



الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
جامعة تشرين
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

النتبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية
بالطرق الحديثة المغلقة

رسالة علمية أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية
اختصاص جيوتكنيكية

إعداد المهندس
أشرف حيدر شبلي

بإشراف

أ.م.د. مالك توفيق حسن
أستاذ مساعد في قسم الهندسة الجيوتكنيكية

أ.د. وائل حسين حرفوش
أستاذ في قسم الهندسة الجيوتكنيكية

2015-2014

قُدمت هذه الرسالة استكمالاً لمتطلبات نيل درجة الماجستير في قسم
الهندسة الجيوتكنيكية من كلية الهندسة المدنية في جامعة تشرين.

**This thesis has been submitted as a partial fulfillment of the
requirement for the degree of master of sciences in
Geotechnical Engineering Department at the Faculty of
Civil Engineering, Tishreen University.**

تصريح

أُصِرَّحَ بِأَنَّ هَذَا الْبَحْثَ " التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق الحديثة المغلقة " لم يسبق أن قُبِلَ للحصول على شهادة ، ولا هو مُقَدَّم حَالِيًا للحصول على شهادة أخرى.

اسم المُرَشِّح

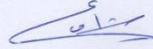


المهندس المدني: اشرف شبلي

تاريخ:

DECLARATION

This is to declare that, this work " **Predication of Ground Settlements induced by shallow bored Tunnels** " has not been being submitted concurrently for any other degree



Ashraf Sheble

Date

تعهد

السيد الدكتور عميد كلية الهندسة المدنية المحترم

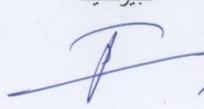
مقدمه المهندس اشرف حيدر شبلي أتعهد بالتزامي بتنفيذ الملاحظات التي قدمتها لجنة الحكم
على أطروحتي بعنوان:

"التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق الحديثة المغلقة"

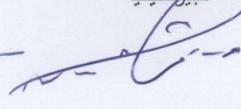
الدكتور صفوان عبد الله
مدرس في قسم الهندسة
الجيو تكنولوجية



الدكتور رامي اسطة
مدرس في قسم الهندسة
الجيو تكنولوجية



الدكتور وائل حرفوش
أستاذ دكتور في قسم الهندسة
الجيو تكنولوجية



نوقشت هذه الرسالة بتاريخ 2015/12/27 و أُجيزت.

لجنة الحكم :

كلمة شكر

الدكتور وائل حرفوش

التوقيع:

أستاذ دكتور في قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين

الدكتور رامي أسطة

التوقيع:

مدرس في قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين

الدكتور صفوان عبد الله

التوقيع:

مدرس في قسم الهندسة الجيوتكنيكية، كلية الهندسة المدنية، جامعة تشرين

كلمة شكر

أقدم بخالص الشكر و الامتنان إلى جامعة تشرين كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية بكامل كوادرها الذين ساهموا في إنجاز هذا
العمل و أخص بالشكر أساتذتي المشرفين الذين قدموا كل العون و
المساعدة لإتمام هذا البحث.

شهادة

نشهد بأن هذا العمل الموصوف في هذه الرسالة " التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق الحديثة المغلقة" هو نتيجة بحث علمي قام به المرشح السيد اشرف حيدر شبلي بإشراف الدكتور وائل حرفوش (أستاذ دكتور، كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، اللاذقية، سورية) و الدكتور مالك حسن (أستاذ مساعد، كلية الهندسة المدنية بجامعة تشرين، اللاذقية، سورية)، و إن أي مرجع ورد في هذه الرسالة موثق في النص.

المرشح	المرشح	المرشح
الاسم	الاسم	الاسم
التوقيع	التوقيع	التوقيع

تاريخ: 2016 / /

CERTIFICATION

It is hereby certified that, the work described in this thesis " **Predication of Ground Settlements induced by shallow bored Tunnels** " is the result of Mr. Ashraf Sheble own investigations under the supervision of Dr. Wael Harfoush(Professor, Faculty of Civil Engineering, Tishren University, Lattakia, Syria) and Dr. Malek Hasan (Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Tishren University, Lattakia, Syria), and any reference of other researchers work has been duly acknowledged in the text.

Candidate
name
signature

Supervisors
name
signature

ملخص البحث

يتناول هذا البحث دراسة هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق السطحية باعتماد تحليل عددي ثنائي الأبعاد حسب طريقة FEM، بافتراض شرط الحقل الأخضر، و الذي 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 للتربة وفق موديل (Hardening Soil Model: HS-Model).

يتضمن هذا البحث مقارنة بين نتائج التحليل العددي و طريقة (Limanov) النظرية مع قياسات حقلية مرجعية لمشاريع منفذة كما تتضمن دراسة بارامترية لأغلب العوامل التي تؤثر على هبوط سطح الأرض. و قد أظهرت نتائج البحث أن أبعاد حوض الهبوط و قيم الهبوط الأعظمي و شكل حوض الهبوط المحسوبة بطرق التحليل العددي قريبة جداً من نتائج القياسات الحقلية المرجعية ، كما أظهرت التأثير الكمي و النوعي لأهم البارامترات التي تم دراستها على قيم الهبوط و على شكل و أبعاد حوض الهبوط

Abstract

In this research, 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 (HS).

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

Search results have shown that width of subsurface trough, maximum surface settlement and shape of subsurface trough calculated by numerical analysis very close to the results of reference field measurements, also showed the quantitative and qualitative impact for the most important parameters that have been studied at settlement values ,shape and width of subsurface trough.

الفهرس

I	ملخص.....
III	الفهرس
V	ملحق الأشكال.....
III	ملحق الجداول.....

الفصل الاول : مدخل البحث

2	1.1 مقدمة
2	2.1 أشكالية البحث.....
3	3.1 أهداف البحث.....
3	4.1 منهجية البحث.....
4	5.1 محتوى البحث.....

الفصل الثاني: دراسات مرجعية حول هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق

6	1.2 مقدمة.....
6	2.2 خلفية نظرية حول هبوط سطح الأرض أثناء تنفيذ الأنفاق.....
6	1.2.2 انتقالات التربة التي يسببها تنفيذ الأنفاق.....
8	2.2.2 أسباب الهبوط الناتج عن التنفيذ.....
11	3.2 الطرق الحالية لحساب هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق.....
12	1.3.2 الطرق المبسطة (الطرق التجريبية و النصف تجريبية).....
17	2.3.2 الطرق النظرية التحليلية.....
18	3.3.2 الطرق العددية.....

الفصل الثالث : النمذجة بطريقة العناصر المنتهية FEM

25	1.3 مقدمة :
25	2.3 البرنامج المستخدم plaxis.....
25	3.3 معطيات النفق و القياسات الحقلية (tunnel data & field measurement).....
27	4.3 خلفية نظرية لقانون المادة (Hardening Soil Model).....
28	5.3 النموذج العددي (2D -FE-Model).....
32	6.3 معايرة النموذج والتحقق من صلاحية النتائج (Model Calibration & Validations).....

الفصل الرابع : الدراسة البارامترية

35	1.4 مقدمة.....
35	2.4 الدراسة البارامترية في حالة تربة غضارية متجانسة.....

36	.....1.2.4 تأثير معامل التقلص (contraction%)
39	.....2.2.4 تأثير عمق النفق (H/D,D=constant=6.4)
43	.....3.2.4 تأثير قطر النفق (H/D,H=constant=15m)
46	.....4.2.4 تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (Ko)
48	.....5.2.4 تأثير مقاومة التربة على القص (c')
48	.....6.2.4 تأثير صلابة التربة (Eoed)
50	.....7.2.4 تأثير منسوب المياه الجوفية
52	.....3.4 الدراسة البارمترية في حالة تربة رملية متجانسة
53	.....1.3.4 تأثير معامل التقلص (contraction%)
55	.....2.3.4 تأثير عمق النفق (H/D,D=constant=6.4m)
58	.....3.3.4 تأثير قطر النفق (H/D,H=constant=15m)
61	.....4.3.4 تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (Ko)
63	.....5.3.4 تأثير مقاومة التربة على القص (ϕ')
63	.....6.3.4 تأثير صلابة التربة (Eoed)
65	.....7.3.4 تأثير منسوب المياه الجوفية
66	.....4.4 تحليل حساسية قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض لتغيير أهم البارمترات

الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات

68	.....1.5 الاستنتاجات حول نتائج الدراسة العددية بطريقة FEM
70	.....2.5 التوصيات

المراجع

72المراجع
----	--------------

رقم الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
6	الشكل الفراغي لحوض الهبوط المتشكل فوق منطقة تنفيذ النفق [6]	الشكل (1,2)
7	الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق: (a) في الاتجاه الطولاني (b) في الاتجاه العرضي [4].	الشكل (2,2)
7	(a) هبوطات شاقولية في الاتجاه العرضي (b) انتقالات أفقية في الاتجاه العرضي [6]	الشكل (3,2)
9	مراحل الهبوط على طول النفق [4]	الشكل (4,2)
10	أسباب الهبوط [20]	الشكل (5,2)
13	حوض الهبوط بالاتجاه العرضي [6]	الشكل (6,2)
14	فأقد الحجم الناتج عن تنفيذ الأنفاق [7]	الشكل (7,2)
15	توزع الانتقالات السطحية الأفقية و التشوهات بالاتجاه العرضي مع حوض الهبوط [6]	الشكل (8,2)
16	العلاقة بين موقع نقطة الانعطاف على السطح i وعمق النفق Z_0 [6]	الشكل (9,2)
18	مثال عن نموذج مستوي (2D-Model) لنفق	الشكل (10,2)
19	مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Addenbrooke,T, et al., 1997 [1])	الشكل (11,2)
19	مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Franzius,N, et al. 2005 [6])	الشكل (12,2)
20	مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Grammatikopoulou,A, et al. 2008 [9])	الشكل (13,2)
20	مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Namazi,E, et al, 2012 [15])	الشكل (14,2)
21	مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Jongpradist,P, et al, 2012 [10])	الشكل (15,2)
21	تأثير قطر النفق على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009) [25]	الشكل (16,2)
22	تأثير عمق النفق على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009) [25]	الشكل (17,2)
22	تأثير صلابة التربة على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009) [25]	الشكل (18,2)
23	تأثير معامل ضغط التربة الجانبي على قيم الهبوط (Hajihassani, M, et al. 2013) [26]	الشكل (19,2)
23	تأثير منسوب المياه الجوفية على قيم الهبوط (Hajihassani, M, et al. 2013) [26]	الشكل (20,2)
26	القياسات الحقلية المرجعية لنفق (Bangkok MRT) [7]	الشكل (1,3)
27	تمثيل سطح الخضوع الرئيسي لموديل (HS) في فضاء الاجهادات الرئيسية للتربة ضعيفة التماسك [18]	الشكل (2,3)

28	الأبعاد الهندسية للنموذج و شبكة العناصر المنتهية	الشكل(3,3)
30	الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق باعتماد موديل (HS)	الشكل(4,3)
30	الشبكة المشوهة بعد تنفيذ النفق (مكبرة 50 مرة) باعتماد موديل (HS)	الشكل(5,3)
31	الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق باعتماد موديل (HS)	الشكل(6,3)
31	أحواض الهبوط على أعماق مختلفة باعتماد موديل (HS)	الشكل(7,3)
32	مقارنة بين نتائج نموذج الـ FEM باستخدام قانون المادة (HS) و طريقة (Limanov) النظرية مع القياسات الحقلية المرجعية بالنسبة لهبوطات سطح الأرض فوق نفق (Bangkok MRT)	الشكل(8,3)
33	تغييرات الهبوط على بعد (30 m) من محور النفق مع ازدياد عرض النموذج	الشكل(9,3)
36	تغيير حوض الهبوط مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة	الشكل(1,4)
37	تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة	الشكل(2,4)
38	تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة.	الشكل(3,4)
39	تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل تقلص النفق لحالات الغضار المختلف القوام	الشكل(4,4)
40	نموذجين عدديين (FE-Model) من أجل عمقين مختلفين (H/D=3). (H/D=1) لنفق بنفس القطر	الشكل(5,4)
41	تغير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثبات القطر للغضار المتوسط الصلابة	الشكل(6,4)
42	تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات القطر لحالات الغضار	الشكل(7,4)
42	تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات القطر لحالات الغضار	الشكل(8,4)
43	تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الغضار (H/D=1.5)	الشكل(9,4)
43	تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الغضار (H/D=3)	الشكل(10,4)
44	تغيير شكل وأبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي (H/D) بثبات سماكة التربة أعلى النفق للغضار المتوسط الصلابة	الشكل(11,4)
45	تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق للغضار المتوسط الصلابة	الشكل(12,4)
45	تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الغضار	الشكل(13,4)
46	تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار	الشكل(14,4)

	المتوسط الصلابة	
47	الشكل (15,4) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار	
	المتوسط الصلابة	
47	الشكل (16,4) تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار المتوسط	
	الصلابة	
48	الشكل (17,4) تغيير الهبوط الأعظمي مع تغيير التماسك للغضار	
49	الشكل (18,4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير صلابة الغضار	
49	الشكل (19,4) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير صلابة الغضار	
50	الشكل (20,4) تغيير عرض الحوض مع تغيير صلابة الغضار	
51	الشكل (21,4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير منسوب المياه الجوفية للغضار	
	المتوسط الصلابة	
51	الشكل (22,4) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير منسوب المياه الجوفية لحالات الغضار.	
53	الشكل (23,4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الرمل	
	المتوسط الارتصاص	
54	الشكل (24,4) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الرمل المتوسط	
	الارتصاص	
54	الشكل (25,4) تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل تقلص النفق لحالات الرمل	
55	الشكل (26,4) تغيير العمق النسبي بتغيير سماكة التربة أعلى النفق و ثبات القطر ($H/D=1$)	
55	الشكل (27,4) تغيير العمق النسبي بتغيير سماكة التربة أعلى النفق و ثبات القطر ($H/D=3$)	
56	الشكل (28,4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق	
	للرمل المتوسط الارتصاص	
57	الشكل (29,4) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق للرمل	
	المتوسط الارتصاص	
57	الشكل (30,4) تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق للرمل المتوسط	
	الارتصاص	
58	الشكل (31,4) تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق	
	لحالات الرمل ($H/D=1$)	
58	الشكل (32,4) تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق	
	لحالات الرمل ($H/D=3$)	
59	الشكل (33,4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة	
	أعلى النفق للرمل المتوسط الارتصاص	
60	الشكل (34,4) تغيير الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق	
	للرمل المتوسط الارتصاص	
60	الشكل (35,4) تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق	

لحالات الرمل	
61	الشكل(4,36) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للرمل المتوسط الارتصاص
62	الشكل(4,37) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل
62	الشكل(4,38) تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل
63	الشكل(4,39) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل الاحتكاك للرمل
64	الشكل(4,40) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير صلابة الرمل
64	الشكل(4,41) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير صلابة الرمل
65	الشكل(4,42) تغيير عرض الحوض مع تغيير صلابة الرمل
65	الشكل(4,43) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير منسوب المياه الجوفية للرمل المتوسط الارتصاص
66	الشكل(4,44) تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير منسوب المياه الجوفية لحالات الرمل.

رقم الصفحة	عنوان الشكل	رقم الجدول
17	علاقات حساب معامل عرض الحوض (ix) [5]	الجدول (1,2)
26	قياسات حقلية لنفق (Bangkok MRT) [8]	الجدول (1,3)
26	خواص طبقات التربة حول نفق (MRT Tunnel) [10]	الجدول (2,3)
29	خواص طبقات التربة حول نفق (MRT Tunnel) وفق موديل (MC) و (HS) [10]	الجدول (3,3)
29	خواص قشرة النفق (MRT Tunnel) [16]	الجدول (4,3)
35	خواص الغضار المعتمد في قانون المادة (HS-Model) حول نفق في الدراسة البارامتريية	الجدول (1,4)
38	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص لحالات الغضار المختلف القوام	الجدول (2,4)
41	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الغضار بثبات قطر النفق.	الجدول (3,4)
44	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الغضار بثبات سماكة التربة أعلى النفق.	الجدول (4,4)
46	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الغضار.	الجدول (5,4)
48	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل المرونة الأودومتري للغضار.	الجدول (6,4)
52	خواص الرمل المعتمد في قانون المادة (HS-Model) حول النفق في الدراسة البارامتريية	الجدول (7,4)
53	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص لحالات الرمل.	الجدول (8,4)
56	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الرمل بثبات قطر النفق.	الجدول (9,4)
59	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الرمل بثبات سماكة التربة أعلى النفق.	الجدول (10,4)
61	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل.	الجدول (11,4)
63	تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل المرونة الأودومتري للرمل.	الجدول (12,4)
66	تحليل حساسية قيم الهبوط الأعظمي و عرض حوض الهبوط لحالات الرمل و الغضار لتغيير أهم البارامترات.	الجدول (13,4)

الفصل الأول

مدخل البحث (Research entrance)

1. مدخل البحث (Research entrance)

1.1 مقدمة (Introduction):

إن نمو المدن وتطورها العمراني يؤدي إلى الحاجة إلى المزيد من المنشآت و البنى التحتية و يدفع بشكل متصاعد إلى الاستخدام المتزايد للأنفاق بسبب محدودية المساحات الأرضية المتوفرة. ولكن تنفيذ الأنفاق داخل المدن يتسبب دائماً بانتقالات و هبوطات لسطح الأرض فوق منطقة تنفيذ الأنفاق و هذه الهبوطات الناتجة عن التنفيذ تسبب غالباً أضراراً للمنشآت الواقعة عند سطح الأرض أو تحت سطح الأرض.

وهذا البحث يتناول الانتقالات و الهبوطات في التربة الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق المغلقة و طرق التنبؤ بمقدار هذه الهبوطات و شكلها و امتدادها ودراسة أهم العوامل المؤثرة فيها. و سيتم التركيز في هذا البحث على أهم طرق التنفيذ الحديثة للأنفاق السطحية ضمن الترب الضعيفة نسبياً و التي تستخدم فيها الطرق الدرعية الحديثة المغلقة (الدروع ذات التدعيم الدائم لجبهة الحفر مثل: الدرع الهيدروليكي (slurry shield) و درع توازن ضغط التربة (EPB-shield)، و يحدد نوع النفق سطحي أو عميق نسبة عمق النفق إلى قطره أو ما يعرف بالعمق النسبي (H/D) فإذا كانت $(H/D \leq 2)$ يعتبر النفق سطحي مهما كان نوع التربة أما في حالة $(2 \leq H/D \leq 3)$ تعتبر مرحلة انتقالية فكلما تحسنت خواص التربة يقترب النفق من كونه عميق و في حالة التربة الضعيفة يعتبر النفق سطحي، $(H/D \geq 3)$ يعتبر النفق عميق و يبدأ عندها التأثير القوسي.

2.1 أشكالية البحث (Problem Statement):

بسبب التطور العمراني الكبير تقل المساحات المخصصة لحل مشاكل النقل و المواصلات، الأمر الذي يدفع بشكل متزايد إلى تنفيذ الأنفاق ، و لكن بناء الأنفاق داخل المدن 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) و كذلك على المنشآت تحت أرضية . و هذه 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 .
العلاقات التقريبية لتقدير هذه الهبوطات تعطي تفاوتاً كبيراً مع النتائج و لا تتناسب مع طرق التنفيذ الحديثة، فبسبب التطور الكبير لتقنيات التنفيذ لابد من إيجاد طرق لتقدير الهبوطات بشكل أكثر دقة لتتناسب مع هذه التقنيات الحديثة.

كما أن هذا البحث سوف يساهم في إغناء البحث العلمي في الجامعات فيما يتعلق بموضوع البحث وهو تقدير الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق المغلقة الحديثة، وفي تسليط الضوء على أهم العوامل المؤثرة في حسابها ، بهدف التوصل إلى فهم أفضل للتأثيرات المتبادل بين تقنيات تنفيذ الأنفاق و التربة المحيطة بها، و كذلك فهم أفضل للآليات النازمة للهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق.

3.1 أهداف البحث (Research Objectives):

يهدف هذا البحث إلى دراسة تشوهات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية في التربة الضعيفة نسبياً 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 عمق النفق و قطره
2. تأثير خواص التربة المحيطة بالنفق.
3. تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (K_0)
4. تأثير معامل التقلص (% Contraction factor C).

4.1 منهجية البحث (Research methodology):

يعتمد البحث على المنهج التحليلي المقارن وقد تم تقسيم البحث إلى مرحلتين أساسيتين:

- 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.
- استخدام الخصائص التقريبية لكل من الغضار و الرمل من اجل تحليل عددي وإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على تشوهات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ النفق في الاتجاه العرضاني.

5.1 محتوى البحث (Research Outlines):

تم توزيع الفصول في هذا البحث كما يلي :

1. **الفصل الأول:** تناول هذا الفصل موضوع البحث وأهميته، كما تم توضيح أهداف البحث و تلخيص منهجية الدراسة و طرق حسابها.
2. **الفصل الثاني:** تم في هذا الفصل عرض خلفية نظرية عن هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق و أسبابها ، بالإضافة إلى دراسة مرجعية عن هبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق السطحية و طرق حسابها.
3. **الفصل الثالث:** تناول هذا الفصل النمذجة العددية حسب طريقة العناصر المنتهية (FEM) لنفق منفذ مع قياسات حقلية للهبوطات المرافقة للتنفيذ بهدف معايرة النموذج الرياضي باستخدام برنامج (plaxis) ، ومقارنة نتائج نموذج الـFEM مع القياسات الحقلية المرجعية.
4. **الفصل الرابع:** تم في هذا الفصل إجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة على قيم الهبوط و شكل و أبعاد حوض الهبوط (عمق النفق و قطره ، خواص التربة $(K_0/c'/\phi'/E_{oed})$ ، معامل التقلص (Contraction Factor C %)).
5. **الفصل الخامس:** خصص هذا الفصل لعرض أهم النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث ، وصياغة أهم التوصيات والمقترحات الختامية للاستفادة منها مستقبلاً.

الفصل الثاني

دراسة مرجعية حول هبوط سطح الأرض الناتج عن
تنفيذ الأنفاق

2. دراسة مرجعية حول هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق

1.1.2. مقدمة:

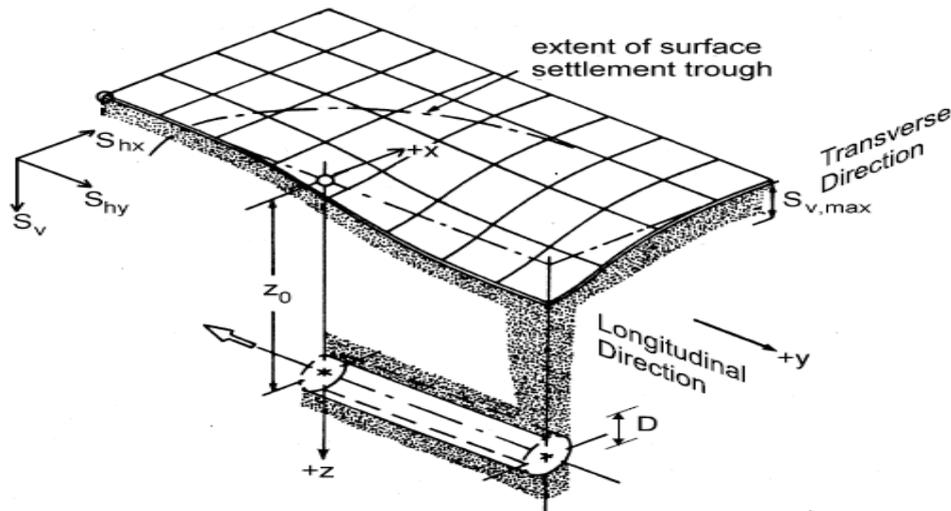
يتناول هذا الفصل خلفية نظرية حول هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق السطحية بالطرق الحديثة المغلقة و آليات الهبوط و أسبابه ، كما يتناول طرق حساب الهبوط الناتج عن التنفيذ و نتائج الدراسات المختلفة لحالة البحث حول هبوط السطح أثناء تنفيذ الأنفاق.

2.2. خلفية نظرية حول هبوط سطح الأرض أثناء تنفيذ الأنفاق:

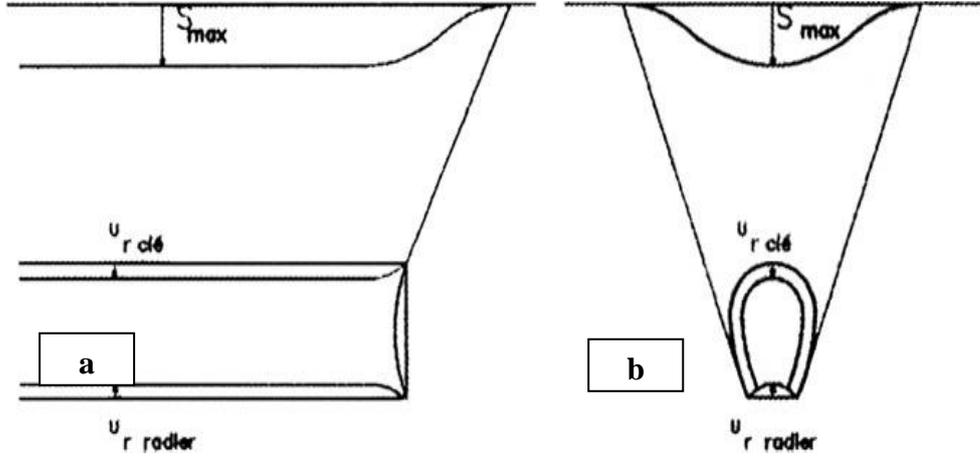
1.2.2. انتقالات التربة الناتجة عن تنفيذ الأنفاق:

إن تنفيذ الأنفاق داخل المدن يسبب انتقالات للتربة يمكن أن تصل حتى سطح الأرض و خصوصاً في حالة الأنفاق السطحية و الترب الضعيفة ، وتؤدي إلى تشكل حوض هبوط (Settlement trough) عند سطح الأرض يمثل المنطقة المتأثرة بعمليات التنفيذ و الشكل (1.2) يوضح الشكل الفراغي لحوض الهبوط فوق النفق حسب (Burland et al., 2001).

و يجب التمييز بين الهبوطات في الاتجاه الطولاني للنفق (Longitudinal Direction) (مقطع طولي) والهبوطات في الاتجاه العرضاني اي العمودي على محور النفق (Transverse Direction) و الذي غالباً ما يعبر عنه في مقطع مستوي عرضي عمودي على محور النفق شكل (2.2)، و كذلك يجب التمييز بالنسبة للهبوطات في الاتجاه العرضاني بين الهبوطات الشاقولية (Vertical Settlements) وبين الانتقالات الأفقية (horizontal displacements or movements) (شكل (3.2)).

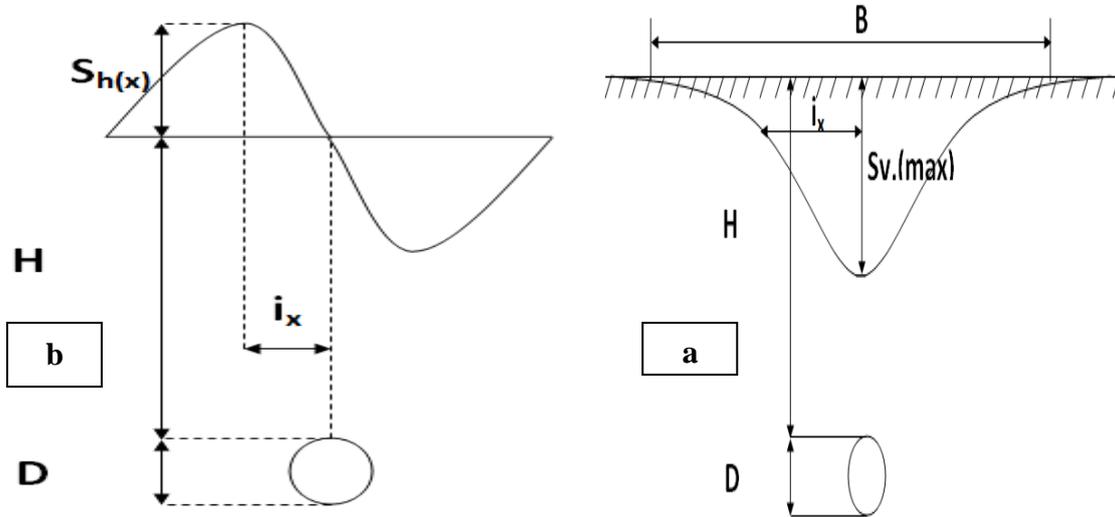


الشكل(1.2):الشكل الفراغي لحوض الهبوط المتشكل فوق منطقة تنفيذ النفق [6]



الشكل (2.2) الهبوطات الناتجة عن تنفيذ الأنفاق: (a) في الاتجاه الطولي (b) في الاتجاه العرضي [4].

يعبر (S_v, \max) في الشكل (3.2) عن الهبوط الشاقولي الأعظمي لسطح الأرض الناتج عن تنفيذ النفق و يعبر $(S_{h,x})$ عن الانتقالات الأفقية.



الشكل (3.2): (a) هبوطات شاقولية في الاتجاه العرضي (b) انتقالات أفقية في الاتجاه العرضي [6]

انتقالات التربة الناتجة عن تنفيذ الأنفاق ترتبط بالعديد من العوامل أهمها:

1. الخواص الجيوتكنيكية و الهيدروجيولوجية و الجيولوجية
2. أبعاد النفق و العمق
3. تقنيات التنفيذ و الخبرة .

من الواضح أن الأنفاق السطحية تسبب تأثير أكبر على المنشآت السطحية أكثر من العميقة . تنفيذ الأنفاق سوف يؤثر على اجهادات التربة الابتدائية و الخواص الهيدروجيولوجية، هذا التغيير بالخواص

الاجهادية الطبيعية و فاقد الحجم الناتج حول النفق يسبب انتقالات سريعة نحو داخل النفق. في التربة الغضارية المتماسكة، تنتج تشوهات طويلة الأمد إضافية يمكن ملاحظتها كنتيجة لتغيرات ضغط الماء المسامي التي تسببها أعمال تنفيذ النفق.

2.2.2. أسباب الهبوط الناتج عن تنفيذ الأنفاق :

• التنفيذ بالطريقة المتسلسلة (NATM):

عند العمل بهذه الطريقة توجد أربع مصادر أساسية للهبوط يمكن تعريفها:

1. هبوط مرتبط باستقرار واجهة الحفر : التحكم باستقرار واجهة الحفر ضروري ، تشير الدراسات إلى العلاقة المباشرة بين التحكم باستقرار الواجهة و الهبوط الناتج أعلى واجهة الحفر.
2. هبوط مرتبط بخصائص و شروط تركيب نظام التدعيم المؤقت : الاختيار لنظام التدعيم المؤقت الملائم يتم في مرحلة الدراسات العملية للمشروع، هذا الدراسة تشمل تحديد:
 - الصلابة النظرية لنظام التدعيم و التي تحسب من خصائصها الميكانيكية و طرق التثبيت.
 - الزمن اللازم لتثبيت نظام التدعيم و هذا يعتمد على تباعد النظام المثبت عن واجهة الحفر.

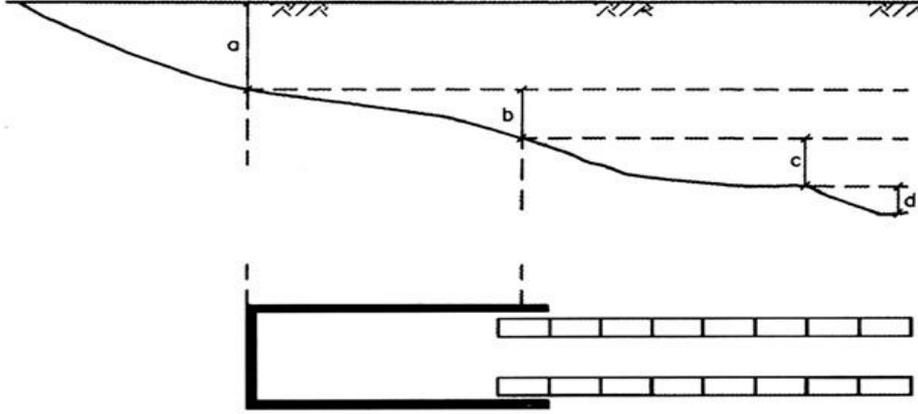
هذان البارامتران يستخدمان لتقييم القدرة العامة لنظام التدعيم لمقاومة الانتقالات، بما أن خصائص التدعيم النظرية محددة لا بد من التأكد من ملائمتها لشروط موقع العمل الفعلية.

3. هبوط مرتبط بتقسيم واجهة الحفر (جبهات) و أعمال الحفر المتسلسلة ضمنها: يقسم الهبوط الناتج إلى:

- هبوط عند واجهة الحفر و هذا يتعلق بمساحة واجهة الحفر.
- هبوط على مسافة من واجهة الحفر : و هذا يعتمد على السرعة بتنفيذ قشرة النفق، مراحل حفر الواجهة، طول المنطقة غير المدعمة خلف واجهة الحفر.
- انتقالات التربة على مسافة خلف واجهة الحفر تتأثر بشكل أكبر بالمسافة بين ال قشرة الدائمة المثبتة و واجهة الحفر، حيث أن هذه القشرة الدائمة عادةً تكون أصلب من القشرة المؤقتة و تخضع لتشوهات أقل ، تثبيتها بشكل مبكر يساهم في توزيع طولي أكثر انتظاماً لحمولات القشرة و بالتالي الحد من تشوهات التربة.
- 4. هبوط مرتبط بتثبيت قشرة النفق الدائمة و استجابتها : تأثير تشوهات قشرة النفق على انتقالات التربة يجب أخذه بالحسبان ، تحديداً في حالة مجازات كبيرة مع تغطية محدودة.

• حالة الأنفاق المنفذة بالطريقة الدرعية :

الهبوط الناتج عن تنفيذ الأنفاق بالطريقة الدرعية يمكن تقسيمه إلى أربعة مصادر، و يوضح الشكل (4.2) مراحل الهبوط على طول النفق:



الشكل (4.2) مراحل الهبوط على طول النفق [4].

(a) الهبوط من الواجهة.

(b) الهبوط على طول الدرع.

(c) الهبوط عند ذيل الدرع.

(d) الهبوط الناتج عن تشوه البطانة.

1. الهبوط أعلى و أمام واجهة الحفر : الهبوط عند الواجهة ناتج عن انتقالات التربة أعلى و فوق الدرع نحو الفتحة (فاقدة الواجهة) الانتقالات تعتمد على مقاومة التدعيم عند واجهة الحفر (ضمن غرفة إخراج التربة)، و على خواص التربة و الخواص الهيدروليكية.
 2. الهبوط على طول الدرع : القياسات المسجلة أعلى الأنفاق المنفذة بالطريقة الدرعية تشير إلى أن انتقالات التربة نادراً ما تكون مستقرة عند الذيل ، و أن زمن الاستجابة للتربة المحيطة يميل إلى التناقص مع تقدم التغطية. الملاحظات القليلة المتوفرة لهذه الظاهرة تميل لإظهار أن الانتقالات تنتشر باتجاه السطح بسرعة ثابتة تتعلق بتربة الموقع.
- الهبوط على طول الدرع يكون ناتج بشكل أساسي عن التالي :

- القطع الزائد للتربة الناتج عن القواطع الحادة التي تنتج قطر أكبر قليلاً عن قطر الدرع و هذا يخفض الاحتكاك بين التربة و الدرع و يسهل التوجيه في المنحنيات ذات الأقطار الضيقة.
- صعوبة توجيه النفق ، تحديداً لميل الدرع للهبوط (الغوص) ، و الذي عادةً يتطلب توجيه الدرع بزاوية نحو الأعلى بحيث يمكن منع التآرجح . بشكل مشابه ميل الدرع للانحراف ينتج مقطع حفر عمودي أعرض من مقطع الدرع، هذا يساهم في زيادة الفجوة بين القطر المحفور و قطر النفق النظري.

• تضيق الدرع.

• ازدياد خشونة القواطع و ذلك بسبب الاحتكاك و قص التربة ، وذلك يسبب هبوط في الأعلى و انتقالات التربة فوق الدرع.

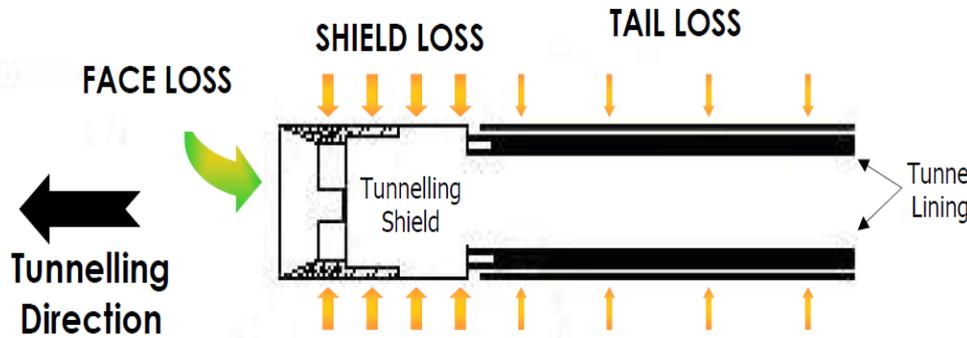
3. الهبوط عند ذيل الدرع : عند ذلي الدرع يتطور فواغ بين التربة و الوجه الخارجي لعناصر ال قشرة بسبب:

• الفجوة المتولدة على طول الدرع.

• سماكة قشرة الذيل و التي تتنوع حسب نوع الدرع (مفردة أو مضاعفة) و قطر النفق.

• حجم الفراغ بين الوجه الداخلي لقشرة الذيل و الوجه الخارجي لعناصر ال قشرة ، المصمم لسحب الذيل.

4. الهبوط الناتج عن تشوه ال قشرة : العناصر البيتونية مسبقة الصنع المثبتة ضمن الذيل يجب أن تكون مقاومتها كافية لتحمل الدفع الناتج عن المكابس. بالنتيجة التشوه الشعاعي لحلقة القشرة عادةً ما يكون مقبول شريطة حقن فجوة الذيل بشكل صحيح .
و يوضح الشكل (5.2) أسباب الهبوط الناتج عن تنفيذ الأنفاق.



الشكل (5.2): أسباب الهبوط [20]

• تأثير منسوب المياه الجوفية :

العديد من الأمثلة يمكن مصادفتها عن الصعوبات و الحوادث في الأعمال تحت السطحية الناتجة عن وجود المياه. من المؤكد أن التحكم بالمياه الجوفية هو عنصر أساسي لنجاح الأعمال تحت السطحية. الهبوط الناتج عن المياه الجوفية يقسم إلى صنفين :

1. الصنف الأول يعود إلى الهبوط الحاصل تقريباً بشكل متزامن مع التنفيذ. تخفيض منسوب المياه

الجوفية قبل الحفر (من خلال الدريناج) أو كنتيجة لتنفيذ النفق ربما يسبب الهبوط المباشر في

طبقات التربة المضغوطة ، كما هو الحال في الترب الصخرية المتأثرة بالعوامل الجوية . تأثير مثل هذا التخفيض لمنسوب المياه يتنوع بالنسبة إلى المقدار و نصف قطر التأثير:

- عندما يكون التخفيض محلي يسبب تشوهات تقوم عادةً بتوليد هبوط مختلف و الذي يمكن أن يسبب الضرر للأبنية المجاورة.
- عندما يكون التخفيض واسع الانتشار نتائجه تكون أقل ضرراً.
- وجود المياه الجوفية عند واجهة الحفر ربما يسبب الهبوط كنتيجة :
- الميل الهيدروليكي يضعف الخصائص الميكانيكية للتربة عند واجهة الحفر و عند جدران النفق وهذا يزيد تشوهات التربة.
- إضعاف الخصائص الميكانيكية للتربة أسفل النفق تحديداً عند استخدام الطريقة المتسلسلة مع خطر ثقب تربة القاعدة بالتدعيم المؤقت.

2. الصنف الثاني : يعود إلى الهبوط مع الزمن الذي يلاحظ بشكل عام في الترب الغضارية المنضغطة. كنتيجة لتنفيذ النفق تخضع التربة لتزايد الاجهادات ثم تزايد ضغط الماء المسامي . ميكانيزمات مشابهة يمكن أن تتطور بمقياس أكبر بنتيجة ضغط الدرغ أثناء التنفيذ . كذلك كنتيجة لنضح الماء الذي سيحصل حتماً باتجاه الجدران أثناء أو بعد التنفيذ ، إما عبر المواد السابقة المتواجدة حول الفتحة أو عبر قشرة النفق، التشديد سوف يحصل ضمن كامل كتلة التربة . مقدار هبوط التشديد سوف يكون أكبر في المناطق التي تخضع لتخفيض شديد لضغط الماء المسامي.

- **تأثير خصائص الموقع:**

هذا يشمل الهبوط الذي تسببه شروط الموقع خصوصاً الاهتزاز الناتج عن الحفر سواء بالطريقة المتسلسلة أو بالطريقة الدرعية بالإضافة إلى عمليات إزاحة الطمي. الهبوط لهذا النوع لوحظ في الترب الضعيفة.

3.2. الطرق الحالية لحساب هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق:

- توجد عدة طرق لحساب الهبوطات الناتج عن تنفيذ الأنفاق و يمكن تقسيمها إلى :
- طرق مبسطة (تجريبية و نصف تجريبية).
 - طرق نظرية تحليلية.
 - طرق التحليل العددي و منها طريقة العناصر المنتهية (FEM).

1.3.2. الطرق المبسطة (الطرق التجريبية و النصف تجريبية):

الطرق المبسطة تعتمد في تقدير هبوطات سطح الأرض الناتجة عن تنفيذ الأنفاق (انتقالات سطح التربة ضمن شروط الحقل الأخضر أي سطح الأرض خالي من الحمولات و المنشآت) على عدد من البارامترات أو العوامل التي تسمح بالأخذ بعين الاعتبار لما يلي:

• قطر النفق و عمقه.

• ظروف التربة و خواصها.

• حجم فاقد التربة الناتج عن تنفيذ النفق.

من إيجابيات هذه الطريقة:

1. بساطتها و سهولة استخدامها.

2. حاجتها لعدد قليل من المعطيات.

3. عدد كبير من الباحثين ((Peck, 1969)، (O`Reilly & New, 1982) (.....) قاموا بأبحاث متعددة عليها و اختبارها في مواقع عديدة.

أما سلبياتها:

1. تتضمن عدد كبير من الافتراضات و التقريبات (من التقريبات : طبقات التربة أفقية و متجانسة،

سطح الأرض خال من الحمولات أو المنشآت أو ما اصطلح على تسميته في المراجع العلمية

الأجنبية بشرط الحقل الأخضر (Greenfield Conditions) ، (....).

2. قابلية استخدام بعض المعاملات التجريبية في هذه الطرق يعتبر غير دقيق ، وذلك لأن هذه

المعاملات التجريبية تم استنتاجها من شروط موقع محدد و تكون قابلية استخدام هذا المعامل على

شروط موقع آخر مجال تساؤل كبير.

الانتقالات بالاتجاه العرضاني : معظم الأبحاث المتعلقة به بوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق

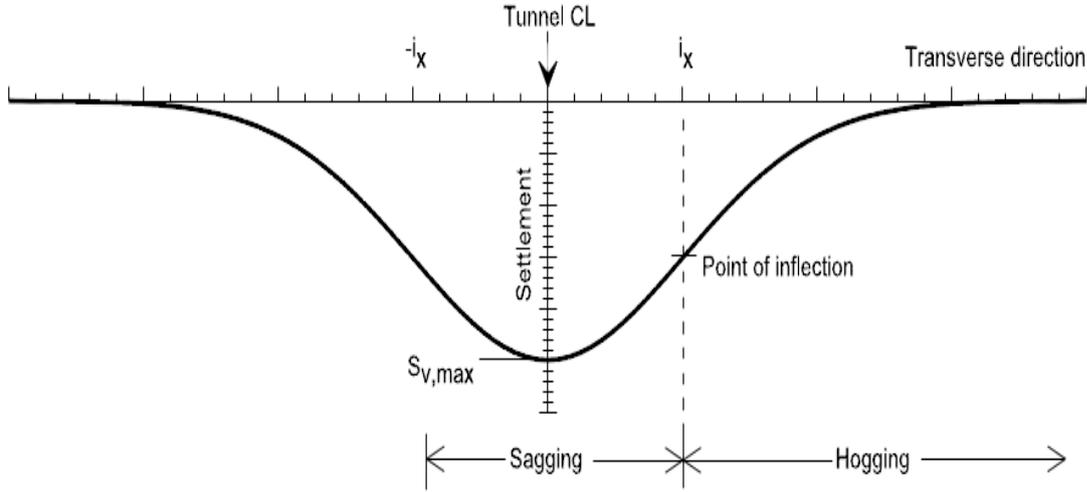
يستند بشكل أساسي على الأبحاث التي قام بها (Peck, 1969). يبين الشكل (6.2) تطور حوض

الهبوط عند السطح الناتج عن تنفيذ الأنفاق. 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:

$$S_{v,x} = S_{v,max} * e^{\frac{-x^2}{2*i_x^2}} \quad (1)$$



الشكل (6.2): حوض الهبوط بالاتجاه العرضاني [6]

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 (6.2) 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.

الهبوط الشاقولي الأعظمي ($S_{v,max}$):

(O'Reilly & New, 1982) أعطوا في أبحاثهم العلاقة التالية لحساب الهبوط الشاقولي الأعظمي

لسطح الأرض كما يلي:

$$S_{v,max} = K \cdot \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot R^2}{E} \quad (2)$$

حيث: K -عامل يعتمد على اجهادات التربة، خواص التربة، و أبعاد النفق (0.5 للغضار القاسي و 0.25 للرمل و الحصى الأقل قساوة)

λ - عامل تناقص الاجهاد، مقدار هذا العامل يتنوع ليأخذ بالحسبان سلوك التربة عند واجهة الحفر ،
المسافة التي يبعدها نظام التدعيم المثبت عن واجهة الحفر ، طريقة التنفيذ و نوعية الخبرة المتوفرة .
التطورات الأكثر حداثة سمحت بإدخال تأثير صلابة التدعيم .

R - نصف قطر الحفر (قطر النفق الخارجي ويتعلق بطريقة التنفيذ)

γ - الوزن الحجمي للتربة

E - عامل مرونة التربة

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

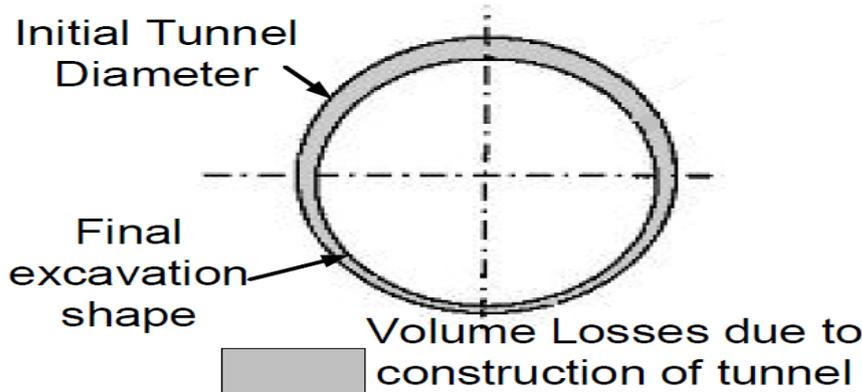
$$v_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s_v * d_x = \sqrt{2\pi} i_x * s_{v,max} \quad (3)$$

تفترض بعض الدراسات إن 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

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

VL: فاقد الحجم (Volume Loss) موضح بالشكل (7.2)

D: قطر النفق الخارجي



الشكل (7.2): فاقد الحجم الناتج عن تنفيذ الأنفاق [7]

بجمع العلاقتين (1) و (4) نحصل على العلاقة المعدلة التالية :

$$S_{v,x} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} * \frac{V_L * D^2}{4 * i_x} * e^{\frac{-x^2}{2 * i_x^2}} \quad (5)$$

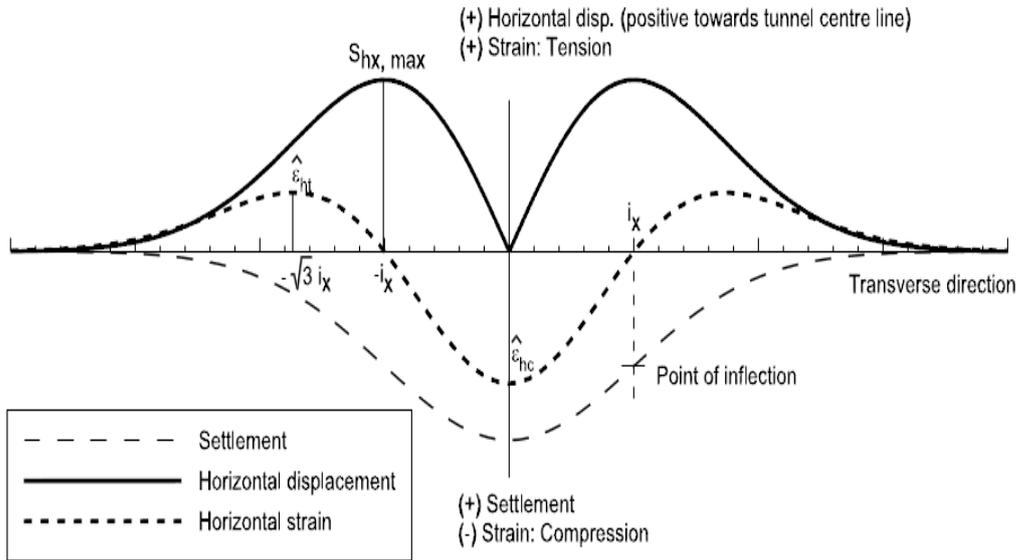
(O'Reilly & New, 1982) أظهروا أن الانتقالات الأفقية لتربة السطح في الاتجاه العرضاني يمكن أن تشتق من المعادلات السابقة بافتراض أن الانتقالات الناتجة تحصل باتجاه نقاط متوضعة على الخط العمودي المار بمركز النفق و تعطى بالعلاقة :

$$S_{h,x} = -\frac{-x * S_{v,x}}{z_0} \quad (6)$$

الشكل (8.2) يظهر الانتقالات الأفقية مع حوض الهبوط ، يمكن ملاحظة أن الانتقال الأفقي الأعظمي يحصل عند نقطة الانعطاف ، التشوه الأفقي بالاتجاه العرضاني مبين بالشكل ، يتم حسابه من الانتقال الأفقي مع الأخذ بعين الاعتبار ل X

$$\epsilon_{hx} = \frac{S_{v,x}}{z_0} * \left(\frac{x^2}{i_x^2} - 1 \right) \quad (7)$$

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 ، إن التشوهات الأفقية معيار أساسي عند وصف تشوهات البناء.



الشكل (8.2): يبين توزيع الانتقالات السطحية الأفقية و التشوهات بالاتجاه العرضاني مع حوض الهبوط [6]

يظهر الشكل (8.2) وجود منطقة منضغطة بين نقطتي الانعطاف ومنطقة مشدودة خارجهما ، القيمة العظمى للتشوهات الأفقية ϵ_{hx} تقسم إلى قيم أعظمية للضغط و للشد ϵ_{hc} و ϵ_{ht} ، هذه القيم تحصل عند $x = \sqrt{3}i_x$ و $x=0$ بالترتيب

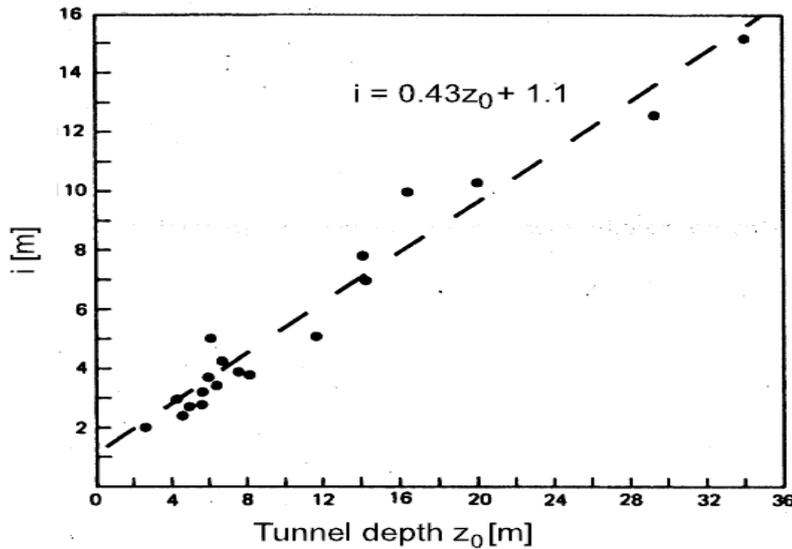
معامل عرض الحوض (ix): كما شرح سابقاً أن (i) يصف عرض حوض الهبوط . في نموذج الهبوط العرضاني تم تعريفه بالمسافة إلى نقطة الانعطاف أو نقطة الانحدار الأعظمي من الخط العمودي المار بمركز النفق . (O`Reilly & New, 1982) قدموا (19) حالة لدراسة إنشاء نفق في الغضار و وضعوا معامل عرض الحوض (i) مقابل عمق النفق المدروس (Z_0) كما هو مبين بالشكل (9.2) ومن المقاربة الخطية حصلوا على العلاقة:

$$i = 0.43Z_0 + 1.1(8)$$

حيث (Z_0, i) مقاسه ب (m) الشكل (9.2) يظهر أن الخط المقارب يمر بالقرب من مركز الإحداثيات . (O`Reilly & New, 1982) بسطوا المعادلة فأصبحت:

$$i = KZ_0(9)$$

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 الطري و القاسي .



الشكل (9.2) العلاقة بين موقع نقطة الانعطاف على السطح i وعمق النفق Z_0 [6]

(Rankin, 1988) قدم نتائج دراسة مشابهة لكن مع قاعدة بيانات أوسع. النتائج أكدت القيمة ($K=0.5$) للغضار مما يؤدي

$$(i = 0.5Z_0) \quad (10)$$

(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) ضمن الجدول (1.2):

جدول (1.2): علاقات حساب معامل عرض الحوض (i)

ملاحظات	العلاقة	الباحث و التاريخ
(n=0.8 - 1)	$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z}{2R}\right)^n$	(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 1989)

حيث : Z: العمق حتى محور النفق . R: نصف قطر النفق . C: سماكة التربة حتى أعلى النفق . D: قطر نفق . K: بارمتر عرض الحوض المحدد تجريبياً.

2.3.2. الطرق النظرية التحليلية:

تتطلب 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:

$$S_{v, \max} = (1 - \nu^2) \frac{p_r}{E} [4 \cdot R^2 \cdot Z_0 / (Z_0^2 - R^2)] \quad (11)$$

حيث أن: ν ، E هي معامل بواسون و معامل مرونة التربة على الترتيب، و R ، Z_0 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.

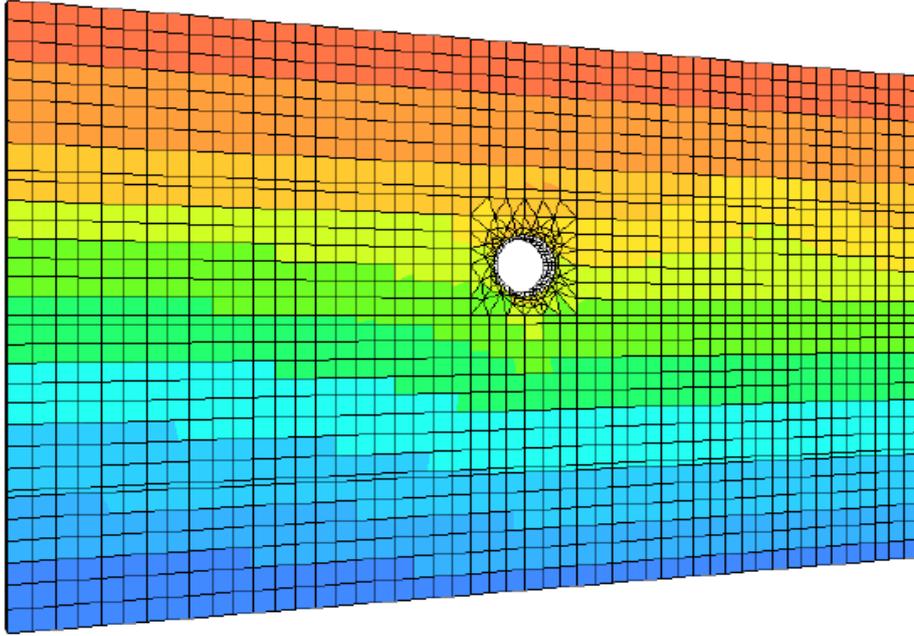
قدم (Sagaseta, 1987) بعض العلاقات التحليلية لتعيين حقل التشوهات في التربة المتجانسة والايزوتروبية الغير قابلة للانضغاط ($\nu=0.5$) نتيجة فاقد التربة بسبب حفر النفق واقترح العلاقة التالية لتقدير الهبوط الأعظمي:

$$S_{v, \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_t}{\pi} \cdot \frac{1}{Z_0} \quad (12)$$

حيث (V_t) فاقد الحجم

3.3.2. الطرق العددية :

تعتبر طريقة العناصر المنتهية (FEM) من أهم الطرق العددية 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 Franzius, 2003 and Addenbrooke, 1996) وغيرهم كثيرين حيث يظهر الشكل (10.2) مثال عن نموذج ثنائي البعد لنفق.

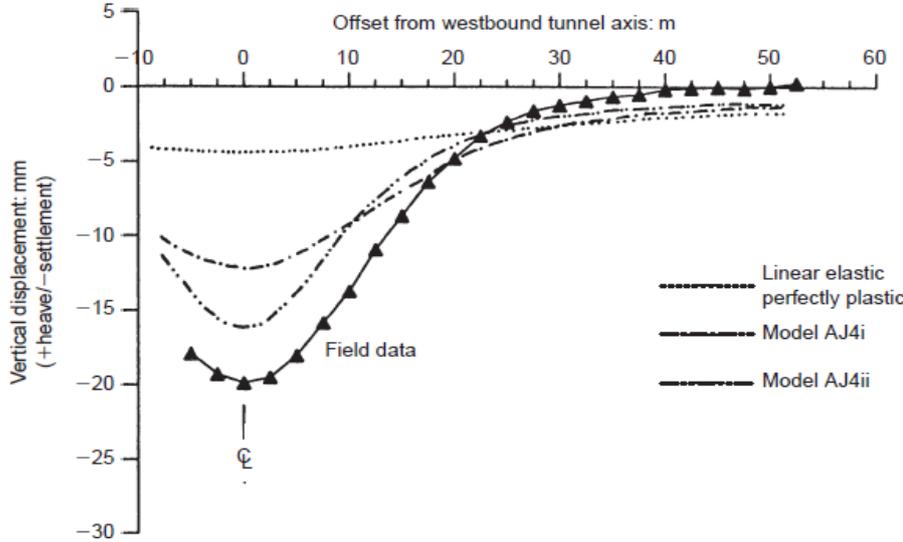


الشكل (10.2): مثال عن نموذج مستوي (2D-Model) لنفق

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.

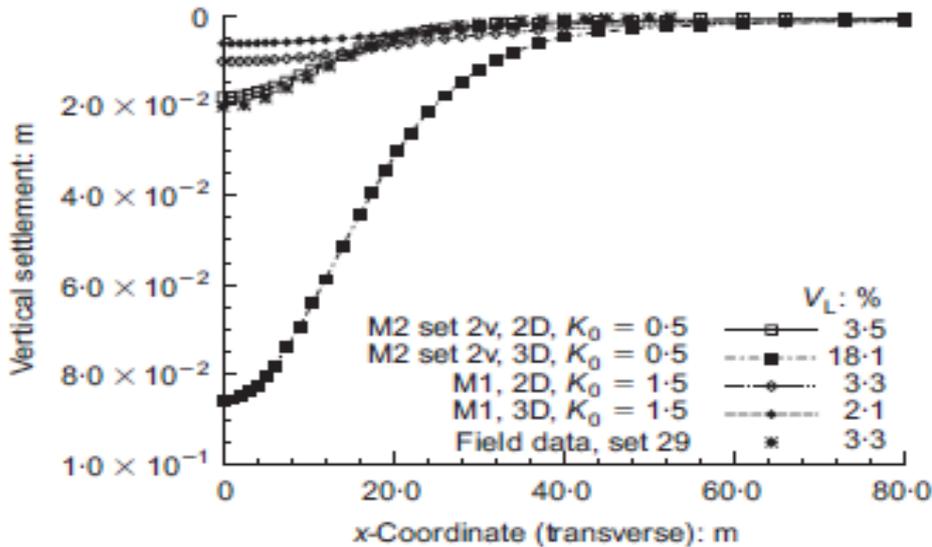
تسمح الطرق العددية بالتمذجة الكاملة للتأثير المتبادل بين التربة و أعمال تنفيذ النفق و الأبنية المتواجدة في الأعلى. هذه الطريقة يمكن استخدامها للحصول على قيم الحمولات المطبقة على قشرة النفق، وتقديم تقييم جيد لتصميم النفق، كذلك هذه التقنية تسمح بتحديد شامل لكل بارمترات التصميم. لكن تطبيقها يبقى معقد نسبياً فهو يحتاج إلى دقة عالية في النمذجة و المطيات المستخدمة من خواص تربة و قشرة النفق بالإضافة إلى دقة إدخال التأثير المتبادل بين التربة و النفق والحاجة إلى الدقة في اختيار حدود النموذج. هنا نورد تقييم مختصر لنتائج بعض الباحثين الذين اعتمدوا طرق التحليل العددي في تقييم هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق:

- قام (Addenbrooke, T, et al. 1997) بتحليل ثنائي البعد (2D analysis) متماثل و غير متماثل الخواص باستخدام موديل مرن خطي و مرن غير خطي.
- صلابة مرنة لا خطية حسنت النتائج لكن حوض الهبوط لا يزال عريضا كما يوضح الشكل (11.2).



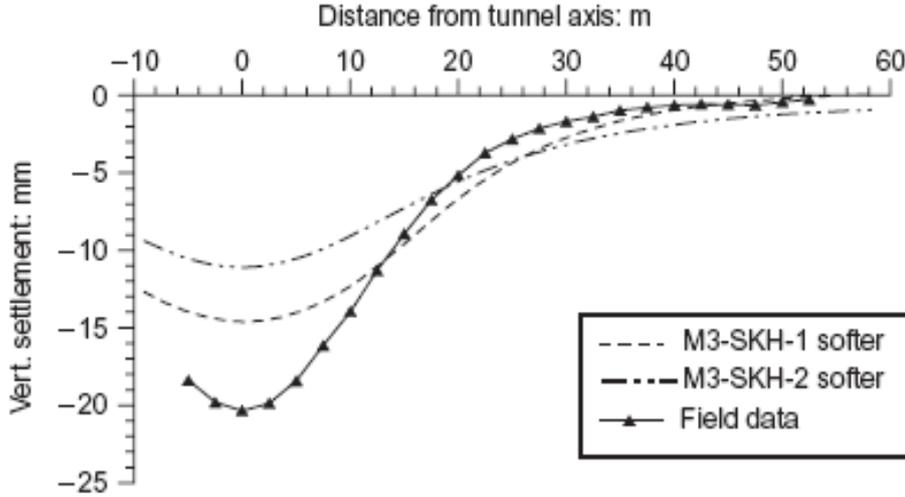
الشكل (11.2): مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Addenbrooke, T, et al., 1997) [1]

- قام (Franzius, N, et al. 2005) بتحليل ثنائي و ثلاثي الأبعاد (2D/3D analysis).
- $K_0=1.5 / K_0=0.5$
- حوض الهبوط بقي عريضا على الرغم من التحليل ثلاثي الأبعاد.
- التوقع تحسن باستخدام عوامل أساسية وهمية (درجة عالية من عدم تماثل الخواص و قيمة منخفضة ل (K_0) كما يظهر الشكل (12.2).



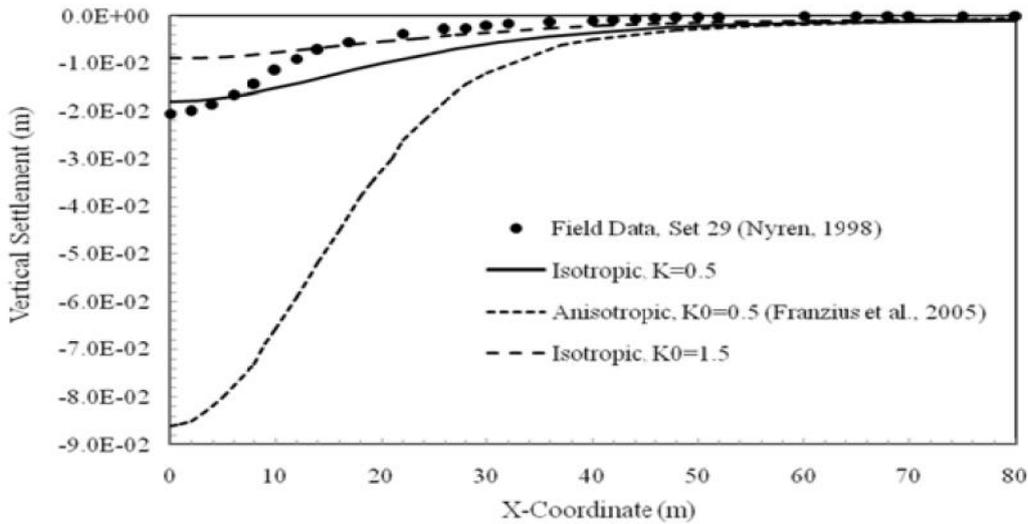
الشكل (12.2): مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Franzius, N, et al. 2005) [6]

- قام (Grammatikopoulou,A, et al. 2008) بتحليل ثنائي البعد (2D analysis).
- موديل قام بتحديدته بنفسه لغضار لندن.
- معايرة على التربة المعاد تشكيلها لغضار لندن.
- حوض الهبوط أفضل عند تخفيض صلابة التربة المستخدمة كما يبين الشكل (13.2).



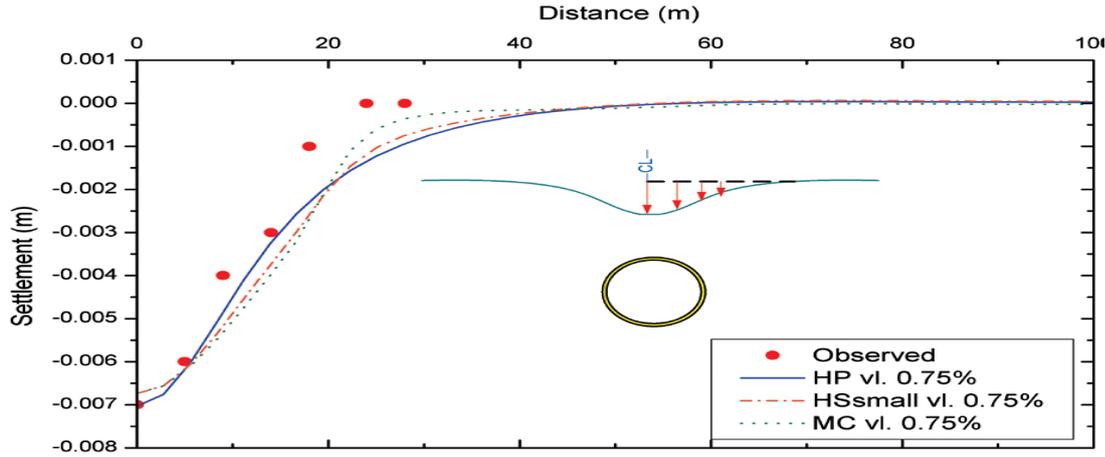
الشكل (13.2): مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Grammatikopoulou,A, et al. 2008) [9]

- قام (Namazi,E, et al. 2012) بتحليل ثلاثي الأبعاد (3D analysis).
- سلوك تربة مرن غير خطي تام اللدونة متماثل الخواص مع ($K_0=1.5, K_0=0.5$).
- ($K_0=1.5$) تنتج حوض هبوط أعمق و أقل عمقا.
- ($K_0=0.5$) تنتج حوض هبوط قريب من القياسات الحقلية و لكنه لا يزال أعمق و أقل عمقا كما يوضح الشكل (14.2).



الشكل (14.2): مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Namazi,E, et al, 2012) [15]

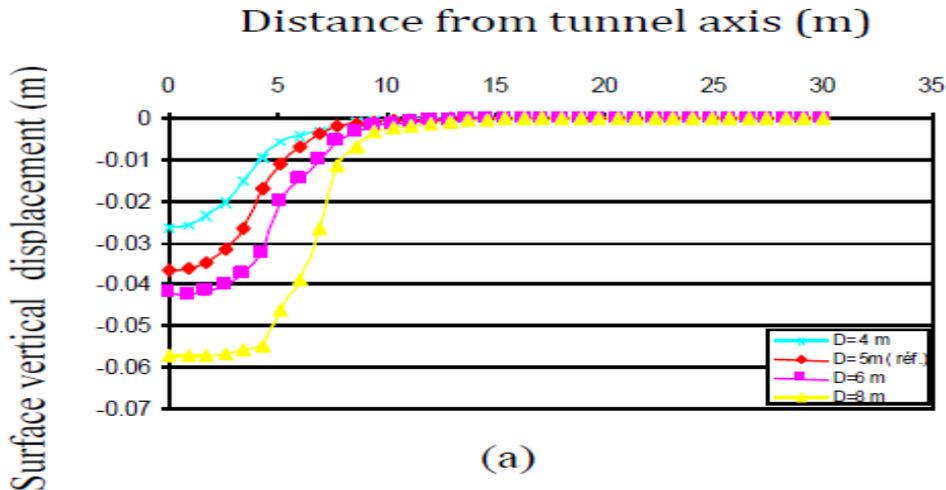
- قام (Jongpradist,P, et al. 2012) بتحليل ثنائي البعد (2D analysis).
- موديل تربة (Mohr Coloump,Hypo plastic,Hardening Soil small).
- (HP) أعطى قيم قريبة من القياسات الحقلية عند محور النفق.
- (MC) أعطى قيم قريبة من القياسات الحقلية على مسافة (20-40m) لكن النتائج لا تزال أعرض من الواقع كما يبين الشكل(15.2) .



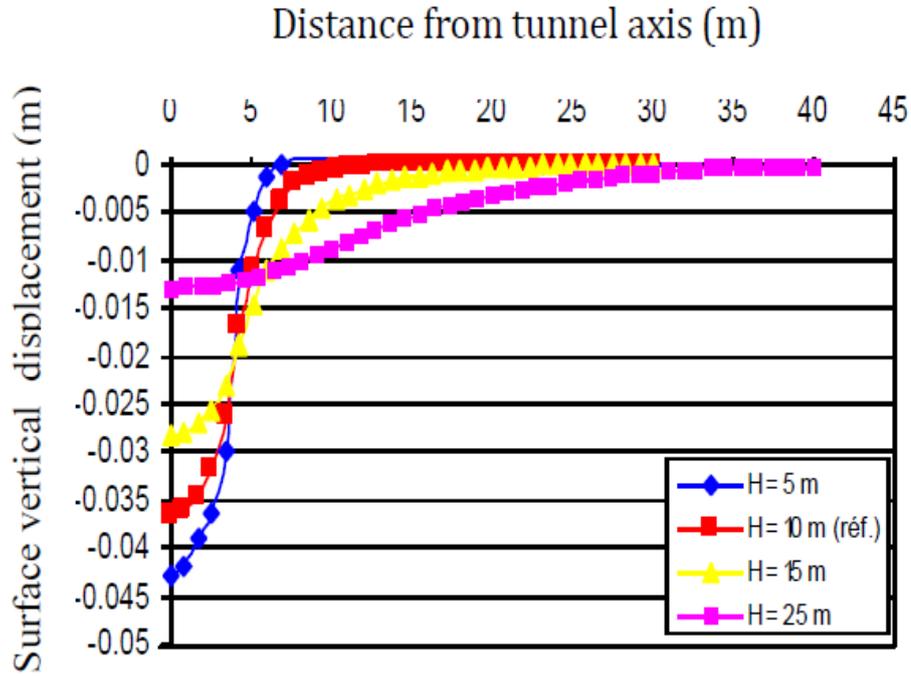
الشكل(15.2): مقارنة بين نتائج (FEM) و القياسات المرجعية (Jongpradist,P, et al, 2012) [10]

- (Nesrine, E, et al. 2009) قام بدراسة بارمترية لعدد من العوامل المؤثرة على قيم الهبوط و شكل و أبعاد حوض الهبوط و تظهر الدراسة:

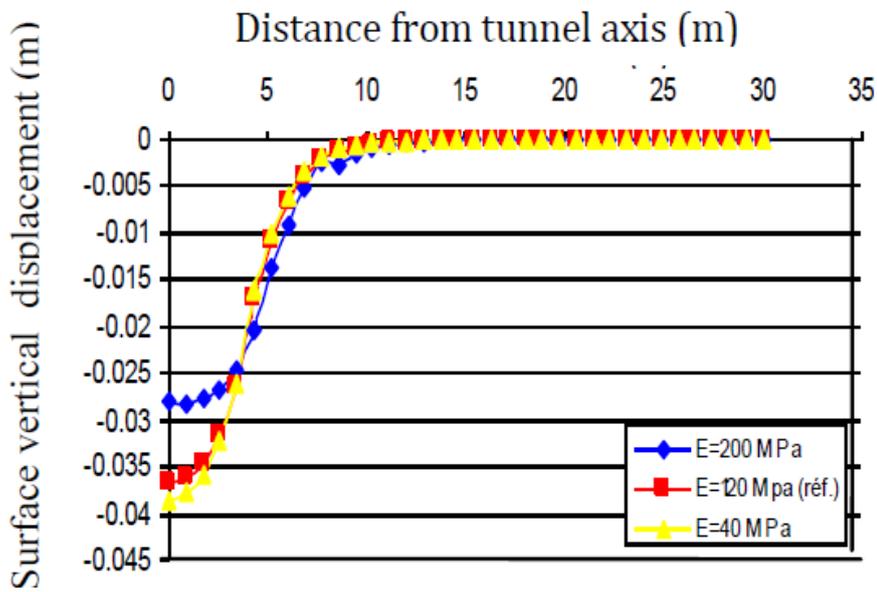
- تناقص الهبوط الأعظمي مع تناقص قطر النفق الشكل (16.2).
- تناقص الهبوط مع تزايد سماكة التربة أعلى النفق الشكل (17.2).
- تناقص الهبوط مع تزايد صلابة التربة الشكل (18.2).



الشكل (16.2): تأثير قطر النفق على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009)[25]

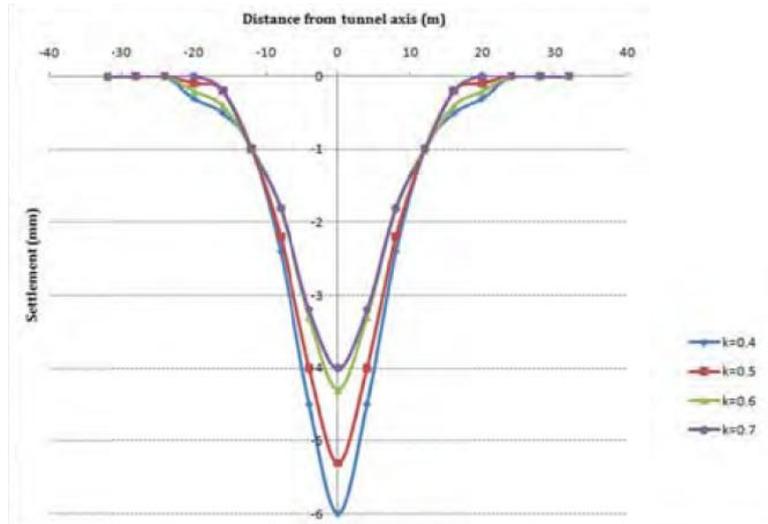


الشكل (17.2): تأثير عمق النفق على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009) [25]

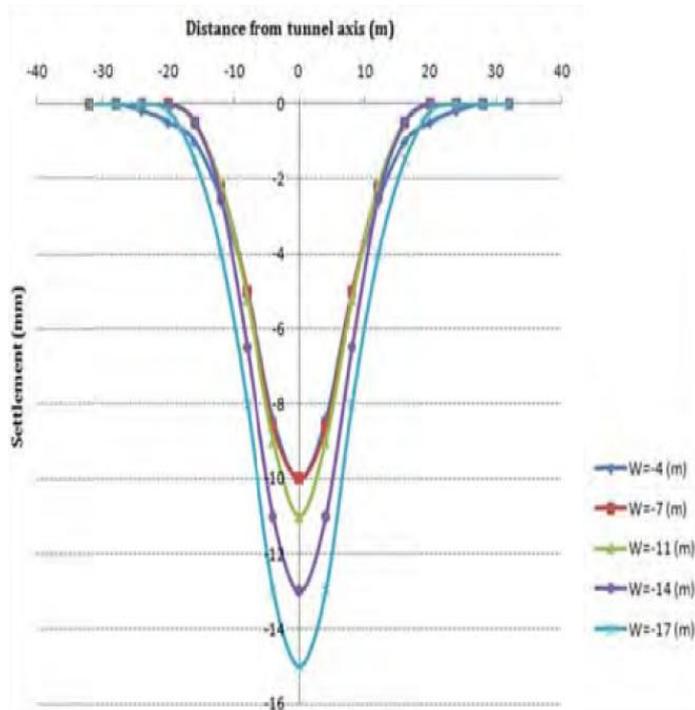


الشكل (18.2): تأثير صلابة التربة على قيم الهبوط (Nesrine, E, et al. 2009) [25]

- (Hajihassani, M, et al. 2013) قام بدراسة بارمترية لعدد من العوامل المؤثرة على قيم الهبوط و شكل و أبعاد حوض الهبوط و تظهر الدراسة:
 - تناقص الهبوط مع تزايد معامل ضغط التربة الجانبي الشكل (19.2).
 - تناقص الهبوط مع ارتفاع منسوب المياه الجوفية الشكل (20.2).



الشكل (19.2): تأثير معامل ضغط التربة الجانبي على قيم الهبوط (Hajihassani, M, et al. 2013)[26]



الشكل (20.2): تأثير منسوب المياه الجوفية على قيم الهبوط (Hajihassani, M, et al. 2013)[26]

الفصل الثالث

النمذجة العددية بطريقة العناصر المنتهية (FEM)

3. النمذجة العددية بطريقة العناصر المنتهية (FEM)

1.3 مقدمة:

إن دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وخواص المواد المستخدمة في الأنفاق السطحية يتطلب إجراء عدد كبير جداً من التجارب المخبرية، ونظراً لصعوبة إجراء هذه التجارب وللكلفة العالية نسبياً ، وللجهد والوقت الكبيرين المطلوبين، استخدمت طرق التحليل العددي ومنها طريقة العناصر المنتهية في الحياة العملية وفي الأبحاث بشكل فعال لدراسة سلوك التربة المحيط بالنفق وأعطت نتائج مقبولة مقارنة بالقياسات الحقلية والمخبرية وخصوصاً مع التطور السريع لطرق النمذجة والبرمجيات المستخدمة ، لذلك تم في هذا البحث استخدام طريقة العناصر المنتهية FEM برنامج Plaxis-V. 8.5 لنمذجة النفق السطحي ولإجراء دراسة متغيرات لأهم العوامل المؤثرة بتوسع أكبر .

2.3 البرنامج المستخدم Plaxis-V.8.5:

تم في هذه البحث استخدام برنامج PLAXIS, Ver.8.5 هو برنامج 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 ، 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) يأخذ بعين الاعتبار فاقد التربة الناتج عن تشوهها داخل النفق.

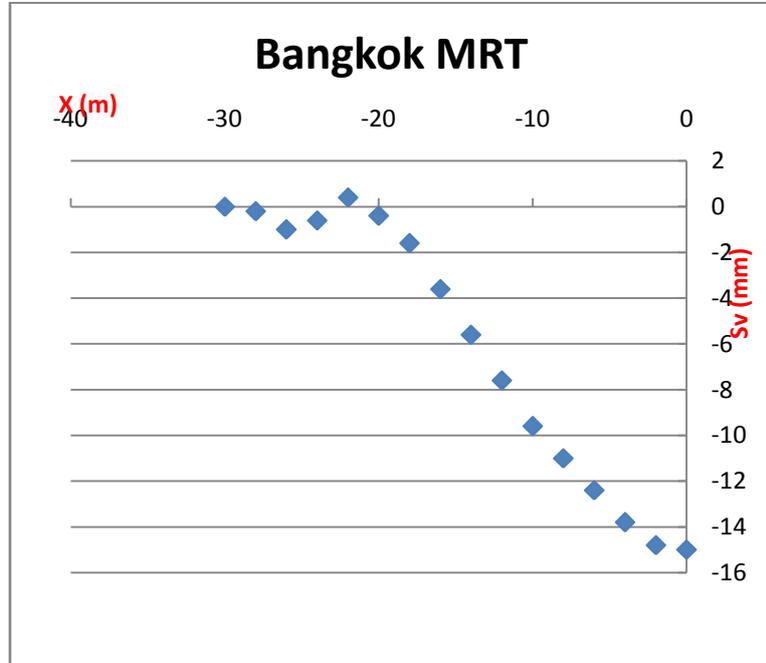
3.3 معطيات النفق و القياسات الحقلية (Tunnel data & Field measurements):

بهدف 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 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 الشكل (1.3) و الجدول (1.3). عمق النفق ($H=17.1\text{m}$) اعتباراً من سطح الأرض وحتى مركز النفق، مناسب طبقات التربة وسماكاتهما وخواصها موضحة في الجدول (2.3).

الجدول (1.3) قياسات (Bangkok MRT) [8]

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



الشكل (1.3): القياسات الحقلية المرجعية لنفق (Bangkok MRT) [8]

جدول (2.3): خواص طبقات التربة حول نفق (MRT Tunnel) [10]

		الطبقة الأولى غضار (sofclay)	الطبقة الثانية غضار (stiff clay)	الطبقة الثالثة رمل (sand)
Type		Drained	Drained	Drained
depth	[m]	0	-15	-20
γ_{unsat}	[kN/m ³]	15.5	17.5	19
γ_{sat}	[kN/m ³]	16	18	20
E_{ref}	[kN/m ²]	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^4$	$80 \cdot 10^4$
ν	[-]	0.33	0.33	0.3
\dot{C}	[kN/m ²]	5	18	0
ϕ'	[o]	22	22	36

4.3 خلفية نظرية لقانون المادة (Hardening Soil Model):

موديل (HS) هو موديل متقدم لنمذجة سلوك أنواع مختلفة للتربة، كلا التربة الطرية و العالية الصلابة. عند الخضوع لتحميل ديفياتوري رئيسي تظهر التربة تناقص في المقاومة و تزايد للتشوهات اللدنة. معادلة الموديل الأساسية تعطى بالعلاقة:

$$\mathcal{F} = \bar{\mathcal{F}} - \gamma^p$$

حيث $\bar{\mathcal{F}}$ تابع الاجهادات، γ^p تابع التشوهات اللدنة

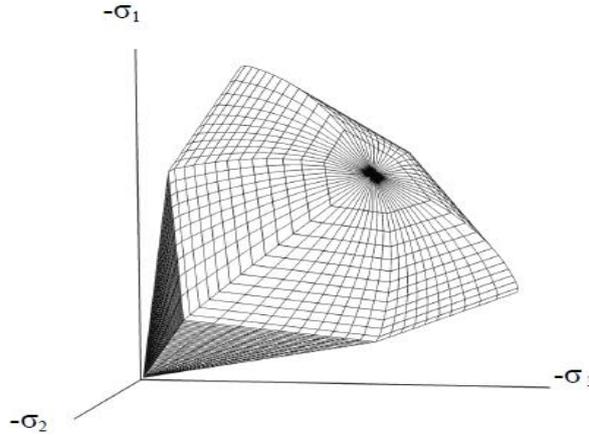
$$\bar{\mathcal{F}} = \frac{1}{E_{50}} \frac{q}{1 - q/a} - \frac{2q}{E_{ur}}$$

$$\gamma^p = -(2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p) \simeq -2\varepsilon_1^p$$

$$q_{\mathcal{F}} = (ccot\varphi - \sigma'_3) \frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

$$q_a = \frac{q_{\mathcal{F}}}{R_{\mathcal{F}}}$$

$R_{\mathcal{F}}$ نسبة الانهيار في برنامج (plaxis) تؤخذ $0.9q$ الاجهاد الديفياتوري، ε_1^p التشوه الناظمي اللدن، ε_v^p التشوه الحجمي اللدن و هو صغير جداً لذا يتم إهماله. و يظهر الشكل (2.3) سطح الخضوع الرئيسي لموديل (HS).



الشكل (2.3) تمثيل سطح الخضوع الرئيسي لموديل (HS) في فضاء الاجهادات الرئيسية للتربة ضعيفة التماسك [18]

بعض الخصائص الرئيسية لهذا الموديل هي:

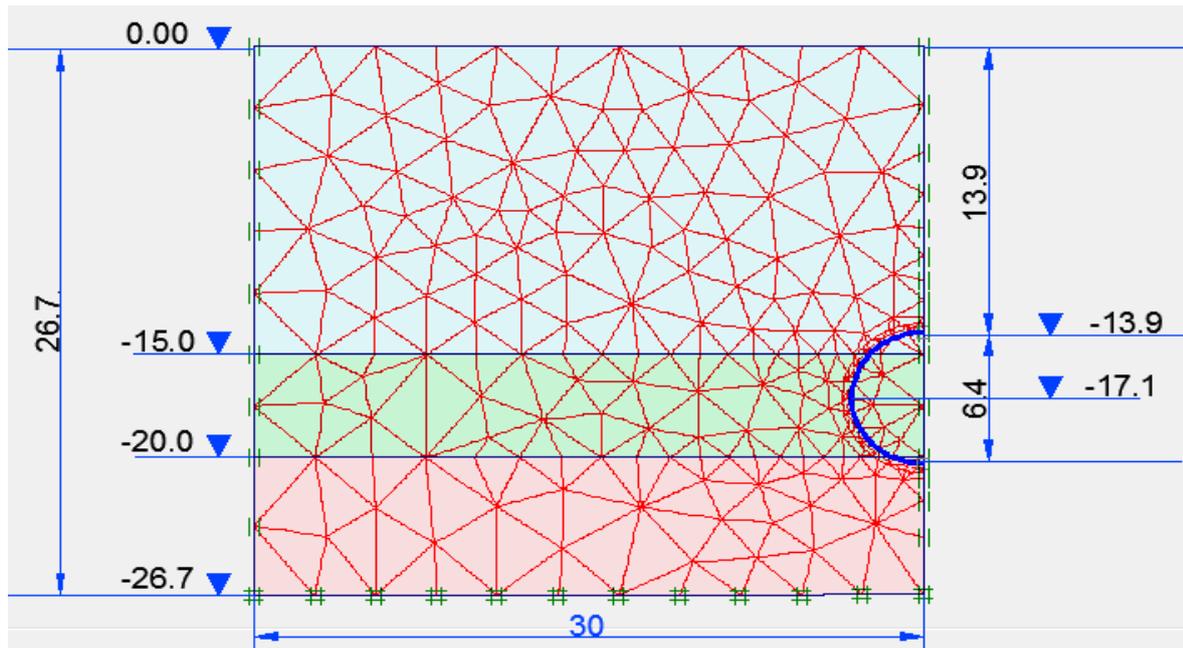
- البارمتر الرابط بين الاجهاد و التشوه وفق علاقة أسية (m).
- التشوهات اللدنة الناتجة عن الاجهاد الديفياتوري الأساسي البارمتر المدخل (E_{50}^{ref}).
- التشوهات اللدنة الناتجة عن الضغط الرئيسي البارمتر المدخل (E_{oed}^{ref}).
- المرونة من خلال التفريغ و إعادة التحميل البارمترات المدخلة (E_{ur}^{ref}), (v_{ur}).
- الانهيار بالنسبة لموديل (Mohr coloump) من خلال البارمترات (c, φ, ψ).

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 (Meissner, 1996) كما يلي:

- عرض النموذج: $w=(4-5)*D$ ، تم اختيار $w=30m$
- بعد محور النفق عن أسفل النموذج $h=(1.5-2.5)*D$ ، تم اختيار $h=9.6m$

الشكل (3.3) 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 المنتهية المثلثية (triangular 15 Nodes Element) عددها (335). إن خواص التربة المستخدمة لنمذجة السلوك المصرف لطبقات التربة المحيطة بالنفق من خلال قانون مور - كولومب (MC-Model) وقانون (HS-Model) تم تلخيصها في الجدول (3.3). أما بالنسبة لقشرة النفق فقد تم نمذجتها من خلال عناصر (Beam elements) ذات سلوك مرن خطي و خواصها موضحة في الجدول (4.3)، حيث تم تخفيض الصلابة على الانعطاف (EI) إلى (EI/4) لأخذ تأثير الفواصل بين القطع البيوتونية المسبقة الصنع بعين الاعتبار.



الشكل (3.3): الأبعاد الهندسية للنموذج وشبكة العناصر المنتهية

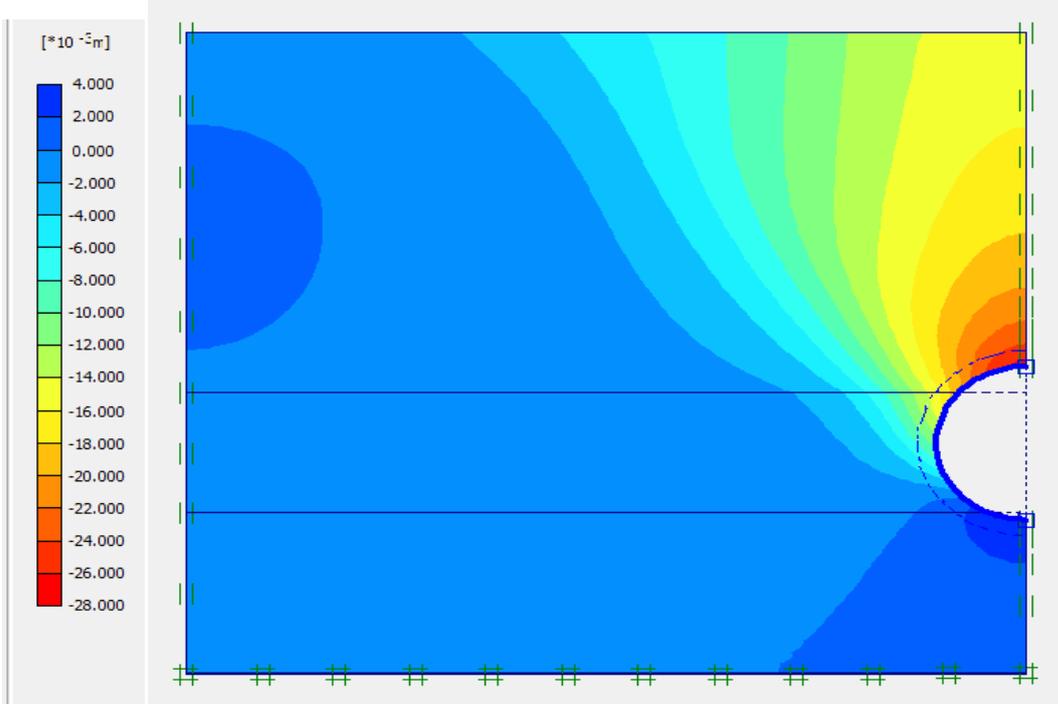
جدول (3.3). خواص طبقات التربة حول نفق (MRT Tunnel) وفق موديل (MC) و (HS). [10].

قانون مور-كولومب (Mohr-coloumb –Model : MC-Model)													
Rinter	ν	E [Mpa]	ψ [°]	c' [kpa]	ϕ' [°]	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{unsat} [kN/m ³]	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				
قانون (Hardening soil –Model : HS-Model)													
R inter	ψ [°]	Ko [-]	ν [-]	ν_{ur} [-]	m [-]	E_{ur}^{ref} Mpa	E_{oed}^{ref} Mpa	E_{50}^{ref} Mpa	c' kpa	ϕ' [°]	γ_{sat} kN/m ³	γ_{unsat} kN/m ³	الطبقة
1	0	0.625	0.33	0.2	1	22.2	7.408	7.408	5	22	16	15.5	الطبقة :1
1	0	0.625	0.33	0.2	1	266.7	88.9	88.9	18	22	18	17.5	الطبقة :2
0.7	6	0.412	0.3	0.2	0.5	323	107.7	107.7	0	36	20	19	الطبقة :3

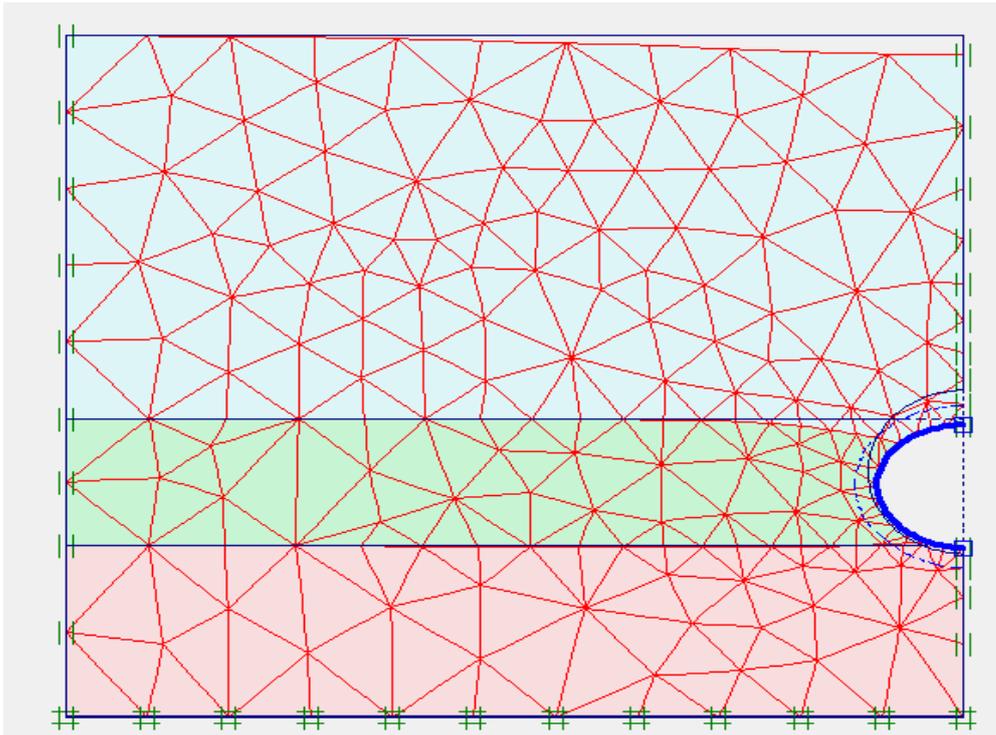
جدول (4.3). خواص قشرة النفق (MRT Tunnel): [16]

t [cm]	E [Mpa]	ν	EI [MNm ²]	EA [GN/m]	γ [kN/m ³]	M-Model	Modeling	
30	35000	0.15	19.7	10.5	24	liner elastic	Beam Elements	قشرة النفق (lining)

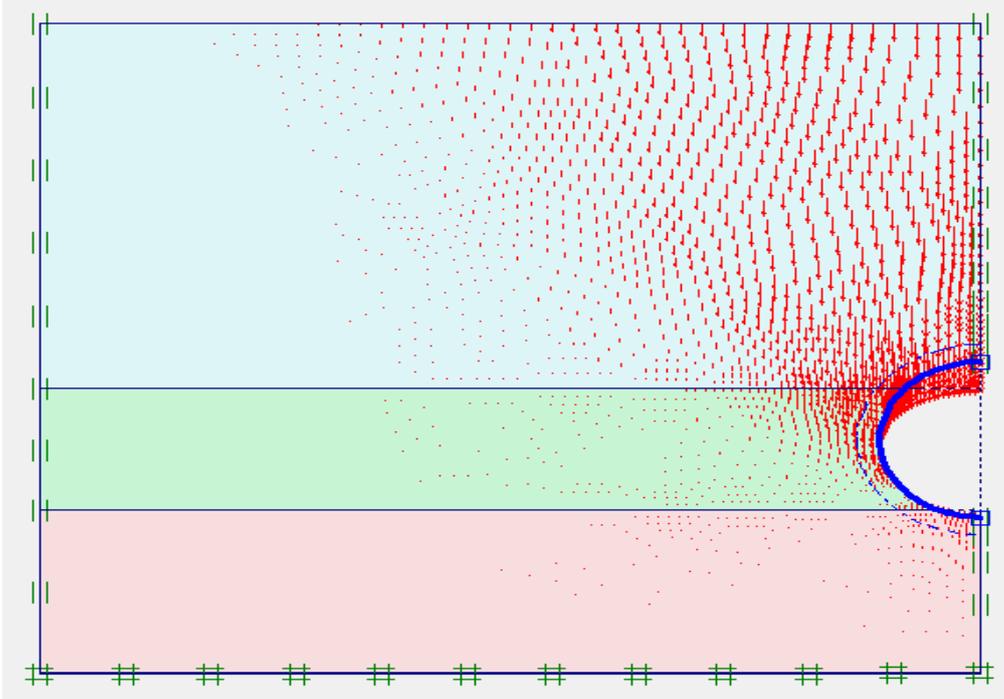
تم في الحساب اعتبار جميع مراحل حفر النفق و تركيب القشرة ، حيث أنه في المرحلة الأولى تم حساب الأجهادات الابتدائية ، في المرحلة الثانية تم إلغاء تفعيل التربة داخل الدرع و تفعيل القشرة، أما في المرحلة الثالثة تم إضافة معامل تقلص (Contraction factor=C) لقشرة النفق . تم حساب الاجهادات الابتدائية والاجهادات بعد التنفيذ المتشكلة حول النفق و كذلك الانتقالات في النموذج و خصوصاً الانتقالات الشاقولية على سطح الأرض . توضح الأشكال (4.3) (5.3) (6.3) الانتقالات الشاقولية التي حدثت نتيجة تنفيذ النفق، كما يظهر الشكل (7.3) أحواض الهبوط على أعماق مختلفة اعتباراً من سطح الأرض و حتى قمة النفق حيث يلاحظ مع ازدياد العمق ازدياد الانتقالات أعلى النفق وتضيق الحوض نتيجة ازدياد ضغط التربة الجانبي مع العمق مما يخفف من انتشار التشوهات.



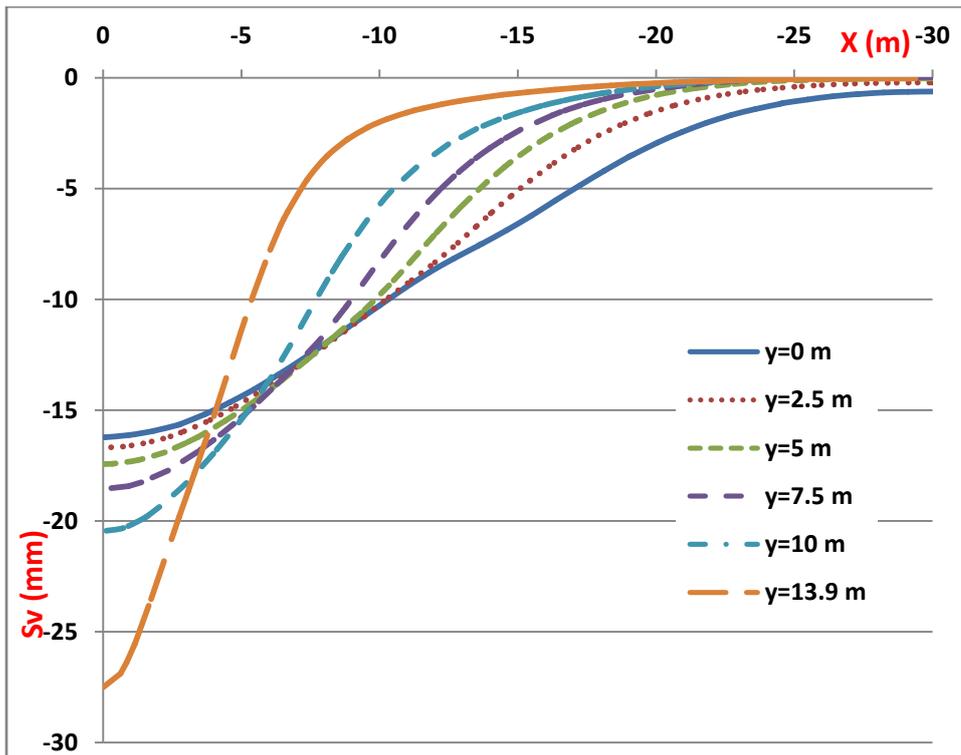
الشكل (4.3): الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق باعتماد موديل (HS)



الشكل (5.3): الشبكة المشوهة بعد تنفيذ النفق (مكبرة 50 مرة) باعتماد موديل (HS).



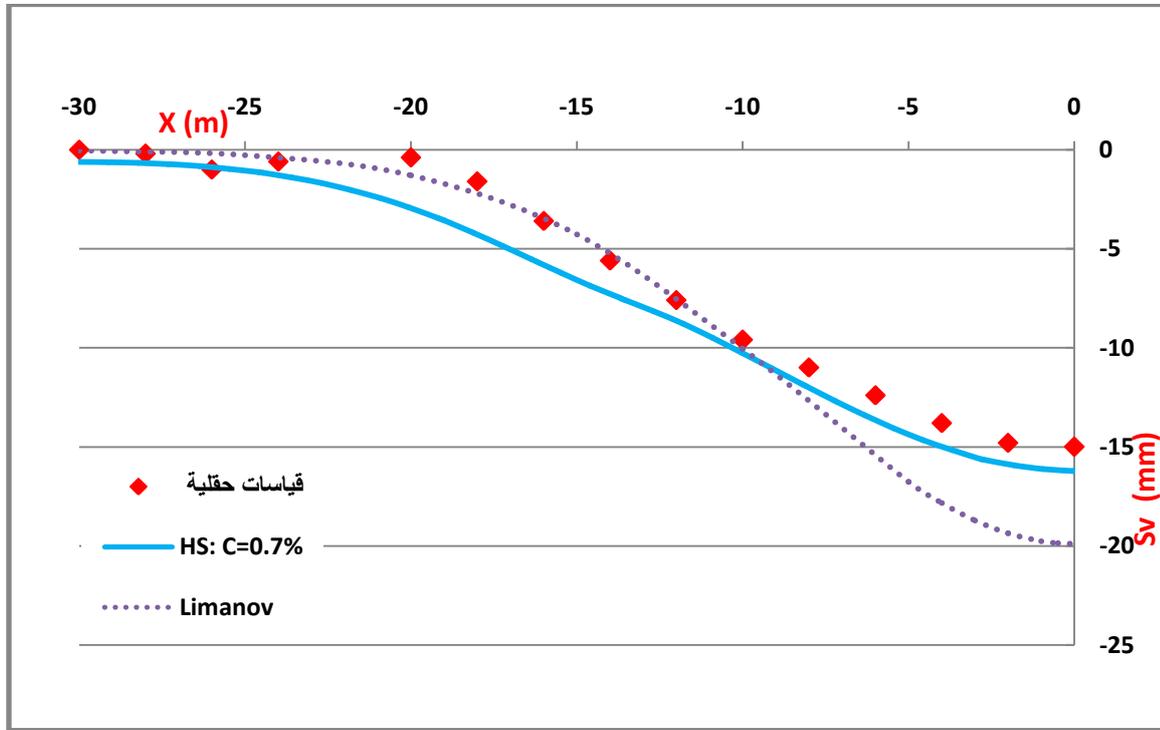
الشكل (6.3): الانتقالات الشاقولية للنموذج بعد تنفيذ النفق باعتماد موديل (HS).



الشكل (7.3): أحواض الهبوط على أعماق مختلفة باعتماد موديل (HS)

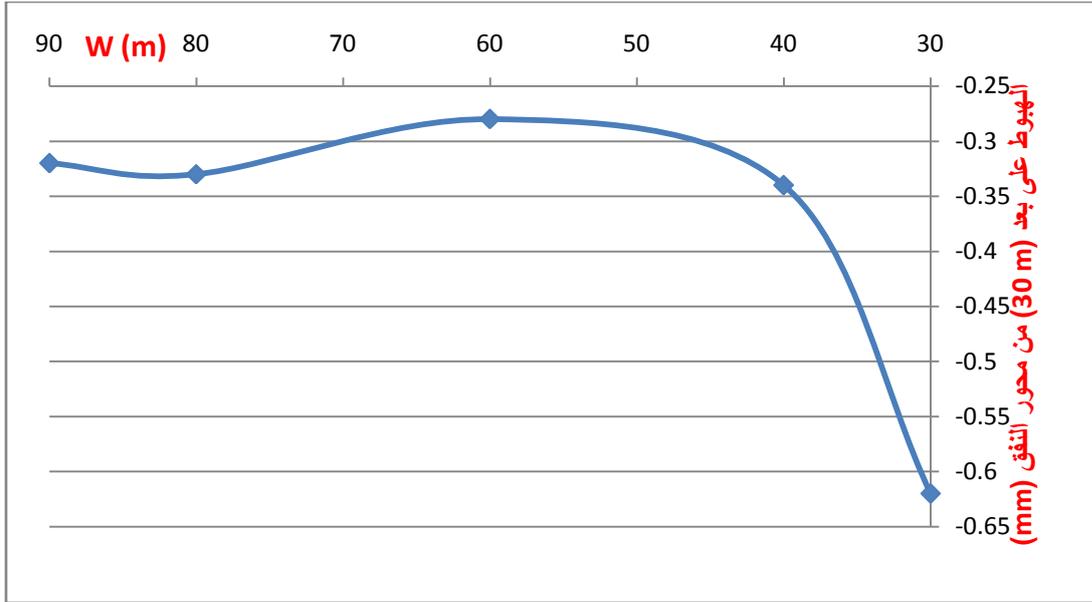
6.3. معايرة النموذج والتحقق من صلاحية النتائج (Model Calibration & Validations):

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 (Hardening soil) لنمذجة سلوك التربة. لقد أظهرت المقارنة، الموضحة في الشكل (8.3)، أن منحنى حوض الهبوط المحسوب من أجل معامل تقلص قدره (C=0.7%) يعطي اقرب قيم للقياسات الحقلية المنفذة على سطح الأرض. كما تمت المقارنة مع طريقة (Limanov) النظرية التي أعطت حوض هبوط أعمق بالمقارنة مع القياسات الحقلية المرجعية.



الشكل (8.3): مقارنة بين نتائج نموذج الـ FEM باستخدام قانون المادة (HS) و طريقة (Limanov) النظرية مع القياسات الحقلية المرجعية بالنسبة لهبوطات سطح الأرض فوق نفق (Bangkok MRT)

بهدف التقليل من تأثير حدود النموذج على قيم الهبوط تم دراسة نتائج نماذج عددية بعرض مختلف ، حيث أظهرت النتائج أنه بزيادة عرض النموذج ينخفض هبوط سطح الأرض بشكل طفيف حتى عرض نموذج (10D) حيث تستقر بعد ذلك ، و من أجل أبعاد وسط (10D) تصبح قيمة الهبوط على بعد (30m) من محور النفق (-0.27 mm) كما يوضح الشكل (9.3) مما يخفض الفرق بين القياسات الحقلية و نتائج التحليل العددي، لذلك تم اعتماد عرض (10*D) للنموذج في الدراسة البارامتريّة لاحقاً.



الشكل(9.3): تغييرات الهبوط على بعد (30 m) من محور النفق مع ازدياد عرض النموذج

الفصل الرابع

الدراسة البارامترية (Parametric study)

4. الدراسة البارامترية (Parametric study)

1.4 مقدمة :

من أجل دراسة تأثير الخواص الجيوتكنيكية للتربة و الأبعاد الهندسية للنفق و أهمها عمق النفق و قطره على هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق السطحية تم تقسيم الدراسة إلى قسمين أساسيين حسب التربة المحيطة بالنفق:

- دراسة هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأنفاق السطحية في حالة تربة غضارية.
- دراسة هبوط سطح الأرض الناتج عن تنفيذ الأفاق السطحية في حالة تربة رملية.

2.4 الدراسة البارامترية في حالة التربة الغضارية المتجانسة:

تم إجراء سلسلة من الحسابات العددية بواسطة برنامج Plaxis بحالة تربة غضارية متجانسة و ممتدة إلى أعماق كبيرة ، حيث تم اختيار بارامترات قانون المادة المستخدم و هو قانون (HS-Model) للتربة الغضارية بثلاث حالات مختلفة : تربة غضارية طرية (soft clay) و تربة غضارية متوسطة الصلابة (medium clay) و تربة غضارية عالية الصلابة (stiff clay)، مع اعتماد منسوب للمياه الجوفية (2- m) من سطح الأرض، عرض الحوض (B) تم تحديده بين أقرب نقطتين من محور النفق و التي يكون الهبوط عندها مساوياً (-1 mm) و جميع البارامترات و الخصائص موضحة في الجدول (1.4):

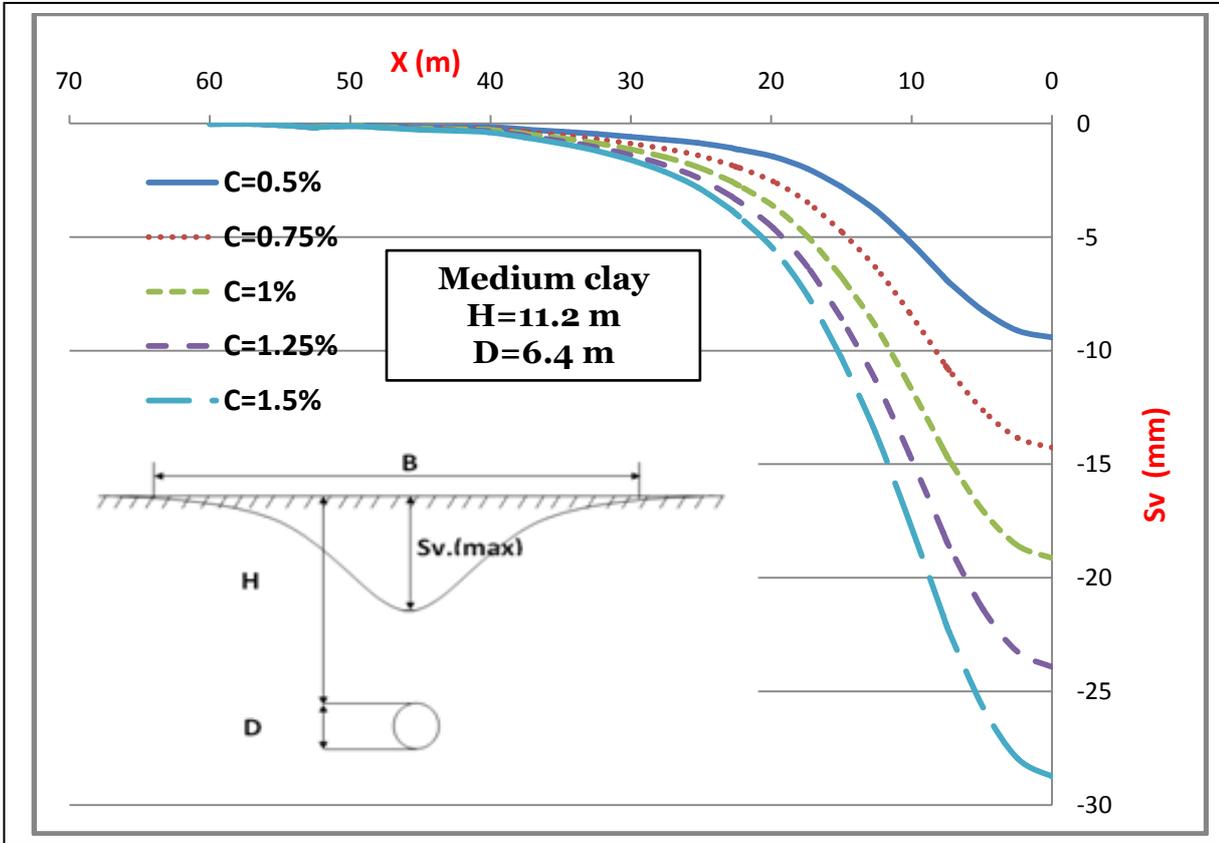
جدول (1.4). خواص الغضار المعتمد في قانون المادة (HS-Model) حول نفق في الدراسة البارامترية

Hardening – soil		(soft clay)	(medium clay)	(stiff clay)
Type		Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	16	17.5	19
γ_{sat}	[kN/m ³]	16.5	18	19.5
E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	4166	12500	25000
E_{oed}^{ref}	[kN/m ²]	2504	10000	25000
E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	12500	37500	75000
ν_{ur}	[-]	0.2	0.2	0.2
C_{ref}	[kN/m ²]	2	10	15
ϕ	[o]	24	26	28
ψ	[o]	0	0	0
m	[-]	0.9	0.8	0.7
K_0	[-]	0.593	0.562	0.531

1.2.4. تأثير معامل التقلص (Contraction Factor: C%) :

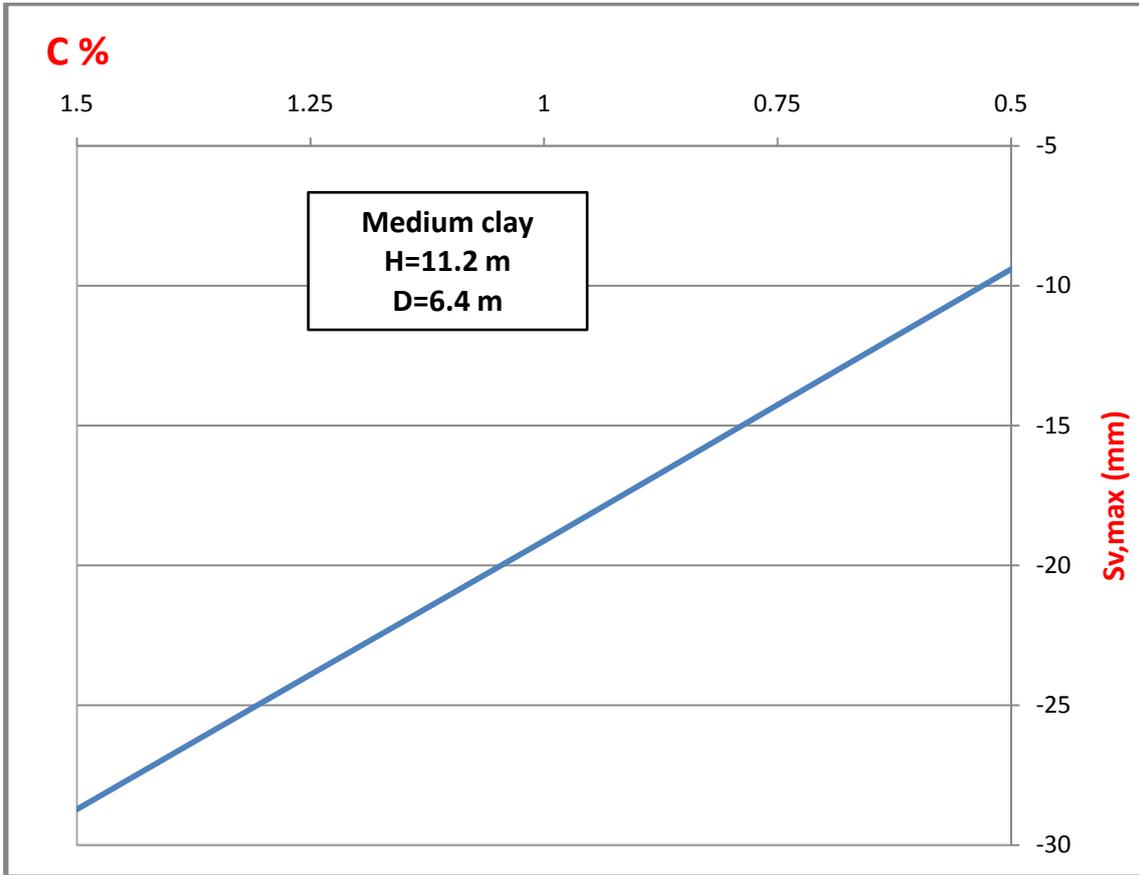
توجد طرق مختلفة لنمذجة فاقد التربة الحجمي (Ground loss/Volume loss) الناتج عن عمليات التنفيذ (حفر التربة داخل النفق، تدعيم جبهة الحفر، تشوه الدرغ و ذيل الدرغ، الفراغ خلف الدرغ، و تشوه قشرة النفق)، و الطريقة المستخدمة في هذه الدراسة هي طريقة معامل التقلص الذي يأخذ بعين الاعتبار تشوهات التربة نحو داخل النفق أثناء التنفيذ م ن خلال تناقص حجمي لقشرة النفق بنسبة ممثلة في المعامل (C%)، و هي تعبر عن فاقد التربة كنسبة من مقطع النفق تمثل تشوهات التربة الناتجة عن عمليات الحفر في مقدمة الدرغ و تشوهات التربة خلف الدرغ بعد الحقن و تشوهات قشرة النفق، و تتراوح هذه النسبة بين 0.5-1.5% بالنسبة للطرق الدرعية 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 شكل حوض الهبوط و تغييره بنسب صغيرة نسبياً يؤدي إلى تغيرات كبيرة و ملحوظة . تم إجراء عدد من الحسابات على النموذج العددي مع تغيير قيم (C%) من (0.5-1.5) و ثبات بقية العوامل. يظهر الشكل (1.4) تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع زيادة عامل التقلص للغضار المتوسط الصلابة.

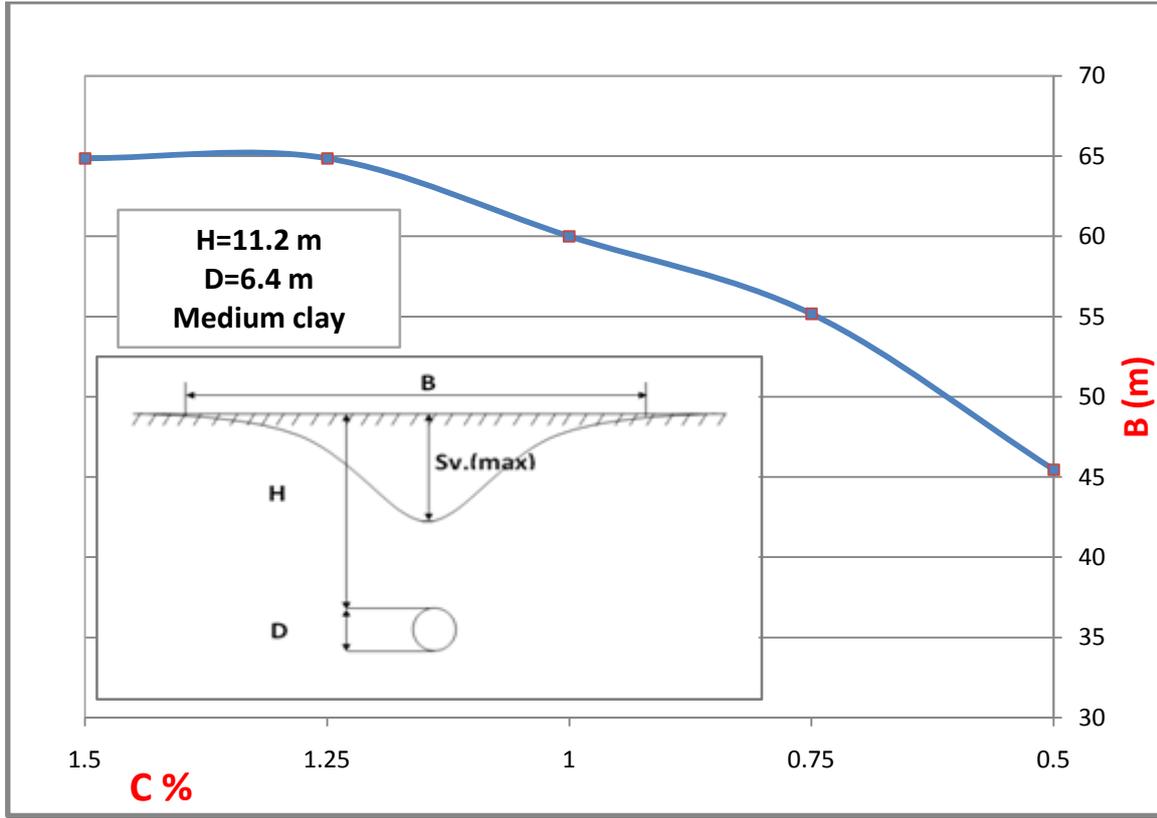


الشكل (1.4): تغيير شكل وأبعاد حوض الهبوط عند السطح مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة

يوضح الشكل (1.4) أنه مع تزايد قيم (C%) يزداد الهبوط الأعظمي لسطح الأرض و كذلك تزايد قيم عرض حوض الهبوط المتشكل على سطح الأرض لحالة الغضار المتوسط الصلابة، و يمكن تعليل هذه الزيادة في الهبوط الأعظمي و في عرض حوض الهبوط بزيادة (C) بأنه نتيجة لزيادة الفراغ المتشكل حول النفق نتيجة عمليات التنفيذ و بالتالي ازدياد التشوهات الحاصلة في التربة أعلى و حول النفق مما يؤدي إلى وصولها حتى سطح الأرض . و تبين نتائج التحليل العددي أن زيادة الهبوط الأعظمي لسطح الأرض فوق النفق مع زيادة معامل النقص (C) تكون بشكل خطي، كما هو موضح في الشكل (2.4)، بينما تزايد عرض حوض الهبوط بزيادة C ليست خطية الشكل (3.4). كما يظهر من الشكل (3.4) أن عرض حوض الهبوط يزداد من (B=45m) من أجل قيمة (C=0.5%) حتى القيمة (B=65m) من أجل قيمة (C=1.25%) و بعد هذه القيمة لا يظهر تأثير للمعامل C على عرض حوض الهبوط.



الشكل(2.4):تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل نقص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة.



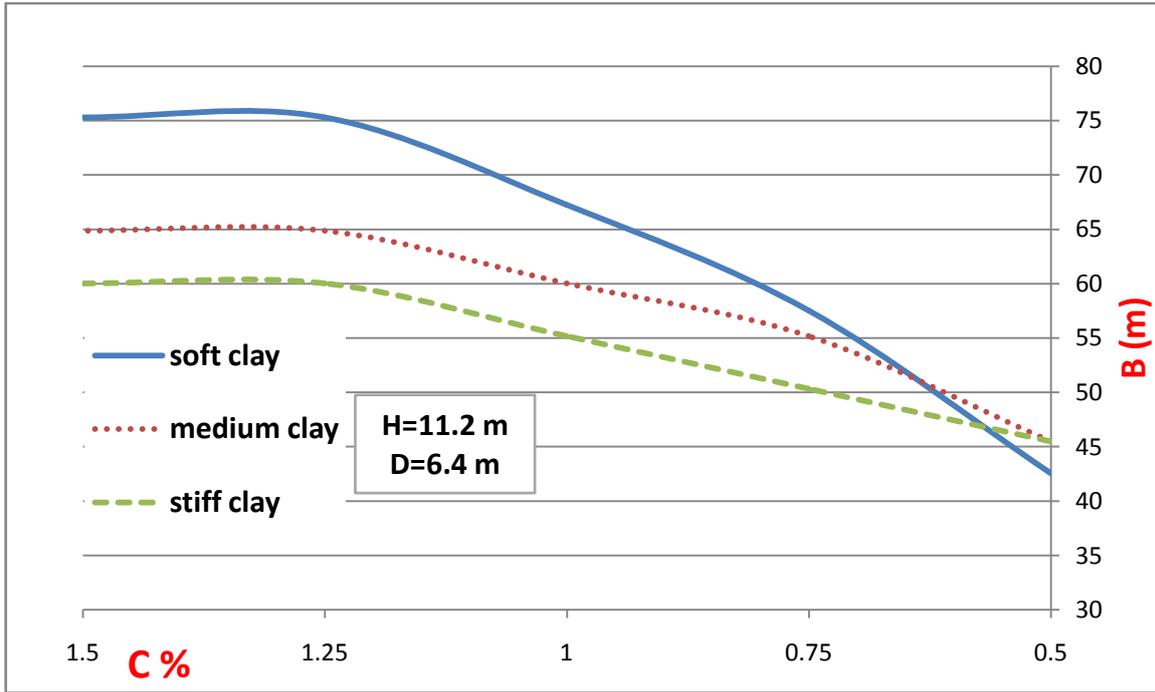
الشكل (3.4): تغيير عرض حوض الهبوط مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الغضار المتوسط الصلابة

تم دراسة تأثير تغيير معامل التقلص C على الهبوط الأعظمي عند السطح فوق محور النفق و على شكل و أبعاد حوض الهبوط من أجل قوام مختلف للغضار (غضار طري و متوسط و عالي الصلابة) و تم تلخيص هذه النتائج في الجدول (2.4).

جدول (2.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص لحالات الغضار المختلف القوام

الغضار العالي الصلابة Stiff Clay		الغضار المتوسط الصلابة Medium Clay		الغضار الطري Soft Clay		معامل التقلص Contraction Factor C%
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
45.47	-9.62	45.47	-9.41	42.56	-6.80	0.5
50.32	-14.15	55.17	-14.26	57.52	-11.78	0.75
55.17	-18.74	60.03	-19.12	67.25	-17.00	1
60.03	-23.34	64.88	-23.91	75.31	-22.26	1.25
60.03	-27.94	64.88	-28.72	75.31	-27.37	1.5

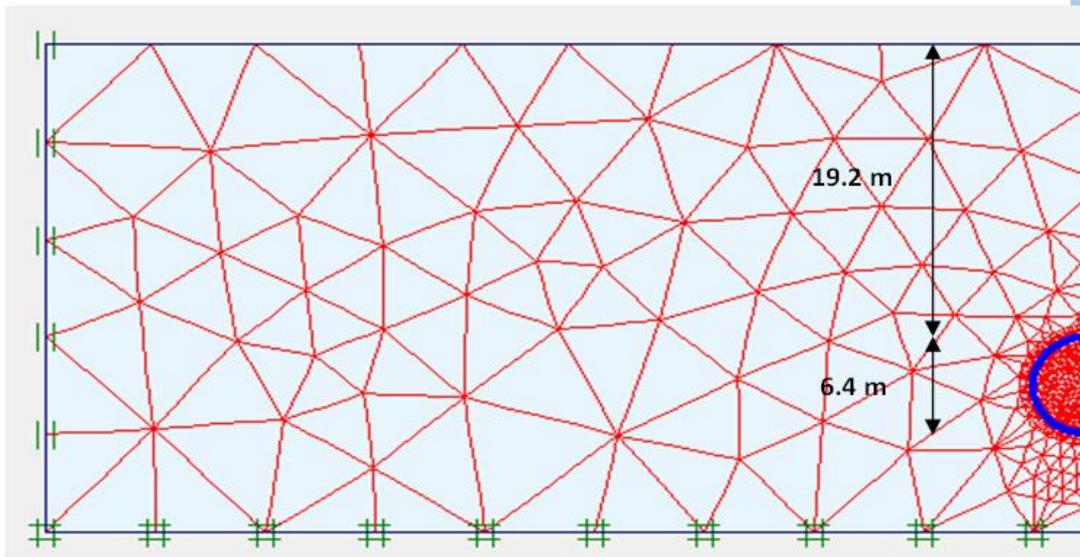
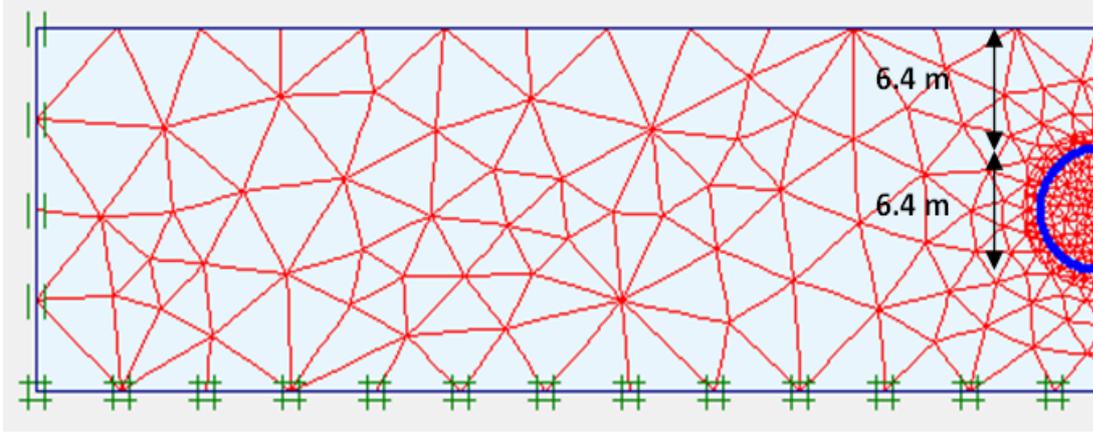
يتضح من هذا الجدول تشابهه في النتائج النوعية بالنسبة لحالات الغضار المختلف القوام مع اختلاف في النتائج الكمية، حيث تبين النتائج أن قيم الهبوط الأعظمي تتزايد بشكل خطي لجميع حالات الغضار و تكون قيم الهبوط متقاربة للغضار المتوسط و العالي الصلابة بينما الهبوط للغضار الطري هو الأقل. كما أن عرض حوض الهبوط يتزايد مع تزايد قيمة (C%) حتى القيمة (C=1.25%) و ذلك لحالات الغضار المختلفة وبعد هذه القيمة لا يكون هناك تأثير لزيادة معامل التقلص على عرض الحوض كما يبين الشكل (4.4).



الشكل(4.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل تقلص النفق لحالات الغضار المختلف القوام.

2.2.4. تأثير عمق النفق: (H/D, D=constant=6.4):

بهدف دراسة تأثير عمق النفق النسبي تم اجراء عدد من التحليلات العددية على نماذج ذات أعماق مختلفة للنفق مع ثبات قطر النفق و بقية العوامل و الأب عاد الهندسية الأخرى، يظهر الشكل (5.4) نموذجين عددين لنفق بقطر (D=6.4m) من اجل عمقين مختلفين و بالتالي (H/D=1)، (H/D=3)، حيث تمت دراسة نسب مختلفة ضمن هذا المجال 1 إلى 3 و هو المجال الذي يكون عنده النفق سطحي.



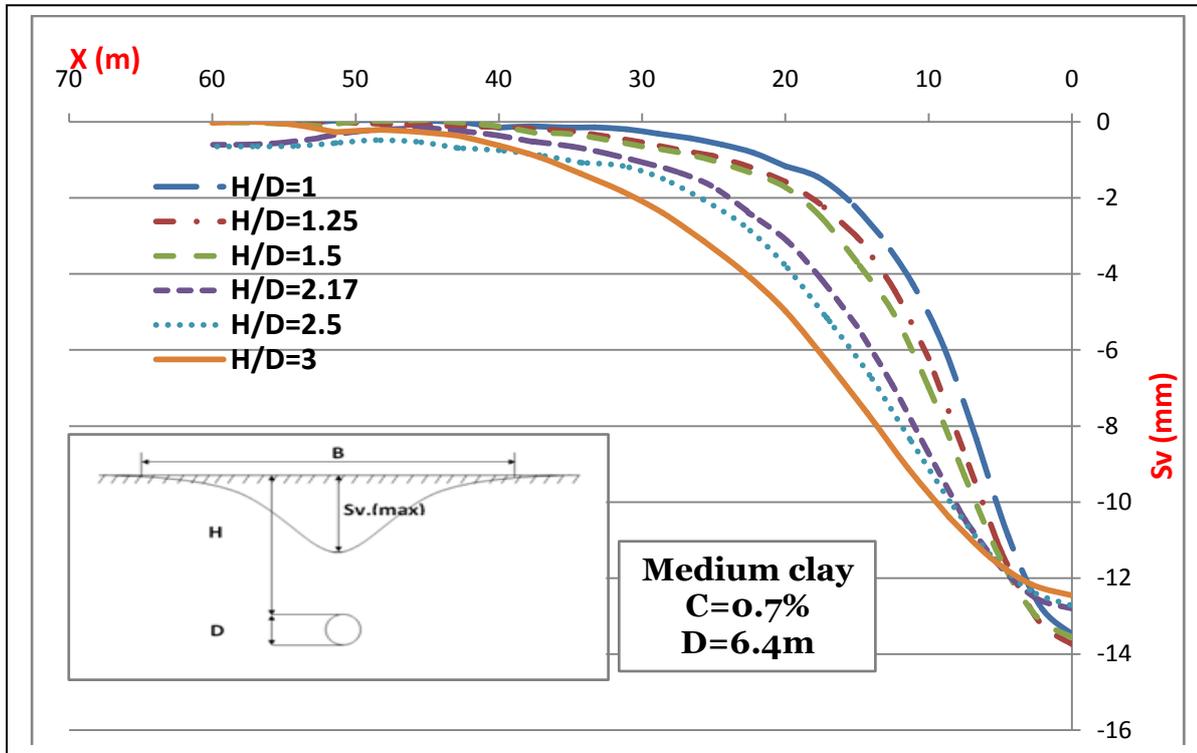
الشكل (5.4): نموذجين عدديين (FE-Model) من أجل عمقين مختلفين ($H/D=1$). ($H/D=3$) لنفق بنفس القطر

تم في الشكل (6.4) تمثيل أحواض الهبوط المتشكلة فوق النفق لحالة غضار متوسط الصلابة من أجل النسب التالية : ($H/D=1, 1.25, 1.5, 2.17, 2.5, 3$)، و يبين الشكل أن تغير عمق النفق لا يسبب تغير كبير في قيم الهبوط الأعظمي فوق النفق و إنما يسبب تغير في شكل حوض الهبوط الذي يصبح أضيق كلما انخفضت النسبة (H/D).

أما بالنسبة لنتائج تأثير النسبة (H/D) على الهبوط الأعظمي و على شكل و أبعاد حوض الهبوط فقد تم تلخيصها في الجدول (3.4) و في الشكلين (8.4/7.4) من أجل الحالات الثلاثة للغضار المختلفة القوام. فللشكل (7.4) يبين أن ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) يؤدي إلى تزايد الهبوط الأعظمي للغضار الطري حتى النسبة ($H/D=2.25$) ليبقى بعدها دون تغيير، في حين أنه بالنسبة للغضار المتوسط الصلابة و العالي الصلابة يتناقص الهبوط الأعظمي مع تزايد (H/D) حتى النسبة ($H/D=2.25$). ويمكن تعليل ثبات الهبوط الأعظمي عند هذه النسبة إلى أن زيادة سماكة التربة أعلى

النفق يقلل من نسبة تشوهات التربة التي تصل إلى السطح بسبب التأثير القوسي (Arch Effect) الذي يتشكل ضمن التربة أعلى النفق من أجل النسبة $(H/D > 2)$.

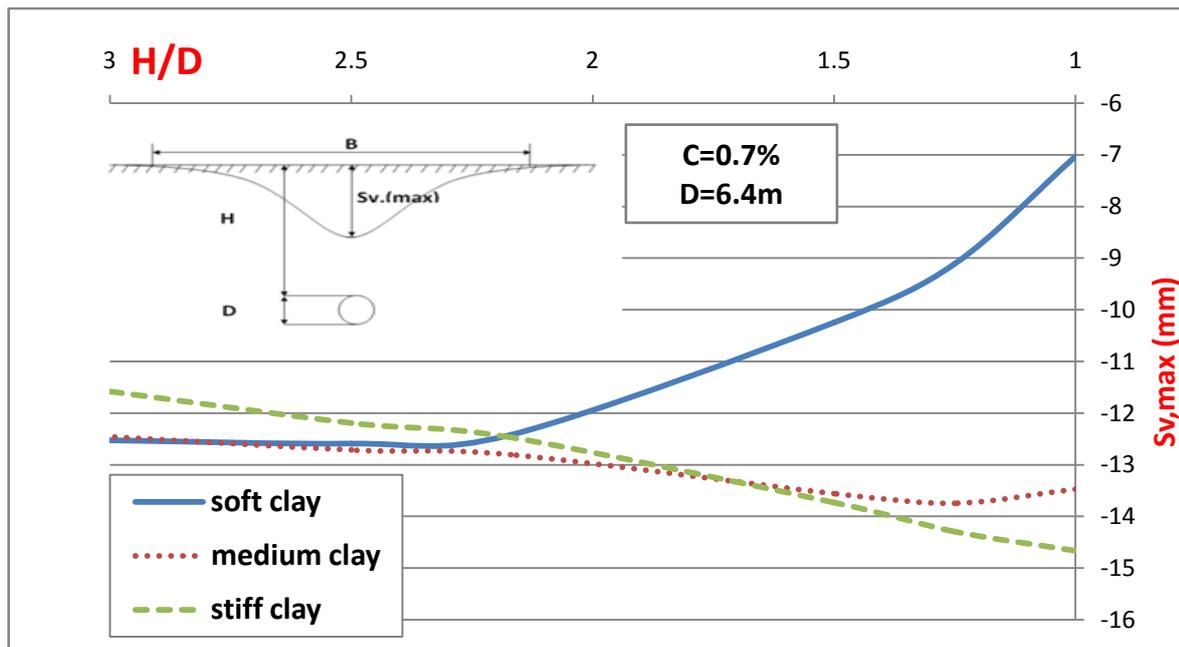
بالنسبة لتأثير تزايد عمق النفق على عرض حوض الهبوط (B) يبين الشكل (8.4) و كذلك الجدول (3.4) أن عرض الحوض يتزايد بشكل خطي تقريباً مع زيادة النسبة (H/D) و ذلك بالنسبة لحالات الغضار المختلف القوام و يعود ذلك إلى أن زيادة سماكة التربة أعلى النفق يقلل من نسبة تشوهات التربة التي تصل إلى السطح مما يخفض من الهبوط عند السطح و تكون الاستجابة لمعامل النقل من خلال تزايد عرض الحوض. أما في حالة الغضار الطري فيتزايد الهبوط الأعظمي نتيجة ازدياد سماكة التربة الضعيفة المتشوهة بتأثير معامل النقل.



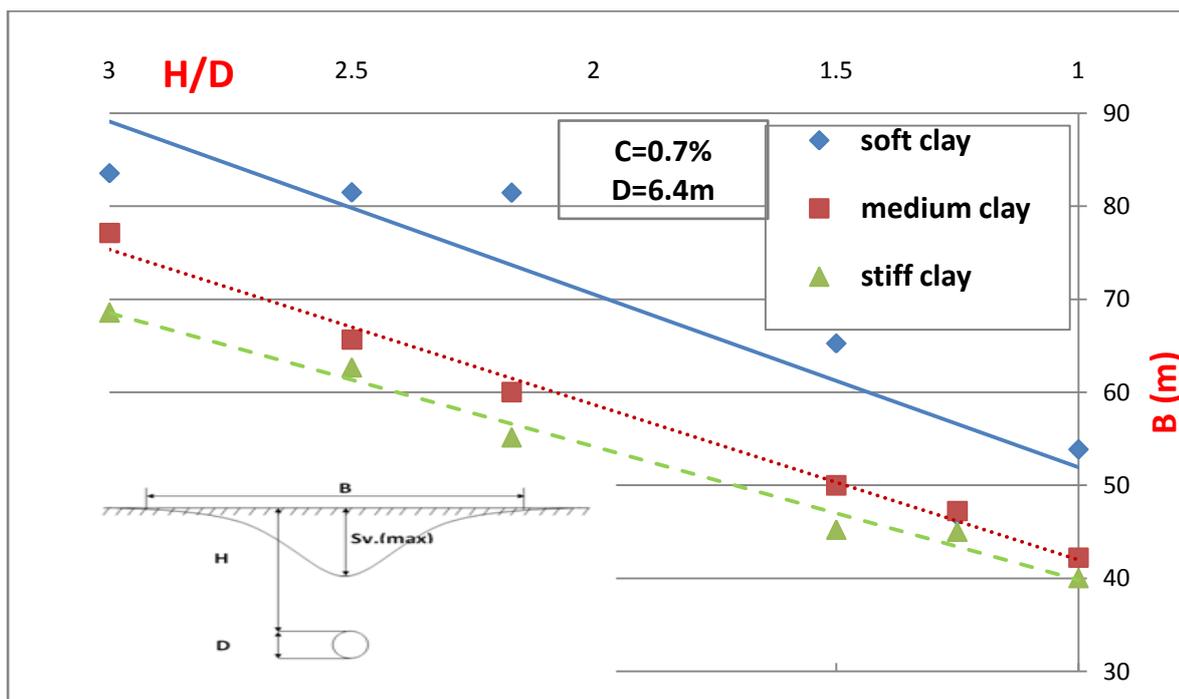
الشكل(6.4): تغير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثابت القطر للغضار المتوسط الصلابة

جدول (3.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الغضار بثبات قطر النفق.

الغضار العالي الصلابة Stiff Clay		الغضار المتوسط الصلابة Medium Clay		الغضار الطري Soft Clay		العمق النسبي للنفق H/D D=constant
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
40.03	-14.67	42.22	-13.47	53.84	-7.03	1
45.00	-14.30	47.25	-13.75	46.76	-9.11	1.25
45.23	-13.73	50.00	-13.56	65.26	-10.25	1.5
55.15	-12.47	60.02	-12.80	81.44	-12.42	2.17
62.68	-12.19	65.67	-12.71	81.48	-12.59	2.5
68.57	-11.58	77.14	-12.46	83.54	-12.53	3



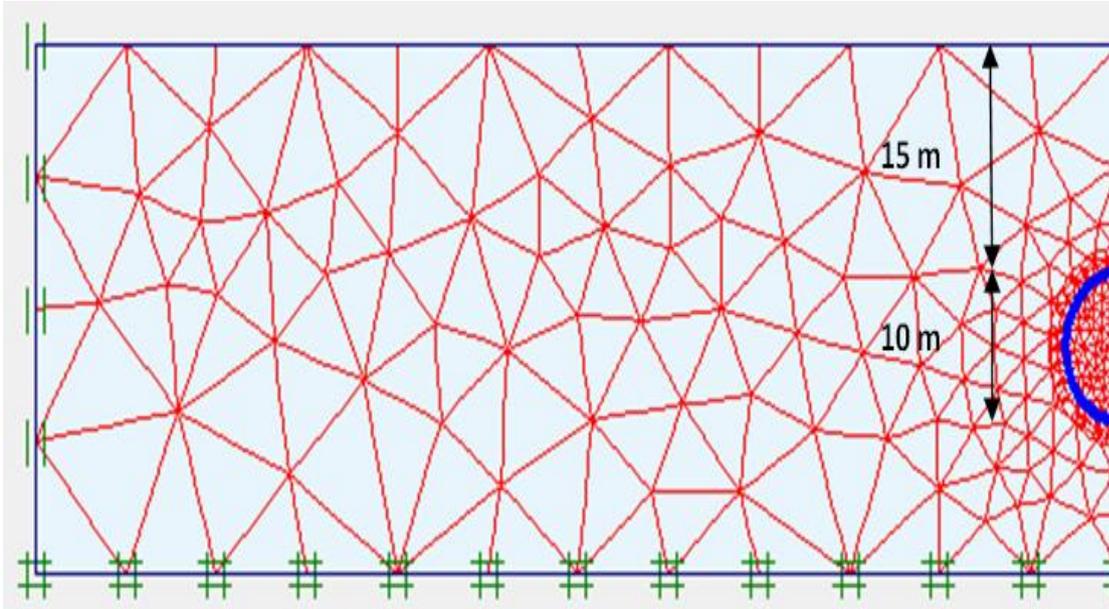
الشكل(7.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي للنفق بثبات القطر لحالات الغضار.



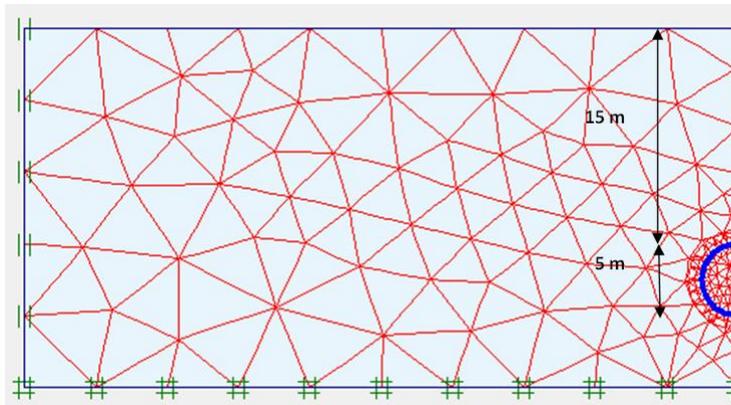
الشكل(8.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق بثبات القطر لحالات الغضار.

3.2.4. تأثير قطر النفق ($H/D, H=constant=15m$):

تمت دراسة تأثير عمق النفق النسبي من خلال عدد من التحليلات العددية على نماذج ذات أقطار مختلفة للنفق مع ثبات سماكة التربة فوق النفق و بقية العوامل و الأبعاد الهندسية الأخرى يظهر الشكلان (9.4) و (10.4) نموذجين عدديين لنفقين بقطرين مختلفين مع سماكة ثابتة التربة فوق النفق. و تم تلخيص نتائج التحليل الخاصة بتأثير تغير قطر النفق على الهبوط الأعظمي و شكل و أبعاد حوض الهبوط بثبات سماكة التربة أعلى النفق و من أجل حالات الغضار المختلفة في الجدول (4.4). حيث يبين الجدول أن الهبوط الأعظمي يتناقص مع تناقص القطر أي مع زيادة النسبة (H/D) ، كما أن أبعاد حوض الهبوط تتخفض بشكل ملحوظ مع تناقص القطر و ذلك لجميع حالات الغضار المدروسة . و بالتالي يمكن الاستنتاج أن تأثير قطر النفق هو أحد العوامل الهامة ذات التأثير الأكبر على الهبوط الأعظمي و على شكل و أبعاد حوض الهبوط المتشكل فوق النفق.



الشكل (9.4): تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الغضار ($H/D=1.5$).

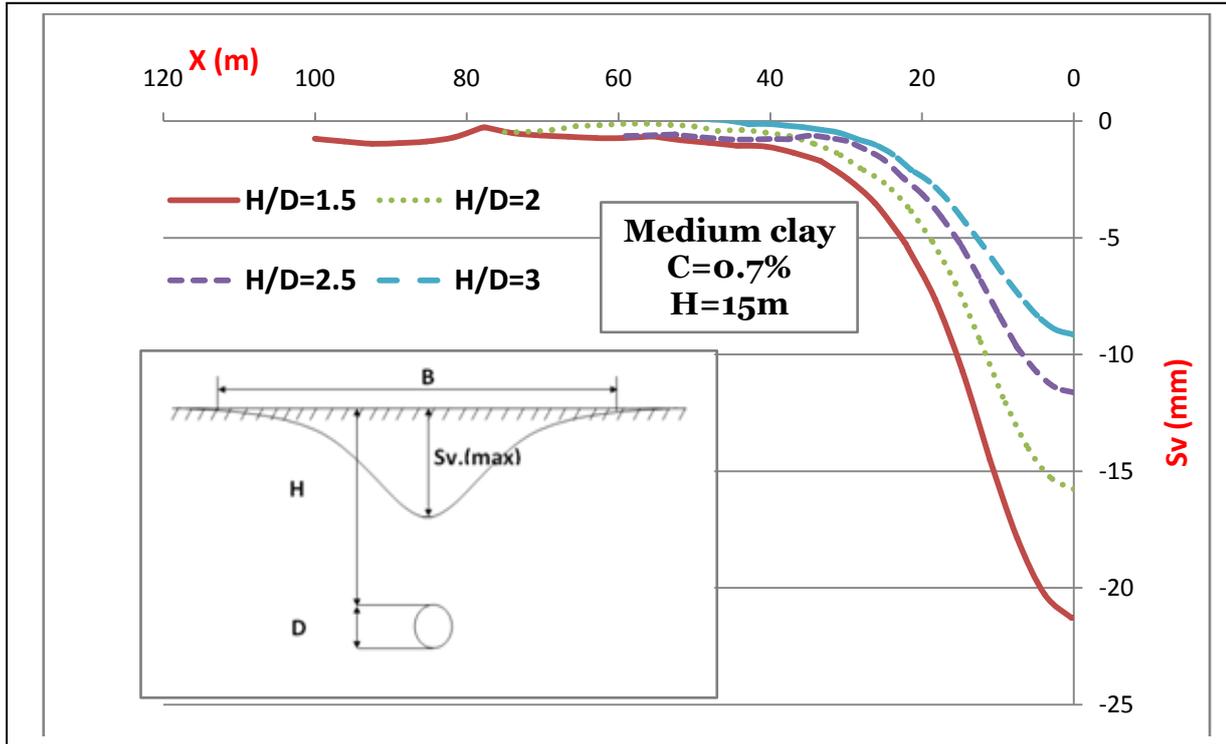


الشكل (10.4): تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الغضار ($H/D=3$).

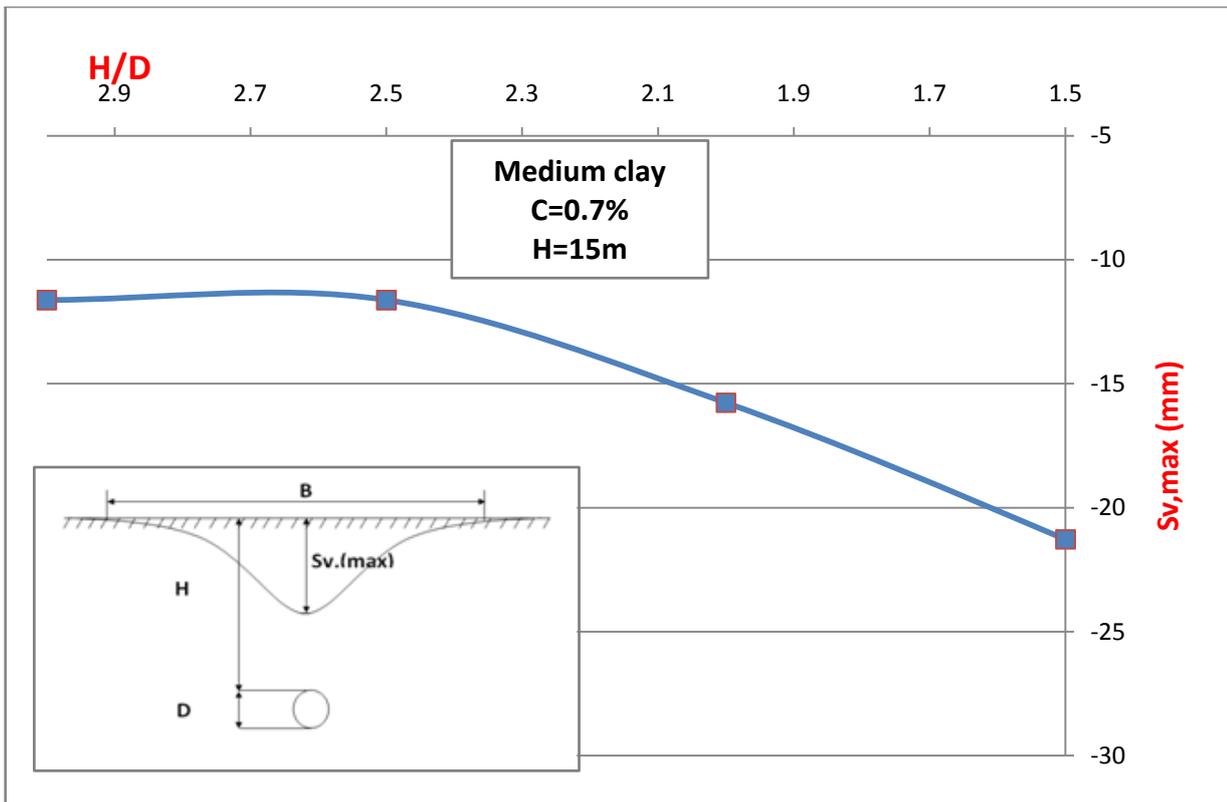
جدول (4.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الغضار بثبات سماكة التربة أعلى النفق

الغضار العالي الصلابة Stiff Clay		الغضار المتوسط الصلابة Medium Clay		الغضار الطري Soft Clay		العمق النسبي للنفق H/D H=constant
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
81.48	-21.74	92.67	-21.28	161.17	-18.41	1.5
68.87	-15.22	75.00	-15.76	72.63	-15.05	2
55.10	-11.22	60.00	-11.63	60.54	-11.38	2.5
52.38	-8.73	52.30	-11.63	57.68	-9.12	3

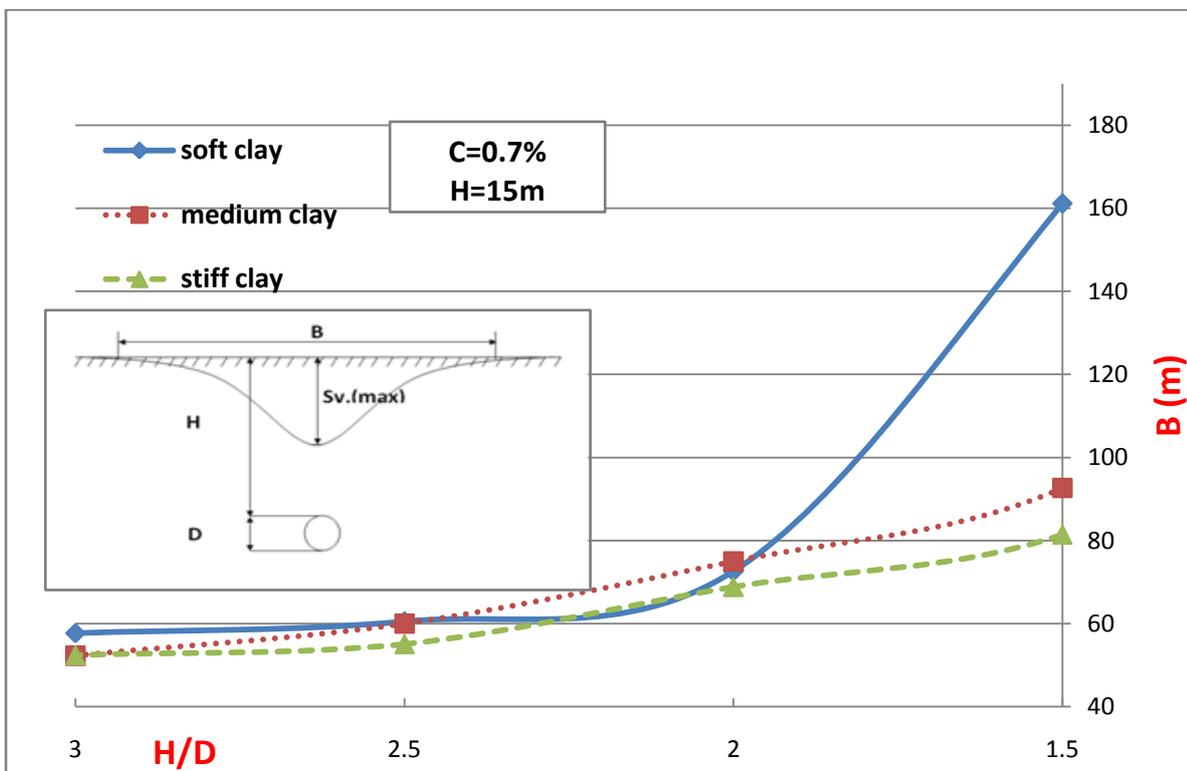
يبين الشكل (11.4) تغير شكل حوض الهبوط للغضار المتوسط الصلابة مع تغير النسبة (H/D)، حيث بين التحليل ان تناقص قطر النفق (D) (أي مع ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D)) يؤدي إلى تناقص عرض حوض الهبوط و تناقص في قيم الهبوط الأعظمي ، لمختلف حالات الغضار كما يوضح الشكلان (12.4) و (13.4)، يعود ذلك إلى أن تناقص قطر 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.



الشكل(11.4): تغيير شكل وأبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي (H/D) بثبات سماكة التربة أعلى النفق للغضار المتوسط الصلابة



الشكل (12.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق للفضار المتوسط الصلابة.



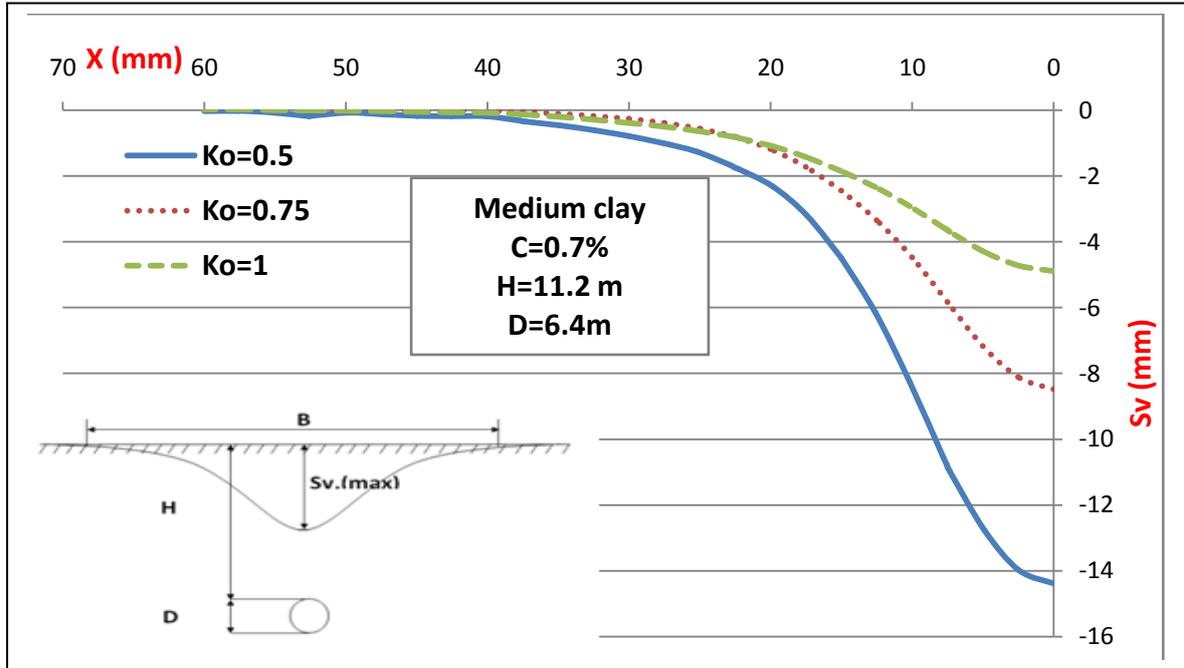
الشكل (13.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الفضار.

4.2.4. 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 اجراء عدداً من الحسابات على النموذج العددي مع تغيير قيم (K_0) من (0.5-1) و ثبات بقية العوامل و منها زاوية الاحتكاك الداخلي ففي بعض الظروف التكتونية يكون تغير (K_0) غير مرتبط بتغير زاوية الاحتكاك، و يبين الجدول (5.4) تناقص قيم الهبوط الأعظمي و تناقص طفيف لقيم عرض حوض الهبوط مع تزايد قيمة معامل ضغط التربة الجانبي K_0 ، و ذلك بالنسبة للغضار المتوسط و العالي الصلابة. كما يظهر الشكل (14.4) تناقص عمق حوض الهبوط مع زيادة معامل ضغط التربة الساكن و تغير طفيف لعرض الحوض من أجل الغضار المتوسط الصلابة .ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة (K_0) يؤدي إلى تناقص التشوهات الجانبية الأمر الذي يسبب تناقص الهبوطات فوق النفق.

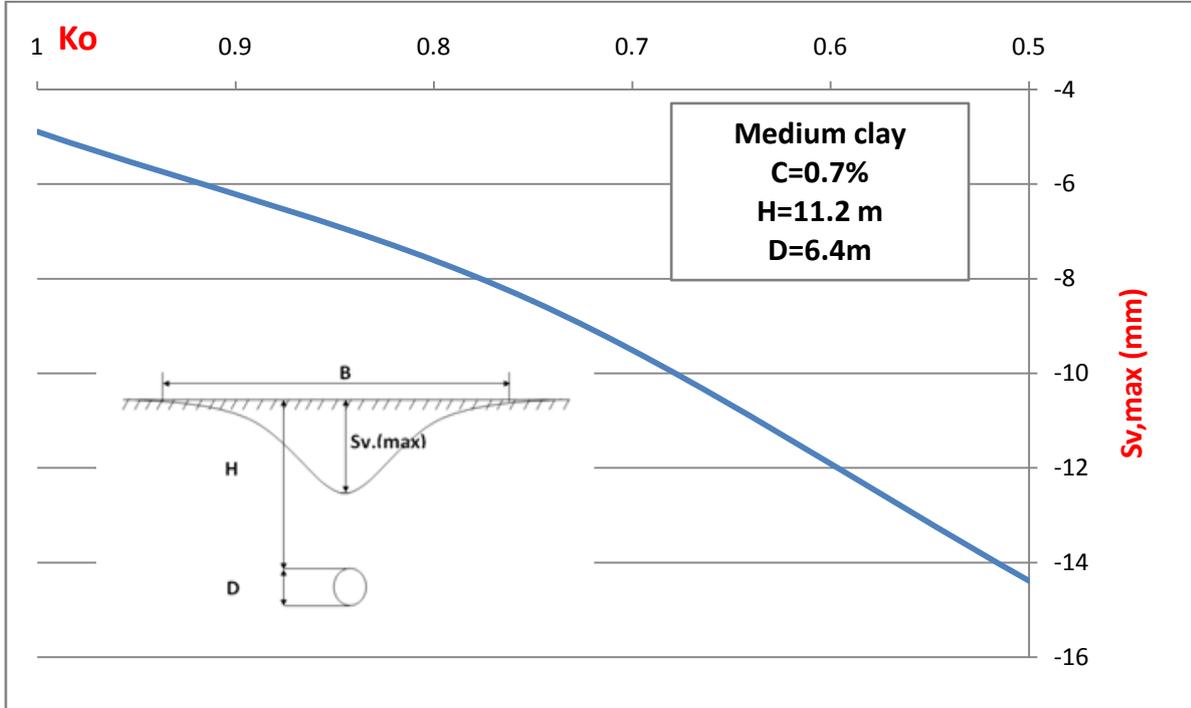
جدول (5.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الغضار.

الغضار العالي الصلابة Stiff Clay		الغضار المتوسط الصلابة Medium Clay		معامل ضغط التربة الجانبي K_0
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي $S_{v,max}$ (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي $S_{v,max}$ (mm)	
50.00	-13.67	52.73	-14.38	0.5
45.00	-9.22	40.00	-8.48	0.75
39.77	-5.93	39.77	-4.89	1

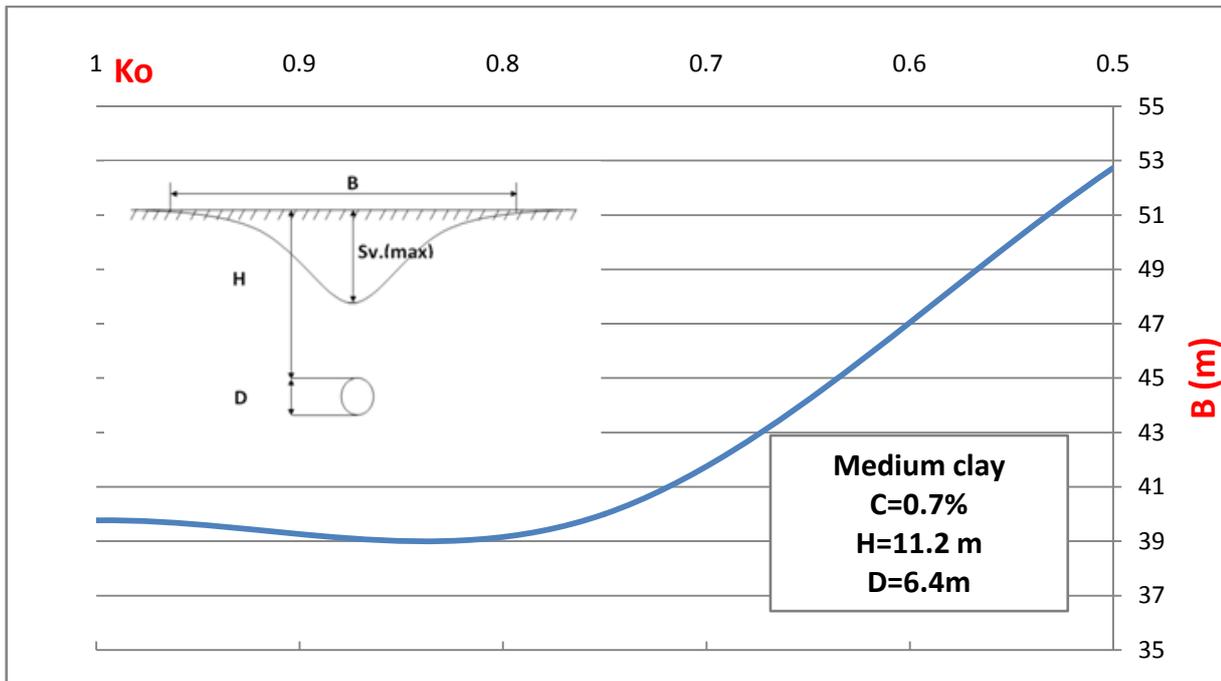


الشكل(14.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار المتوسط الصلابة.

تم عرض النتائج الخاصة بتأثير تغير K_0 لحالة الغضار المتوسط الصلابة على الهبوط الأعظمي و على عرض حوض الهبوط في الشكلين (15.4) و (16.4) على الترتيب، و لقد أظهرت النتائج أنه مع تزايد قيم (K_0) يتناقص الهبوط الأعظمي لسطح الأرض بشكل واضح ، اما بالنسبة ل عرض حوض الهبوط فهو يتناقص مع تزايد K_0 حتى قيمة $K_0=0.8$ بعدها لا يسبب أي تغيير على عرض الحوض.



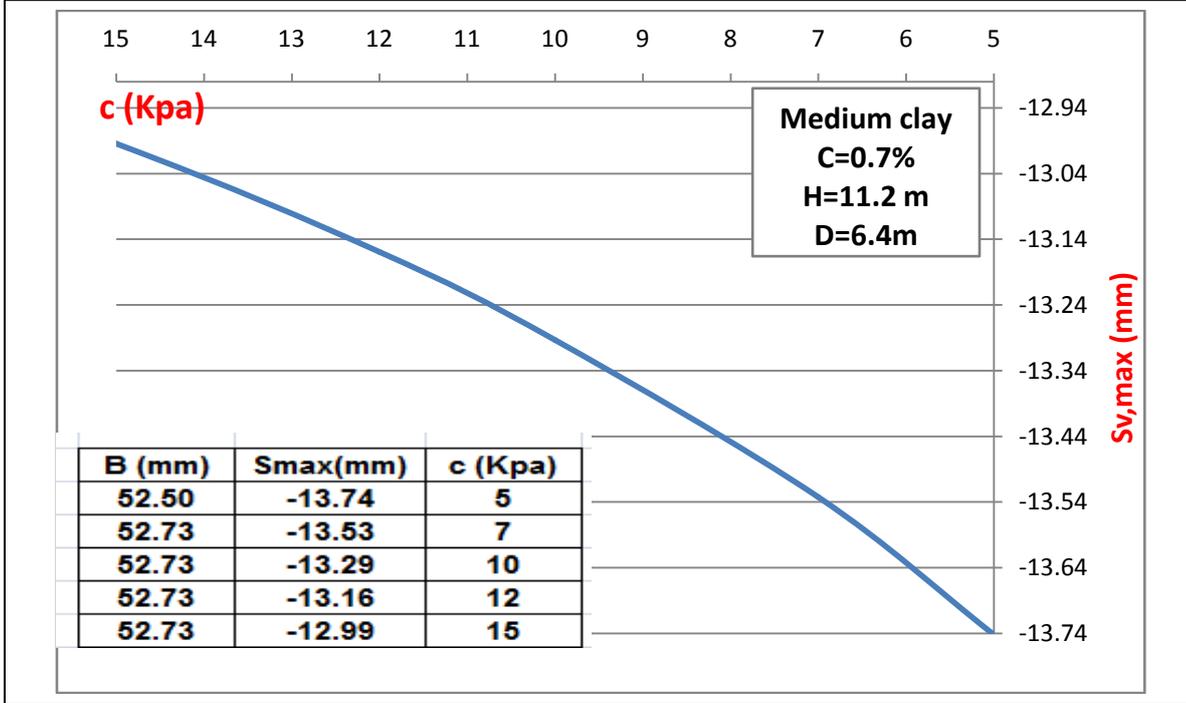
الشكل (15.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للغضار المتوسط الصلابة.



الشكل (16.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لغضار لمتوسط الصلابة.

5.2.4. تأثير مقاومة التربة على القص (c'):

بينت الدراسة أن لمقاومة القص من خلال التماسك (c) تأثيراً على الانتقالات و الهبوطات التي ترافق تنفيذ النفق الشكل (17.4)، حيث أدت زيادة التماسك إلى تناقص الهبوط الأعظمي بمقدار طفيف مع تغير طفيف جداً في عرض حوض الهبوط.



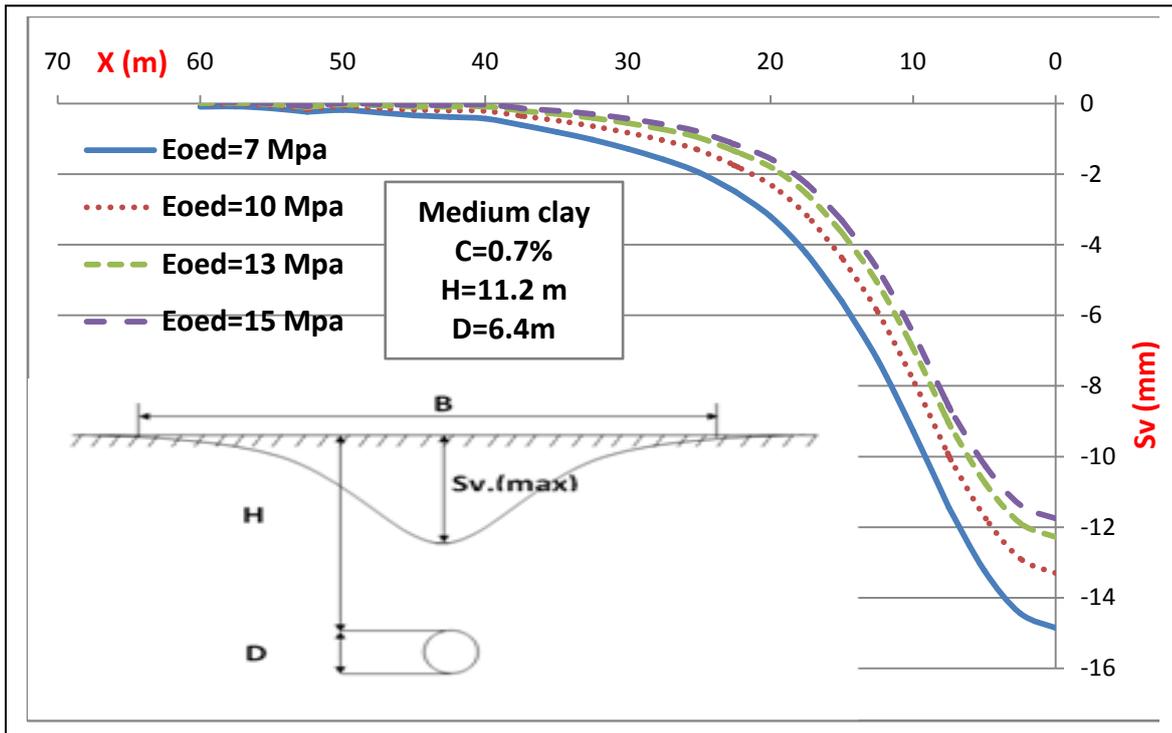
الشكل(17.4): تغيير الهبوط الأعظمي مع تغيير التماسك للغضار.

6.2.4. تأثير صلابة التربة (E_{oed}):

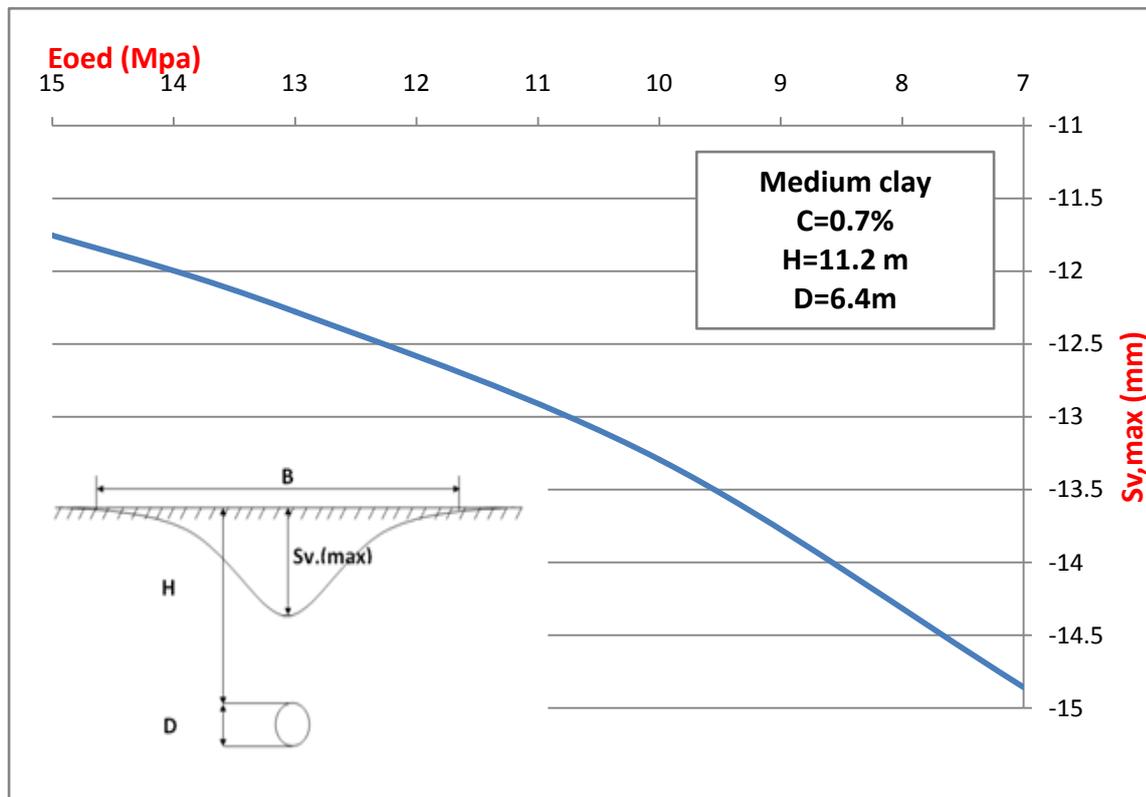
أظهرت الدراسة أن لصلابة التربة من خلال (E_{oed}) تأثيراً على الانتقالات و الهبوطات التي ترافق تنفيذ النفق حيث يبين الجدول (6.4) تناقص الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع زيادة معامل المرونة الأودومتري. كذلك يظهر الشكل (18.4) تناقص حجم حوض الهبوط بشكل شبه خطي مع زيادة معامل المرونة الأودومتري، حيث تتناقص الهبوطات الأعظمية فوق النفق و يتناقص عرض حوض الهبوط كلما زاد E_{oed} كما يبين الشكلان (19.4) و (20.4).

جدول (6.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل المرونة الأودومتري للغضار.

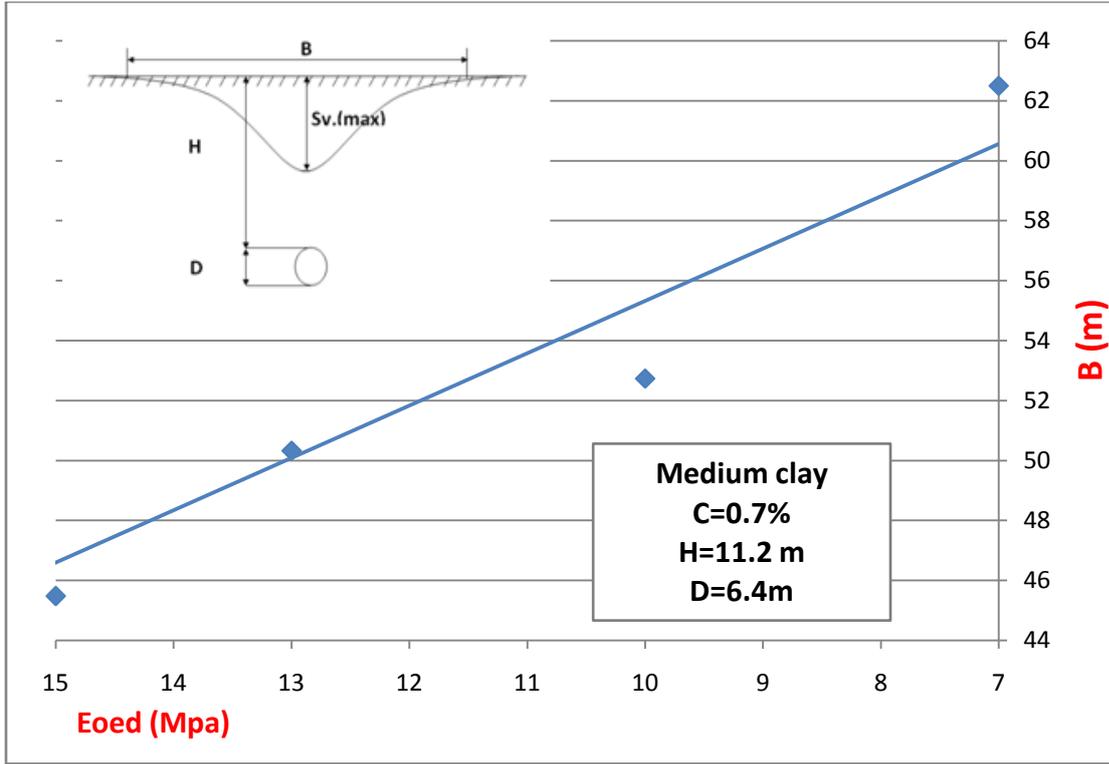
الغضار المتوسط الصلابة Medium Clay		معامل المرونة الأودومتري E_{oed} Mpa
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
62.5	-14.8561	7
52.73469	-13.2931	10
50.32479	-12.2778	13
45.47463	-11.7535	15



الشكل (18.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير صلابة الغضار



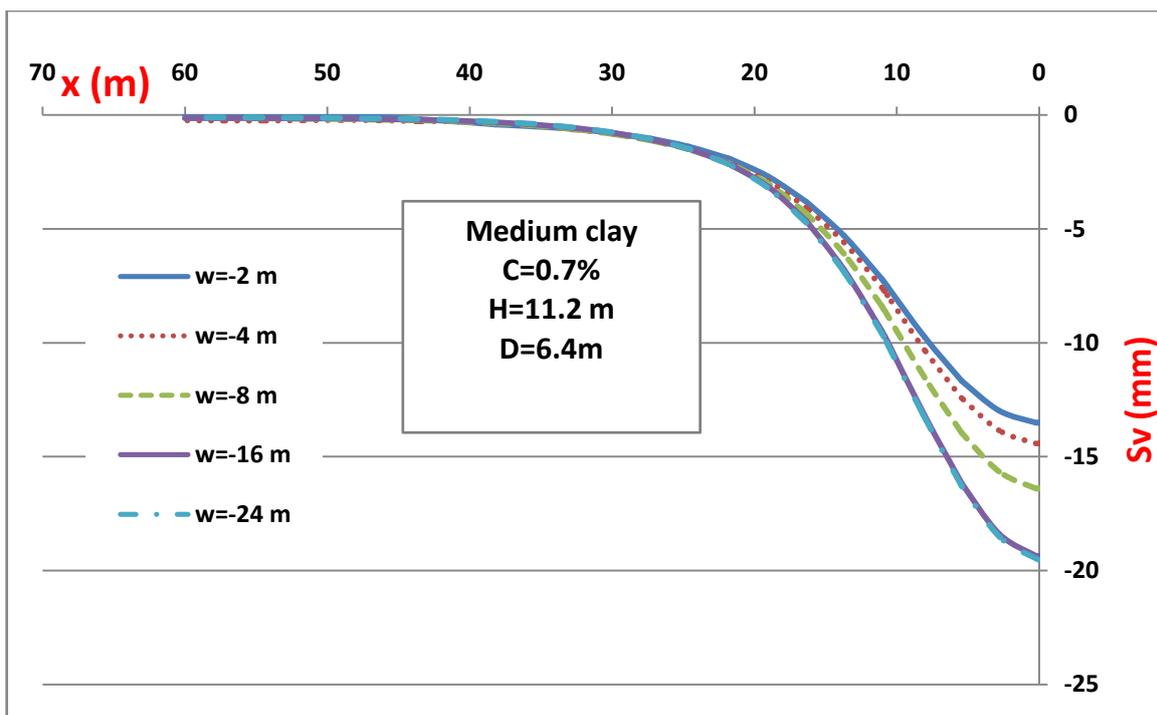
الشكل (19.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير صلابة الغضار.



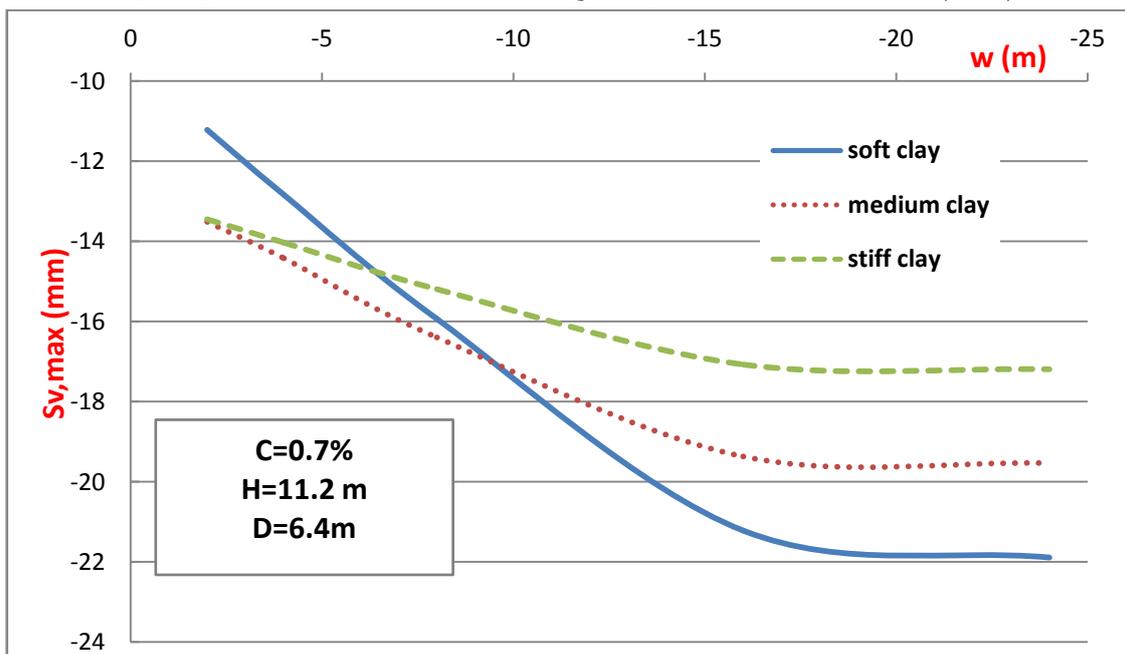
الشكل(20.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير صلابة الغضار.

7.2.4. تأثير منسوب المياه الجوفية:

بينت الدراسة أنه مع تناقص منسوب المياه الجوفية يزداد الهبوط الأعظمي لحالات الغضار حتى عمق $(w=-16 \text{ m})$ من منسوب سطح الأرض حيث تصبح التغيرات طفيفة و يظهر الشكل (21.4) تزايد حجم حوض الهبوط مع انخفاض منسوب المياه الجوفية للغضار المتوسط الصلابة، كما يبين الشكل (22.4) تزايد الهبوط الأعظمي لحالات الغضار مع انخفاض منسوب المياه الجوفية، و يعود ذلك إلى أنه مع تناقص منسوب المياه الجوفية يتناقص ضغط الماء المسامي و تزداد الاجهادات الفعالة في التربة مما يؤدي إلى تزايد الهبوط.



الشكل (21.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير منسوب المياه الجوفية للغضار المتوسط الصلابة



الشكل (22.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير منسوب المياه الجوفية لحالات الغضار.

3.4 الدراسة البارامترية في حالة تربة رملية متجانسة:

تم إجراء سلسلة من الحسابات بواسطة برنامج Plaxis بحالة تربة رملية متجانسة و ممتدة إلى أعماق كبيرة، ذات كثافات نسبية مختلفة أو درجة تراص مختلفة (رمل مخلخل، رمل متوسط التراص و رمل مرتص) كذلك مع اعتماد منسوب للمياه الجوفية (-2 m) اعتباراً من سطح الأرض، حيث أن خواص الرمل المستخدم في التحليل العددي موضحة في الجدول (7.4).

جدول (7.4). خواص الرمل المعتمد في قانون المادة (HS-Model) حول النفق في الدراسة البارامترية

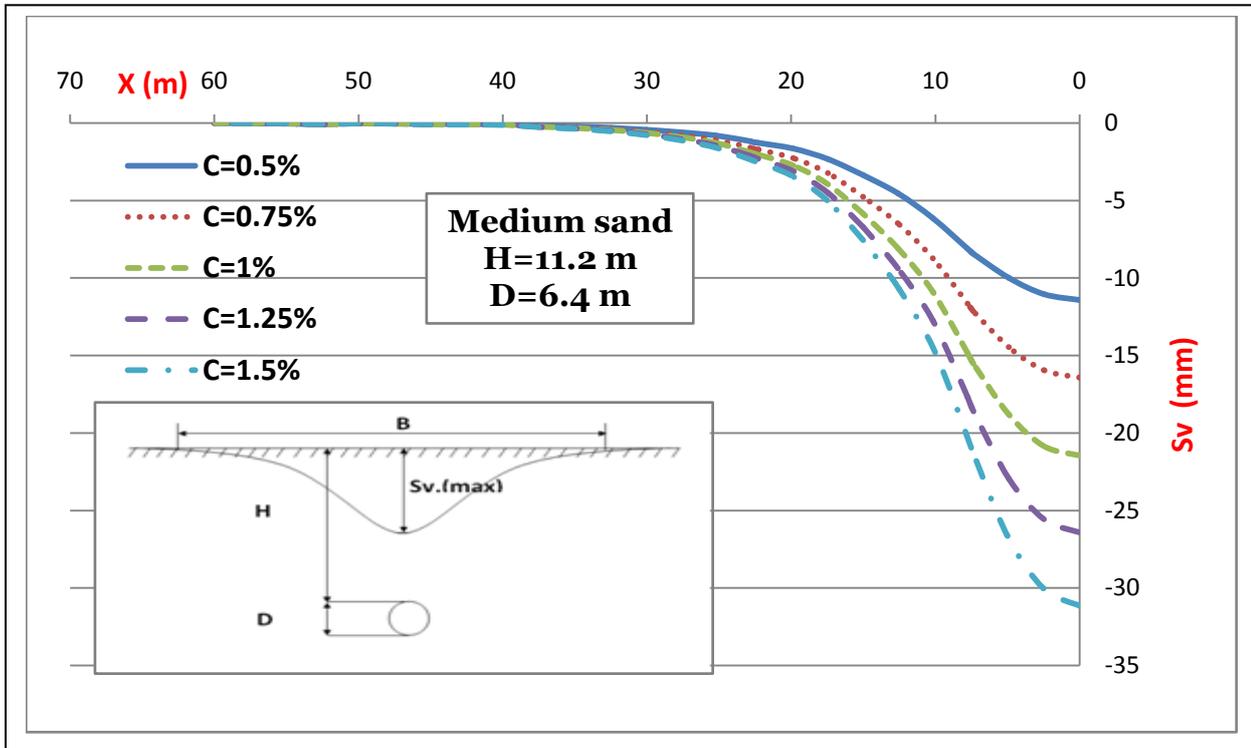
Hardening – soil		(loose sand)	(medium sand)	(dense sand)
Type		Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	15	17.5	18
γ_{sat}	[kN/m ³]	15.5	18	18.5
E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	18750	50000	75000
E_{oed}^{ref}	[kN/m ²]	15000	45000	75000
E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	56250	150000	225000
ν_{ur}	[-]	0.2	0.2	0.2
C_{ref}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

1.3.4. تأثير معامل التقلص (Contraction: C%):

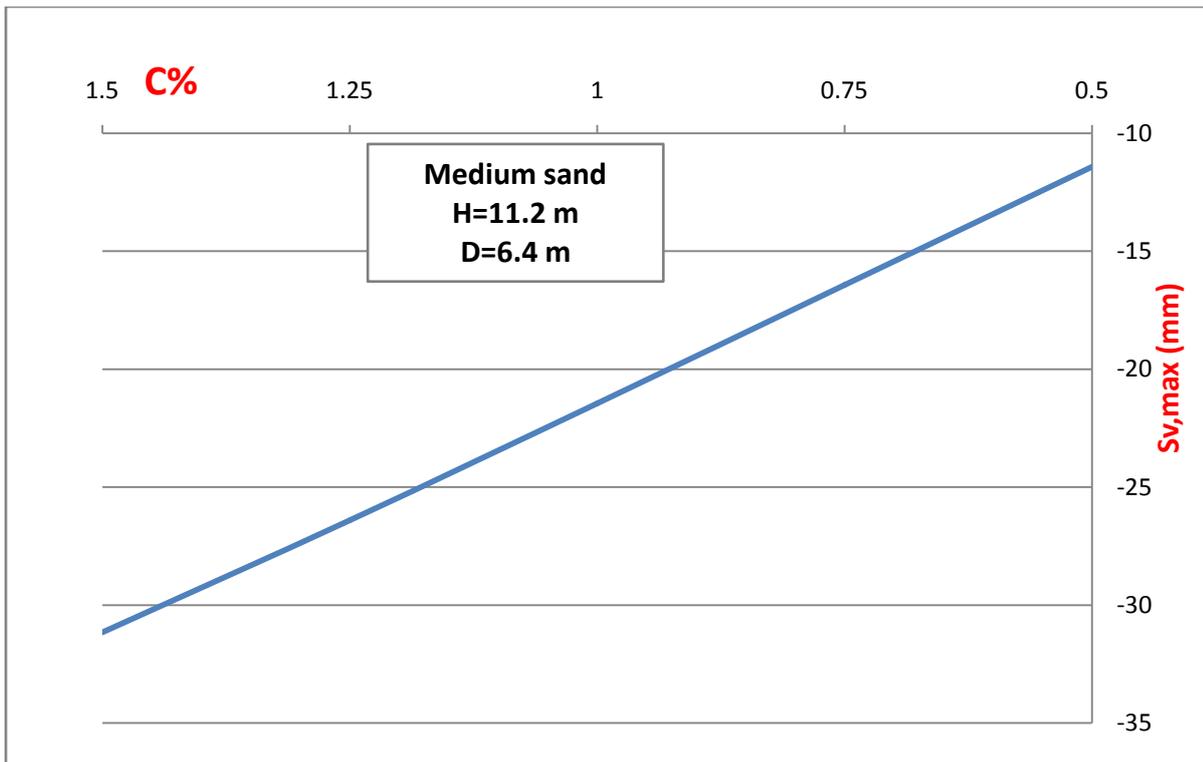
يظهر الجدول (8.4) نتائج التحليل العددي حيث يبين تزايد قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تزايد معامل التقلص C% لحالات الرمل بكثافات نسبية مختلفة. يظهر الشكل (23.4) تزايد حجم حوض الهبوط مع تزايد قيم معامل التقلص ، حيث أنه بزيادة قيم C% يزداد الهبوط الأعظمي لسطح الأرض في حالة الترب الرملية ، و كذلك يزداد عرض حوض الهبوط المتشكل على سطح الأرض ، و تظهر أهمية مقاومة التربة من خلال عرض الحوض حيث يتناقص عرض الحوض مع تزايد درجة التراص فيكون للرمل المخلخل أكبر عرض حوض ثم المتوسط ثم المترص، كما يوضح الشكلان (24.4) و(25.4). و يلاحظ من الشكل (25.4) أن عرض حوض الهبوط يتزايد مع تزايد C حتى قيمة (c=1.25%) و بعدها يبقى ثابتاً و ذلك لحالات الرمل الثلاث المختلف التراص.

جدول (8.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل التقلص لحالات الرمل.

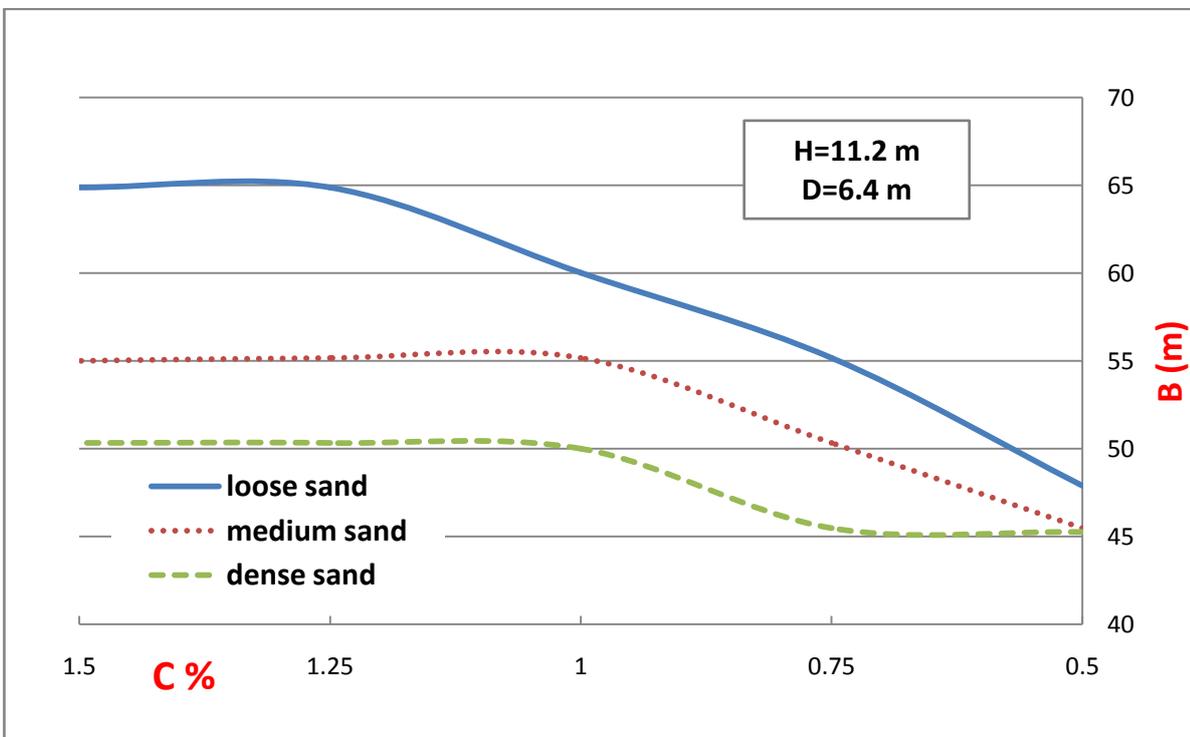
الرمل العالي الارتصاص Dense Sand		الرمل المتوسط الارتصاص Medium Sand		الرمل المخلخل Loose Sand		معامل التقلص Contraction Factor C%
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
45.25	-10.82	45.47	-11.41	47.88	-10.35	0.5
45.47	-15.42	50.32	-16.43	55.17	-15.53	0.75
50.00	-19.63	55.17	-21.45	60.03	-20.64	1
50.32	-23.07	55.17	-26.41	64.88	-25.82	1.25
50.32	-25.45	55.00	-31.16	64.88	-30.99	1.5



الشكل(23.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الرمل المتوسط الارتصاص.



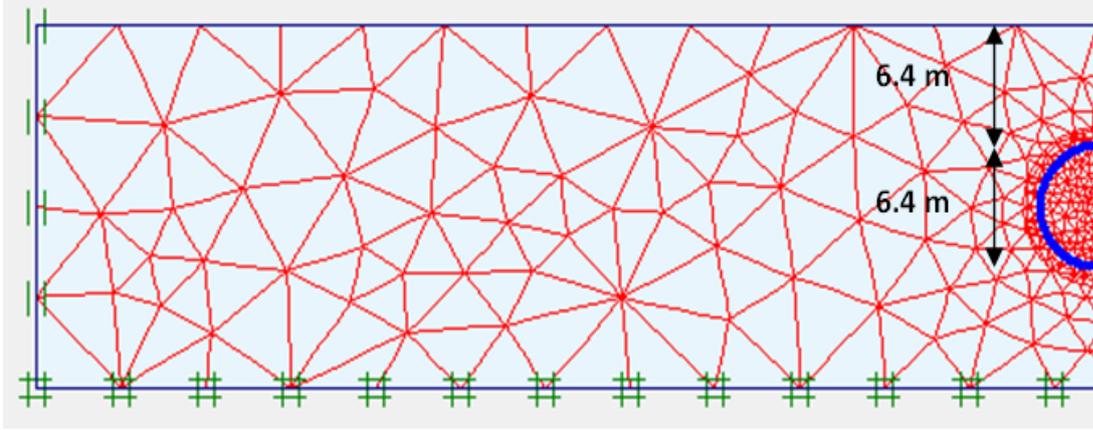
الشكل (24.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل تقلص النفق لحالة الرمل المتوسط الارتصاص.



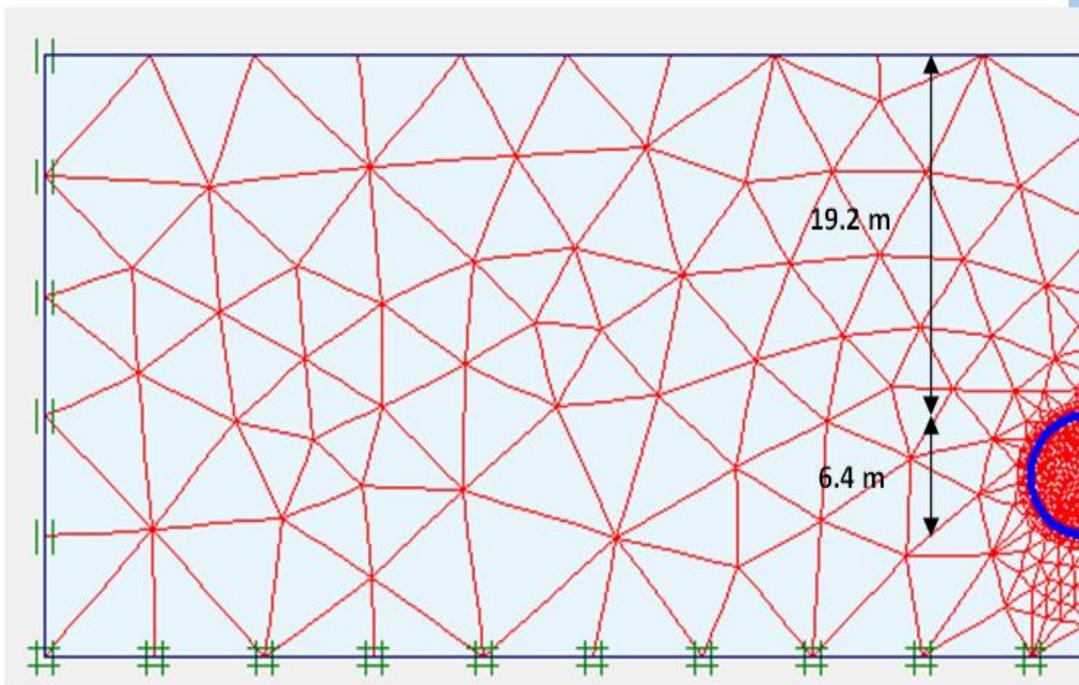
الشكل (25.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل تقلص النفق لحالات الرمل.

2.3.4. تأثير عمق النفق ($H/D, D=constant=6.4m$):

لدراسة تأثير عمق النفق مع ثبات القطر تم استخدام عدد من النماذج العددية و الموضحة في الشكلين (26.4) و (27.4)، حيث أظهرت نتائج التحليل العددي الموضحة بالجدول (9.4) أن ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) بزيادة سماكة التربة أعلى النفق و ثبات قطر النفق يؤدي إلى تناقص في حجم حوض الهبوط الشكل (28.4) و تناقص في قيم الهبوط الأعظمي و تزايد عرض حوض الهبوط لحالات الرمل كما يبين الشكلان (29.4) و (30.4).



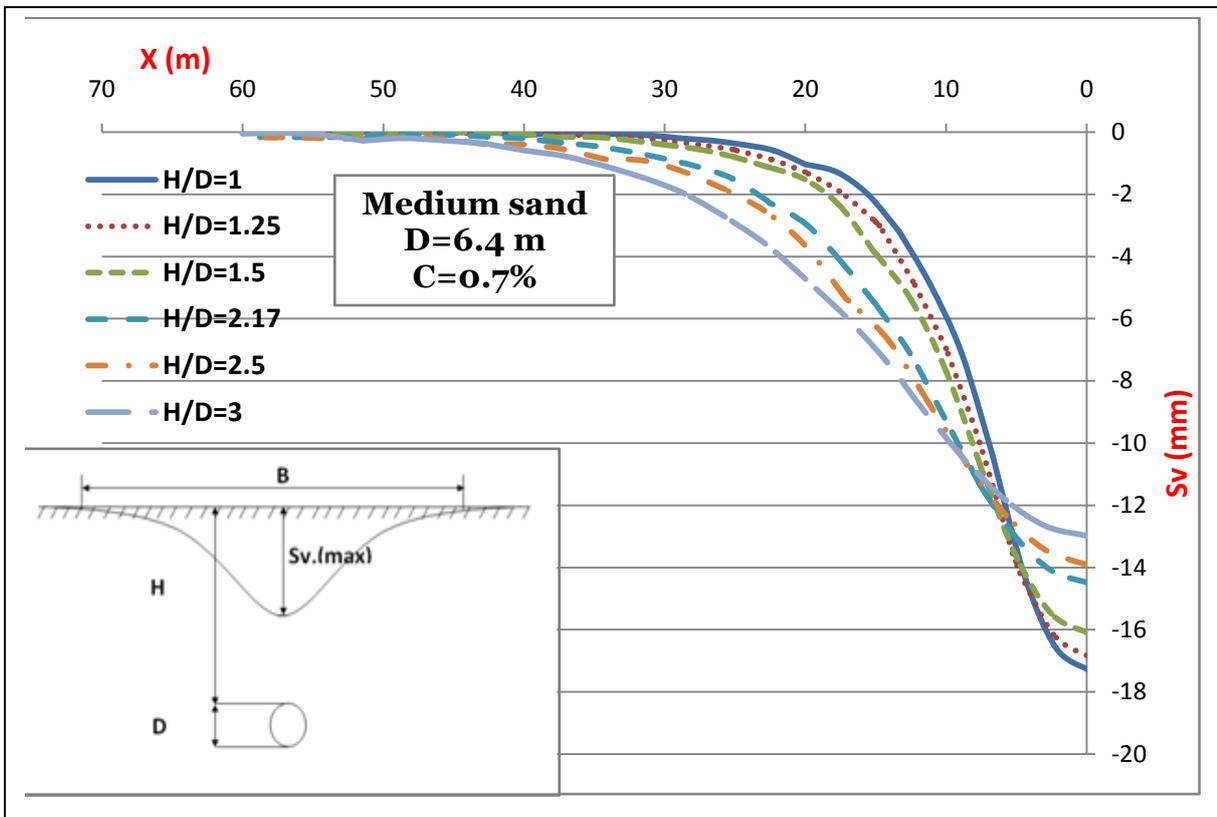
الشكل (26.4): تغيير العمق النسبي بتغيير سماكة التربة أعلى النفق و ثبات القطر ($H/D=1$).



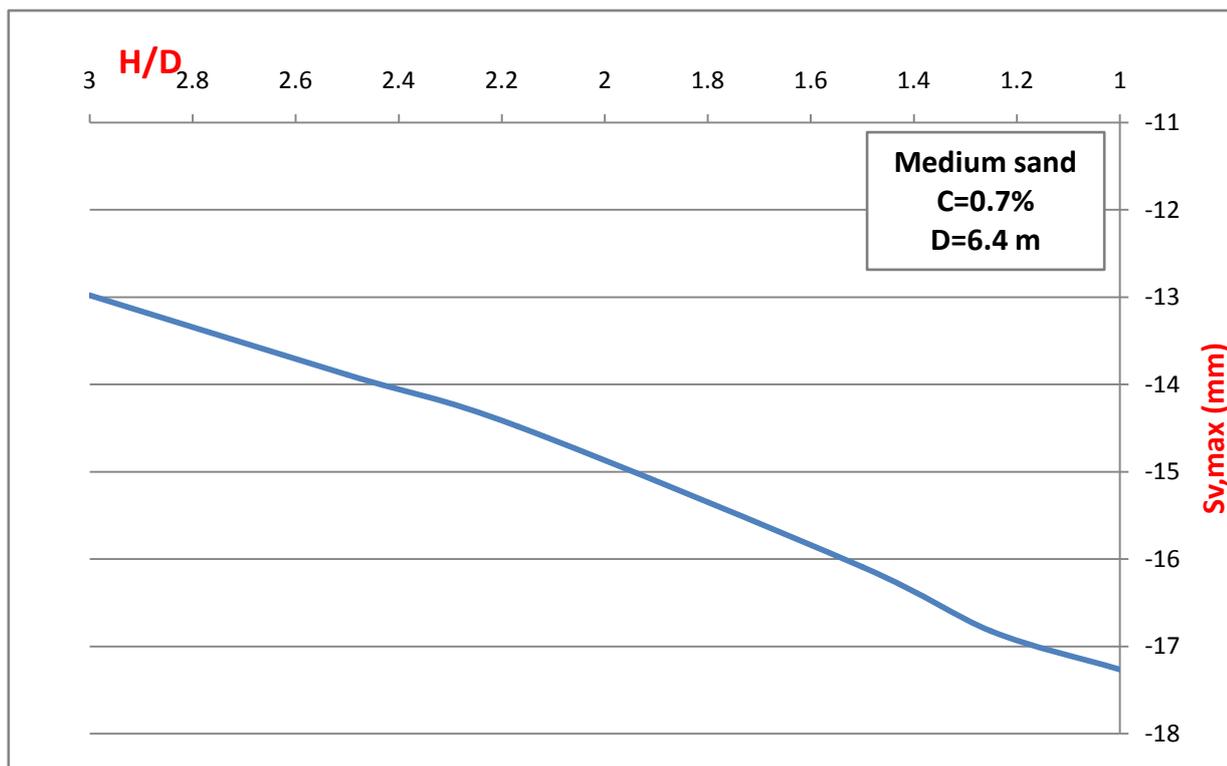
الشكل (27.4): تغيير العمق النسبي بتغيير سماكة التربة أعلى النفق و ثبات القطر ($H/D=3$).

جدول (9.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الرمل بثبات قطر النفق .

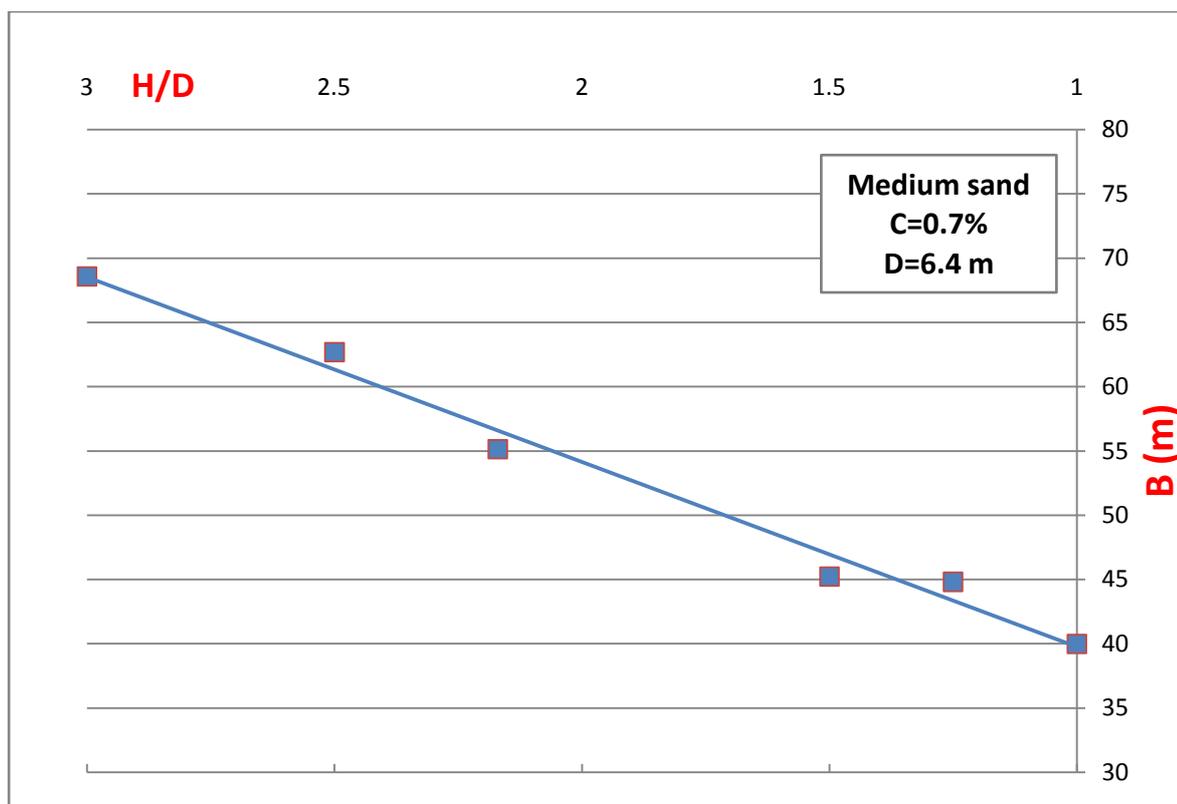
الرمل العالي الارتصاص Dense Sand		الرمل المتوسط الارتصاص Medium Sand		الرمل المخلخل Loose Sand		العمق النسبي للنفق H/D D=constant
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
35.50	-16.63	40.00	-17.27	44.44	-15.50	1
40.00	-16.02	44.83	-16.83	47.25	-15.41	1.25
45.00	-15.16	45.23	-16.09	50.12	-14.96	1.5
55.15	-13.49	55.15	-14.48	60.02	-13.71	2.17
57.14	-12.74	62.68	-13.89	71.43	-13.40	2.5
68.57	-12.01	68.57	-12.98	77.12	-12.83	3



الشكل (28,4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق للرمل المتوسط الارتصاص



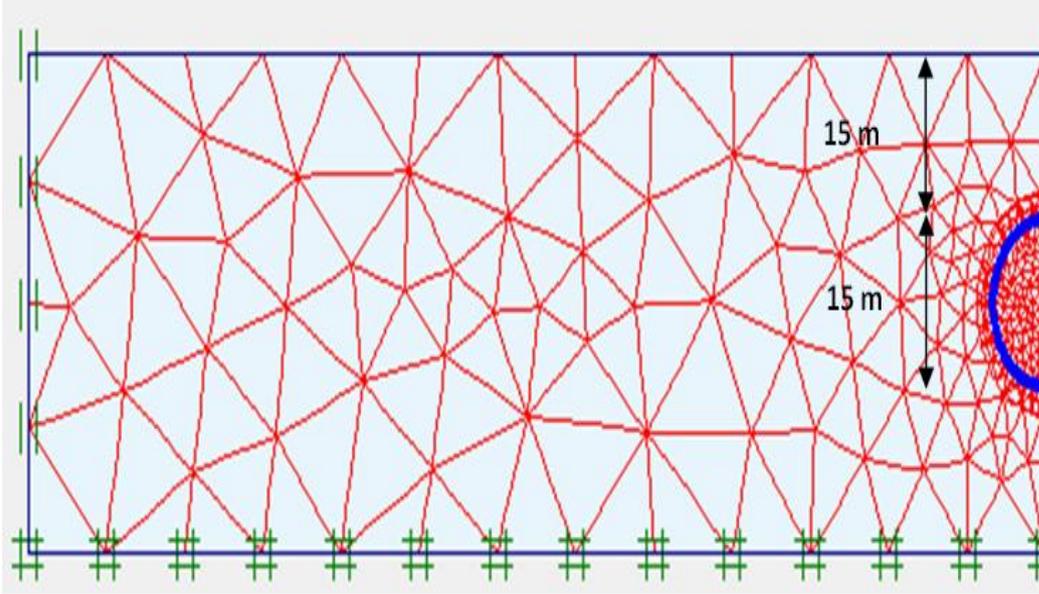
الشكل (29.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق للرمال المتوسط الارتصاص.



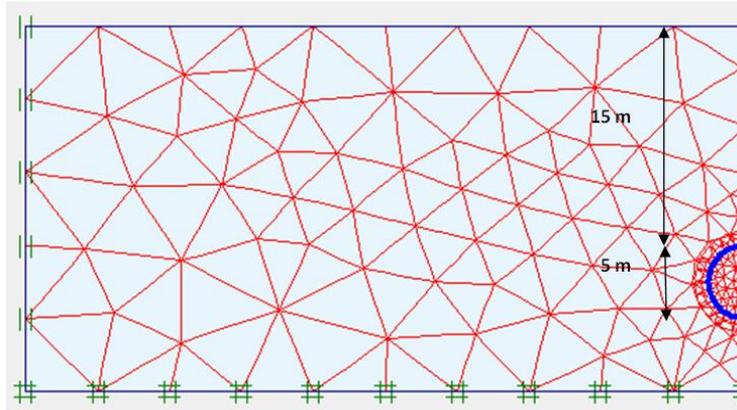
الشكل (30.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات قطر النفق للرمال المتوسط الارتصاص.

3.3.4. تأثير قطر النفق ($H/D, H=constant=15m$):

يظهر الشكلان (31.4) و (32.4) تغييرات العمق النسبي للنفق بتغيير القطر و ثبات السماكة أعلى النفق، ونتائج التحليل العددي لحالات الرمل موضحة في الجدول (10.4) حيث تبين النتائج أن ازدياد العمق النسبي للنفق (H/D) بتناقص قطر النفق يؤدي إلى تناقص حجم حوض الهبوط الشكل (33.4) و تناقص في قيم الهبوط الأعظمي للرمل الشكل (34.4) و تناقص عرض حوض الهبوط الشكل (35.4) و ذلك نتيجة تناقص معامل التقلص مع تناقص قطر النفق. كما يبين الشكل (35.4) تناقص عرض حوض الهبوط مع تناقص درجة الارتصاص بين حالات الرمل



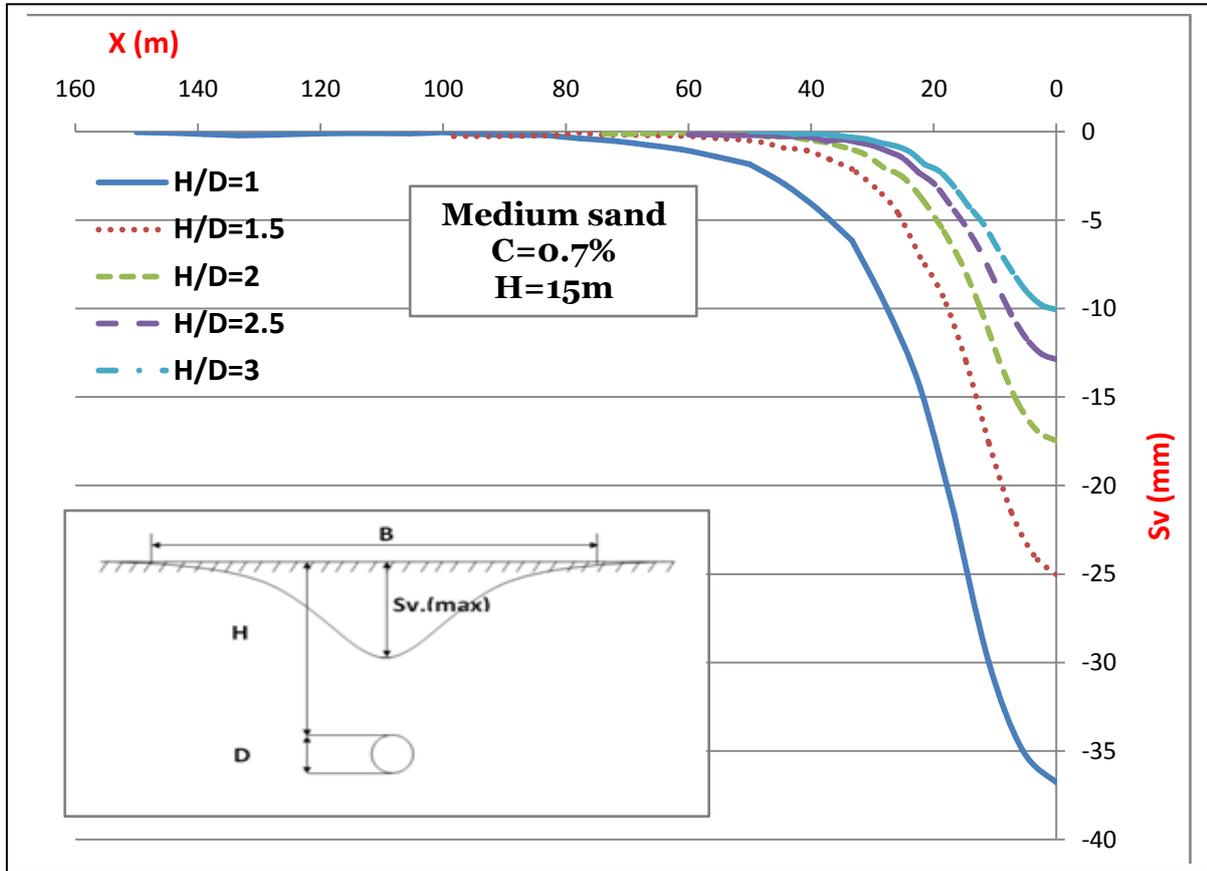
الشكل (31.4): تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الرمل ($H/D=1$).



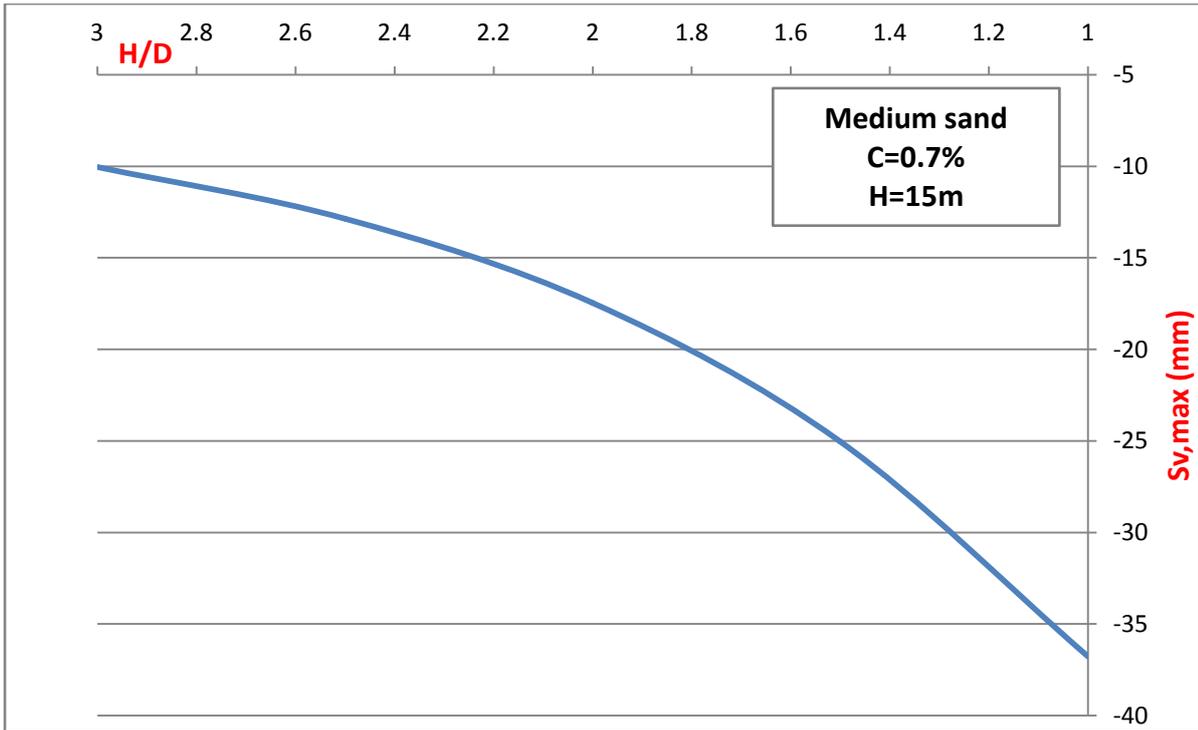
الشكل (32.4): تغيير العمق النسبي للنفق بتغيير قطر النفق و ثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الرمل ($H/D=3$).

جدول (10.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي للنفق لحالات الرمل بثبات سماكة التربة أعلى النفق.

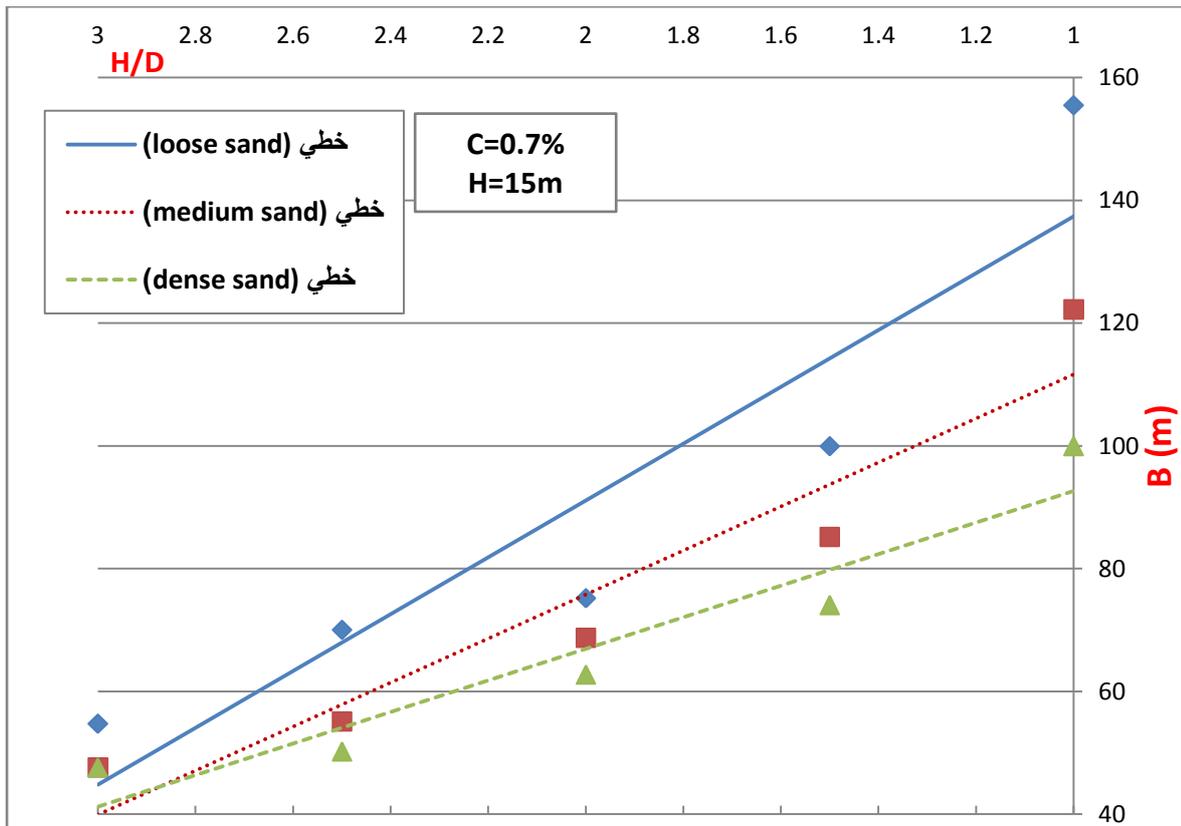
الرمل العالي الارتصاص Dense Sand		الرمل المتوسط الارتصاص Medium Sand		الرمل المخلخل Loose Sand		العمق النسبي للنفق H/D H=constant
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
99.97	-25.23	122.22	-36.77	155.50	-28.87	1
74.07	-22.75	85.19	-25.02	99.95	-22.75	1.5
62.77	-16.22	68.75	-17.46	75.20	-16.56	2
50.21	-11.86	55.10	-12.86	70.05	-12.34	2.5
47.61	-9.25	47.61	-10.04	54.76	-9.83	3



الشكل (33.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق للرمل المتوسط الارتصاص.



الشكل (34.4): تغيير الهبوط الأعظمي مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق للرمل المتوسط الارتصاص.



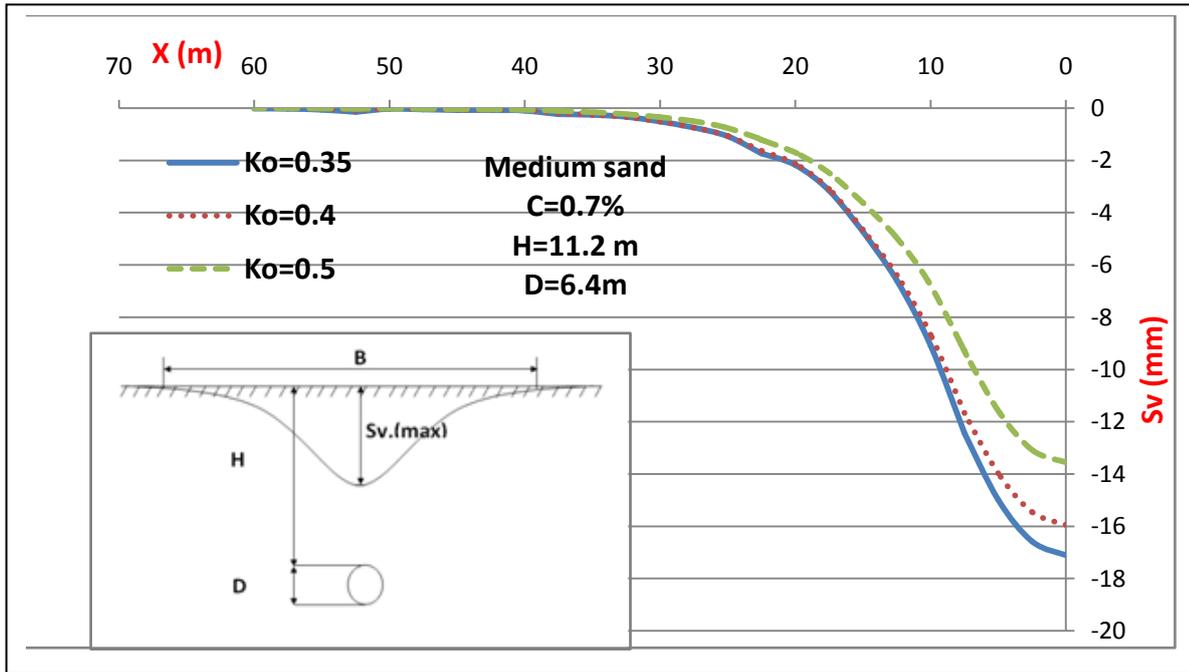
الشكل (35.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير العمق النسبي بثبات سماكة التربة أعلى النفق لحالات الرمل.

4.3.4. تأثير معامل ضغط التربة الجانبي (K_0):

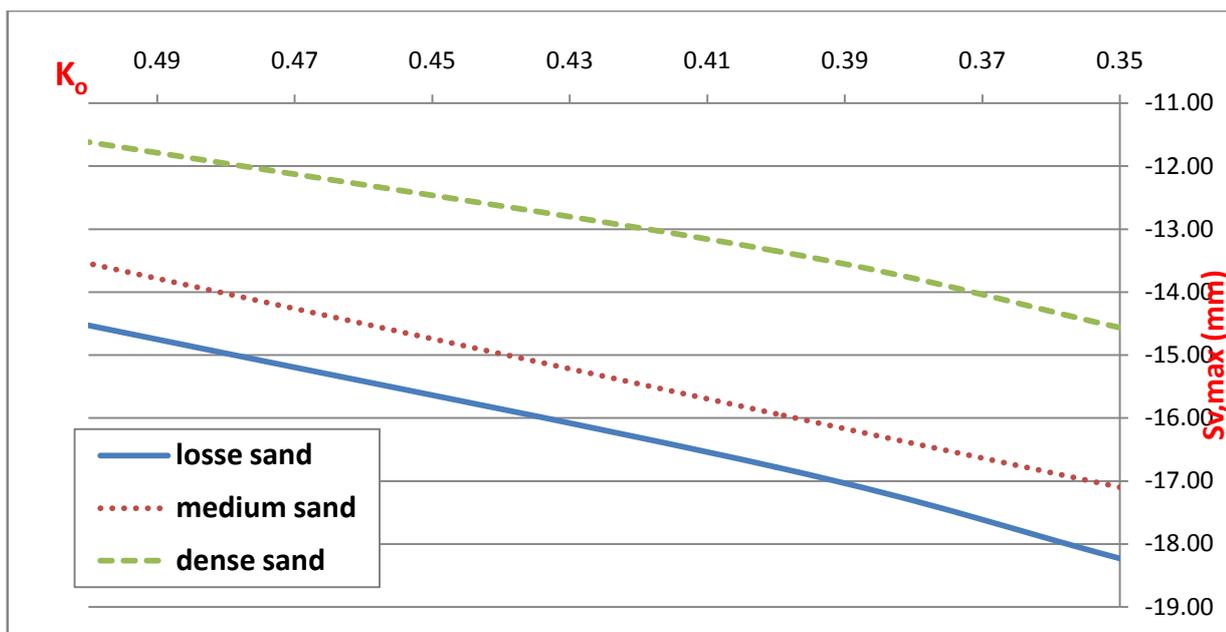
لقد أظهرت النتائج الموضحة في الجدول (11.4) أنه مع تزايد قيم (K_0) من 0.35 حتى 0.5 مع ثبات بقية العوامل و منها زاوية الاحتكاك الداخلي يتناقص حجم حوض الهبوط الشكل (36.4)، و يتناقص الهبوط الأعظمي لسطح الأرض حيث يكون الهبوط للرمل المرتص هو الأقل ثم الرمل المتوسط يليه المخلخل أي يتناقص الهبوط مع تزايد درجة الارتصاص ، فيما عرض حوض الهبوط يكون تغيره طفيف كما يبين الشكلان (37.4) و (38.4).

جدول (11.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل .

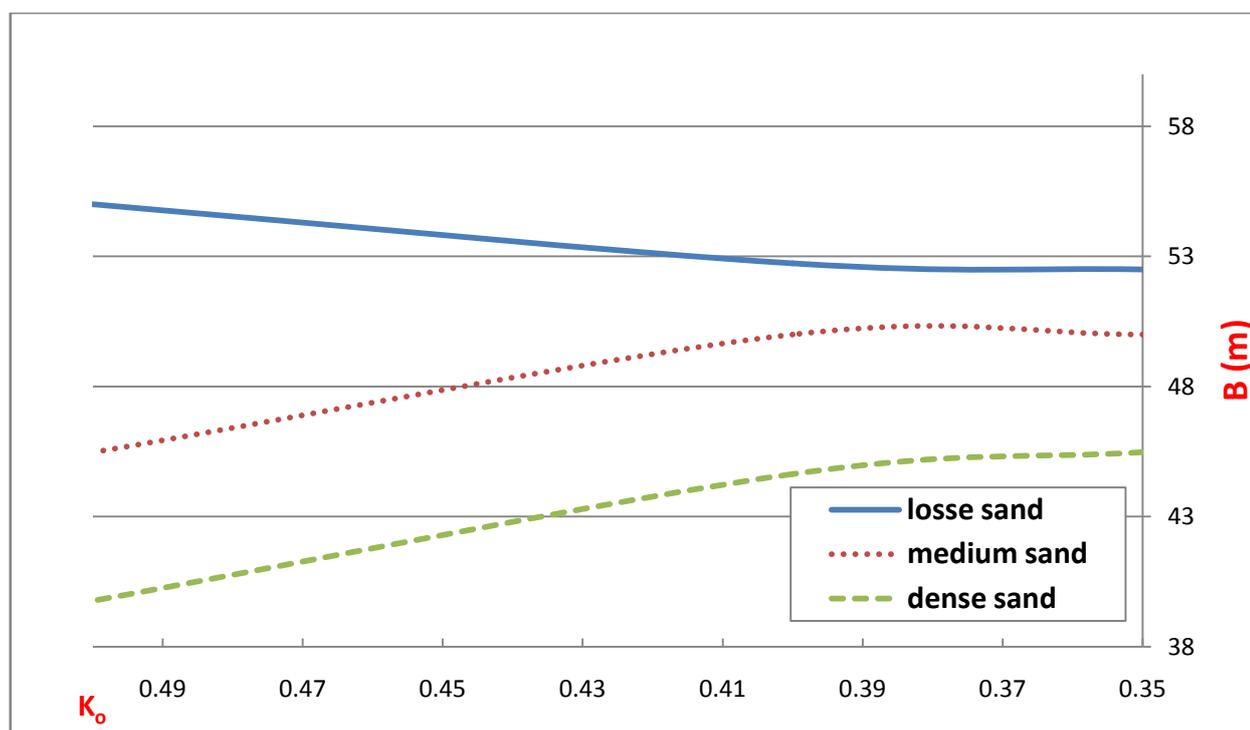
الرمل العالي الارتصاص Dense Sand		الرمل المتوسط الارتصاص Medium Sand		الرمل المخلخل Loose Sand		معامل ضغط التربة الجانبي K_0
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي Sv,max (mm)	
45.47	-14.57	50.00	-17.10	52.50	-18.23	0.35
44.64	-13.35	50.00	-15.94	52.73	-16.78	0.4
39.77	-11.62	45.47	-13.54	55.00	-14.53	0.5



الشكل(36.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي للرمل المتوسط الارتصاص.



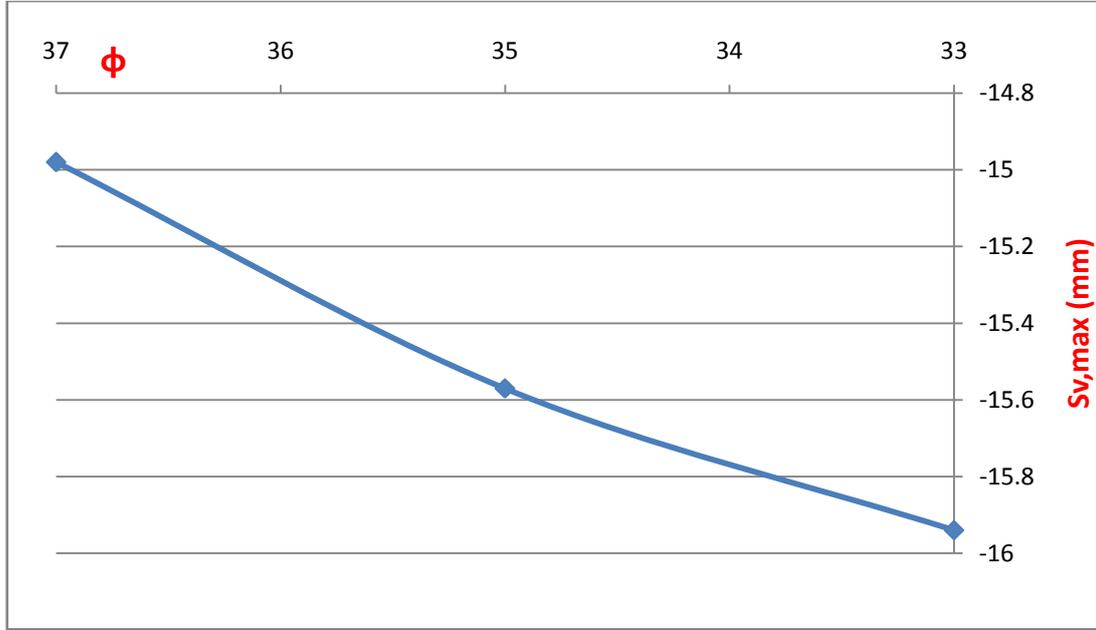
الشكل (37.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل.



الشكل (38.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير معامل ضغط التربة الجانبي لحالات الرمل.

5.3.4. تأثير مقاومة التربة على القص (ϕ'):

بينت الدراسة بأن الهبوطات الأعظمية فوق النفق تتناقص كلما زادت زاوية الاحتكاك. حيث أن زيادة ϕ' أدت إلى تناقص الهبوطات الأعظمية تناقصاً طفيفاً أما عرض حوض الهبوط فتغيره طفيف، وذلك من أجل نفس قيمة معامل التقلص كما يبين الشكل (39.4).



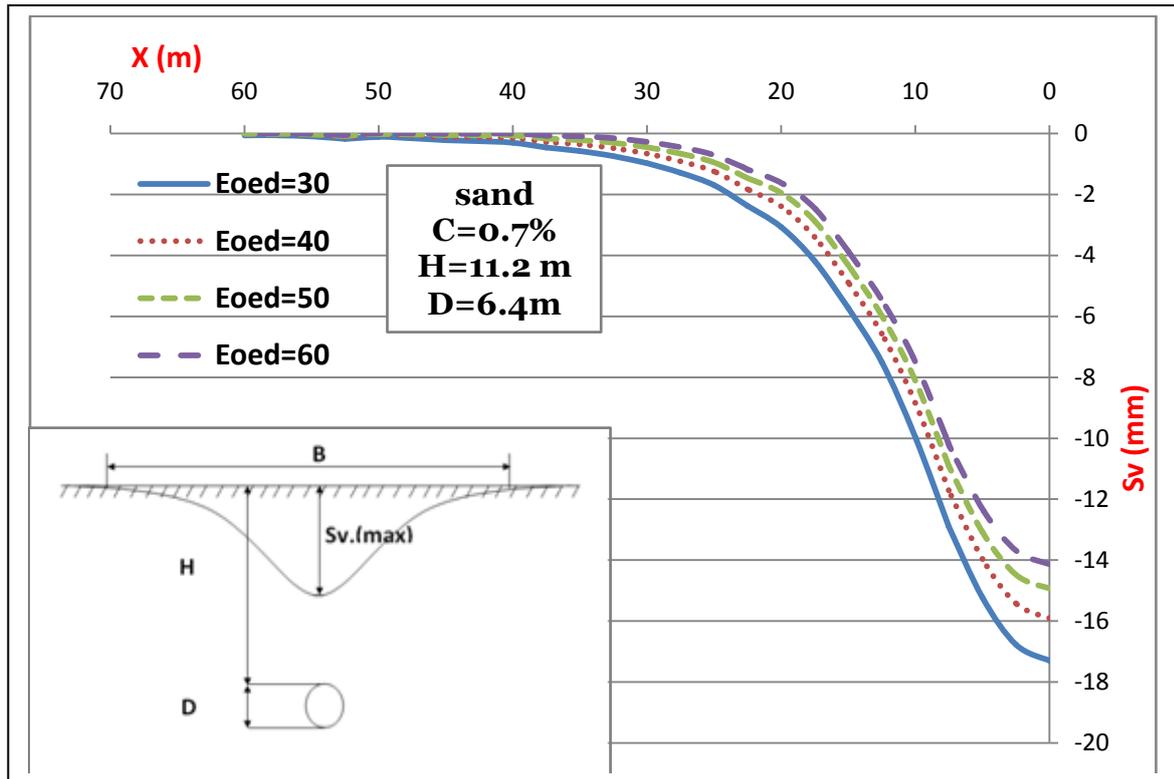
الشكل (39.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير معامل الاحتكاك للرمال المتوسط الارتصاص.

6.3.4. تأثير صلابة التربة (E_{oed}):

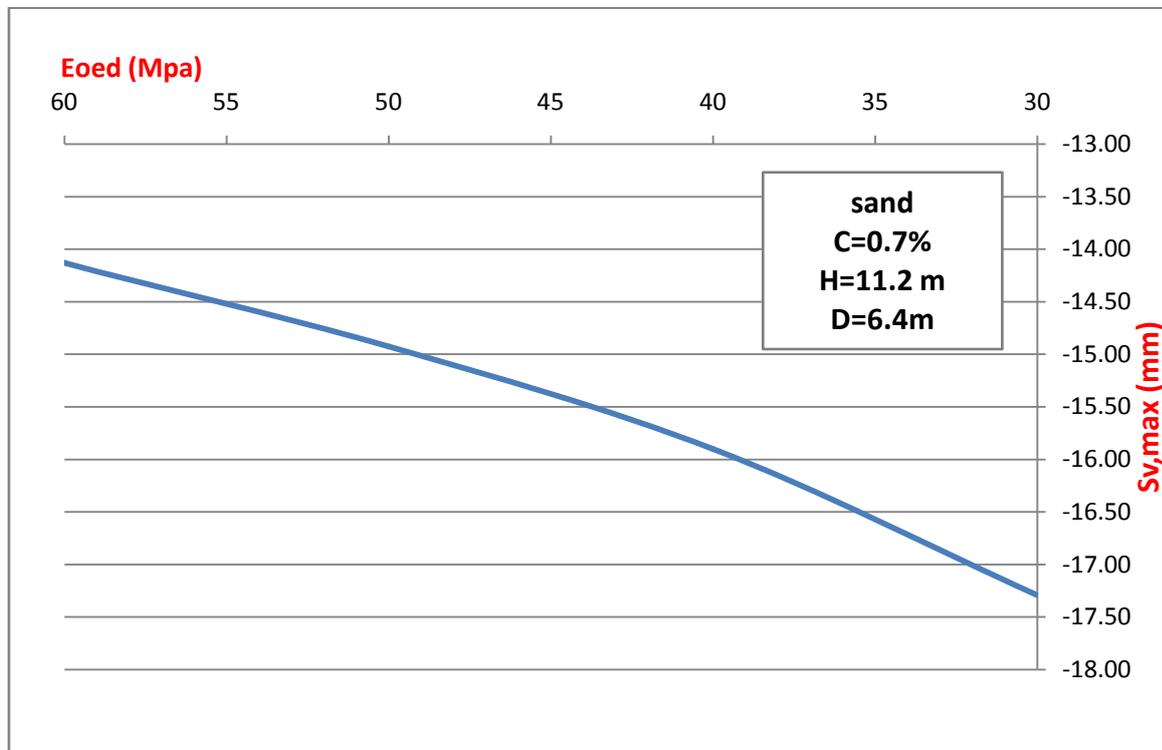
أدت زيادة E_{oed} للرمال إلى النتائج الموضحة في الجدول (12.4) حيث تظهر النتائج تناقص حجم حوض الهبوط الشكل (40.4)، و إلى تناقص الهبوط و تناقص عرض حوض الهبوط بشكل خطي كما يظهر الشكلان (41.4) و (42.4).

جدول (12.4): تغيير الهبوط الأعظمي و عرض الحوض مع تغيير معامل المرونة الأدمتري للرمال.

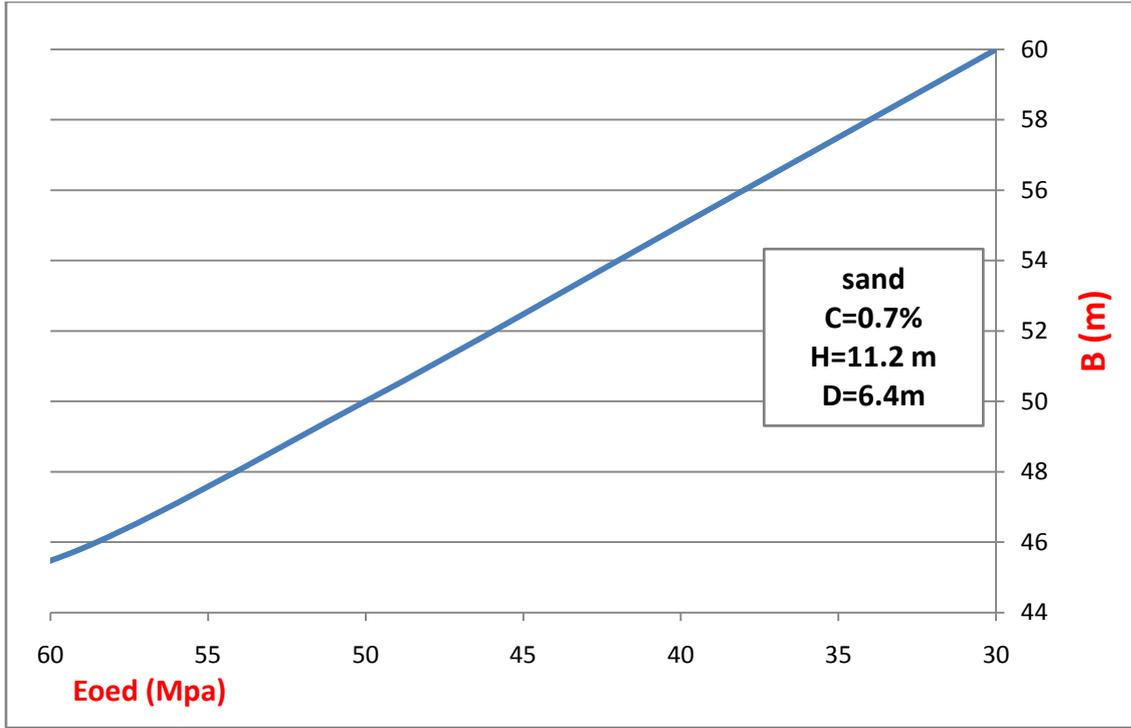
الرمال المتوسط الارتصاص Medium Sand		معامل المرونة الأدمتري E_{oed} Mpa
عرض حوض الهبوط B (m)	الهبوط الأعظمي $S_{v,max}$ (mm)	
65.00	-25.82	30
55.17	-24.08	40
50.32	-22.83	50
50.32	-21.75	60



الشكل(40.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير صلابة الرمل.



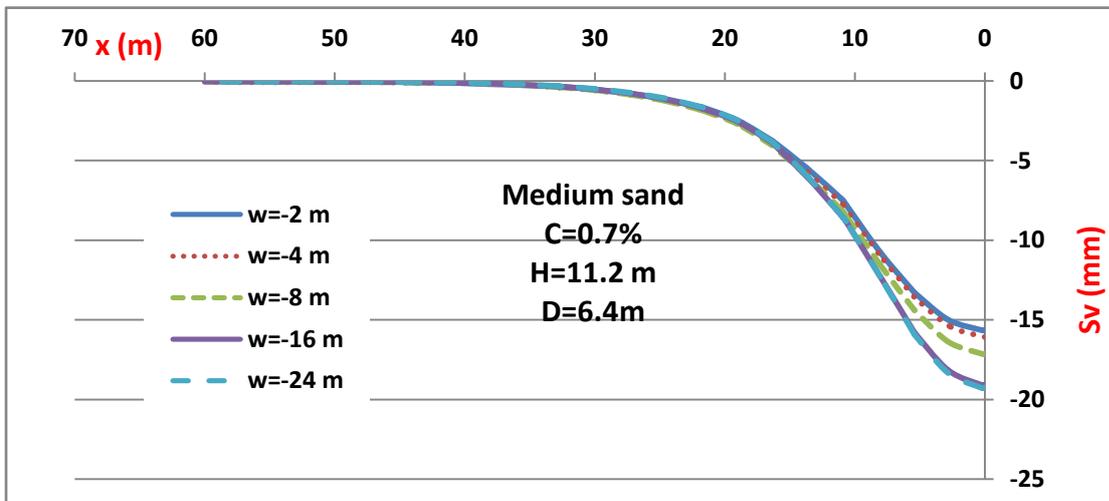
الشكل(41.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير صلابة الرمل.



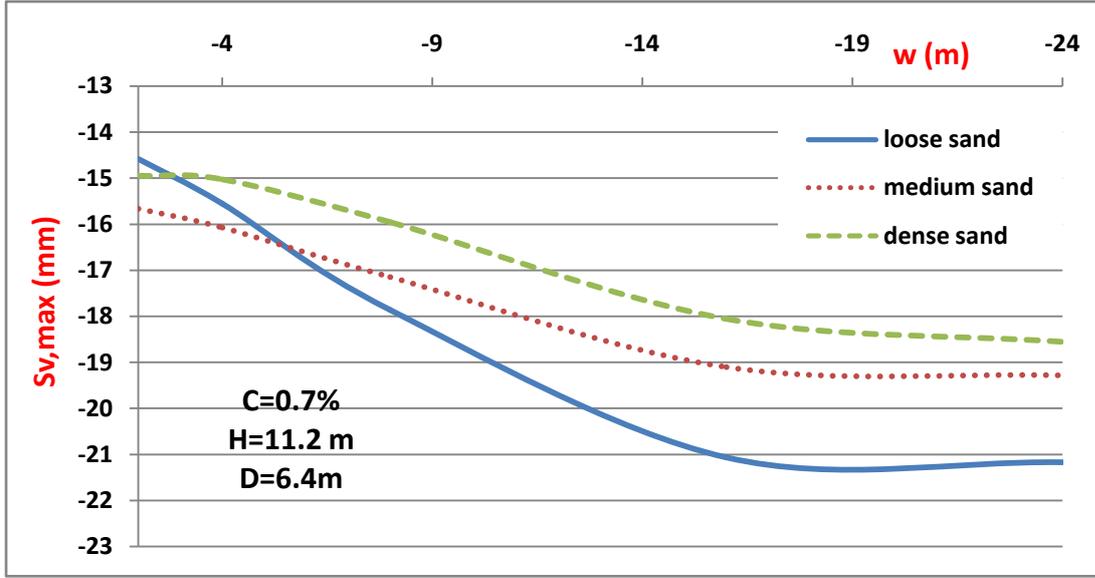
الشكل(42.4): تغيير عرض الحوض مع تغيير صلابة الرمل.

7.3.4. تأثير منسوب المياه الجوفية:

بينت الدراسة أنه مع تناقص منسوب المياه الجوفية يزداد الهبوط الأعظمي لحالات الغضار حتى عمق $(w=-16 \text{ m})$ من منسوب سطح الأرض حيث تصبح التغيرات طفيفة وذلك نتيجة ازدياد الاجهادات الفعالة مع تناقص منسوب المياه الجوفية، و يظهر الشكل (43.4) تزاوي حجم حوض الهبوط مع انخفاض منسوب المياه الجوفية للرمل المتوسط الارتصاص، كما يبين الشكل (44.4) بتأيد الهبوط الأعظمي لحالات الرمل مع انخفاض منسوب المياه الجوفية.



الشكل(43.4): تغيير شكل و أبعاد حوض الهبوط مع تغيير منسوب المياه الجوفية للرمل المتوسط الارتصاص



الشكل (44.4): تغيير قيم الهبوط الأعظمي مع تغيير منسوب المياه الجوفية لحالات الرمل.

4.4. تحليل حساسية قيم الهبوط الأعظمي و عرض الحوض لتغيير أهم البارامترات:

يظهر الجدول (13.4) تغييرات قيم الهبوط الأعظمي و عرض حوض الهبوط لحالات الرمل و الغضار مع زيادة بنسبة 25% لأهم البارامترات المؤثرة.

جدول (13.4): تحليل حساسية قيم الهبوط الأعظمي و عرض حوض الهبوط لحالات الغضار و الرمل لتغيير أهم البارامترات.

sand			clay		
B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة (C%) 25%	B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة (C%) 25%
زيادة 6.6%	زيادة 24%	Loose sand	زيادة 13%	زيادة 33%	Soft clay
زيادة 7.2%	زيادة 23%	Medium sand	زيادة 6.6%	زيادة 25%	Medium clay
زيادة 7.5%	زيادة 20.5%	Dense sand	زيادة 7.2%	زيادة 24%	Stiff clay
B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة (H/D) بتناقص (D) 25%	B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة (H/D) بتناقص (D) 25%
تناقص 6.8%	تناقص 25.5%	Loose sand	تناقص 16.65%	تناقص 24.4%	Soft clay
تناقص 19.8%	تناقص 26.3%	Medium sand	تناقص 20%	تناقص 26.2%	Medium clay
تناقص 20%	تناقص 26.9%	Dense sand	تناقص 20%	تناقص 26.3%	Stiff clay
B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة K_0 25%	B(m)	$S_{v,max}$ (mm)	زيادة K_0 25%
----	تناقص 12.56%	Loose sand	----	----	Soft clay
----	تناقص 12.05%	Medium sand	تناقص 12%	تناقص 20.5%	Medium clay
----	تناقص 12.83%	Dense sand	تناقص 5%	تناقص 16.3%	Stiff clay

الفصل الخامس

الاستنتاجات و التوصيات

Conclusions and Recommendations

5. الاستنتاجات و التوصيات (Conclusions and Recommendations)

1.5. الاستنتاجات حول نتائج الدراسة العددية بطريقة FEM:

تم من خلال نتائج الدراسة العددية ودراسة المتغيرات التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات يمكن تلخيصها بما يلي:

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. بينما تعطي طريقة (Limanov) النظرية قيمة أعلى للهبوط الأعظمي مقارنةً بالقياسات الحقلية.

2. أظهرت الدراسة البارامترية تأثيراً كبيراً لمعامل النقلص (C%)، الذي يمثل فاقد التربة الناتج عن عمليات التنفيذ و عن التشوهات في الدرع و في القشرة، على قيم الهبوط و عرض الحوض لأنواع الترب المختلفة، حيث يزداد الهبوط بشكل خطي مع تزايد معامل النقلص، و ذلك من أجل التربة الغضارية على اختلاف قوامها و للترب الرملية على اختلاف درجة ترابصها. و بالتالي فإن معامل النقلص هو أحد أهم العوامل المؤثرة على الهبوط و يجب اختياره بعناية بسبب حساسية النتائج الكبيرة لتغيراته. و لقد أظهرت النتائج أن الهبوط الأعظمي فوق النفق يزداد خطياً مع زيادة C% سواءً للتربة الغضارية أو للترب الرملية، و كذلك عرض حوض الهبوط و يكون عرض حوض الهبوط للغضار الطري أكبر من الغضار المتوسط و العالي الصلابة. و بالنسبة للرمل يتناقص الهبوط و عرض الحوض مع تزايد درجة الترابص، و الهبوط للرمل أكبر منه للغضار بالمقابل عرض الحوض للرمل أصغر منه للغضار، حيث أنه بزيادة (C%) بنسبة 25% يزداد الهبوط الأعظمي للغضار المتوسط الصلابة 25% و عرض الحوض 6.6% أما بالنسبة للرمل المتوسط الارتصاص فيزداد الهبوط الأعظمي بنسبة 23% و عرض الحوض يزداد بنفس النسبة 7.2%.

3. توضح الدراسة أن قطر النفق له تأثير كبير نسبياً على الهبوط و على شكل و أبعاد حوض الهبوط، حيث أنه مع تناقص قطر النفق يتناقص ال هبوط و عرض الحوض لأنواع الترب المختلفة. بالنسبة للغضار يتناقص الهبوط و عرض الحوض مع تناقص القطر و مع تزايد دليل

- القوام أما الرمل فيتناقص الهبوط و عرض الحوض مع تزايد درجة التراص. و بالمقارنة بين الرمل و الغضار فإن الهبوط للغضار أقل مقابل عرض حوض أكبر، فمع تزايد (H/D) بنسبة 25% بثبات السماكة و تناقص القطر ينتج تناقص الهبوط الأعظمي بنسبة 26.2% و تناقص عرض الحوض 20% و ذلك للغضار المتوسط الصلابة و الرمل المتوسط الارتصاص.
4. بينت نتائج الدراسة أن تزايد سماكة التربة أعلى النفق مع ثبات القطر تؤدي إلى تناقص في قيم الهبوط و تزايد لعرض حوض الهبوط بشكل خطي و ذلك للترب الغضارية و الرملية بمختلف حالاتها. بالنسبة للتربة الغضارية تم ملاحظة استقرار قيم الهبوط عند نسب $(H/D \geq 2.25)$ لكل حالات الغضار المختلفة القوام الأمر الذي يمكن تعليقه بلق زيادة سماكة التربة أعلى النفق يقلل من نسبة تشوهات التربة التي تصل إلى السطح بسبب التأثير القوسي (Arch Effect). في حين أنه بالنسبة للترب الرملية تصل هذه النسبة إلى $(H/D \geq 3)$.
5. أظهرت الدراسة أن تزايد معامل ضغط التربة الجانبي يؤدي إلى تناقص الهبوط لأنواع الترب المختلفة في حين أن تأثيره على عرض حوض الهبوط يكون طفيف . كما تؤدي زيادة K_0 لتناقص الهبوط و يكون هذا التناقص أكبر كلما ازداد دليل القوام بالنسبة للترب الغضارية و كلما ازدادت درجة التراص بالنسبة للرمل ، ففي حالة الغضار المتوسط الصلابة فزيادة المعامل بنسبة 25% تؤدي إلى تناقص الهبوط 20.5% و عرض الحوض 12% أما الرمل المتوسط الارتصاص فزيادة بنفس النسبة تؤدي إلى تناقص الهبوط 12% و تحدث الزيادة تأثير طفيف على عرض الحوض.
6. توضح الدراسة أنه مع تزايد صلابة التربة من خلال معامل المرونة الأدمتري يتناقص الهبوط الأعظمي و يتناقص عرض الحوض للغضار و الرمل.
7. أظهرت الدراسة أن لمقاومة التربة على القص تأثيراً طفيفاً على قيم الهبوط الأعظمي حيث يتناقص الهبوط مع تزايد المقاومة على القص بينما تغيرات عرض حوض الهبوط تكون طفيفة.
8. بينت الدراسة تزايد الهبوط مع انخفاض منسوب المياه الجوفية لحالات الرمل و الغضار حتى منسوب (-16 m) اعتباراً من سطح الأرض عندها تتوقف التغييرات.

2.5 التوصيات :

- 1 يوصى بالاهتمام بالتنبؤ بهبوطات سطح الأرض فوق الأنفاق أثناء مرحلة التصميم و خصوصاً عند وجود المنشآت على سطح الأرض
- 2 يوصى بإجراء المزيد من الأبحاث مستقبلاً تأخذ بعين الاعتبار توسيع موضوع البحث في الاتجاهات التالية:
 - دراسة حوض الهبوط من خلال نماذج ثلاثية الأبعاد .
 - دراسة الهبوط في الاتجاه الطولاني مع أخذ تأثير تقنيات التنفيذ و خصوصاً تدعيم جبهة الحفر الأمامية.
 - دراسة تأثير هبوط سطح الأرض الموافق لتنفيذ النفق على الأبنية و المنشآت المتواجدة على السطح.

المراجع

1. Addenbrooke, T., Potts, D., and Puzrin, A.. “The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction”., *Géotechnique*, 1997,47(3), 693–712
2. Atkinson,J.H., and Potts, D.M., “Subsidence above shallow tunnels in soft ground”,*Jnl. Geotech. Eng. Div., ASCE, GT4*, 1977 , PP. 307-325.
3. Attewell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R., “Soil Movmentes induced by tunneling and their Effects on Pipelines and Structures”,Blackie, Glasgow, 1986.
4. ERIC L. ; BARRY N." Settlements induced by tunneling in Soft Ground", *Tunneling and Underground Space Technology* 22, 2007, 119–149.
5. FATTAH,Y,M, et al. "*Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground*". *Acta Geotechnical an international journal for geo engineering*, 2012,15.
6. FRANZIUS,N,J. "*Behavior of buildings due to tunnel induced settlement*".1PhD Dissertation,2 College of Science, Technology and Medicine, 2003,360.
7. FARREL,R. "*the response of surface structures to tunneling-induced ground movments*". Geotechnical research group, department of engineering, university of Cambridge, 2007,20.
8. 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.
9. Grammatikopoulou, A., John, H. D., St, Potts, D. M.. “Non-linear and linear models in design of retaining walls”. *Geotechnical Engineering* 161(GE6) ,2008, 311–323.

10. 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.
11. Lee, K. M., & Rowe, R. K.. Deformations caused by surface loading and tunnelling:the role of elastic anisotropy.*Geotechnique*,39(1), 1989,125-140.
12. Limanov, J.A., "InfolgeTunnelbau in kambrischen Tonen Leningrad",Inst. Inzh.Zhelezu, Transport, 1957.
13. 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, 1983,PP. 323-328,.
14. Meissner, H., "TunnelbauunterTage-Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 Numerik in der Geotechnik". *Geotechnik*, 19 (2):1996 ,PP. 99-108, .
15. 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.
16. Noppadol, P, et al. "Evaluation ofGround Movementsin EPB-Shield Tunnelling forBangkok MRTby 3D-NumericalAnalysis", School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand,6.
17. O'Reilly, M.P., New, B.M. "Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. In: *Tunnelling*",London. IMM, pp,1982,173–181.
18. PLAXIS. "*Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses-User's Manual*", Version 8.2,Delft, The Netherlands, 2005,421.

19. 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, 1969, PP 225-290.
20. PICKHAVER, J. "*Numerical modeling of building response to tunneling*". Department of engineering science, university of oxford, 63.
21. Rankin, W. J.. "Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects". The Geological Society, London, 1988, 79-92.
22. Sagaseta, C., "Analysis of underground soil deformation due to the ground loss", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 3, 1987, PP, 301-330.
23. Suwansawat, S. "Superposition Technique for Mapping Surface Settlements over Twin Tunnels. International Symposium on Underground Excavation and Tunneling. 16 Troughs over Twin Tunnels. 17 Tunnelling. 18 m on Underground Excavation and Tunneling". 2006
24. Wongsaroj, J. "Three-dimensional finite element analysis of short and long-term ground response to open-face tunnelling in stiff clay". Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 2005
25. NESRINE, E, et al. Department of Civil Engineering. University of Tlemcen, Algeria, 2009, 10.
26. HAJIHASSANI, M, et al. "Effects of Geotechnical Conditions on Surface Settlement Induced by Tunneling in Soft Grounds". Researcher, Universiti Teknologi Malaysia, Department of Geotechnics and Transportation, Faculty of Civil Engineering, 2013, 8.

**Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education
Tishreen University
Faculty of Civil Engineering
Department of Geotechnical
Engineering**



Predication of Ground Settlements induced by shallow bored Tunnels

**A Thesis submitted in partial fulfillment of requirements of the
degree of Master of Civil Engineering**

**By
Ashraf Haidar Sheble**

supervision of

**Dr. Wael Harfoush
Professor at Geotechnical
Engineering Department**

**Dr. Malek Hasan
Assistant Professor at
Geotechnical Engineering
Department**

2015-2014

