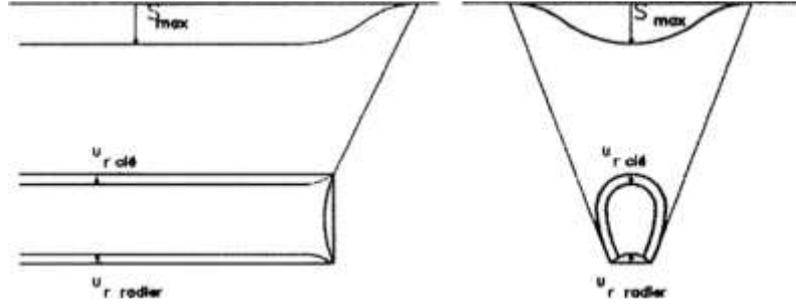
طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث المنهج التحليلي المقارن وتم تقسيم البحث إلى مرحلتين أساسيتين:

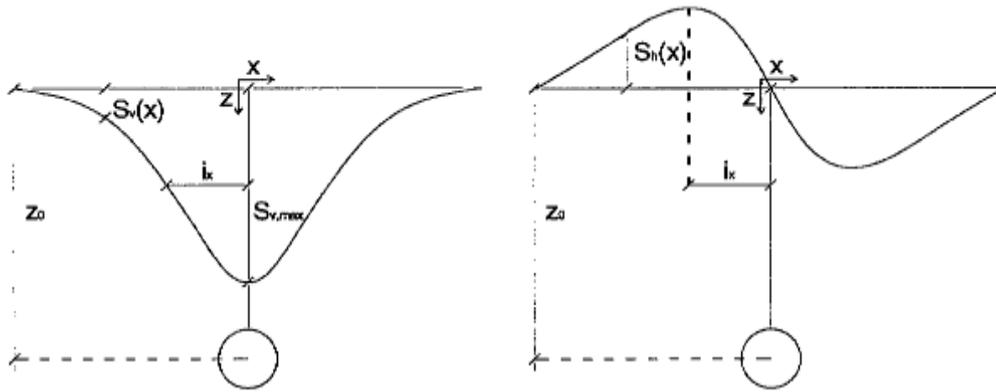
1. إجراء نمذجة عددية لنفق سطحي منفذ تم فيه إجراء قياسات حقلية بهدف معايرة النموذج العددي بالطرق المعتمدة في الدراسات المرجعية والتحقق من صلاحية النتائج من خلال مقارنة نتائج النموذج مع القياسات الحقلية المرجعية.
2. مقارنة نتائج الطرق المختلفة لنمذجة تنفيذ النفق وهبوط السطح الناتج عنه وكذلك مقارنة نتائج الطرق باعتماد قوانين مادة مختلفة لنمذجة سلوك التربة.

الدراسات و الأبحاث السابقة:

يترافق تنفيذ الأنفاق السطحية وخصوصاً في الترب الطرية مع تشوهات عديدة لسطح الأرض وينتج عنها تشكل حوض هبوط عند سطح الأرض يكون فيه الانتقال الأعظمي فوق محور النفق والشكل (1) يوضح شكل حوض الهبوط والانتقالات الأعظمية في المقطع الطولي والعرضي للنفق. وتجدر الإشارة انه في هذه المقالة سيتم دراسة التشوهات والانتقالات التي تحدث في المقطع العرضي فقط، والتي يمكن تقسيمها إلى قسمين تشوهات بشكل انتقالات شاقولية (هبوطات) وتشوهات 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 [1]

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

1. طرق تجريبية ونصف تجريبية.
2. طرق تحليلية نظرية.
3. طرق التحليل العددي.

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، وقام العديد من الباحثين في العقود الثلاثة الأخيرة باستخدام هذه الطريقة في التنبؤ بالهبوطات الناتجة عن الأنفاق مثل (Franzius, 2003 and Addenbrooke, 1996) وغيرهم كثيرين.

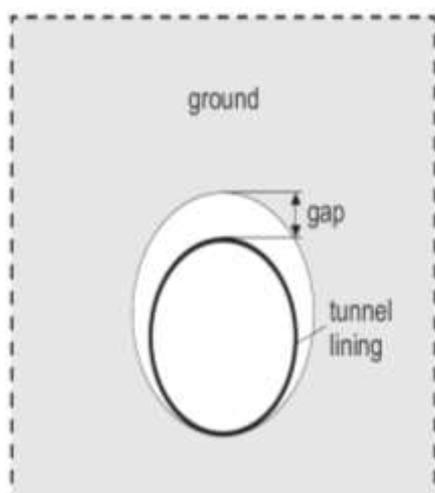
هذه الطرق تهدف إلى حساب هبوط التربة في كل نقطة ضمن التربة حول فتحة النفق. تسمح هذه الطرق بإدخال تأثير طريقة التنفيذ وخواص التربة (الأبعاد، الاجهادات الابتدائية، سلوك التربة، مراحل الحفر). الطريقة الأكثر استخداماً لتحليل ثنائي البعد (FEM) في المستوي العمودي على محور النفق.

أن الطرق العددية تسمح عند الضرورة بالنمذجة الكاملة للتأثير المتبادل بين التربة وأعمال تنفيذ النفق والأبنية 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 والمعطيات المستخدمة من خواص تربة وبطانة النفق بالإضافة إلى دقة إدخال التأثير المتبادل بين التربة والنفق والحاجة إلى الدقة في اختيار حدود النموذج.

طرق نمذجة الأنفاق المنفذة بالطرق الدرعية المغلقة:

عند استخدام الطرق العددية لنمذجة حفر الأنفاق بالطرق الدرعية المغلقة يجب التركيز على التربة أمام آلة حفر الأنفاق، هذه التربة سوف تتحرك قطرياً ومحورياً باتجاه واجهة النفق. هذا يعني أن التربة المتوضعة أمام السطح القاطع لآلة الحفر كانت تتوضع على مسافة من النفق، يمثل الحجم بين الموضع الأصلي وسطح الحفر النهائي فاقد التربة قبل الحفر. فاقد حجم إضافي سوف ينتج بفعل الفجوة بين قطر سطح الحفر والقطر الخارجي لقشرة النفق. يستخدم التحليل العددي ثنائي الأبعاد بطريقة العناصر المنتهية (FEM) لنمذجة تنفيذ الأنفاق بالطرق الدرعية. إجراءات خاصة تعتمد لنمذجة فاقد الحجم، (MUIR WOOD, 1975) اقترح طريقة تخفيض الاجهادات لنمذجة تنفيذ الأنفاق بالطرق الدرعية، اعتمدت لاحقاً طرق عديدة لنمذجة فاقد الحجم كطريقة الفجوة أو طريقة تخفيض الاجهادات. في الجزء التالي سوف يتم تلخيص الطرق المعتمدة للنمذجة ثنائية الأبعاد لتنفيذ الأنفاق باستخدام الدروع.

طريقة الفجوة (gap method):



الشكل (3): طريقة الفجوة (Rowe et al, 1983) [6]

اقترحت هذه الطريقة أولاً من قبل (Rowe et al, 1983). طورت هذه الطريقة لاحقاً لتشمل الفجوة الشاقولية بين قشرة النفق وسطح الحفر كما يوضح الشكل (3). باستناد قاعدة النفق على التربة أسفله فعندها تكون الفجوة هي المسافة الشاقولية بين قمة النفق والموقع الأصلي لسطح التربة المحفورة قبل تنفيذ النفق.

انطلاقاً من الاجهادات الأولية، يحفر النفق بخطوة حسابية واحدة وتتخذ قشرة النفق مع فجوة محددة عند قمة النفق. وتترك التربة حرة وغير مدعمة لتنتقل حتى تصل إلى قشرة النفق المثبتة. من أجل ($K_0 < 1$)، حيث (K_0) معامل ضغط التربة الجانبي الساكن، تلتحم التربة مع قشرة النفق أولاً عند القمة والقاع ثم تتحرك باتجاه الجوانب. خلال التشوهات يراقب سطح التربة

المحفور وفور حصول التماس بين سطح التربة المحفور وقشرة النفق المثبتة تفعل عناصر التماس بين التربة والنفق.

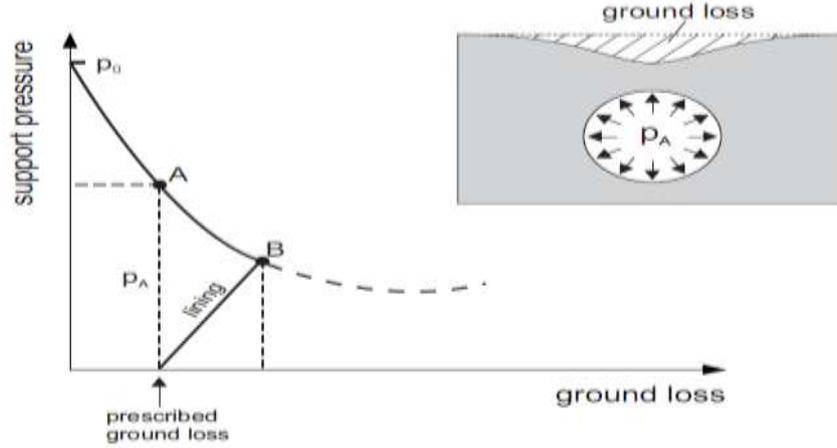
طريقة تخفيض الاجهادات (stress reduction method):

استخدمت هذه الطريقة كذلك لنمذجة تنفيذ الأنفاق باستخدام الدروع، بما أن قيمة معامل تخفيض الاجهادات غير محددة وتنفيذ الأنفاق باستخدام الدروع محكوم بقيمة محددة لفاقد التربة، تم استبدال معاملات تخفيض الاجهادات من خلال التحكم بفاقد التربة (Addenbrooke et al 1997).

الشكل (4) يوضح المرحلتين الحسابيتين لهذه الطريقة مع التحكم بفاقد التربة باعتماد منحنى استجابة التربة. انطلاقاً من الاجهادات الأولية للتربة يتم تخفيض الاجهادات ضمن النفق في المرحلة الأولى ويتم حساب فاقد التربة الناتج عند كل تخفيض، حال وصول فاقد الحجم الناتج عند النقطة (A) الموافق لضغط (P_A) تفعل قشرة النفق حيث يتم اختيار معامل تخفيض الاجهادات (βg) بحيث يتطابق مع فاقد التربة المفروض.

(Addenbrooke et al 1997) افترض سلوك غير مصرف للتربة، أي تشوه حجمي ثابت، من خلاله يكون حجم حوض الهبوط الناتج عند السطح مساوي لفاقد التربة.

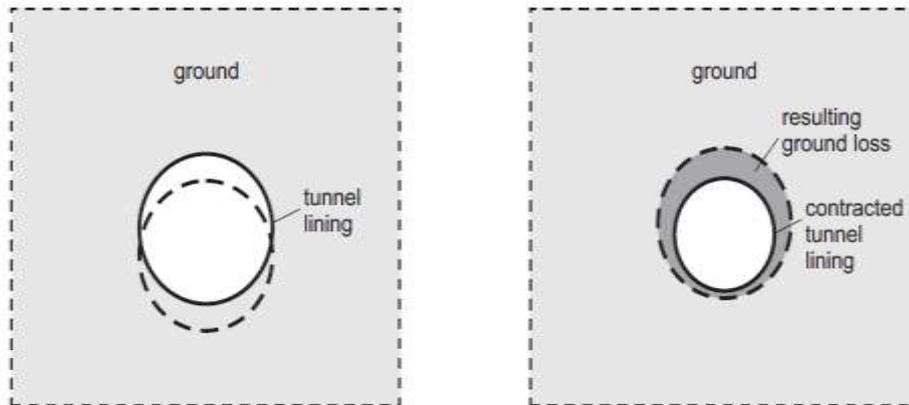
عند التركيز على الهبوط دون الاهتمام بالقوى الناتجة في القشرة، عندها يمكن إيقاف الحساب فور الوصول إلى فاقد التربة المطلوب، عند تحليل القوى في القشرة فأن الاجهادات المنقولة إلى القشرة يتم حسابها بمرحلة حسابية أخرى، يحصل عندها فاقد حجم إضافي حتى الوصول إلى التوازن النهائي عند النقطة (B) لكن فاقد الحجم الإضافي سوف يكون صغير بالمقارنة مع فاقد الحجم الناتج في المرحلة الأولى حيث أن صلابة القشرة أعلى من صلابة التربة.



الشكل (4): طريقة تخفيض الاجهادات باعتماد منحنى استجابة التربة (Addenbrooke et al, 1997) [6]

طريقة التقلص (contraction method):

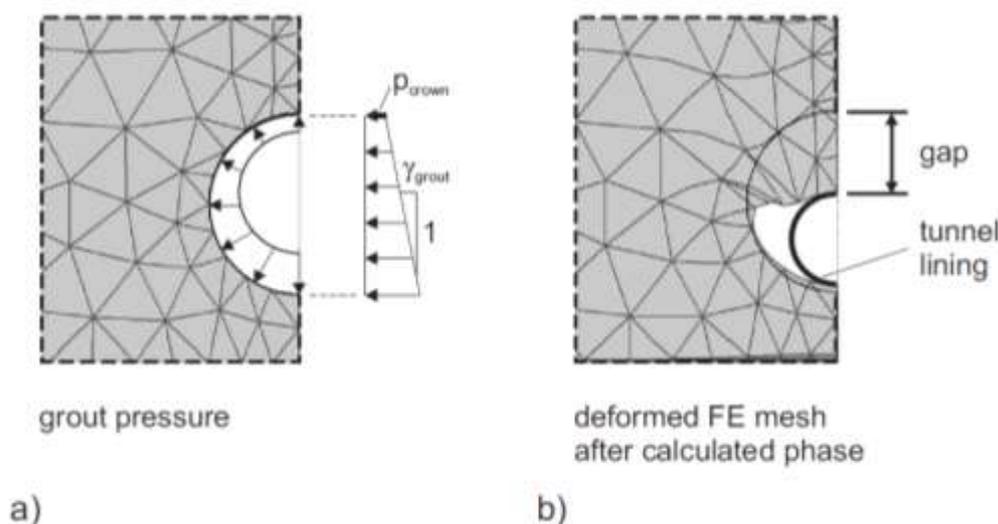
هي طريقة عديدة مختلفة قليلاً اعتمدت من قبل (Brinkgreve, 1993) حيث يتم تمثيل فاقد التربة بتقلص محدد لقشرة النفق، انطلاقاً من الاجهادات الأولية للتربة فأن هذه الطريقة تتألف من مرحلتين حسابيتين كما هو موضح بالشكل (5). ضمن المرحلة الأولى يتم تفعيل حفر النفق بإزالة عناصر التربة ضمن النفق في نفس الوقت يتم تفعيل قشرة النفق، ثم تترك قشرة النفق حرة لتستقر ضمن هذه المرحلة، سوف يكون هناك انتفاخ للتربة نتيجة إزالة التربة من داخل النفق. العناصر القشرية المستخدمة لنمذجة قشرة النفق يمكن إعطاؤها وزن الخرسانة هذا سوف يفرض بعض القوى باتجاه الأسفل والمطبقة على النفق، لكن وزن قشرة النفق صغير بالمقارنة مع وزن التربة المزاحة هذا سوف يسبب انتقال للنفق نحو الأعلى، في المرحلة الحسابية الثانية يتم تقليص قشرة النفق حتى يطابق تقلصها القيمة المطلوبة، بما أن صلابة القشرة أكبر مقارنة بصلابة التربة فأن التقلص سوف يفرض انتقالات قطرية للتربة باتجاه داخل النفق بالإضافة إلى أن صلابة التربة تفرض انتقالات شاقولية لكامل النفق.



الشكل (5): طريقة التقلص (Vermeer and Brinkgreve, 1993) [12]

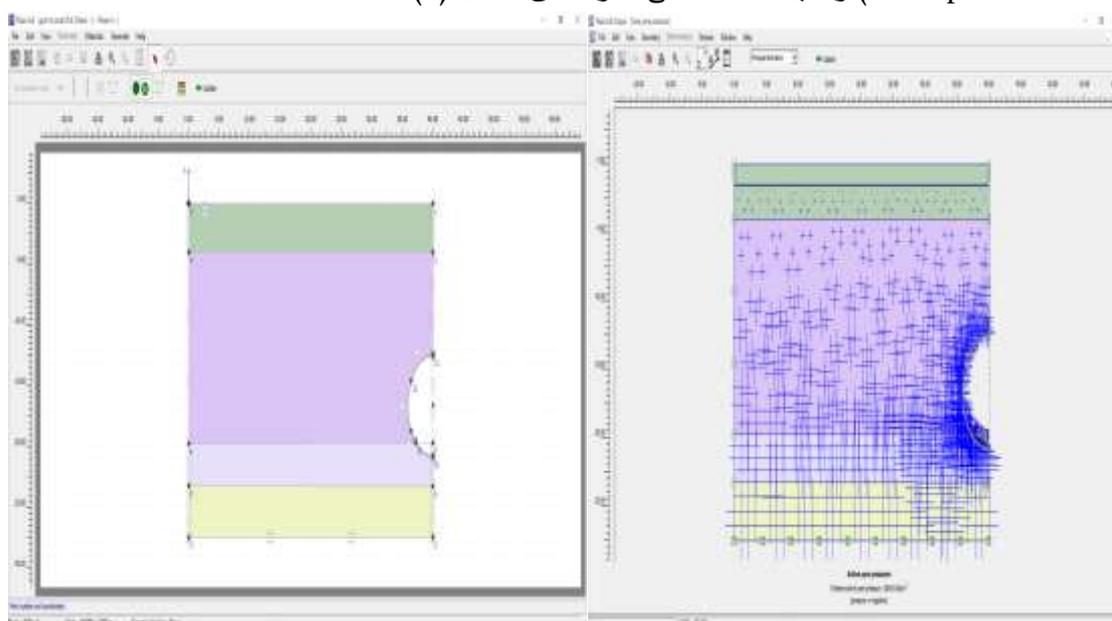
طريقة ضغط الحقن (grout pressure method):

قُدمت هذه الطريقة من قبل (Moller,s,2006) يتم فيها تمثيل فاقد التربة من خلال الجمع بين طريقة الفجوة وطريقة تخفيض الاجهادات، كما في طريقة الفجوة تشوهات التربة محدودة بالقطر الخارجي لقشرة النفق وبشكل مشابه لطريقة تخفيض الاجهادات يطبق ضغط على حدود النفق المحفور، لكن بخلاف طريقة تخفيض الاجهادات التي تفترض تخفيض الاجهادات المطبقة على كامل النفق، فأن طريقة ضغط الحقن تستبدل الاجهاد الأولي بتوزيع محدد لضغط الحقن والذي يختلف عن توزيع الاجهادات الأولي كما يوضح الشكل (6).



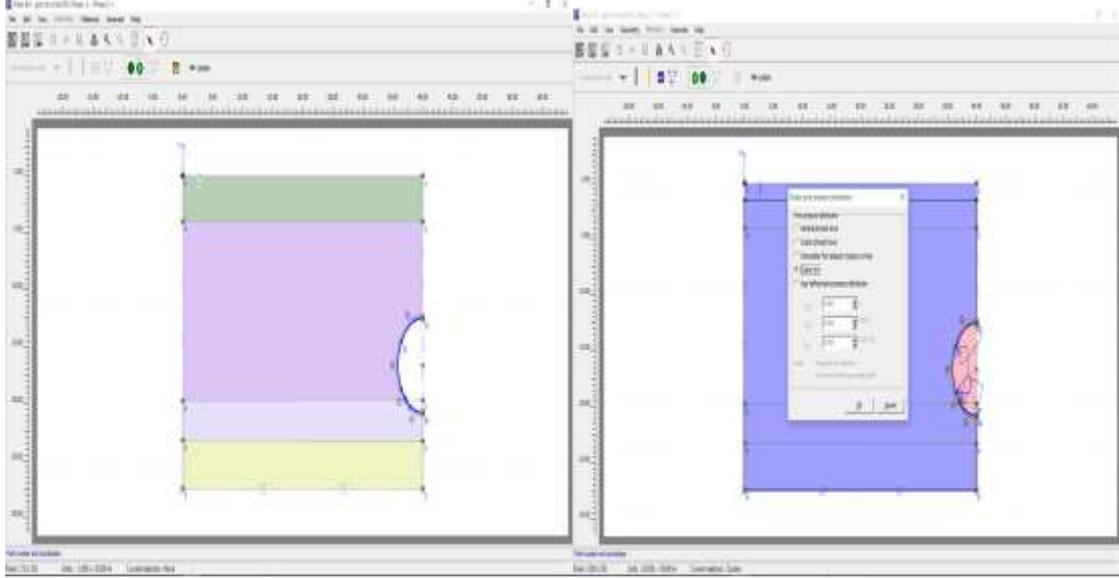
الشكل (6): طريقة ضغط الحقن (Moller,2006)[12]

يتألف الحساب بهذه الطريقة باستخدام برنامج (plaxis) من مرحلتين حسابيتين: المرحلة الأولى: يتم إلغاء تفعيل التربة داخل النفق ضمن (geometry configuration mode) ثم الانتقال إلى (water pressures mode) وتفعيل الضغط على حدود النفق الشكل (7).



الشكل (7): طريقة ضغط الحقن المرحلة الحسابية الأولى.

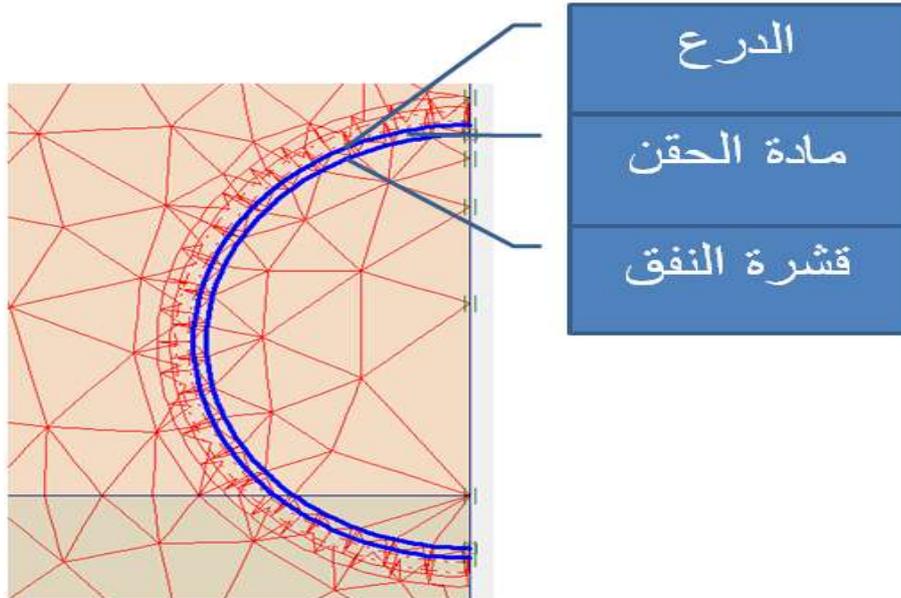
المرحلة الثانية: وعند الوصول إلى الهبوط المطلوب عند السطح يتم تفعيل قشرة النفق ضمن (geometry configuration mode) وإلغاء تفعيل الضغط على حدود النفق ضمن (water pressures mode). الشكل (8).



الشكل (8): طريقة ضغط الحقن المرحلة الحسابية الثانية.

طريقة تصلب الحقن (grout hardening method):

هي طريقة أكثر واقعية لنمذجة تنفيذ الأنفاق حيث يتم تقسيم الحساب فيها إلى ثلاثة مراحل، في المرحلة الأولى يتم إلغاء تفعيل التربة ضمن النفق والدرع ويتم تفعيل الدرع، في المرحلة الثانية يتم إلغاء تفعيل الدرع وتفعيل القشرة واستبدال التربة بين الدرع والقشرة بمادة حقن بصلابة أولية منخفضة ويتم تغيير الصلابة حتى الوصول إلى هبوط لسطح الأرض قريب من القياسات الحقلية، في المرحلة الأخيرة يتم استبدال الحقن الأولي بمادة الحقن ذات الصلابة النهائية كما يوضح الشكل (9).



الشكل (9): طريقة تصلب الحقن

1) النمذجة العددية:

5-1) البرنامج المستخدم (FE-Program):

تم في هذه البحث استخدام برنامج PLAXIS, Ver.8.6 الذي يستخدم طريقة العناصر المنتهية من أجل التحليل الثنائي الأبعاد (2D) للمنشآت والمسائل الهندسية الجيوتكنيكية، ويعطي إمكانية استخدام عدد كبير من قوانين المادة الأساسية والمتطورة لنمذجة السلوك الاجهادي-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.

5-2) معطيات النفق و القياسات الحقلية:

الجدول (1): قياسات (Second

Heinenoord) [12]

Sv	X
[mm]	[m]
-0.34	20
-1.34	23.3
-6.96	29.6
-10.44	31.5
-16.86	33.8

بهدف التحقق لاحقاً من صلاحية نتائج التحليل العددي بطريقة FEM و معايرة سلوك النموذج المستخدم للتربة تم إجراء نمذجة عددية بطريقة العناصر المنتهية لنفق (Second Heinenoord) الذي تم تنفيذه في هولندا، بقطر خارجي للنفق (Da=8.3m). استخدم في تنفيذ هذا النفق درع هيدروليكي (Slurry Shield) يعتمد على تدعيم دائم أمامي، وقشرة النفق عبارة عن حلقات من قطع بيتونية مسلحة مسبقة الصنع بسماكة (0.35m)، تم في هذا

المشروع إجراء العديد من برامج القياسات الحقلية المرافقة للتنفيذ شملت قياس هبوطات سطح الأرض فوق النفق والموضحة في الجدول (1). عمق النفق (H=16.65m) اعتباراً من سطح الأرض وحتى مركز النفق، مناسب طبقات التربة وسماكاتهما وخواصها موضحة في الجدول (2).

جدول (2) خواص طبقات التربة حول نفق (Second Heinenoord) [12]

R _{inter}	v	E _{oed} [Mpa]	ψ [°]	c' [kpa]	φ' [°]	γ _{sat} [kN/m ³]	γ _{unsat} [kN/m ³]	Depth [m]	الطبقة
1	0.34	8	0	3	27	17.2	17	0.0	الطبقة 1: (fill)
0.67	0.3	40	5	1	35	20	20	-4	الطبقة 2: (sand)
0.67	0.3	120	5	1	35	20	20	-19.75	الطبقة 3: (sand)
1	0.32	48	1	7	31	20	20	-23.25	الطبقة 4: (sand clay)

5-3) 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 (Moller, 2006).

الشكل (10) 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 (317). إن خواص التربة المستخدمة لنمذجة سلوك طبقات التربة المحيطة بالنفق من خلال قانون (HS-Model) تم تلخيصها في الجدول (3)، قانون (HSsmall-Model) يختلف عن (HS-Model) بالبارامترات (γ_{0.7}) و (G₀^{ref}) الواردين بالجدول (3). أما بالنسبة لقشرة النفق فقد تم نمذجتها من خلال عناصر (Beam

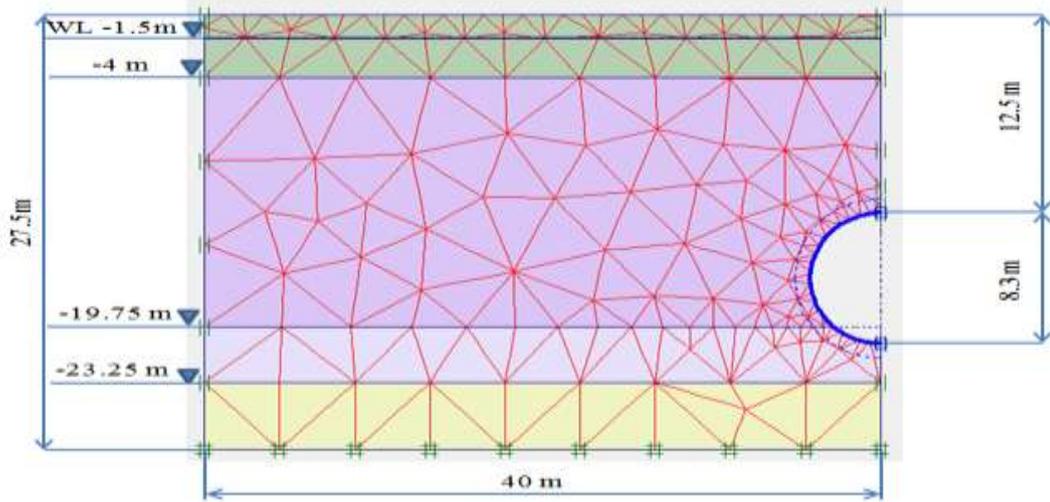
(elements) ذات سلوك مرن خطي وتم تخفيض الصلابة على الانعطاف بتقسيمها على معامل تخفيض يساوي (4) وذلك لأخذ تأثير الفواصل بين القطع البيتونية المسبقة الصنع (Wood, 1975) وخواصها موضحة في الجدول (4).

جدول (3) خواص طبقات التربة حول نفق وفق قانون (Second Heinenoord) (HS Model) [12]

(Hardening soil Model : HS-Model)								
OCR	m [-]	$\gamma_{0.7}$ [%]	G_0^{ref} [Mpa]	E_{ur}^{ref} [Mpa]	E_{50}^{ref} [Mpa]	E_{oed}^{ref} [Mpa]	ν_{ur}	الطبقة
1	0.5	0.0005	52	42	14	14	0.2	الطبقة 1: (fill)
1	0.5	0.0005	175	105	35	35	0.2	الطبقة 2: (sand)
1	0.5	0.0005	175	105	35	35	0.2	الطبقة 3: (sand)
1	0.9	0.0005	88	35	12	7	0.2	الطبقة 4: (sand clay)

جدول (4) خواص قشرة نفق (Second Heinenoord) [12]

t [cm]	ν	EI [MNm ²]	EA [GN/m]	γ [kN/m ³]	M-Model	Modeling	
35	0.15	26.78	10.5	24	liner elastic	Beam Elements	قشرة النفق (lining)



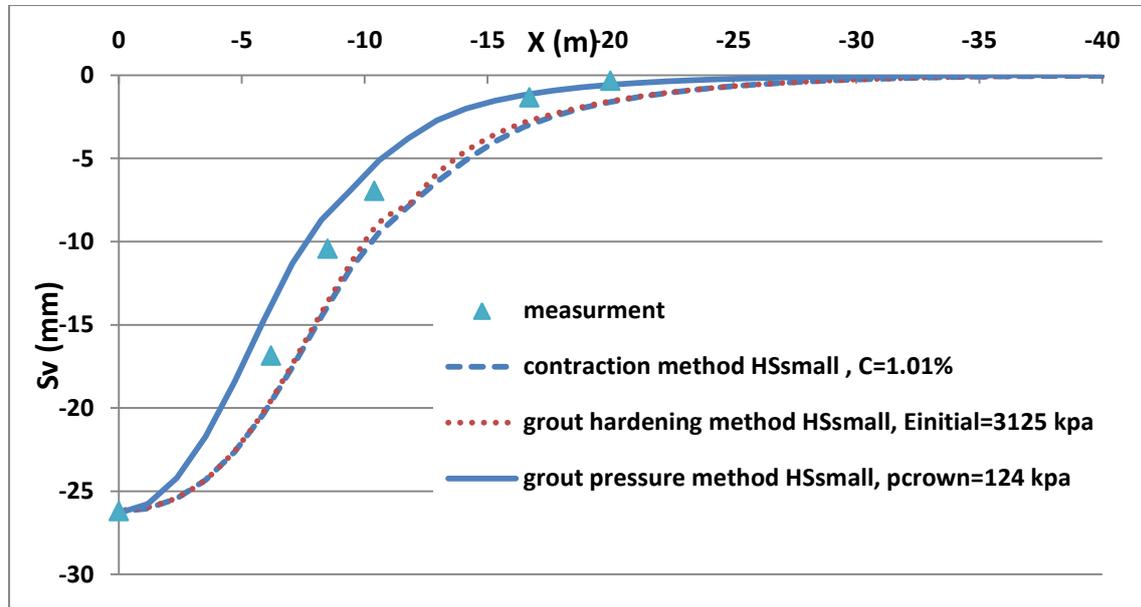
الشكل (10): النموذج العددي المعتمد في التحليل

النتائج والمناقشة:

1) معايرة النموذج والتحقق من صلاحية النتائج:

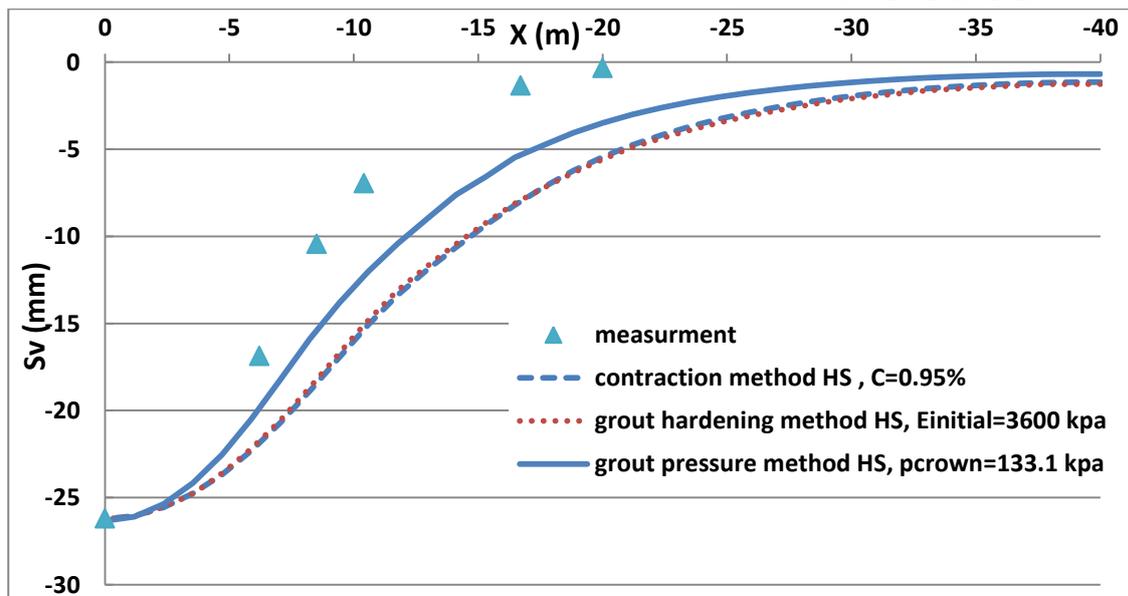
يهدف التحقق من دقة النتائج التي تم التوصل إليها تم مقارنة قيم هبوطات سطح الأرض المقاسة حقلياً أثناء تنفيذ نفق (Second Heinenoord) مع قيم الهبوطات المحسوبة من النموذج العددي للنفق باستخدام قوانين المادة (HS, HS_{small}) و باستخدام ثلاث طرق للنمذجة ضغط الحقن، تصلب الحقن و التقلص.

لقد أظهرت المقارنة الموضحة في الشكل (11) باعتماد قانون مادة (HSsmall)، أن منحنى حوض الهبوط المحسوب باعتماد الطرق الثلاثة تعطي قيم قريبة من القياسات الحقلية لكن طريقة ضغط الحقن تعطي حوض هبوط اضيق بينما طريقة النقل وتصلب الحقن تعطي قيم متقاربة فيما بينها وحوض هبوط أعرض من القياسات الحقلية.



الشكل(11): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM باعتماد قانون (HSsmall) والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Second Heinenoord)

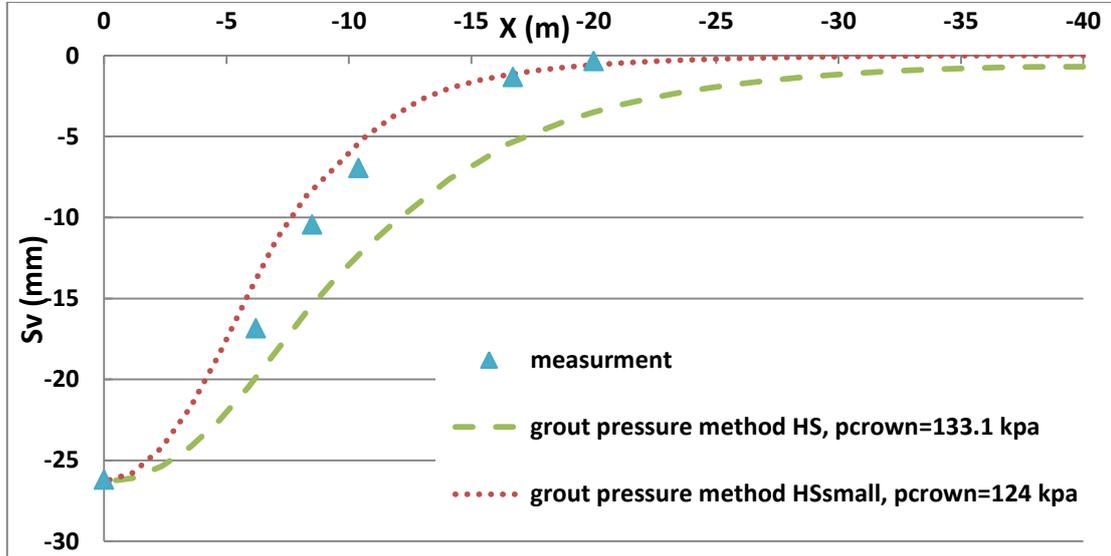
كما بينت نتائج المقارنة بين طرق النمذجة باعتماد قانون مادة (HS) الموضحة في الشكل (12) أن طريقة ضغط الحقن تعطي شكل لحوض الهبوط أقرب إلى القياسات الحقلية بينما طريقة النقل وتصلب الحقن تعطي حوضي هبوط متطابقين وأعرض من القياسات الحقلية.



الشكل(12): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM باعتماد قانون (HS) والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Second Heinenoord)

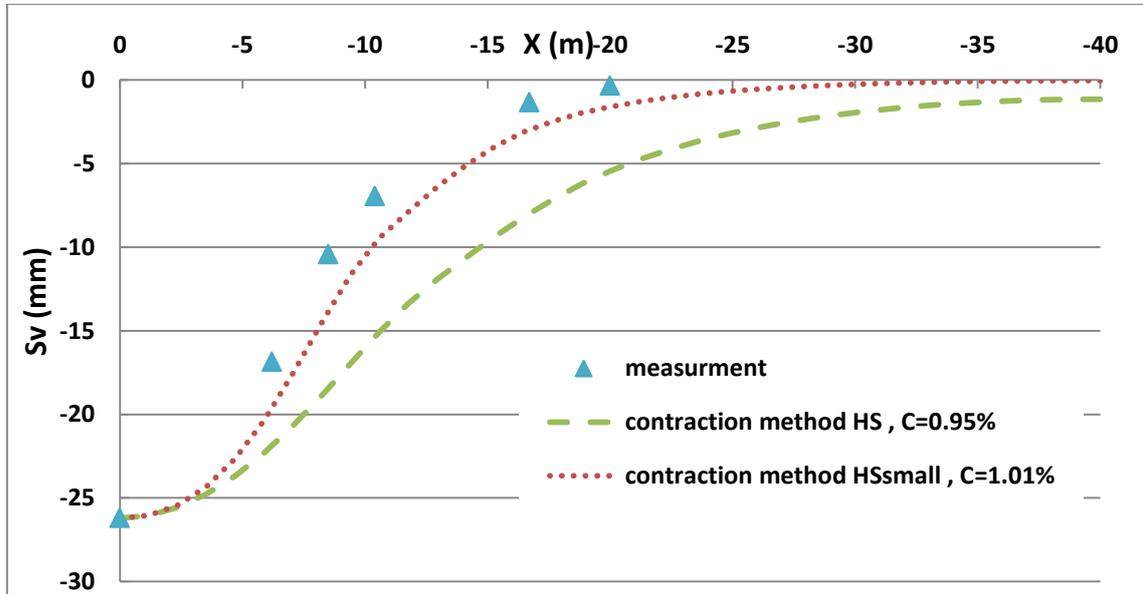
2) دراسة مقارنة بين قوانين المادة المعتمدة لنمذجة سلوك التربة:

أجريت دراسة مقارنة بين قوانين المادة المعتمدة في نمذجة سلوك التربة لكل طريقة من طرق نمذجة تنفيذ الأنفاق حيث أظهرت النتائج الموضحة في الشكل (13) أنه بالنسبة لطريقة ضغط الحقن فأن قانون (HSsmall) يعطي أقرب شكل لحوض الهبوط من القياسات الحقلية المرجعية يليه قانون (HS).



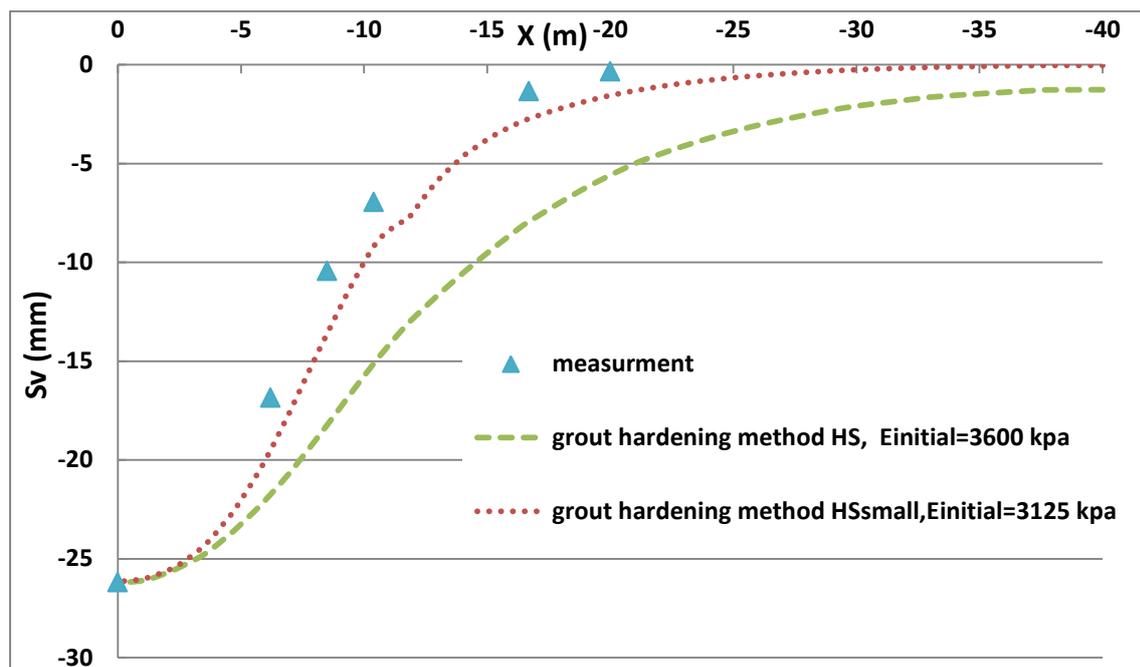
الشكل(13): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM باعتماد قوانين مادة مختلفة لطريقة ضغط الحقن والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Second Heineoord)

كما بينت نتائج المقارنة باعتماد طريقة النقلص أن قانون (HSsmall) يعطي أقرب شكل لحوض الهبوط مقارنة بالقياسات الحقلية المرجعية يليه قانون (HS) كما يبين الشكل(14).



الشكل(14): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM باعتماد قوانين مادة مختلفة لطريقة النقلص والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Second Heineoord)

أما بالنسبة لطريقة تصلب الحقن فالنتائج موضحة بالشكل (15) حيث يظهر الشكل أن قانون (HSsmall) كذلك يعطي أفضل تقارب مع القياسات المرجعية بالنسبة لشكل حوض الهبوط يليه قانون (HS).



الشكل (15): مقارنة حوض الهبوط المتشكل بين نتائج نموذج الـ FEM باعتماد قوانين مادة مختلفة لطريقة تصلب الحقن لتنفيذ النفق والقياسات الحقلية المرجعية فوق نفق (Second Heinenoord)

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

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

1. بينت المقارنة بين نتائج التحليل العددي باستخدام طريقة الـ (FEM) ونتائج القياسات الحقلية على نفق منفذ في الواقع تقارباً جيداً بين قيم هبوطات سطح الأرض وشكل وأبعاد حوض الهبوط المحسوب من خلال نموذج ثنائي الأبعاد للنفق والتربة المحيطة (2D-FE-Model).
2. أظهرت نتائج المقارنة بين طرق النمذجة العددية لتنفيذ الأنفاق باستخدام الدروع وذلك باعتماد قانون مادة (HSsmall) إن طريقة ضغط الحقن تعطي أقرب شكل لحوض الهبوط مقارنة بالقياسات الحقلية المرجعية وتتقارب نتائج طريقتي التقلص وتصلب الحقن لكن طريقة ضغط الحقن تفترض الاستعاضة عن التربة ضمن النفق بضغط افتراضي يطبق على محيط النفق وهي بعيدة عن الواقع التنفيذي للنفق.
3. وضحت دراسة المقارنة بين طرق النمذجة العددية باعتماد قانون (HS) كذلك أن طريقة ضغط الحقن تعطي أقرب شكل لحوض الهبوط مقارنة بالقياسات الحقلية المرجعية، بينما تعطي طريقتي التقلص وتصلب الحقن نتائج متقاربة.
4. أثبتت نتائج المقارنة بين قوانين المادة المستخدمة لتمثيل سلوك التربة باعتماد طريقة ضغط الحقن لنمذجة تنفيذ الأنفاق باستخدام الدروع أن موديل التربة (HSsmall) يعطي أقرب شكل لحوض الهبوط مقارنة بالقياسات الحقلية المرجعية بينما موديل (HS) يعطي حوض هبوط أعرض وذلك كون (HSsmall) هو تطوير لـ (HS) حيث يأخذ بالحسبان بارمترات أكثر لإدخال تأثير التشوهات الصغيرة بعين الاعتبار.

5. أظهرت نتائج الدراسة باعتماد طريقة معامل التقلص وطريقة تصلب الحقن أن قانون (HSsmall) يعطي أقرب شكل لحوض الهبوط مقارنة بالقياسات الحقلية المرجعية.

التوصيات:

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

1. دراسة القوى الداخلية الناتجة في قشرة النفق باعتماد طريقة تصلب الحقن.
2. إجراء دراسة عددية ثلاثية الأبعاد باعتماد طريقة قريبة من تصلب الحقن تحاكي الواقع التفتيزي للأنفاق باستخدام الدروع.
3. دراسة تأثير هبوط سطح الأرض المرافق لتنفيذ النفق على الأبنية والمنشآت 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] FARGNOLI, V. *SOIL-STRUCTURE INTERACTION DURING TUNNELLING IN URBANAREA: OBSERVATIONS AND 3D NUMERICAL MODELLING*. PhD Dissertation, Università di Bollogna, Italy, 2015,192.
- [3] FARREL,R. *the response of surface structures to tunneling-induced ground movements*. Geotechnical research group, department of engineering, university of Cambridge, 2007,20.
- [4] FRANZIUS,N,J. *Behavior of buildings due to tunnel induced settlement*.1PhD Dissertation,2 College of Science, Technology and Medicine, 2003,360.
- [5] GIARDINA,G,et. Al. *Interaction between surface structures and tunneling in sand: Centrifuge and computational modeling*. 2014, 14.
- [6] SENTHILNATH, T,G et al. *Stacked Tunnelling Induced Settlements in Soft Soil*.2015,13.
- [7] LAMBRUGHI,A,et. al" *Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanized excavations*"2010,17.
- [8] LIMANOV,J.A. *InfolgeTunnelbau in kambrischen Tonen Leningrad*. Inst. Inzh.Zhelezu, Transport, 1957.
- [9] MIGLIAZZA,M,et al. *Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground*.2007,12.

- [10] MIRHABIBI, A. et al. *Effects of surface buildings on twin tunneling-induced ground settlements*. 2011, 12.
- [11] MEISSNER, H. *Tunnelbauunter Tage-Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 Numerik in der Geotechnik*. Geotechnik, 19 (2):PP. 99-108 1996.
- [12] MOLLER, S. *Tunnel induced settlements and structural forces in lining*. PhD Dissertation, Stuttgart university, 2006. 174.
- [13] PLAXIS. *Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses-User's Manual*. Version 8.2, Delft, The Netherlands, 2005, 421.
- [14] PECK, R. B. *Deep excavations and tunneling in soft ground*. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969, 225-290.